



Textil kompozitok anyagtulajdonságainak
numerikus modellezése

Doktori (PhD) értekezés tézisei
Bojtár Gergely

Gödöllő
2019

A doktori iskola megnevezése: Műszaki Tudományi Doktori Iskola

tudományága: Agrárműszaki tudományok

vezetője: Prof. Dr. Farkas István
egyetemi tanár, DSc
SZIE, Gépészmérnöki Kar

Témavezetők: Dr. M. Csizmadia Béla †
professor emeritus, CSc
SZIE, Gépészmérnöki Kar,
Mechanikai és Géptani Intézet

Prof. Dr. Égert János
egyetemi tanár, CSc
SZE, Gépészmérnöki, Informatikai és
Villamosmérnöki Kar,
Alkalmazott Mechanika Tanszék

.....
az iskolavezető jóváhagyása

.....
a témavezető jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

JELÖLÉSEK, RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE.....	2
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK.....	3
1.1. Bevezetés	3
1.2. Célkítűzések	3
2. ANYAG ÉS MÓDSZER.....	5
2.1. A kísérletnél és a modellezésnél felhasznált textil kompozit réteg	5
2.2. Szálköteg végeselemes modellcellája	6
2.3. Textil kompozit réteg végeselemes modellcellája	9
3. EREDMÉNYEK.....	14
3.1. Szálköteg meghatározott makroszkopikus anyagjellemzői	14
3.2. Kompozit réteg meghatározott makroszkopikus anyagjellemzői	14
3.3. A végeselemes modellcellák alkalmazhatósága	15
3.4. A szálköteg és a textil kompozit réteg végeselemes modellcella validálása	16
3.5. Előírt kompozit réteg anyagjellemzők létrehozása	17
4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK.....	19
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK.....	23
6. ÖSSZEFOGLALÁS.....	24
7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT PUBLIKÁCIÓK.....	25

JELÖLÉSEK, RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE

u, v, w	az elmozdulásvektor skaláris koordinátái
$E_1, E_2, \nu_{12}, G_{12}$	a kompozit réteg síkbeli, ortotrop anyagjellemzői
E_{r1}, E_{r2}, E_{r3}	a szálköteg rugalmassági modulusai
$\nu_{r12}, \nu_{r23}, \nu_{r13}$	a szálköteg Poisson-tényezői
$G_{r12}, G_{r23}, G_{r13}$	a szálköteg csúsztató rugalmassági modulusai
E_{f1}, E_{f2}, E_{f3}	az erősítő szál rugalmassági modulusai
$\nu_{f12}, \nu_{f23}, \nu_{f13}$	az erősítő szál Poisson-tényezői
$G_{f12}, G_{f23}, G_{f13}$	az erősítő szál csúsztató rugalmassági modulusai
E_m, ν_m, G_m	a mátrix izotrop anyagjellemzői
$\bar{\sigma}_1, \bar{\sigma}_2, \bar{\tau}_{12}$	homogenizált/átlagos feszültség koordináták a kompozit rétegben
$\bar{\varepsilon}_1, \bar{\varepsilon}_2, \bar{\gamma}_{12}$	homogenizált/átlagos alakváltozás koordináták a kompozit rétegben
$\bar{\sigma}_{r1}, \bar{\sigma}_{r2}, \bar{\sigma}_{r3}$	homogenizált/átlagos normálfeszültségek a szálkötegben
$\bar{\tau}_{r12}, \bar{\tau}_{r23}, \bar{\tau}_{r13}$	homogenizált/átlagos nyírófeszültségek a szálkötegben
$\bar{\varepsilon}_{r1}, \bar{\varepsilon}_{r2}, \bar{\varepsilon}_{r3}$	homogenizált/átlagos fajlagos nyúlások a szálkötegben
$\bar{\gamma}_{r12}, \bar{\gamma}_{r23}, \bar{\gamma}_{r13}$	homogenizált/átlagos fajlagos szögtorzulások a szálkötegben
F_i	x_i irányú eredő reakcióerő a réteg modellcella oldallapján
F_{ri}	x_{ri} irányú eredő reakcióerő a szálköteg modellcella oldallapján
n_1, n_2	x_1 és x_2 irányú szálkötegek sűrűsége a textilben
t_1, t_2	x_1 és x_2 irányú szálkötegek távolsága, osztása a textilben
λ	a hossz- és keresztirányú szálkötegek aránya a textilben
φ_f	az erősítő szálak / a textil térfogataránya a kompozit rétegben

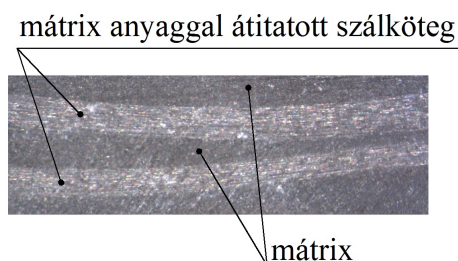
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

Ebben a fejezetben a textil kompozitokat és a disszertáció célkitűzéseit mutatom be.

1.1. Bevezetés

Kompozitnak azokat a társított, heterogén szerkezetű anyagokat nevezik, melyek két vagy több különböző anyag kombinációjából épülnek fel. A műszaki, gépészmérnöki gyakorlatban főleg rétegelt, szálerősített műanyagokat alkalmaznak.

A rétegelt textil kompozit szerkezetek rétegenként általában szövet formájában tartalmazzák a szálerősítést. A síkbeli, kétdimenziós (2D-s) szövet olyan textília, melynek vastagsági mérete a két másik méretéhez képest kicsi. A szövetben több ezer darab elemi szál szálkötegbe (rovingba) van rendezve. A szálkötegek lehetnek sodratlanok és sodrottak is. A gyártás során a szálkötegbe, az elemi szálak közé is kerül mátrix anyag. Egy ilyen heterogén anyagszerkezet látható az 1. ábrán. A heterogén anyagszerkezet makroszkopikus anyagmodellel kezelhető, mely nem alkalmas a szálakban és a mátrixban fellépő feszültségek, alakváltozások meghatározására, csak egy kisebb tartomány homogenizált mechanikai jellemzői határozhatók meg vele.



1. ábra A kompozit heterogén anyagszerkezete

1.2. Célkitűzések

A kompozit anyagú gépszerkezetek mechanikai tervezésénél szükség van az egyes kompozit rétegek makroszkopikus anyagjellemzőire. A végeleemes programokban a vizsgált szerkezetet rétegzett kompozit héj elemekkel szokás modellezni. Ezeknél az elemeknél bemenő adatnak meg kell adni a rétegek E_1 , E_2 , ν_{12} , G_{12} homogenizált, ortotrop anyagjellemzőit az anyagi főirányok koordináta-rendszerében, a rétegek vastagságát és az x_1 anyagi főirányok orientációs szögét. A disszertáció célja az, hogy a szakirodalomban ismertett kompozitok makroszkopikus anyagállandóinak

meghatározására kifejlesztett végeselemes modelleket továbbfejleszse, módosítsa annak érdekében, hogy a felhasználásukkal előállított anyagállandók pontosabbak legyenek. További cél, hogy megvizsgáljam, az erősítő textil szerkezete és anyagi jellemzői hogyan befolyásolják a kompozit réteg makroszkopikus anyagjellemzőit. Az anyag megtervezésénél ez az egyik legfontosabb kérdés. A dolgozatban a következő feladatok megoldását tűztem ki:

1. A kompozit mátrixába ágyazott szálköteg végeselemes modelcellájának kifejlesztése és felépítése. A szálköteg modelcellával végeselem analízis elvégzése húzásra mindhárom anyagi főirányban és tiszta nyírásra mindhárom síkban. Megfelelő peremfeltételek megadása után a végeselemes modellezés eredményeiből a szálköteg makroszkopikus, ortotrop anyagi jellemzőinek numerikus meghatározása.
2. Textil kompozit lemez egy rétegének modellezésére végeselemes réteg modelcella kifejlesztése és felépítése. Megfelelő peremfeltételek megadása húzásra a réteg síkjában mindkét anyagi főirányban és tiszta nyírásra. A réteg modelcellával, végeselemes modellezéssel a kompozit réteg síkbeli, makroszkopikus, ortotrop anyagi jellemzőinek numerikus meghatározása.
3. A végeselemes modelcellák alkalmazhatóságának ellenőrzése, annak tisztázása, hogy mik a kifejlesztett numerikus eljárások használhatóságának szükséges végeselemes modellezési feltételei.
4. Adott textil és mátrix anyagból többrétegű, rétegenként azonos szálalrendezésű, húzó és nyíró textil kompozit próbatestek gyártása és kísérleti vizsgálata a textil kompozit réteg makroszkopikus anyagi jellemzőinek meghatározására. A mérési eredmények és a végeselemes modellezés numerikus eredményeinek összehasonlítása, és ezzel a szálköteg és a textil kompozit réteg végeselemes modelcellájának validálása.
5. Numerikus vizsgálatok a végeselemes modelcellákkal annak tisztázására, hogy a kompozit tervezési paraméterei a textil kompozit réteg ortotrop anyagtulajdonságait hogyan változtatják meg.
A vizsgált esetek:
 - a) Az erősítő szálak rugalmassági modulusának hatása a réteg makroszkopikus anyagtulajdonságaira.
 - b) A textil szövéstípusának befolyása a kompozit réteg anyagtulajdonságaira.
 - c) A réteg anyagtulajdonságainak függése a textil térfogatarányától.
 - d) A réteg anyagtulajdonságainak függése a textil hossz- és keresztirányú szálazásának arányától.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

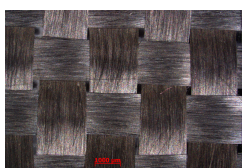
Ebben a fejezetben bemutatom a kísérletnél és a modellezésnél felhasznált textil kompozit réteget. Szálköteg vége-selemes modellcellát és textil kompozit réteg vége-selemes modellcellát építék fel. Leírom a homogenizált, ortotrop anyagjellemzők meghatározásának menetét.

