



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

SHAPE-CHANGING FIBRE-REINFORCED COMPOSITES

ALAKVÁLTÓ SZÁLERŐSÍTÉSŰ KOMPOZITOK

PHD ÉRTEKEZÉS TÉZISFÜZETE

SZERZŐ:

VERMES BRÚNÓ GYÖRGY

MSC KOMPOZITMÉRNÖK

TÉMAVEZETŐ:

DR. CZIGÁNY TIBOR

EGYETEMI TANÁR

- 2021 -

1. Bevezetés

A kiváló fajlagos tulajdonságaiknak és a bennük rejlő még kiaknázatlan lehetőségeknek köszönhetően a szálerősítésű kompozitok kutatása és ipari alkalmazása várhatóan a jövőben is növekvő tendenciát fog követni. Míg a szálerősítésnek köszönhetően az elsődleges terhelési irányokban kitűnő mechanikai tulajdonságok érhetők el, a másodlagos, nem kritikus irányokban az erősítőanyag mennyiségének korlátozásával csökkenthető a kompozit alkatrészek tömege. A nagy mechanikai teljesítmény és kis tömeg kombinációja számos iparágban kiemelkedő fontosságú (pl. repülőgép-, autó-, szélenergia-, motorsport- és sportszeripar). A kompozitok jelentőségének növekedését jól példázza a repülőgépekben való felhasználásuk alakulása. Húsz évvel ezelőtt a kereskedelmi repülőgépek szerkezeti tömegének kevesebb, mint 20%-a származott kompozitokból, napjainkra azonban mintegy 50%-ra növekedett ez a részesedés. Még ha a részarány növekedésének üteme lassul is, a modern repülőgépek számának növekedése miatt egyre több kompozitra lesz szükség az iparban.

Bár a kompozitok széleskörű alkalmazásának elsődleges oka a fajlagos mechanikai tulajdonságaikban keresendő, értékük tovább növelhető azzal, ha többletfunkcióval ruházzuk fel őket. Ez a többletfunkció lehet például öngyógyítás, vagy beépített állapotjelzés, azonban létezik egy még inkább alapvető képesség, amelyet a rétegrend hangolásával lehet elérni: az alakváltó viselkedés. Terhelés hatására az anyagok általában a terheléssel megegyező módon deformálódnak (pl. megnyúlás húzó terhelés hatására vagy lehajlás hajlító terhelés hatására). Azonban bizonyos esetekben előnyösebb lehet egy hagyományostól eltérő deformációs válasz. Egy hajlításra csavarodó repülőgépszárny vagy egy húzásra csavarodó turbinalapát tervezett mértékű csavarodása anélkül növelheti az alkatrészek aerodinamikai hatékonyságát, hogy bármilyen további alkatrészt, vagy mozgó motorra lenne szükség. Az alakváltó koncepció lényege annak a nem hagyományos deformációs válasznak a kihasználása, amelyet a működési körülmények váltanak ki. A kiváltó tényezők az anyag vagy szerkezet jellemzőitől függően sokfélék lehetnek (pl. elektromosság, hő-, vagy mechanikai terhelés), azonban mindegyik megközelítésben közös, hogy a cél a nem-konvencionális deformáció elérése. Az alakváltó anyagok témájában megjelenő tudományos cikkek évről évre növekvő száma jól mutatja a téma aktualitását és jelentőségét.

Értekezésem célja az előzőekben bemutatott két tématerület (kompozitok és alakváltó anyagok) metszetében található alakváltó szálerősítésű kompozitok fejlesztése és vizsgálata.

2. Az irodalom kritikai elemzése és az értekezés célkitűzései

Az irodalomban számos megközelítés található különböző anyagok és szerkezetek alakváltó viselkedésének elérésére és kihasználására. A kívánt deformációt kiválthatja elektromos áram, hőterhelés, mechanikai terhelés, de akár fény, különböző vegyületek, illetve nyomás is. Az alakváltó szálerősítésű kompozitok azonban két fontos szempontból is kitűnnek a többi irodalmi megközelítés közül. Egyrészt az ortotrop rétegekből felépülő rétegrendjük nagyfokú alakíthatóságának köszönhetően számos kapcsolt viselkedési formával rendelkezhetnek különböző módú terhelések és deformációk között (pl. húzásra csavarodás vagy hajlításra csavarodás). Másrészt a kompozitok kiváló fajlagos mechanikai tulajdonságai lehetővé teszik, hogy ezeket az anyagokat elsődleges, teherviselő szerkezetekben is alkalmazzuk. Az alakváltó kompozitok irodalma kiterjedt, sőt, ipari alkalmazási példákkal is lehet találkozni (pl. húzásra, illetve hajlításra csavarodó turbinalapátok). Irodalmi áttekintésem során azonban azonosítottam néhány megoldásra váró fontos kihívást az alakváltó kompozitok tervezésével és gyárthatóságával kapcsolatban.