2.1. A kísérletnél és a modellezésnél felhasznált textil kompozit réteg

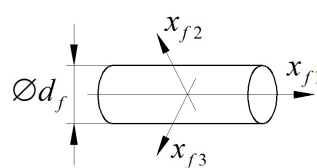
Kézi laminálással gyártottam két nyolcrétegű textil kompozit lemezt, melyből az egyik a 2. ábrán látható. Ezekből próbatesteket vágtam ki. A nyolcrétegű textil kompozit lemez kísérleti vizsgálatával meghatározott ortotrop anyagjellemzők jó közelítéssel megegyeznek a lemez egy rétegének anyagjellemzőivel. A disszertációban a kidolgozott réteg modellcellával a 2. ábrán látható textil kompozit lemez egy rétegét modelleztem.



2. ábra Textil kompozit lemez felülnézete



3. ábra Vászonszövetű textil



4. ábra Az $x_{f1}x_{f2}x_{f3}$ koordináta-rendszer

A kompozit lemezt rétegenként SIGRATEX KDL 8003 típusú vászonkötésű szénszövet erősíti. A 3. ábra impregnálás előtt mutatja be a felhasznált szénszövetet. A $d_f = 7 \mu\text{m}$ átmérőjű elemi szénszálak lapos, sodratlan szálkötegekbe rendezettek. A szálköteg (roving) típusa lánc- és vetülékirányban is Torayca T300-3K. Egy rovingban $n_f = 3\,000$ db szénszál található. A szálköteget felépítő szénszálak ortotrop anyagjellemzőit az 1. táblázat tartalmazza a 4. ábrán látható $x_{f1}x_{f2}x_{f3}$ anyagi főirányok koordináta-rendszerében. A szénszál keresztirányban izotrop, a G_{f23} nyírási modulust a (45) képlettel lehet meghatározni. A mátrix AROPOL M105TB típusú poliészter gyanta, amely homogén, lineárisan rugalmas, izotrop anyag. Az anyagjellemzőit mérésrel határoztam meg (1. táblázat).

1. táblázat A szénszál és a poliészter gyanta anyagjellemzői

Szénszál		Poliészter gyanta
$E_{f1} = 230\,000 \text{ MPa}$	$E_{f2} = E_{f3} = 15\,000 \text{ MPa}$	$E_m = 3\,677 \text{ MPa}$
$\nu_{f12} = \nu_{f13} = 0,166$	$\nu_{f23} = 0,400$	$\nu_m = 0,346$
$G_{f12} = G_{f13} = 6\,432 \text{ MPa}$	$G_{f23} = 5\,357 \text{ MPa}$	$G_m = 1\,365,9 \text{ MPa}$

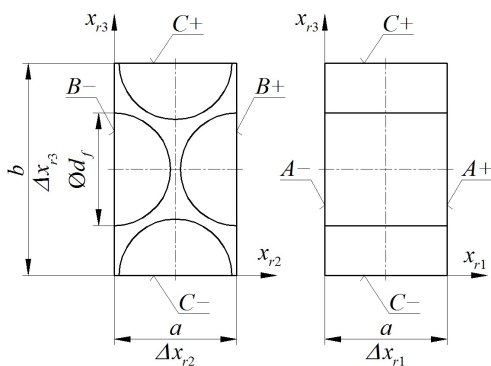
2.2. Szálköteg végeleemes modellcellája

A kompozit réteg szálkötegekből szőtt textilt tartalmaz, amely mátrix anyagba ágyazott. A szálkötegek (rovingok) több ezer darab, erősítő szálát tartalmaznak, amelyek szintén át vannak itatva mátrix anyaggal.

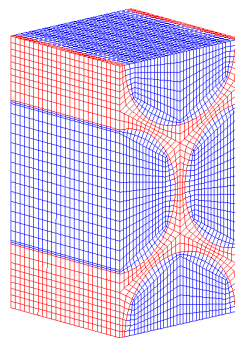
Az 5. ábrán látható a szálköteg végeleemes modellcellája, a kompozit szálkötegeknek az az ismétlődő tartománya, amelyből a szálköteg létrehozható. A szálköteg modellcella hosszúság egységének a μm -t választottam, és a (kg, μm , s, μN , MPa) mértékegység-rendszerben dolgoztam. Az ábra a cella hat oldallapjának azonosító jelét is bemutatja. A vizsgált textil kompozit lemez szálköteg modellcellájának jellemző geometriai adatai az alábbiak:

$$d_f = 7 \mu\text{m}, \quad a = 7,613 \mu\text{m}, \quad b = 13,186 \mu\text{m},$$

$$A_{A+} = A_{A-} = A_{B+} = A_{B-} = 100,385 \mu\text{m}^2, \quad A_{C+} = A_{C-} = 57,958 \mu\text{m}^2.$$



5. ábra A szálköteg modellcella méretei



6. ábra A szálköteg modellcella végelelem hálója

A 6. ábrán látható a szálköteg modellcella végelelem hálója. A szemben lévő felületeken a csomópontok azonos síkbeli koordinátáknál vannak, és ezzel a modellcellában csomópontpárokat hoztam létre.

A modellcella szimmetriájának köszönhetően a makroszkopikus anyagjellemzők megegyeznek az x_{r2} , x_{r3} irányban és az $x_{r1}x_{r2}$, $x_{r1}x_{r3}$ síkban, így a szálkötegeknek csak 6 független ortotrop anyagjellemzője van:

$$E_{r1}, \quad E_{r2} = E_{r3}, \quad \nu_{r12} = \nu_{r13}, \quad \nu_{r23}, \quad G_{r12} = G_{r13}, \quad G_{r23}.$$

Ha az elemi szálak ortotrop, de keresztirányban, azaz transzverzálisan izotrop tulajdonságúak, a szálak hatszög elrendezése következtében a mátrixszal átítatott szálköteg is ilyen tulajdonságú lesz. A G_{r23} nyírási modulus meghatározható az izotrop esetre érvényes összefüggéssel:

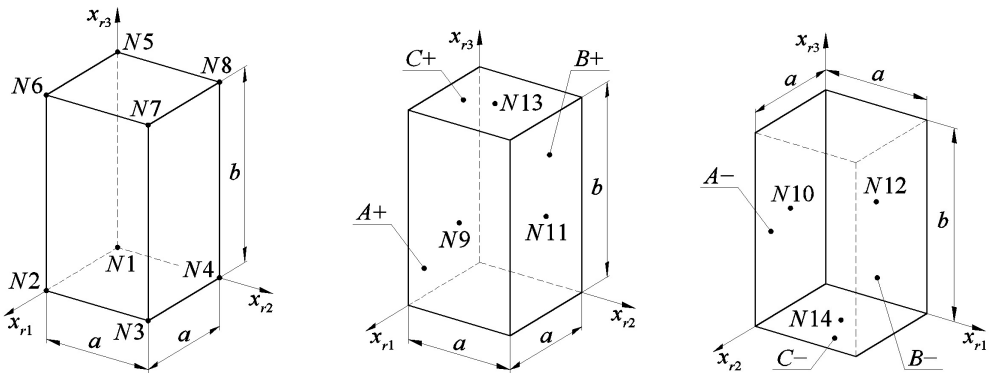
$$G_{r23} = \frac{E_{r2}}{2(1 + \nu_{r23})}. \quad (1)$$

A 2. táblázatban láthatók az adott terhelési esetben meghatározható anyagállandók. Megvizsgáltam mind a 6 terhelési esetet, ami egyben ellenőrzés is volt, hogy kijönnek-e az anyagállandók közötti összefüggések. A tézisfüzetben az x_{r1} irányú húzás végeleges modellezését mutatom be.