A kompozitok alakváltásának és vetemedésének belső szerkezeti oka a rétegrendjükben keresendő, így ezen viselkedések optimalizálásához a rétegrend optimalizálására van szükség. A klasszikus lemezelmélet (CLT) hatékony számítási megoldást kínál a kompozit laminátumok rugalmas viselkedésének leírására, miközben kapcsoló paraméterek segítségével jellemzi az egyes alakváltó viselkedési formákat. A rendelkezésre álló CLT alapú kalkulátorok azonban nem alkalmasak a rétegrend teljes-mezős optimalizálására, így szükség van egy teljesebb CLT alapú algoritmus kifejlesztésére.

A legtöbb alakváltó kompozit aszimmetrikus rétegrenddel rendelkezik, az aszimmetrikus rétegrendek pedig az esetek túlnyomó többségében vetemednek. A vetemedés általában nem kívánt folyamat, azonban ki is lehet használni. A hőaktuált síkból kilépő deformációkat például terhek mozgatása révén ki lehet használni mechanikai munkavégzésre. A hőaktuált munkavégző képesség leírása önmagában is kihívás, azonban az aszimmetrikus laminátumok monostabil-bistabil átmenete tovább bonyolítja a feladatot a laminátum alakjának megváltozása miatt. A stabilitási átmenet hőaktuált munkavégző képességre gyakorolt hatását eddig még nem vizsgálták az irodalomban. A témához kapcsolódó új eredmények akár a hővetemedés jobb kihasználhatóságához is vezethetnek.

A kompozitipar egyik legnagyobb kihívása az aszimmetrikus rétegrendű laminátumok vetemedésének csökkentése, illetve kiküszöbölése. Ennek a megoldása kulcsfontosságú ahhoz, hogy egyáltalán szóba jöhessen aszimmetrikus rétegrendű alakváltó kompozitok ipari alkalmazása. Az irodalomban fellelhető három olyan vetemedéscsökkentő módszer, amely a megoldás részét képezheti, azonban mindegyik további vizsgálatokat igényel.

Szerszámkompenzációs módszereket elterjedten használ a kompozitipar, de elsősorban szimmetrikus rétegrendű laminátumok vetemedése esetén, ahol a vetemedés a termék komplex geometriájából származik. Ezzel szemben az

aszimmetrikus rétegrendek belső szerkezetükből fakadóan, a geometriától függetlenül vetemednek. Ráadásul, mivel az aszimmetrikus laminátumok monostabilak és bistabilak is lehetnek, a szerszámkompenzációs módszer hatékonyságát mindkét stabilitási tartományban szükséges vizsgálni.

Hibrid rétegrendekkel javítani lehet a laminátumok bizonyos tulajdonságait (köztük bizonyos alakváltó tulajdonságokat is), azonban közvetlenül a vetemedéscsökkentő hatásukat még nem vizsgálták. A legfőbb kérdés, hogy a rétegrend hibridizálása képes-e egyszerre csökkenteni a nem kívánt vetemedés mértékét és növelni a kívánt alakváltó viselkedés mértékét.

A harmadik vetemedéscsökkentő módszer a rétegrend homogenizálásán alapszik, amely azonos felépítésű al-laminátumok egymáson való ismétlését jelenti. Ebben az esetben a fő kihívás az alakváltó viselkedésre gyakorolt hatás vizsgálata. Minél inkább homogenizált a rétegrend, a kompozit annál szimmetrikusabban viselkedik. Emiatt homogenizálással várhatóan különböző mértékben változik a különböző alakváltó viselkedési formák mértéke is, az aszimmetriától való függésük függvényében.

Végezetül pedig szilárdsági szempontból, komplex terhelések esetére össze kell hasonlítani az újszerű double-double rétegrend tervezési módszert – amely $[\pm\varphi/\pm\psi]$ al-laminátumok homogenizálására épül – a jelenlegi ipari sztenderd quad rétegrend tervezési módszerrel.

A következő hat pontban röviden összefoglalom az értekezésem fő céljait.

1. Egy olyan CLT alapú analitikus algoritmus kifejlesztése és validálása, amely képes alakváltó és double-double kompozitok rétegrendjének teljes-mezős optimalizálására merevségi, illetve szilárdsági szempontokból.
2. Az aszimmetrikus rétegrendű kompozitok hőaktuált munkavégző képességének vizsgálata, különös tekintettel a monostabil-bistabil átmenetre.
3. A szerszámkompenzációs vetemedéscsökkentő módszer hatékonyságának elemzése monostabil és bistabil aszimmetrikus laminátumok esetében.
4. Annak vizsgálata, hogy a rétegrend hibridizációja képes-e egyszerre csökkenteni a nem kívánt vetemedés mértékét és növelni a kívánt alakváltó viselkedés (pl. húzásra csavarodás) mértékét a mono rétegrendekhez képest.
5. A rétegrend homogenizálásának alakváltó viselkedési formákra gyakorolt hatásának vizsgálata.
6. Annak vizsgálata, hogy a double-double rétegrendek nagyobb szilárdsághoz vezethetnek-e, mint a hagyományosan alkalmazott quad rétegrendek.

3. Anyagok, módszerek, berendezések

A kompozit termékek mechanikai viselkedését jelentősen befolyásolja a mátrix és az erősítőanyag minősége, aránya valamint adhéziós kapcsolata. A prepreg előgyártmányok (amelyek gyantával előimpregnált erősítőanyagok) biztosítják a megfelelő szál-mátrix arányt, amely elengedhetetlen a lehető legjobb minőségű termékek gyártásához. A minőség és reprodukálhatóság biztosítása érdekében munkám során kizárólag prepreg alapanyagokat használtam.

Az alakváltó kompozitok legvalószínűbb alkalmazási területein (pl. a repülőgépiparban) általában a lehető legnagyobb teljesítményű anyagokkal dolgoznak, amely kompozitok esetében leggyakrabban térhálós epoxi mátrixot és szénszál erősítőanyagot jelent. Ennek megfelelően kutatásom során túlnyomórészt szén-epoxi kompozitokat vizsgáltam. Emellett mindegyik felhasznált prepreg egyirányú (UD) erősítést tartalmazott, ugyanis ez teszi lehetővé a rétegrend legjobb finomhangolhatóságát. Munkám során javarészt Hexcel IM7/913 szén-epoxi prepreggel dolgoztam (Hexcel Corporation, Stamford, USA). A hibrid kompozitokkal foglalkozó fejezetben emellett Hexcel S-Glass/913 üveg-epoxi prepreget használtam (Hexcel Corporation, Stamford, USA). Az értekezés 4.5. fejezetében egy nemzetközi kutatási projekthez kapcsolódó eredményeimet tárgyalom, ahol számításaimhoz a Toray T300/F934 szén-epoxi alapanyag paramétereit használtam fel (Toray Industries, Tokyo, Japán). Az alapanyagok releváns tulajdonságait az értekezés 3.1. fejezete tartalmazza.

A kompozitok tervezési és optimalizálási folyamatait programozási és végelesemes szimulációs szoftverek segítették. Az analitikus rétegrend optimalizáláshoz és a 3D szkennelés során kapott adathalmaz kiértékeléséhez a MATLAB 2017b verzióját használtam (MathWorks, Natick, USA). A MATLAB szoftver kiválóan képes kezelni a mátrixműveleteket, amely fontos szempont volt a klasszikus lemezelmélet alapú optimalizáló algoritmus környezetének kiválasztásakor. A végelesemes modellek felépítésére és a szimulációk futtatására az Ansys Workbench 2019 R3 verzióját, illetve annak Composite PrepPost kiegészítőjét használtam (Ansys, Canonsburg, USA).

Az ívelt alumínium szerszámokat egy MDX-540 négytengelyes marógép segítségével gyártottam, 0.1 mm-es pontosság mellett (Roland DG Corporation, Hamamatsu, Japán). Az összeállított és alumínium szerszámon vákuumzsákba csomagolt laminátumokat autoklávban térhálósítottam. Az alkalmazott ATC 1100/2000 autokláv (Olmars, Gijón, Spanyolország) két vákuumkörrel és négy termoelemmel rendelkezik, így egyszerre több laminátum gyártására is képes. A térhálósítási ciklus két legfontosabb paramétere a 60 perces 140 °C-on tartás, illetve a 7 bar túlnyomás volt (a részletes térhálósítási ciklus az értekezés 3.3. fejezetében található). A gyártást követő kísérleteket szobahőmérsékleten végeztem (25 °C), vagyis a térháló kialakulásakor mért hőmérséklet és a kísérleti hőmérséklet között $\Delta T=115$ °C különbség volt. A kitérhálósodott laminátumokat egy gyémántfejes vágókoronggal ellátott Diadisc 4200 precíziós vágóberendezéssel alakítottam a

próbatetek pontos méretére (Mutronic Präzisionsgerätebau GmbH & Co. KG, Rieden, Németország).

A mechanikai vizsgálatok többségét Zwick Z005, Z050 és Z250 univerzális szakítógépekkel végeztem (Zwick Roell Group, Ulm, Németország). Ez alól kivételt jelentett a húzásra csavarodó próbatetek vizsgálata, amelyhez szabadon elforgó befogókkal rendelkező, hidraulikus Instron 8872 univerzális szakítógépet használtam (Instron Corporation, Norwood, USA). A megnyúlások pontos méréséhez digitális képkorrelációra (DIC) képes Mercury Monet videókamerás berendezést használtam (Sobriety s.r.o., Kuřim, Csehország). A hőtágulási együtthatók kimérését KMT-LIAS-06-1,5-350-5E nyúlásmérő bélyegek (Kaliber Műszer- és Méréstechnika Kft., Budapest, Magyarország) és egy Spider8 általános adatrögzítő berendezés segítségével végeztem (HBM, Darmstadt, Németország). A laminátumok vetemedett alakjának elemzéséhez egy ATOS 5M 3D szkennert használtam a saját ATOS Professional 2018 szoftverével (GOM GmbH, Braunschweig, Németország), az adathalmazt pedig MATLAB segítségével értékeltem ki.