2. táblázat A szálköteg meghatározható anyagállandói

Szimulált terhelési esetek	Meghatározható anyagállandók	Ellenőrzés
Húzás x_{r1} irányban	$E_{r1}, \nu_{r12}, \nu_{r13}$	$\frac{\nu_{rij}}{E_{ri}} = \frac{\nu_{rji}}{E_{rj}}$ $\nu_{rji} = \frac{E_{rj}}{E_{ri}} \nu_{rij}$ $(i \neq j = 1, 2, 3)$
Húzás x_{r2} irányban	$E_{r2}, \nu_{r21}, \nu_{r23}$	
Húzás x_{r3} irányban	$E_{r3}, \nu_{r31}, \nu_{r32}$	
Nyírás az $x_{r1}x_{r2}$ síkban	G_{r12}	
Nyírás az $x_{r2}x_{r3}$ síkban	G_{r23}	
Nyírás az $x_{r1}x_{r3}$ síkban	G_{r13}	

A szálköteg modellcellára – az ismétlődés biztosítása érdekében – kinematikai terhelést, csomóponti elmozdulásmezőt írtam elő. A modellcella csúcspontjaiban és az oldallapok középpontjában lévő csomópontokra a 7. ábrán látható csomópont sorszámokkal hivatkozom.



7. ábra Csomópontok jelölése a szálköteg modellcella nyolc csúcspontjában és az oldallapok középpontjában

A modellcellában egy csomópont elmozdulásvektora az $x_{r1}x_{r2}x_{r3}$ anyagi főirányok koordináta-rendszerében:

$$\vec{u} = u \vec{e}_{r1} + v \vec{e}_{r2} + w \vec{e}_{r3}. \quad (2)$$

A szálköteg modellcella geometriai modelljének (5. ábra) három egymásra merőleges szimmetriasíkja van, amelyek párhuzamosak az oldallapokkal. Emiatt az oldallapoknak speciális alakváltozási és periodikus tulajdonságaik

vannak. A modelcellára előírtam a szimmetriából adódó periodikus peremfeltételeket is. Ez arra az esetre is biztosítja a periodicitást, ha a végeelem háló nem szimmetrikus.

A húzási szimulációknál a homogenizált alakváltozási vektorban az $\bar{\varepsilon}_{r_1}$, $\bar{\varepsilon}_{r_2}$, $\bar{\varepsilon}_{r_3}$ átlagos fajlagos nyúlások különböznek 0-tól. A homogenizált feszültségi vektorban x_{r_1} irányú húzásnál a $\bar{\sigma}_{r_1}$ átlagos normálfeszültség különbözik zérustól.

A szimmetrikus tulajdonságokból adódóan húzásnál az oldallapok síkok maradnak, és párhuzamosan mozdulnak el. Hogy ezt teljesítse a modell, összekapcsoltam a csomópontokat az oldallapokon a felületre merőleges irányban:

$$u_{A-} = u(0; x_{r_2}; x_{r_3}) = u_{N1}, \quad u_{A+} = u(a; x_{r_2}; x_{r_3}) = u_{N2}, \quad (3)$$

$$v_{B-} = v(x_{r_1}; 0; x_{r_3}) = v_{N5}, \quad v_{B+} = v(x_{r_1}; a; x_{r_3}) = v_{N8}, \quad (4)$$

$$w_{C-} = w(x_{r_1}; x_{r_2}; 0) = w_{N3}, \quad w_{C+} = w(x_{r_1}; x_{r_2}; b) = w_{N7}. \quad (5)$$

A (3)-(5) összefüggésben:

$$0 \leq x_{r_1} \leq a, \quad 0 \leq x_{r_2} \leq a, \quad 0 \leq x_{r_3} \leq b. \quad (6)$$

A dolgozatban újszerű módon írtam elő a periodicitást a három szemben lévő oldalpárra mindhárom irányban. Külön kapcsoltam össze adott irányokban a szemben lévő csomópontokat az oldallapokon az élek nélkül és az éleken a csúcspontokat nem belevéve. Ezzel elkerültem, hogy bizonyos éleken és csúcspontokban duplikálva írjam elő a csomópontok elmozdulás koordinátáit, azaz túlhatározottságot idézzek elő. A csomópontpárokat az alábbiak szerint kell összekapcsolni:

$$A- / A+: v(0; x_{r_2}; x_{r_3}) = v(a; x_{r_2}; x_{r_3}), \quad w(0; x_{r_2}; x_{r_3}) = w(a; x_{r_2}; x_{r_3}), \quad (7)$$

$$B- / B+: u(x_{r_1}; 0; x_{r_3}) = u(x_{r_1}; a; x_{r_3}), \quad w(x_{r_1}; 0; x_{r_3}) = w(x_{r_1}; a; x_{r_3}), \quad (8)$$

$$C- / C+: u(x_{r_1}; x_{r_2}; 0) = u(x_{r_1}; x_{r_2}; b), \quad v(x_{r_1}; x_{r_2}; 0) = v(x_{r_1}; x_{r_2}; b). \quad (9)$$

$$x_{r_1} \text{ irányú élek: } u(x_{r_1}; 0; 0) = u(x_{r_1}; a; 0) = u(x_{r_1}; a; b) = u(x_{r_1}; 0; b), \quad (10)$$

$$x_{r_2} \text{ irányú élek: } v(0; x_{r_2}; 0) = v(0; x_{r_2}; b) = v(a; x_{r_2}; b) = v(a; x_{r_2}; 0), \quad (11)$$

$$x_{r_3} \text{ irányú élek: } w(0; 0; x_{r_3}) = w(a; 0; x_{r_3}) = w(a; a; x_{r_3}) = w(0; a; x_{r_3}). \quad (12)$$

A (7)-(12) összefüggésekben:

$$0 < x_{r_1} < a, \quad 0 < x_{r_2} < a, \quad 0 < x_{r_3} < b. \quad (13)$$

A szálköteg modelcella merevtestszerű mozgásának megakadályozása

érdekében a húzási kísérletek modellezésénél megfogtam az $A-$, $B-$ és $C-$ oldallapot a középső csomópontban a felületre merőleges irányban:

$$u_{A-} = u_{N10} = 0, \quad v_{B-} = v_{N12} = 0, \quad w_{C-} = w_{N14} = 0. \quad (14)$$

Az x_{r1} irányú, egytengelyű húzásnál az $\bar{\varepsilon}_{r1}$ -et vettem fel, melyből az $A+$ oldallap u_{A+} elmozdulását írtam elő kinematikai terhelésnek:

$$u_{A+} = u_{N9} = a \bar{\varepsilon}_{r1}. \quad (15)$$

A szálköteg végeeselemes modelcellával numerikusan meghatározott keresztkontrakciók (a húzás irányára merőleges síkba eső elmozdulások) és reakcióerők az x_{r1} irányú húzásnál:

$$\begin{aligned} &v_{B+}, w_{C+}, \\ &\vec{F}_{rA+} = F_{r1A+} \vec{e}_{r1}, \quad \vec{F}_{rA-} = F_{r1A-} \vec{e}_{r1}, \quad (\vec{F}_{rA+} = -\vec{F}_{rA-}), \\ &\vec{F}_{rB-} = \vec{F}_{rC-} = \vec{0}. \end{aligned} \quad (16)$$

Azzal, hogy az összes csomópontot összekapcsoltam az oldallapokon a megfogás és a terhelés irányában a (3)-(5) egyenletek szerint, a reakcióerőt a középső csomópontra redukáltam.