4. Összefoglalás

Egyes anyagok és szerkezetek képesek a megszokottól eltérő deformációval reagálni különböző hatásokra. Értekezésemben nem-konvencionális deformáció vagy alakváltás alatt értek minden olyan geometriai változást, amely nem következik egyértelműen az aktuáció jellegéből (például csavarodó deformáció hajlító terhelés hatására). Az alakváltó anyagok előnyei rendkívül széleskörűek lehetnek (például turbina lapátok, vagy repülőgép szárnyak hatékonyságának növelése), és az ipari jelentőségüknek köszönhetően a fejlesztésükre irányuló kutatások száma évről évre növekvő tendenciát mutat. Munkámat a főbb alakváltó koncepciók irodalmának áttekintésével kezdtem, azokat aktuációjuk szerint csoportosítva. Megállapítottam, hogy a szálerősítésű kompozit laminátumok – elsősorban a kiváló fajlagos mechanikai tulajdonságaiknak köszönhetően – kiemelkednek a többi megközelítés közül. Az irodalmi áttekintés második felében bemutattam a kompozitok rugalmas viselkedésének modellezési lehetőségeit, majd összefoglaltam, hogy milyen eredményeket értek el eddig az alakváltó kompozitok témakörében, miközben azonosítottam néhány fontos, megoldásra váró kihívást. Kutatómunkám céljait ezeknek a kihívásoknak megfelelően jelöltem ki [6].

A szálerősítésű kompozitok kapcsolt viselkedésének oka (például húzó-hajlító kapcsolat) a rétegrendjük felépítésében keresendő. Ahhoz tehát, hogy az alakváltó viselkedést optimalizálni lehessen, a rétegrend optimalizálására van szükség. Egy teljes-mezős vizsgálat esetén a lehetséges rétegrend-permutációk nagy száma miatt általában csak az analitikus modellek jöhetnek szóba. A klasszikus lemezelmélet kiválóan alkalmas a laminátumok különböző kapcsoló paramétereinek elemzésére. Munkám alapjaként kifejlesztettem és validáltam egy MATLAB környezetű, klasszikus lemezelmélet alapú rétegrend optimalizáló algoritmust, amelynek segítségével automatikusan tudtam elemezni több százezer különböző rétegrend alakváltó viselkedését. Az algoritmus alakváltásra és szilárdságra vonatkozó eredményeit több fejezetben is felhasználtam [8, 9, 11].

Az irodalmi áttekintés alapján a kutatási terület egyik legnagyobb kihívása a kompozit lemezek hővetemedésének megoldása, ugyanis a legtöbb alakváltó kompozit aszimmetrikus rétegrendű, az aszimmetrikus laminátumok pedig az esetek túlnyomó többségében vetemednek. Sőt, a vetemedett kompozit a rétegrendtől és az oldalhossz/vastagság aránytól függően nem csak monostabil, hanem bistabil is lehet, amely további kihívásokat jelent.

A hővetemedés csökkentése előtt azonban annak egy hasznosítási lehetőségét vizsgáltam. A hőaktuált síkból kilépő deformációkat ki lehet használni mechanikai munkavégzésre, azonban az irodalomban nem találtam információt arra vonatkozóan, hogy azt miként befolyásolja a laminátum bistabil-monostabil átmenete. Emiatt ezt végelelemes módszerrel és kísérletileg is vizsgáltam. Kimutattam, hogy a laminátum oldalhossz/vastagság arányának csökkentésével a munkavégző képesség egy lokális maximumon majd egy lokális minimumon megy keresztül. A bistabil tartományban a munkavégző képesség csökkenése a laminátum második főgörbületének megjelenésével és növekedésével van

összefüggésben, amelynek hatását csak a bifurkációs pont közelében kompenzálja túl a növekvő relatív vastagság hatása [1, 5].

Ezután három különböző megközelítést vizsgáltam az aszimmetrikus rétegrendű laminátumok hővetemedésének csökkentésére: szerszámkompenzáción, hibrid rétegrendeken és a rétegrend homogenizálásán alapuló módszereket. Tanulmányoztam továbbá, hogy a módszerek milyen hatással vannak egyes alakváltó képességek alakulására.

Irodalmi eredmények híján kísérletileg vizsgáltam, hogy ívelt szerszámok segítségével lehetséges-e síkra gyártani monostabil, illetve bistabil aszimmetrikus rétegrendű laminátumokat. A módszer alkalmasnak bizonyult bistabil laminátumok monostabillá alakítására, valamint monostabil laminátumok közel síkra gyártására. A változatlan rétegrendnek köszönhetően a kompozitok alakváltó viselkedése megmarad, amely lehetőséget biztosít a hőaktuált munkavégzés kihasználására is [1].

A hibrid kompozitok különböző anyagú rétegei egyszerre különbözhetnek a merevségi és a termikus tulajdonságaikban (például szénszál/epoxi – üvegszál/epoxi hibrid). Emiatt a rétegrendek egy részében alakulhatnak olyan előnyösen ezek a tulajdonságok, amely egy mono (nem hibrid) rétegrend esetében nem lehetséges. Numerikusan és kísérletileg vizsgáltam, hogy közel vetemedésmentes laminátumok esetében a rétegrend hibridizálásával meghaladható-e a mono rétegrendekkel elérhető mechanikai alakváltó képesség. A húzásra csavarodó alakváltó képességet jelentősen növelte a hibridizálás. Az eredményeket úgy is lehet értelmezni, hogy adott mértékű mechanikai alakváltó képesség hibrid laminátumokkal kisebb hővetemedés mellett érhető el, mint mono laminátumokkal [2].