Új megoldás, hogy az átlagfeszültséget az oldallapokon kialakult reakcióerőnek és az oldallap kiinduló területének hányadosával számoltam. Az átlagos $\bar{\sigma}_{r1}$ normálfeszültséget is így határoztam meg, amiből a szálköteg x_{r1} irányú rugalmassági modulusa a szokásos módon számítható:

$$\bar{\sigma}_{r1} = \frac{1}{A_{A+}} \int_{(A_{A+})} \sigma_{r1} dA = \frac{F_{r1A+}}{A_{A+}}, \quad (17)$$

$$E_{r1} = \frac{\bar{\sigma}_{r1}}{\bar{\varepsilon}_{r1}}. \quad (18)$$

A Poisson-tényező a keresztirányú és a hosszirányú alakváltozás viszonya egytengelyű feszültségállapotnál. A homogenizált anyag Poisson-tényezői a kiszámított elmozdulásmező megfelelő adataiból állíthatók elő:

$$v_{r12} = -\frac{\bar{\varepsilon}_{r2}}{\bar{\varepsilon}_{r1}} = -\frac{v_{B+}}{a} \frac{a}{u_{A+}} = -\frac{v_{B+}}{u_{A+}}, \quad v_{r13} = -\frac{\bar{\varepsilon}_{r3}}{\bar{\varepsilon}_{r1}} = -\frac{w_{C+}}{b} \frac{a}{u_{A+}} = -\frac{w_{C+}}{u_{A+}} \frac{a}{b}. \quad (19)$$

2.3. Textil kompozit réteg végeeselemes modelcellája

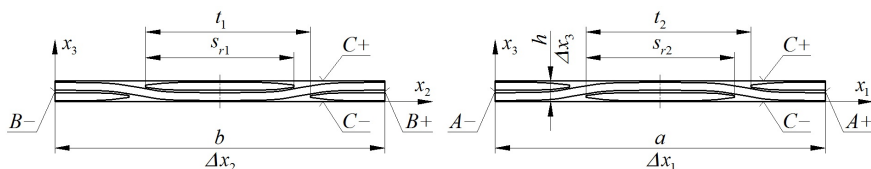
A textil kompozit réteg lánc- és vetülékirányban is ismétlődő tartományokból áll. A réteg modelcella a rétegnek egy ismétlődő része,

2. Anyag és módszer

melyből a kompozit réteg létrehozható. A 8. ábrán egy vászonkötésű textillel erősített kompozit réteg modellcellájának parametrikus méretei láthatók, amely bemutatja a hat oldallap azonosító jelét is. A 2. ábrán látható nyolcrétegű, vászonkötésű textil kompozit lemez egy rétegére felépített réteg modellcella geometriai méretei:

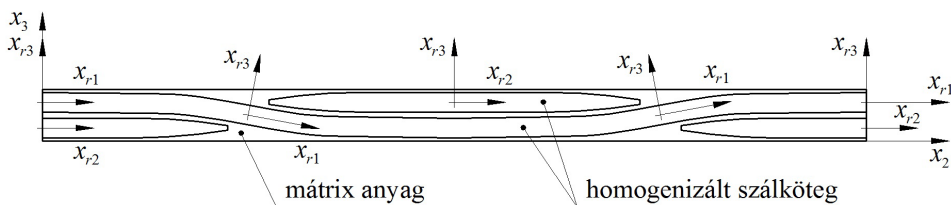
$$a = b = 4 \text{ mm}, h = 0,25 \text{ mm}, t_1 = t_2 = 2 \text{ mm}, s_{r1} = s_{r2} = 1,8 \text{ mm},$$

$$A_{A+} = A_{A-} = 1 \text{ mm}^2, A_{B+} = A_{B-} = 1 \text{ mm}^2, A_{C+} = A_{C-} = 16 \text{ mm}^2.$$



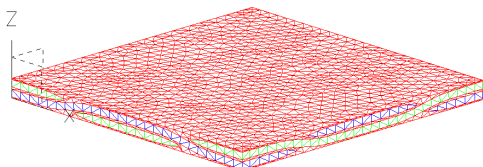
8. ábra A réteg modellcella geometriája és méretei

A modellcella x_1 és x_2 tengelyre merőleges oldallapjait úgy vettem fel, hogy lánc- és vetülékirányban is 1-1 szimmetrikus egységet tartalmazzon (8. ábra), illetve hogy az oldallapok essenek egybe a szálkötegek $x_{r1}x_{r3}$ és $x_{r2}x_{r3}$ anyagi főirányok síkjaival (9. ábra).

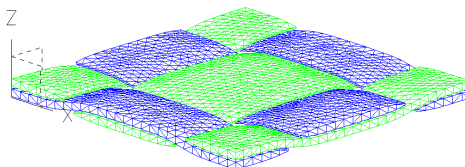


9. ábra A réteg modellcella $x_1x_2x_3$ koordináta-rendszere
és a szálkötegek x_{r1}, x_{r2}, x_{r3} anyagi főiránya

A 10. ábrán a réteg modellcella, a 11. ábrán a textil végelem hálója látható. A modellcella három oldalpárján a csomópontok egymással szemben, azonos koordinátáknál vannak. Az XYZ koordináta-rendszer a réteg modellcella $x_1x_2x_3$ anyagi főirányok koordináta-rendszerét jelöli.



10. ábra A réteg modellcella
végelem hálója



11. ábra A textil réteg
végelem hálója

A textil kompozit réteg síkbeli ortotrop Hooke-törvényében 4 független makroszkopikus anyagállandó van: E_1 , E_2 , ν_{12} , G_{12} . A 3. táblázatban látható, hogy az adott terhelési esetben melyik anyagállandó határozható meg. Mivel a vizsgált modellcellánál az erősítés megegyezik hossz- és keresztirányban, az ezzel merevített kompozit réteg – illetve azonos rétegfelépítés esetén a kompozit lemez – rugalmassági modulusa és Poisson-tényezője is megegyezik x_1 és x_2 irányban:

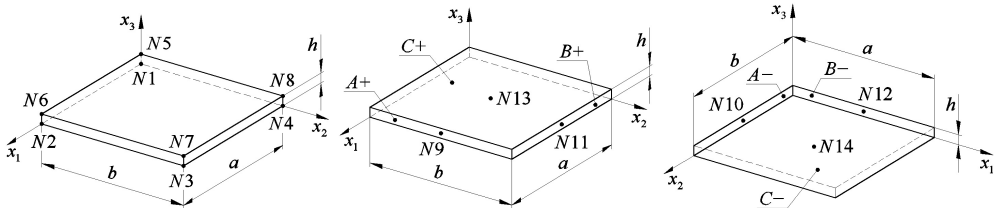
$$E_1 = E_2, \quad \nu_{12} = \nu_{21}. \quad (20)$$

3. táblázat A kompozit réteg meghatározható anyagállandói

Szimulált terhelési esetek	Meghatározható anyagállandók	Ellenőrzés
Húzás x_1 irányban	E_1, ν_{12}	$\frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2}, \nu_{21} = \frac{E_2}{E_1} \nu_{12}$
Húzás x_2 irányban	E_2, ν_{21}	
Nyírás az x_1x_2 síkban	G_{12}	

A réteg modellcellával a 3. táblázatban látható valamennyi terhelési esetet szimuláltam. A tézisfüzetben a nyírást mutatom be az x_1x_2 síkban.

A textil kompozit réteg modellcellára is kinematikai terhelést, csomóponti elmozdulásmezőt írtam elő. A modellcella csúcspontjaiban és az oldallapok középpontjában lévő csomópontokra a 12. ábrán látható sorszámokkal hivatkozom.



12. ábra Csomópontok jelölése a réteg modellcella nyolc csúcspontjában és az oldallapok középpontjában

Egy csomópont elmozdulásvektora a modellcella $x_1x_2x_3$ koordináta-rendszerében:

$$\vec{u} = u \vec{e}_1 + v \vec{e}_2 + w \vec{e}_3. \quad (21)$$

A textil kompozit réteg G_{12} csúsztató rugalmassági modulusának meghatározásához az x_1x_2 síkban kell tiszta nyírást szimulálni. Ebben az esetben az átlagos fajlagos nyúlás mindkét irányban zérus kell, hogy legyen. Az átlagos alakváltozási vektorban csak a $\bar{\gamma}_{12}$ átlagos szögtorzulás

különbözik nullától, ezért a szimulációnál ezt kell előírni:

$$\bar{\gamma}_{12} = \frac{1}{2}\bar{\gamma}_{12} + \frac{1}{2}\bar{\gamma}_{21}, \quad \frac{1}{2}\bar{\gamma}_{12} = \frac{1}{2}\bar{\gamma}_{21}. \quad (22)$$

A homogenizált feszültségi vektorban a $\bar{\tau}_{12}$ átlagos csúsztató feszültség különbözik nullától.

A réteg modellcellának az x_1 és x_2 tengelyre merőlegesen van szimmetriasíkja (8. ábra). Az $A-$, $A+$, $B-$ és $B+$ oldallap a periodikusan egymás mellett lévő modellcellák szimmetriasíkja. Emiatt az x_1x_2 síkbeli nyírásnál az x_1 tengelyre merőleges oldallapokon x_2 irányban, az x_2 tengelyre merőleges oldallapokon x_1 irányban nincs deformáció. Ezt úgy valósítottam meg, hogy mereven összeköttem az oldalfelületeken az összes csomópontot az alábbiak szerint:

$$v_{A-} = v(0; x_2; x_3) = v_{N1}, \quad v_{A+} = v(a; x_2; x_3) = v_{N2}, \quad (23)$$

$$u_{B-} = u(x_1; 0; x_3) = u_{N5}, \quad u_{B+} = u(x_1; b; x_3) = u_{N8}. \quad (24)$$

A (23) és (24) összefüggésben:

$$0 \leq x_1 \leq a, \quad 0 \leq x_2 \leq b, \quad 0 \leq x_3 \leq h. \quad (25)$$

A tiszta nyírást a réteg modellcella x_1 tengelyre merőleges oldallapjainak x_2 irányú és az x_2 tengelyre merőleges oldallapjainak x_1 irányú előírt elmozdulásával modelleztem. Az ehhez szükséges kinematikai előírásokat az $A+$, $A-$, $B+$, $B-$ oldallapok középpontjában lévő csomópontokra adtam meg:

$$v_{A-} = v_{N10} = 0, \quad v_{A+} = v_{N9} = a \frac{1}{2} \bar{\gamma}_{21}, \quad (26)$$

$$u_{B-} = u_{N12} = 0, \quad u_{B+} = u_{N11} = b \frac{1}{2} \bar{\gamma}_{12}. \quad (27)$$

A merevtestszerű mozgás megakadályozására az origóban lévő $N1$ csomópontot fogtam meg x_3 irányban:

$$w_{N1} = 0. \quad (28)$$

A réteg modellcellánál is új eljárás, hogy külön kapcsoltam össze adott irányokban a szemben lévő csomópontokat az oldallapokon az élek nélkül és az éleken a csúcspontokat nem belevéve. Nyírásnál a csomópontpárokat a (29)-(38) szerint kell összekötni a periodicitás biztosításához. Újszerű, ahogy a $C-/C+$ oldallapon megoldottam az egymás felett elhelyezkedő csomópontok összekapcsolását is.

2. Anyag és módszer

$$A- / A+: u(0; x_2; x_3) = u(a; x_2; x_3), \quad w(0; x_2; x_3) = w(a; x_2; x_3), \quad (29)$$

$$B- / B+: v(x_1; 0; x_3) = v(x_1; b; x_3), \quad w(x_1; 0; x_3) = w(x_1; b; x_3), \quad (30)$$

$$C- / C+: u(x_1; x_2; 0) = u(x_1; x_2; h), \quad v(x_1; x_2; 0) = v(x_1; x_2; h). \quad (31)$$

$$x_1 \text{ irányú élek: } v(x_1; 0; 0) = v(x_1; b; 0), \quad w(x_1; 0; 0) = w(x_1; b; 0), \quad (32)$$

$$v(x_1; 0; h) = v(x_1; b; h), \quad w(x_1; 0; h) = w(x_1; b; h), \quad (33)$$

$$v(x_1; b; 0) = v(x_1; b; h). \quad (34)$$

$$x_2 \text{ irányú élek: } u(0; x_2; 0) = u(a; x_2; 0), \quad w(0; x_2; 0) = w(a; x_2; 0), \quad (35)$$

$$u(0; x_2; h) = u(a; x_2; h), \quad w(0; x_2; h) = w(a; x_2; h), \quad (36)$$

$$u(a; x_2; 0) = u(a; x_2; h). \quad (37)$$

$$x_3 \text{ irányú élek: } w(0; 0; x_3) = w(a; 0; x_3) = w(a; b; x_3) = w(0; b; x_3). \quad (38)$$

A (29)-(38) összefüggésekben:

$$0 < x_1 < a, \quad 0 < x_2 < b, \quad 0 < x_3 < h. \quad (39)$$

A $C-$ és a $C+$ oldallapon összekötöttem x_3 irányban a csomópontokat a sarokpontokban:

$$w_{N1} = w_{N2} = w_{N4} = w_{N3}, \quad w_{N5} = w_{N6} = w_{N8} = w_{N7}. \quad (40)$$

A végeeselemes számítással meghatározott reakcióerők az x_1x_2 síkbeli nyírásnál:

$$\begin{aligned} \vec{F}_{A+} &= F_{2A+} \vec{e}_2, & \vec{F}_{A-} &= F_{2A-} \vec{e}_2, & (\vec{F}_{A+} &= -\vec{F}_{A-}), \\ \vec{F}_{B+} &= F_{1B+} \vec{e}_1, & \vec{F}_{B-} &= F_{1B-} \vec{e}_1, & (\vec{F}_{B+} &= -\vec{F}_{B-}), \\ \vec{F}_{N1} &= \vec{0}. \end{aligned} \quad (41)$$

Az átlagos nyírófeszültségeket – melyek a τ feszültségek dualitása miatt megegyeznek – a (17) egyenlethez hasonlóan a reakcióerőnek és az oldallap kiinduló területének hányadosával határoztam meg:

$$\bar{\tau}_{12} = \frac{F_{1B+}}{A_{B+}}, \quad \bar{\tau}_{21} = \frac{F_{2A+}}{A_{A+}}. \quad (42)$$

A textil kompozit réteg nyírási modulusa az x_1x_2 síkban:

$$G_{12} = \frac{\bar{\tau}_{12}}{\bar{\gamma}_{12}}. \quad (43)$$

3. EREDMÉNYEK

Ebben a fejezetben leírom a kísérletbe bevont textil kompozit lemez modellcelláival meghatározott makroszkopikus anyagjellemzőket. Összehasonlítom a modellcellákkal kapott anyagjellemzőket mérési eredményekkel. Ezzel igazolom (validálom) a szálköteg és a textil kompozit réteg modellcella mérnöki számításokban történő használhatóságát, alkalmazhatóságát. Modellcellákkal paraméter vizsgálatokat is végeztem. Egy textil kompozit réteg mechanikai tulajdonságainak változását elemeztem. Bemutatom, milyen tényezők hatását vizsgáltam.

3.1. Szálköteg meghatározott makroszkopikus anyagjellemzői

A 4. táblázat foglalja össze a 2.2. pontban ismertetett x_{r1} irányú húzás esetére az előírt kinematikai terhelést, a numerikusan meghatározott mennyiségeket, valamint az azokból számolt átlagos feszültséget és anyagjellemzőket.

4. táblázat Előírt és meghatározott mennyiségek x_{r1} irányú húzásnál

Kinematikai terhelés	$\bar{\epsilon}_{r1} = 2,5 \cdot 10^{-3}$, $u_{A+} = u_{N9} = 19,0325 \cdot 10^{-3}$ μm
Végeselemes számítással előállított mennyiségek	$v_{B+} = -3,854 \cdot 10^{-3}$ μm , $w_{C+} = -6,675 \cdot 10^{-3}$ μm $\vec{F}_{rA+} = (44\,479,2\bar{\epsilon}_{r1}) \mu\text{N}$, $\vec{F}_{rA-} = (-44\,479,2\bar{\epsilon}_{r1}) \mu\text{N}$
Átlagos feszültség	$\bar{\sigma}_{r1} = 443,09$ MPa
Anyagjellemzők	$E_{r1} = 177\,236$ MPa, $\nu_{r12} = 0,202$, $\nu_{r13} = 0,202$

A szálköteg modellcella lineárisan rugalmas. Az 5. táblázat összefoglalva tartalmazza azt a tizenkét anyagállandót, melyeket a 2. táblázatban leírt 6 terhelési esettel határoztam meg a szálköteg végeselemes modellcellájával. A szálköteg ortotrop, keresztirányban izortop tulajdonságú.

5. táblázat A szálköteg modellcellával meghatározott anyagjellemzők

$E_{r1} = 177\,236$ MPa	$E_{r2} = 10\,352$ MPa	$E_{r3} = 10\,352$ MPa
$\nu_{r12} = 0,202$	$\nu_{r21} = 0,012$	$\nu_{r31} = 0,012$
$\nu_{r13} = 0,202$	$\nu_{r23} = 0,430$	$\nu_{r32} = 0,430$
$G_{r12} = 4\,115$ MPa	$G_{r23} = 3\,620$ MPa	$G_{r13} = 4\,115$ MPa

3.2. Kompozit réteg meghatározott makroszkopikus anyagjellemzői

A 6. táblázatban láthatjuk a 2.3. pontban bemutatott x_1, x_2 síkbeli tiszta nyírásnál az előírt kinematikai terheléseket, a végeselemes számítással

3. Eredmények

meghatározott reakcióerőket, és az ezekből számolt átlagos nyírófeszültségeket és nyírési moduluszt.

6. táblázat Előírt és meghatározott mennyiségek x_1x_2 síkbeli nyírásnál

Kinematikai terhelés	$\bar{\gamma}_{12} = 2 \cdot 10^{-3}$, $\frac{1}{2}\bar{\gamma}_{12} = \frac{1}{2}\bar{\gamma}_{21} = 10^{-3}$
	$v_{A+} = v_{N9} = 4 \cdot 10^{-3}$ mm, $u_{B+} = u_{N11} = 4 \cdot 10^{-3}$ mm
Reakcióerők	$\vec{F}_{A+} = (5,8\vec{e}_2)$ N, $\vec{F}_{A-} = (-5,8\vec{e}_2)$ N
	$\vec{F}_{B+} = (5,8\vec{e}_1)$ N, $\vec{F}_{B-} = (-5,8\vec{e}_1)$ N
Átlagos feszültség	$\bar{\tau}_{12} = 5,8$ MPa, $\bar{\tau}_{21} = 5,8$ MPa
Nyírési modulus	$G_{12} = 2\,900$ MPa

A 2. ábrán látható nyolcrétegű textil kompozit lemez lineárisan rugalmas, ortotrop anyagtulajdonságú. A végeelemes réteg modellcellával meghatározott makroszkopikus anyagjellemzőit a 7. táblázat tartalmazza. Az 5 ortotrop anyagjellemzőt a 3. táblázatban ismertetett 3 terhelési esettel számítottam ki.