A rétegrend homogenizálásakor azonos felépítésű, általában aszimmetrikus al-laminátumokat ismétlünk egymáson. Analitikus irodalmi eredmények szerint ezzel csökkenthető a hővetemedés, amelyet numerikusan és kísérletileg is validáltam. Azt viszont még nem vizsgálták, hogy a módszer miként módosítja a mechanikailag aktuált alakváltó képességet. Numerikusan és analitikusan is kimutattam, hogy a húzásra csavarodó képesség a homogenizálással a vetemedéshez hasonlóan gyors ütemben csökken, míg a hajlításra csavarodás lényegesen kisebb mértékben változik. Megmutattam továbbá, hogy a rétegrendtől függően a homogenizálás a $[d]$ mátrix bármely elemét csökkentheti, illetve növelheti is [3].

Végül, egy nemzetközi kutatócsoport munkájához csatlakozva, egy új rétegrend-tervezési módszert vizsgáltam szilárdsági szempontból. Az úgynevezett double-double laminátumok négyrétegű $[\pm\varphi/\pm\psi]$ al-laminátumokból homogenizálás útján felépülő kompozitok. Munkám során analitikus úton bizonyítottam, hogy a double-double laminátumok nagyobb szilárdsággal rendelkezhetnek, és így könnyebb szerkezetekhez vezethetnek, mint az iparban hagyományosan alkalmazott – úgynevezett quad – laminátumok, amelyek csupán 0° , 90° és $\pm 45^\circ$ orientációjú rétegeket tartalmaznak [3, 4].

5. Tézisek

A következőkben röviden, öt tézispontban ismertetem a kutatómunkám főbb eredményeit. Az eredmények megfogalmazását minden esetben egy bevezető leírással kezdem, majd tömören megfogalmazom a tézist. A tézisek alapjául szolgáló vizsgálatok további részletei a disszertáció hivatkozott fejezeteiben találhatóak.

Az aszimmetrikus rétegrendű kompozitok hőmérséklet-változás hatására vetemednek, amely általában egy nem kívánt folyamat. Azonban a síkból kilépő deformációt ki lehet használni terhek mozgására, így a laminátum alkalmassá tehető hőaktuált mechanikai munkavégzésre. Analitikusan optimalizált rétegrendű [45_n/90_n/-75_n/-45_n] Hexcel IM7/913 szénszál-epoxi laminátumok vizsgálata során kimutattam, hogy a hőaktuált mechanikai munkavégző képességet jelentősen befolyásolja a bistabil-monostabil átmenet (4.3. fejezet). A laminátum főgörbületeinek kísérleti mérésével megmutattam, hogy a bifurkációs ponttól a bistabil tartomány felé mozdulva – a laminátum élhossz/vastagság arányának növelésével – a második főgörbület zérushoz tart, így ebben a tartományban nem csak a deformáció mértéke változik, hanem az alak is (4.3.3. fejezet). Végeselemes szimulációkkal és kísérleti úton is kimutattam, hogy a hőaktuált teheremelésből számolt munkavégző képesség a laminátum relatív vastagságának növelésével egy szakaszon csökken (4.3.4. fejezet, szimulációs és mérési elrendezés: 35. ábra). A numerikus és a kísérleti eredmények alapján a hőaktuált munkavégző képesség lokális maximuma a második főgörbület megjelenésével van összefüggésben. Eredményeim alapján azt a következtetést vontam le, hogy az ettől a ponttól csökkenő munkavégző képesség oka a laminátum alakjának változása (növekvő második főgörbület), amelynek hatása túlkompenzálja a relatív vastagság növekedésének hatását. A túlkompenzáció végét a bifurkációs pont közelében a munkavégző képesség lokális minimuma jelzi, ahonnan újra növekedés figyelhető meg.

1. Tézis

Aszimmetrikus rétegrendű szálerősítésű kompozitok vizsgálata során kimutattam, hogy vastagságuk növelésével – miközben bistabil állapotból monostabil állapot felé tartanak – a legnagyobb elérhető hőaktuált mechanikai munkavégző képességük egy lokális maximumon, majd egy lokális minimumon megy keresztül. Ennek magyarázata, hogy a két lokális szélsőérték között a laminátum alakjának megváltozása (a második főgörbület megjelenése és növekedése) túlkompenzálja a növekvő vastagság hatását [1].