7. táblázat A kompozit réteg modellcellával meghatározott anyagjellemzők

$E_1 = 50\,720$ MPa	$E_2 = 50\,720$ MPa
$\nu_{12} = 0,103$	$\nu_{21} = 0,103$
$G_{12} = 2\,900$ MPa	

3.3. A végeelemes modellcellák alkalmazhatósága

A szálköteg modellcellát arra az esetre dolgoztam ki, amelyben az elemi szálak a szálkötegben sodratlanok és egymással párhuzamosan helyezkednek el. Sodrottnál további numerikus vizsgálat szükséges.

Textil kompozit réteg modellcellánál feltétel, hogy az erősítő textil legyen síkbeli, 2D-s. A textilben két irányban fussanak a szálkötegek, melyek legyenek egymásra merőlegesek. Illetve egy irányban erősített kompozit réteg makroszkopikus, ortotrop anyagjellemzőit is meg lehet határozni a bemutatott réteg modellcellával. A módszer alkalmazhatósága nem függ a szálköteg és a mátrix anyagjellemzőitől, a szálkötegek keresztmetszetétől, szélességétől, távolságától és a textil szövésintájától. A réteg modellcellánál bemutatott peremfeltételek használatához feltétel, hogy a modellcella oldallapjai essenek egybe a szálkötegek anyagi főirányainak síkjaiival úgy, mint a 9. ábrán. Atkötési helyen nem lehet oldallap. A peremfeltételek alkalmazásához nem szükséges, hogy a textil felépítése és a modellezett periodikus rész szimmetrikus legyen. Tehát az általam

alkalmazott modellcella kiterjeszhető nem szimmetrikus esetre is.

3.4. A szálköteg és a textil kompozit réteg végeselemes modellcella validálása

A szálköteg és a textil kompozit réteg végeselemes modellcellát, a kidolgozott modellezési eljárást azzal igazoltam, hogy a réteg modellcellával kapott anyagjellemzőket összehasonlítottam mérési eredményekkel.

A végeselemes réteg modellcella ugyanúgy ortotrop, lineáris tulajdonságú, mint amilyen a textil kompozit lemez a húzási és a nyíróvizsgálatnál. A 8. táblázat a textil kompozit rétegnek a kísérleti vizsgálattal meghatározott E_1 , E_2 , ν_{12} , ν_{21} és G_{12} anyagjellemzőit, valamint a hibahatárhoz tartozó minimum és maximum értéket tartalmazza. A 9. táblázat pedig a végeselemes modellcellákkal meghatározott ortotrop, makroszkopikus anyagjellemzőket, valamint a réteg modellcella eredményeinek a mérés középértékéhez viszonyított eltérését foglalja össze.

8. táblázat Textil kompozit réteg méréssel meghatározott anyagjellemzői

Kísérleti vizsgálattal meghatározott anyagjellemzők	Minimum	Maximum
$E_1 = E_2 = 50\,094 \pm 1\,480$ MPa	$E_1 = E_2 = 48\,614$ MPa	$E_1 = E_2 = 51\,574$ MPa
$\nu_{12} = \nu_{21} = 0,102 \pm 0,016$	$\nu_{12} = \nu_{21} = 0,086$	$\nu_{12} = \nu_{21} = 0,118$
$G_{12} = 3\,018 \pm 254$ MPa	$G_{12} = 2\,764$ MPa	$G_{12} = 3\,272$ MPa

9. táblázat A szálköteg és a réteg modellcella eredményeinek összehasonlítása a mérés eredményeivel

Textil kompozit réteg modellcellával meghatározott anyagjellemzők	A modellcella eredményének eltérése a mérés középértékéhez képest	
$E_1 = E_2 = 50\,720$ MPa	+626 MPa	+1,25 %
$\nu_{12} = \nu_{21} = 0,103$	+0,001	+0,98 %
$G_{12} = 2\,900$ MPa	-118 MPa	-3,91 %

Megállapítható, hogy a textil kompozit réteg végeselemes szálköteg és réteg modellcellával előállított eredményei, anyagjellemzői a mérés hibahatárán belül vannak, és az eltérés a mérés átlagához képest 4% alatt van. Ez igazolja, hogy a szálköteg és a textil kompozit réteg végeselemes modellcella eredményei elérik a mérnöki modellezéshez, a mérnöki számításokhoz szükséges, elvárt pontosságot.

3.5. Előírt kompozit réteg anyagjellemzők létrehozása

Négy olyan paraméter vizsgálatot végeztem, mellyel egy kompozit réteg mechanikai tulajdonságainak változását elemeztem. A paraméter vizsgálatok eredményeit a 4. Új tudományos eredmények fejezetben foglaltam össze.

Mindegyik réteg modellcellában azonos volt a réteg vastagsága. A szálkötegek geometriája mindegyik esetben megegyezett a Torayca T300-3K típusúval (3. ábra), anyagjellemzői csak az erősítő szál rugalmassági modulusának hatása a réteg anyagjellemzőire paraméter vizsgálatnál tértek el. A mátrix anyag valamennyi esetben az AROPOL M105TB típusú poliészter gyanta volt, melynek az izotrop anyagjellemzői az 1. táblázatban láthatók.

Erősítő szál rugalmassági modulusának hatása

A textil kompozit réteg anyagjellemzőit a szál rugalmassági modulusának függvényében úgy vizsgáltam, hogy a szál kereszt- és hosszirányú modulusainak az arányát állandó értéken tartottam:

$$\delta = \frac{E_{f2}}{E_{f1}} = 0,08. \quad (44)$$

A ν_{f12} , ν_{f23} , G_{f12} három független anyagállandóra a modellcella validálásánál alkalmazott értéket vettem fel, mely az 1. táblázatban látható. A szénszálal keresztirányban itt is izotrop tulajdonságúnak tételeztem fel, így az E_{f2} rugalmassági modulus változtatásával a G_{f23} nyírási modulus is változott. A G_{f23} csúsztató rugalmassági modulus az E_{f2} és a ν_{f23} függvényében számítottam:

$$G_{f23} = \frac{E_{f2}}{2(1 + \nu_{f23})}. \quad (45)$$

Három paraméter változatot vizsgáltam meg:

- a) $E_{f1} = 200\,000$ MPa , $E_{f2} = 16\,000$ MPa ,
- b) $E_{f1} = 225\,000$ MPa , $E_{f2} = 18\,000$ MPa ,
- c) $E_{f1} = 250\,000$ MPa , $E_{f2} = 20\,000$ MPa .

A vizsgálathoz a 2.2., 2.3. pontban ismertetett modellcellákat használtam. A végeelemes szálköteg modellcellával három szénszál anyagjellemzőhöz határoztam meg makroszkopikus szálköteg anyagjellemzőket. Ezután ezeket adtam meg a textil kompozit réteg modellcellánál a homogenizált szálköteg anyagjellemzőinek.

Réteg anyagjellemzőinek változása különböző szövésminták esetén

Azt vizsgáltam, hogyan változnak a textil kompozit réteg anyagállandói, ha egy szálköteg egyszerre több egymást követő merőleges szálköteget keresztez alul vagy felül, és így kevésbé hullámos egy szálköteg egy adott hosszon belül. 4 különböző textillel erősített réteget modelleztem. A tűzött, kétirányú szövetben nincsenek átkötések. A vizsgált erősítések:

- a) az 1×1 -es, azaz a vászonkötésű textil,
- b) a 2×2 -es kosárkötésű textil,
- c) a 3×3 -as kosárkötésű textil és
- d) a tűzött, kétirányú szövet.

Textil térfogatarányának hatása a réteg anyagtulajdonságaira

A textil, vagyis az elemi szálak φ_f térfogatarányát a kompozit rétegekben a 8. ábrán látható t_1 , t_2 szálkötegek távolságával változtattam. Az alábbi három esetet vizsgáltam:

- a) $t_1 = t_2 = 3 \text{ mm}$, $\varphi_f = 0,307$,
- b) $t_1 = t_2 = 2,5 \text{ mm}$, $\varphi_f = 0,368$,
- c) $t_1 = t_2 = 2 \text{ mm}$, $\varphi_f = 0,461$.