Aszimmetrikus kompozit laminátumok esetében megmutattam, hogy ívelt szerszámlapra laminálással, tervezett visszavetemedés útján hővetemedésük kompenzálható (4.4.1. fejezet). A módszer lényege, hogy a termékkel megegyező alakú szerszám helyett módosított alakú szerszámon történik a gyártás. Ezzel megváltozik a kompozit kiindulási alakja és a termék a gyártási hővetemedés során a kívánt alakot közelíti meg, így csökkentve a látszólagos vetemedést. Mivel a rétegtrend nem változik, a termék alakjának hőmérsékletfüggése megmarad, vagyis a gyártást követő további hőközlés vagy hőelvonás hatására a laminátum síkból kilépő deformációval reagál. Ez alapvető fontosságú a hőaktuált munkavégzés kihasználásához. A vetemedés-kompenzációs módszer alkalmazhatóságát kísérletileg vizsgáltam mind monostabil, mind pedig bistabil laminátumok esetében; analitikusan optimalizált rétegtrendű [45_n/90_n/-75_n/-45_n] Hexcel IM7/913 szénszál-epoxi laminátumokon. A laminátumok élhossz/vastagság arányát kísérleti eredményeim alapján úgy választottam meg, hogy a kétféle viselkedési forma határeseteit vizsgálhassam. Így a praktikusság határain belül minél nagyobb második főgörbületű monostabil laminátumokat és minél kisebb második főgörbületű bistabil laminátumokat vizsgáltam. Kísérleteim során a bistabil laminátumokat „bistabil alakú” (zérus második főgörbületű) szerszámra laminálva átlagosan 11.7%-os vetemedéscsökkenést értem el a sík szerszámon való gyártáshoz képest, azonban a főgörbületek megcserélődtek a gyártás során. Ebből azt a következtetést vontam le, hogy a szerszám alakjával a zérus – vagyis az átpattanásig rejtőzködő – főgörbületet is kompenzálni kell. Ezért a bistabil laminátum „monostabil alakú” (összemérhető nagyságú főgörbületekkel rendelkező) szerszámon való gyártását is vizsgáltam. Átlagosan 23.3%-os vetemedéscsökkenést figyeltem meg, azonban a fő eredmény, hogy monostabillá sikerült alakítani a laminátumot. Mivel a szerszámozással átjárás biztosítható a bistabil tartományból a monostabilba, a legfontosabb kérdés az maradt, hogy mennyire hatékony a vetemedés-kompenzációs módszer a monostabil tartományban. Kimutattam, hogy a módszerrel több, mint 90%-kal csökkenthető a monostabil laminátumok vetemedésének mértéke, amellyel már elérhető az ISO 2768 szabvány K kategóriája szerinti síklapúság.

2. Tézis

Kimutattam, hogy ívelt szerszámlapon történő gyártással kompenzálható mind a bistabil, mind pedig a monostabil aszimmetrikus rétegtrendű kompozitok hővetemedése. A módszer továbbá alkalmas bistabil laminátumok monostabillá alakítására is. Mivel a geometria kompenzációjára épülő módszer nem módosítja a laminátum rétegtrendjét, a termék alakjának hőmérsékletfüggése megmarad, ezzel megőrizve a hőaktuált munkavégző képességet [1].

Végeselemes szimulációk és kísérletek segítségével bebizonyítottam, hogy a hibrid rétegrendek előnyt jelenthetnek a mono (nem hibrid) rétegrendekhez képest az alakváltó képességüket tekintve. A bizonyításhoz numerikusan vizsgáltam a hővetemedését és a húzásra csavarodó alakváltó viselkedését Hexcel IM7/913 szénszál-epoxi és Hexcel S-Glass/913 üvegszál-epoxi mono laminátumoknak, illetve azok hibridjeinek. A kétféle anyag számos tulajdonságában különbözik egymástól, amelyek közül ebben az esetben a termikus és a merevségi paraméterek a legfontosabbak. Az elmélet alapja, hogy hibridizálással, vagyis egy laminátumon belül többféle réteg alkalmazásával, olyan módon alakulhatnak a termikus és a merevségi tulajdonságok, amelyek egy mono laminátumon belül nem lehetségesek. Ezek az összetett hatások ahhoz vezethetnek, hogy a nem kívánt hővetemedés csökken, miközben a kívánt alakváltó képesség növekszik. A teljes mezős numerikus vizsgálat célja az volt, hogy megtaláljam mindhárom laminátum-családból (szénszál-epoxi mono, üvegszál-epoxi mono és szénszál-epoxi/üvegszál-epoxi hibrid) azt a legnagyobb alakváltó képességgel rendelkező laminátumot, amely a gyártási folyamat hűtési ciklusa után még közel vetemedésmentes (az ISO 2768 szabvány L osztálya szerint). A támasztott kritériumok és a bemeneti paraméterek alapján (4.4.2. fejezet) a legjobb hibrid rétegrend több, mint 43%-kal teljesítette túl a legjobb mono rétegrendet, vagyis ennyivel nagyobb csavarodó deformációra volt képes azonos mértékű megnyúlásnál. A legjobb teljesítményű hibrid és mono rétegrendek vetemedési és alakváltási teljesítményét kísérletileg is validáltam. Mérésekkel igazoltam mind a síklapúság feltételének teljesülését a gyártást követően, mind pedig a hibrid laminátum előnyét az alakváltó viselkedés tekintetében. Egy hasonló numerikus kísérletsorozat során azt is kimutattam, hogy nem minden típusú alakváltó viselkedés esetében hibrid rétegrend jelenti az optimumot. Hajlító terhelés hatására történő csavarodás maximalizálásakor például a legjobb teljesítményt egy mono (szénszál-epoxi) laminátum nyújtotta, bár a hibrid rétegrend teljesítménye csupán 2.5%-kal maradt el attól.

3. Tézis

Közel vetemedésmentes, az ISO 2768 szabvány L tolerancia osztálya szerinti síklapúságnak megfelelő laminátumok esetében kimutattam, hogy hibrid rétegrendekkel nagyobb csavarodó deformáció érhető el húzó terhelés hatására, mint mono rétegrendekkel. Ennek oka, hogy a különböző anyagú rétegek (pl. szén-epoxi és üveg-epoxi) a hőtágulási és a merevségi tulajdonságaikban is különböznek egymástól, amely egy hibrid rétegrend esetében egyszerre vezethet a vetemedés csökkenéséhez és az alakváltó képesség növekedéséhez [2].

Dolgozatomban 32-rétegű laminátumokon vizsgáltam a rétegrend homogenizálásának hatását kompozitok gyártási hővetemedésére és kétféle alakváltó viselkedésére (4.4.3. fejezet). A rétegrend homogenizálását azonos felépítésű al-laminátumok egymáson való ismétlésével értem el. $[0_n/90_n]_k$ rétegrendű Hexcel IM7/913 szénszál-epoxi laminátumok esetében (ahol k a homogenizáltság fokát jelzi) numerikus és kísérleti úton is megmutattam, hogy homogenizálással a vetemedés mértéke több, mint 97%-kal csökkenthető. További numerikus vizsgálatokkal megmutattam, hogy az analitikusan maximális hővetemedésre optimalizált $[45_n/90_n/-75_n/-45_n]_k$ laminátum már nyolcas fokú homogenizáltság esetén is megfelel az ISO 2768 szabvány L osztálya szerinti síklapúságnak. A húzásra csavarodó végeelemes vizsgálatokat szintén analitikusan optimalizált, $[30_n/90_n/90_n/-30_n]_k$ rétegrendű laminátumokon végeztem el, amely során nyolcas fokú homogenizáltság esetén a vetemedéshez hasonló, nagyjából 90%-os csökkenést figyeltem meg az alakváltó képességben. A hasonló tendencia oka, hogy a homogenizálással csökken a laminátum aszimmetriája és ezzel a $[b]$ engedékenységi mátrix elemeinek értéke is. $[-30_n/90_n/90_n/-30_n]_k$ rétegrendű hajlításra csavarodó laminátumok vizsgálatakor az alakváltó képesség lényegesen kisebb változását mutattam ki a homogenizáltsági fok függvényében, azonban azonos mértékű hajlító terhelés esetén a rétegrend homogenizálása még növelte is az alakváltó képességet; nyolcas homogenizáltsági foknál 9%-kal. Továbbá analitikus számításokkal bebizonyítottam, hogy a homogenizálás a $[d]$ mátrix bármely elemének értékét képes csökkenteni vagy növelni, az al-laminátum rétegrendjétől függően.

4. Tézis

Kimutattam, hogy a rétegrend homogenizálásával a kompozitok húzásra csavarodó képessége hasonlóan gyors ütemben csökken, mint hővetemedésük mértéke. Ennek oka, hogy mindkét viselkedési forma aszimmetrikus rétegrendet igényel, azonban a homogenizáltsági fok növekedésével az al-laminátum aszimmetriájának hatása egyre kevésbé érvényesül a kompozitban. Az aszimmetriát nem igénylő hajlításra csavarodó képesség ezzel szemben akár növekedhet is, amely következhet közvetlen módon a d_{16} elem növekedéséből, illetve közvetett módon a d_{11} elem növekedéséből is, amely nagyobb lehajlások révén vezethet a csavarodás növekedéséhez. Megmutattam továbbá, hogy a homogenizálás az al-laminátum rétegrendjétől függően a $[d]$ mátrix bármely elemét csökkentheti, illetve növelheti is, vagyis általános tendencia erre vonatkozóan nem figyelhető meg [3].