Hossz- és keresztirányú szálazás arányának hatása

Azt vizsgáltam, hogyan változnak a textil kompozit réteg ortotrop anyagjellemzői, ha módosítjuk a textilben a hossz- és keresztirányú szálkötegek arányát. Mindegyik réteg modellcellában azonos volt a hosszirányú szálkötegek távolsága: $t_1 = 2 \text{ mm}$. Az egyes modellekben a keresztirányú szálkötegek t_2 távolsága különbözött. A szálazás λ aránya a szálkötegek t_i távolságával és n_i sűrűségével is kifejezhető ($i = 1, 2$):

$$\lambda = \frac{n_2}{n_1} = \frac{t_1}{t_2}. \quad (46)$$

A vizsgált öt réteg modellcella jellemzői:

- a) Nincs keresztirányú szálköteg: $n_2 = 0$, ($t_2 = \infty$), $\lambda = 0$,
- b) $t_2 = 4 \text{ mm}$, $\lambda = 0,5$,
- c) $t_2 = 3 \text{ mm}$, $\lambda = 0,67$,
- d) $t_2 = 2,5 \text{ mm}$, $\lambda = 0,8$,
- e) $t_2 = 2 \text{ mm}$, $\lambda = 1$.

4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Sodratlan szálköteg vége-selemes modellcellája

Szakirodalmi forrásokra alapozva vége-selemes szálköteg modellcellát dolgoztam ki a több ezer elemi szálból álló, mátrix anyaggal átítatott sodratlan szálköteg anyagállandóinak numerikus meghatározására. A modellcellával meg lehet határozni a homogén, ortotrop anyagúnak tekintett szálköteg E_{r1} , E_{r2} , E_{r3} , ν_{r12} , ν_{r23} , ν_{r13} , G_{r12} , G_{r23} , G_{r13} makroszkopikus anyagjellemzőit az anyagi főirányok koordináta-rendszerében az elemi szálak és a mátrix anyagjellemzőinek, valamint a szálköteg keresztmetszet geometriájának ismeretében. Az anyagállandók az általam kidolgozott számítógépes szimulációval, a szálköteg modellcella x_{r1} , x_{r2} , x_{r3} tengelyirányú húzása és az $x_{r1}x_{r2}$, $x_{r2}x_{r3}$, $x_{r1}x_{r3}$ síkbeli nyírása modellezésével állíthatók elő.

A kinematikai előírásokat újszerű módon, a cella oldallap középső csomópontjához kötött megfogásokkal, terhelésekkel valószínűsítettem meg, a feszültségeket a középső csomópontra redukált reakcióerőkből határoztam meg. Új megoldás, hogy a disszertációban adott irányokban külön kapcsoltam össze a szemben elhelyezkedő csomópontokat az oldallapokon és az éleken. Ezzel úgy biztosítottam a modellcella periodikus viselkedését a három szemben lévő oldallapon mindhárom irányban, hogy elkerültem az éleken és a csúcspontokban a csomópontok túlhatározottságát. Olyan szimmetria feltételeket írtam elő, melyek összhangban vannak a periodikus peremfeltételekkel. Így a szimulált terhelési esetek nem csak szimmetrikus felépítésű vége-selemes háló esetén alkalmazhatók.

2. Textil kompozit réteg vége-selemes modellcellája

A szakirodalom felhasználásával vége-selemes réteg modellcellát dolgoztam ki a szálkötegekből szőtt textilből és a textilt átítató mátrix anyagból álló kompozit réteg anyagállandóinak numerikus meghatározására. A modellcellával számítani lehet a homogén, ortotrop anyaggal modellezett kompozit réteg E_1 , E_2 , ν_{12} és G_{12} makroszkopikus anyagjellemzőit a szálkötegek és a mátrix anyagjellemzői, valamint az erősítő textil geometriájának és a réteg vastagságának ismeretében. Az anyagtulajdonságokat a réteg modellcella x_1 , x_2 tengelyirányú húzására és x_1x_2 síkbeli nyírására vonatkozó vége-selem modellkísérlettel, az általam kidolgozott numerikus eljárással határoztam meg.

Modellezési újdonság, hogy a réteg modellcella négy oldalsó lapján a reakcióerőt a középső csomópontra redukáltam. A megfogásokat és a

kinematikai terheléseket is a középső csomópontra adtam meg. Az oldallapon összekapcsoltam a csomópontokat a megfogások és a terhelések irányában. A feszültségeket a reakcióerőkből határoztam meg. Modellezési pontosítás, hogy adott irányokban külön kapcsoltam össze az egymással szemben lévő csomópontokat az oldallapokon, az éleken és a csúcspontokban. Ezzel az előírással azt biztosítottam, hogy nincs túlhatározott csomópont az éleken és a csúcspontokban. Újdonság, hogy a modellcellán összekapcsoltam az egymás felett elhelyezkedő csomópontokat a réteg síkjába eső két irányban. Így a kompozit lemez egy kiragadott rétegében nem lép fel hajlítás a szövésből adódó hullámosság csökkenéséből, növekedéséből adódóan.

Mérésekkel bizonyítottam, hogy a szálköteg és a textil kompozit réteg vége-selemes modellcellájával meghatározott anyagi jellemzők pontossága eléri a mérnöki számításokhoz szükséges mértéket. A numerikus modellezés mérésekkel történő validációja igazolja az általam alkalmazott újszerű modellezési fogások indokoltságát.

3. Erősítő szál rugalmassági modulusának hatása a réteg anyagjellemzőire

Vége-selemes szálköteg és réteg modellcellák felhasználásával végzett paraméter vizsgálatokkal igazoltam, hogy a kompozit réteg E_1 rugalmassági modulusa jó közelítéssel lineárisan növekszik az erősítő szál E_{f1} (és E_{f2}) rugalmassági modulusai változása függvényében. Az E_1/E_{f1} viszonyszám reciprok függvény szerint csökken, mert a textil kompozit réteg E_1 rugalmassági modulusa kisebb mértékben nő, mint ahogy növeljük a szénszál merevségét.

Kimutattam, hogy a kompozit réteg ν_{12} Poisson-tényezője jó közelítéssel lineárisan növekszik az E_{f1} , illetve az E_{f2} függvényében. A kompozit réteg G_{12} síkbeli csúsztató rugalmassági modulusát viszont az erősítő szál rugalmassági modulusának változása nem befolyásolja.

A vizsgálat érvényességi tartománya: $E_{f1} = 200 - 250$ GPa , $E_{f2} = 16 - 20$ GPa . Feltételeztem, hogy az elemi szál keresztirányú és hosszirányú rugalmassági modulusának aránya állandó, a gyakorlatban előforduló átlagérték mellett: $\delta = E_{f2}/E_{f1} = 0,08$.

4. Réteg anyagjellemzőinek változása különböző szövésminták esetén

Réteg modellcellák alkalmazásával, paraméter vizsgálattal állapítottam meg, hogy a textil szövésmintájának változása milyen hatással van a réteg anyagjellemzőire.

Az elvégzett paraméter vizsgálat igazolta, hogy ha a textil szálkötegében egy adott hosszban belül csökkentjük a szövésből adódó hullámok számát (azaz változtatjuk a szövésmintát), azzal növeljük a kompozit réteg E_1 rugalmassági modulusát, és csökkentjük a ν_{12} Poisson-tényezőjét. Megállapítottam, hogy a G_{12} csúsztató rugalmassági modulus a szövés minta nem befolyásolja.

5. Textil térfogatarányának hatása a kompozit réteg anyagtulajdonságaira

Réteg modellcellák felhasználásával, paraméter vizsgálattal kimutattam, hogy milyen hatással van a kompozit réteg anyagtulajdonságaira a textil φ_f térfogataránya. A vizsgálat során a szálkötegek s_r szélességét és a kompozit réteg h vastagságát állandónak vettem, a térfogatarányt a szálkötegek t távolságával változtattam. A vizsgált $\varphi_f = 0,301 - 0,461$ tartományt a szövéstechnológiai megvalósíthatóság alapján határoztam meg $s_r/t = 0,6 - 0,9$ arány mellett.

Megállapítottam, hogy a textil térfogatarányának függvényében az E_1 rugalmassági modulus, a ν_{12} Poisson-tényező és a G_{12} csúsztató rugalmassági modulus is növekszik. Közülük a G_{12} közel lineárisan.

6. Hossz- és keresztirányú szálazás arányának hatása a réteg anyagjellemzőire

Réteg modellcellák alkalmazásával meghatároztam, hogy milyen hatással van a hossz- és keresztirányú szálazás λ aránya a kompozit réteg anyagtulajdonságaira. A vizsgálat során a textilben a szálkötegek szélessége állandó volt, és a két irányban megegyezett: $s_{r1} = s_{r2}$. A szálazás $\lambda = t_1/t_2$ arányát úgy módosítottam, hogy az x_1 irányú szálkötegek t_1 távolsága, $s_{r1}/t_1 = 0,9$ aránya nem, viszont az x_2 irányú szálkötegek t_2 távolsága, s_{r2}/t_2 viszonyzáma változott. A numerikus szimulációt a gyakorlatban előforduló textilfajták figyelembevételével végeztem el: $\lambda = 0$ ($s_{r2}/t_2 = 0$), $\lambda = 0,5 - 1$ ($s_{r2}/t_2 = 0,45 - 0,9$). $\lambda = 0$ esetén nincs keresztirányú szálköteg, ez az egyirányú szálerősítés esete.