A double-double (DD) laminátumok analitikus szilárdsági vizsgálatait a módszer megalkotójának és úttörőjének - Stephen W. Tsai professzornak (Stanford Egyetem, USA) - nemzetközi kutatócsoportjához csatlakozva végeztem el. Munkám kezdetéig már nagy mennyiségű információ halmozódott fel a speciális rétegrend-tervezési módszerről mind analitikus, mind pedig numerikus és kísérleti vizsgálatok során. A DD laminátumok 4-rétegű $[\pm\varphi/\pm\psi]$ al-laminátumok ismétlődéséből felépülő kompozitok, amelyek számos előnnyel rendelkeznek a még jelenleg is ipari sztenderdnek számító quad laminátumokkal szemben, amelyek csupán 0° , 90° , 45° és -45° -os rétegekből épülnek fel és követik a 10%-os szabályt (minimum 10% mindegyik orientációból). Munkám során a klasszikus lemezelmélet alapján szilárdsági szempontból (maximális megnyúlás, első réteg tönkremenetele) optimalizáltam és összehasonlítottam a kétféle rétegrendet. A szilárdsági számításokat Toray T300/F934 szénszál-epoxi prepreg anyagtulajdonságaival, két alkatrész jellemző komplex terheléseire végeztem el. A quad laminátumok esetében a felépítő rétegek száma szerint több laminátum-családot is vizsgáltam (4.5. fejezet). Kimutattam, hogy mindkét alkatrész esetében több, mint 5%-kal nagyobb szilárdság érhető el DD laminátumokkal, ráadásul az összehasonlításhoz a quad laminátumok olyan optimumát vettem alapul, amely a gyakorlatban nem mindig érhető el. Ráműtattam továbbá, hogy amíg a DD laminátumok hatékonyan homogenizálhatók, a quadok a vastagabb al-laminátumuk miatt általában szimmetriát igényelnek, amely tovább növeli a hátrányukat például rétegelhagyások esetében. Az eredmények alapján a DD laminátumok egy adott terhelést kisebb vastagság mellett is képesek elviselni, mint a quadok, vagyis a kompozit termékek tömege ezzel a módszerrel csökkenthető. A szilárdság mellett természetesen egyéb szempontokat is figyelembe kell venni egy teljeskörű optimalizálás esetén (például merevség, kihajlási stabilitás vagy rétegelhagyás), amelyekkel a kutatócsoport eredményei alapján tovább növekedhet a double-double laminátumok előnye.

5. Tézis

Bebizonyítottam, hogy double-double laminátumokkal a terheléstől függően nagyobb szilárdság érhető el, mint quad laminátumokkal, amely könnyebb szerkezetekhez vezethet. Ennek elsődleges oka, hogy a double-double rétegrendekben bármilyen szálorientáció előfordulhat, így hatékonyabban lehet kihasználni az erősítőszálak irányfüggő mechanikai viselkedését [3, 4].

6. Saját publikációk listája

- [1] **Vermes B.**, Czigány T.: Thermally induced mechanical work and warpage compensation of asymmetric laminates. *Composite Structures* (bírálat alatt, benyújtva 2021.06.21-én) IF=5.407 D1
- [2] **Vermes B.**, Czigány T.: Improving the extension–twist coupling performance of practically warpage-free laminates via layup hybridization. *Composites Science and Technology* (bírálat alatt, benyújtva 2021.09.17-én) IF=8.528 D1
- [3] **Vermes B.**, Tsai S.W., Massard T., Springer G.S., Czigány T.: Design of laminates by a novel "double-double" layup. *Thin-Walled Structures*, 165, 107954/1-107954/8 (2021) IF=4.442 D1
- [4] **Vermes B.**, Tsai S.W., Riccio A., Di Caprio F., Roy S.: Application of the Tsai's modulus and double-double concepts to the definition of a new affordable design approach for composite laminates. *Composite Structures*, 259, 113246/1-113246/11 (2021) IF=5.407 D1
- [5] **Vermes B.**, Czigány T.: Kompozitok hővetemedésének kihasználási lehetősége. in 'XXIX. Nemzetközi Gépészeti Találkozó (OGÉT 2021). Cluj-Napoca, Romania (online)', 144–147 (2021)
- [6] **Vermes B.**, Czigány T.: Non-conventional deformations: Materials and actuation. *Materials*, 13, 1383/1-1383/26 (2020) IF=3.623 Q2
- [7] Turk M. A., **Vermes B.**, Thompson A. J., Belnoue J. P.-H., Hallett S. R., Ivanov D. S.: Mitigating forming defects by local modification of dry preforms. *Composites Part A (Applied Science and Manufacturing)*, 128, 105643/1-105643/12 (2020) IF=7.664 D1
- [8] **Vermes B.**, Czigány T.: Alakváltó kompozitok tervezése és gyártása autoklávval. *Polimerek*, 6, 895-899 (2020)
- [9] **Vermes B.**, Czigány T.: Kompozitok alakváltásának lehetőségei. *Gép*, 69, 51-54 (2018)
- [10] Szebényi G., Czigány T., **Vermes B.**, Ye X. J., Rong M. Z., Zhang M. Q.: Acoustic emission study of the TDCB test of microcapsules filled self-healing polymer. *Polymer Testing*, 54, 134-138 (2016) IF=2.464 Q1
- [11] **Vermes B.**, Czigány T.: Layup optimization and ways to improve the manufacturability of coupled composites. in '22nd International Conference on Composite Materials (ICCM22). Melbourne, Australia', 4667–4673 (2019)
- [12] **Vermes B.**, Thompson A., Belnoue J., Hallett S., Ivanov D.: Mitigation against forming defects by local modification of dry preforms. in '18th European Conference on Composite Materials (ECCM18). Athens, Greece', paper ID: 188729353 (2018)
- [13] **Vermes B.**, Czigány T.: Development of microcapsules. *Materials Science Forum* 885, 31-35 (2017)