Kimutattam, hogy az E_1 hosszirányú rugalmassági modulusnak a λ szálarány változtatása során lokális maximuma van. Ha a hosszirányú szálkötegek elérnek egy adott hullámosságot, a textil kompozit réteg veszít az x_1 irányú merevségéből. A numerikus analízis bizonyította, hogy az E_2 keresztirányú rugalmassági modulus a λ függvényében közel lineárisan növekszik. A ν_{12} Poisson-tényező (keresztkontrakció x_1 irányú húzásnál) $\lambda = 0$ esetén a legnagyobb. A ν_{12} a hossz- és keresztirányú szárlazás arányának függvényében csökken, majd egy lokális minimum után kis meredekséggel növekszik. A ν_{21} a λ függvényében monoton növekedést mutat. Ha a kompozit réteget x_2 irányban merevítjük, és ezzel az x_1 irányú szálkötegekben több hullám van egy adott hosszon belül, akkor az x_2 irányú húzásnál növekszik a keresztkontrakció. A G_{12} csúsztató rugalmassági modulus közelítőleg lineárisan növekszik a hossz- és keresztirányú szárlazás arányának függvényében.

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

A végeselemes programrendszerekben a rétegelt kompozit szerkezeteket rétegzett kompozit héjelemekkel szokás modellezni. Ezeknél az elemeknél bemenő adatnak meg kell adni rétegenként a vastagságot, az x_1 anyagi főirány orientációs szögét, valamint az x_1, x_2 anyagi főirányok koordináta-rendszerében négy független anyagállandót: E_1 , E_2 , ν_{12} , (ν_{21}) és G_{12} . Egy kompozit réteg anyagjellemzőinek megállapítására az utóbbi időben több eljárás is megjelent, amely a végeselem módszert alkalmazza.

Az általam kidolgozott, illetve továbbfejlesztett textil kompozit réteg végeselemes modellcellával numerikus úton meg lehet határozni egy réteg makroszkopikus, ortotrop anyagjellemzőit a mátrix és a szálköteg anyagjellemzőinek, valamint az erősítő textil szerkezet geometriájának és a réteg vastagságának ismeretében. A réteg modellcellában a szálköteget nem az elemi szálak figyelembevételével, hanem egy homogén, ortotrop tulajdonságú anyaggal kell modellezni.

Az általam felépített, illetve továbbfejlesztett végeselemes szálköteg modellcellával elő lehet állítani a több ezer elemi szál tartalmazó, mátrixszal átítatott szálköteg makroszkopikus, ortotrop anyagjellemzőit.

A fenti két eszközzel, a végeselemes szálköteg és a végeselemes réteg modellcellával próbatetek gyártása nélkül meg lehet határozni mérnöki modellezéshez szükséges pontossággal egy kompozit réteg makroszkopikus anyagjellemzőit.

Egy rétegelt kompozit szerkezetnél elvárás lehet, hogy egy réteg előírt mechanikai tulajdonságokkal rendelkezzen. Ehhez kapcsolódóan paraméter vizsgálatokat végeztem, hogy az alábbi tényezők hogyan befolyásolják egy réteg makroszkopikus anyagjellemzőit:

- az erősítő szál rugalmassági modulusának változása,
- a textil szövésmintájának változása,
- az erősítő textil térfogatarányának változása,
- a textilben a hossz- és keresztirányú szálazás arányának változása.

Ezek a paraméter vizsgálatok jó kiinduló alapot, becslést jelentenek, amivel egy textil kompozit réteg anyagjellemzőit az előírásoknak, elvárásoknak megfelelően be lehet állítani.

A doktori munkám során kidolgozott modellcellákkal nem csak textil kompozit réteg anyagjellemzőit, hanem egy irányban erősített kompozit réteg makroszkopikus anyagjellemzőit is elő lehet állítani.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A dolgozat célja az volt, hogy végeselemes modellcellákat dolgozzon ki a kompozit anyagban előforduló szálkötegek és ezekből a szálkötegekből előállított textil kompozit rétegek makroszkopikus anyagállandóinak meghatározására. A kidolgozásnál figyelembe vettem és továbbfejlesztettem a szakirodalomban ismertetett végeselemes modelleket.

Adott textil és mátrix anyagból nyolcrétegű húzó és nyíró próbatesteket gyártottam. Kísérleti vizsgálattal meghatároztam az ortotrop tulajdonságú kompozit lemez makroszkopikus anyagjellemzőit, melyek megegyeznek egy kompozit réteg anyagjellemzőivel. A mátrix anyagából is gyártottam próbatesteket, és meghatároztam a mátrix izotrop anyagtulajdonságait.

Szálköteg végeselemes modellcellát dolgoztam ki a kísérleti vizsgálatoknál alkalmazott textil kompozit próbatestnek a mátrixba ágyazott textil szálkötegeire. A modellcellával végeselem analízist végeztem, előállítottam a szálköteg makroszkopikus, ortotrop anyagjellemzőit.

Ezután réteg végeselemes modellcellát dolgoztam ki a kísérleti vizsgálatoknál használt textil kompozit próbatest egy rétegeire. A textil anyag egy szálkötegehez a szálköteg modellcellával meghatározott anyagjellemzőket használtam fel. A réteg modellcellával előállítottam a réteg síkbeli, makroszkopikus anyagjellemzőit.

A modellcellákon az egymással szemben lévő oldallapok periodikus peremfeltételeinek megadásánál az éleket, az egymással szemben lévő élek ismétlődési peremfeltételeiből pedig a csúcspontokat zártam ki, hogy ezzel elkerüljem a csomópontok túlhatározottságát. Kinematikai terhelést, csomóponti elmozdulásmezőt írtam elő. A modellcellákon az átlagos feszültséget az oldallapokon fellépő reakcióerőkből számítottam.

A szálköteg és réteg modellcellát azzal ellenőriztem, hogy a mérési és a végeselemes modellcellák numerikus eredményeit összehasonlítottam. A modellcellákkal meghatározott anyagjellemzők a mérés hibahatárán belül vannak, és az eltérés a mérés átlagához képest 4% alatt van. Ez az összehasonlítás igazolja a végeselemes textil szálköteg és textil kompozit réteg modellcella mérnöki számításokban történő alkalmazhatóságát.

További kutatási célom az volt, hogy a végeselemes modellcellákkal megvizsgáljam egyes paramétereknek a textil kompozit réteg makroszkopikus, ortotrop anyagjellemzőire gyakorolt hatását. Megvizsgáltam a textil szálkötegekben az erősítő szál rugalmassági modulusának változását. Elemeztem az erősítő textil szövésmintájának, térfogatarányának és a hossz- és keresztirányú szálazás arányának változását. Diagramokat vettem fel, melyek útmutatást adnak arra, hogy az adott tényezők hogyan befolyásolják a kompozit réteg ortotrop anyagjellemzőit.

7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT PUBLIKÁCIÓK

Lektorált cikk világnyelven

1. **Bojtár, G.**; M. Csizmadia, B.; Égert, J. (2016): Numerical estimation method of orthotropic material properties of a roving for reinforcement of composite materials. Acta Polytechnica Hungarica, Vol. 13, No. 6, pp. 163-182., ISSN 1785-8860, (IF: 0,745)
2. **Bojtár, G.**; M. Csizmadia, B.; Égert, J. (2017): Numerical determination of orthotropic material properties of textile composite layers and their validation by measurement. Acta Polytechnica Hungarica, Vol. 14, No. 2, pp. 47-67., ISSN 1785-8860, (IF: 0,909)

Lektorált cikk magyar nyelven

3. **Bojtár G.**, M. Csizmadia B., Égert J. (2008): Üvegszálás textil kompozit anyagok mechanikai viselkedésének vége-selemes modellezése. GÉP, LIX. évf., 10-11. sz., 23-29. o., ISSN 0016-8572
4. **Bojtár G.**, Égert J. (2009): 2D és 3D vége-selem modellcellák textil-kompozit rétegek anyagállandóinak meghatározására. EMT Műszaki Szemle, Különszám 2009, XVII. OGÉT 2009., 69-74. o., ISSN 1454-0746
5. Aczél Á., **Bojtár G.**, Fehér L., Keresztes D. (2011): Versenyautó alváz térbeli rúdmodelljének vége-selemes analízise. GÉP, LXII. évf., 7-8. sz., 3-8. o., ISSN 0016-8572