

POLIMER KOMPOZIT SZERKEZET REDŐZŐDÉS SZIMULÁCIÓJA

DRAPING SIMULATION OF POLYMER COMPOSITE STRUCTURES

TAKÁCS LÁSZLÓ^{1,2}
SZABÓ FERENC²

Polimer kompozit szerkezetek tervezési módszerei között szerepel az úgynevezett redőződés szimuláció (angolul draping simulation). Az előgyártmányként sík erősítőrétegben a szálak orientációja egy 3 dimenziós felületre fektetve lokálisan megváltozhat, kritikus esetben gyűrődhet is. Ez a szimulációs technika lehetőséget ad arra, hogy a technológusoknak támogatást nyújtson az optimális fektetési irányok meghatározásában. Azonban a szálorientáció megváltozása nem csak gyártástechnológiai szempontból fontos, hanem a mechanikai tulajdonságokra is hatással van. Munkánkban az erősítőrétegek gyártás közbeni redőződésének a merevségi tulajdonságokra gyakorolt hatását vizsgáltuk egy vákuuminfúzióval gyártott, két réteg biaxiális üvegszövet erősítésű, telítetlen poliészter mátrixanyagú szerkezet esetében. Húzópróbatesteken és egy demonstrátor alkatrészen mechanikai vizsgálatokat végeztünk, valamint szimulációval is meghatároztuk a merevségi jellemzőket. Húzópróbatesteken végzett mechanikai vizsgálatokkal és szimulációkkal bemutattuk, hogy a szálorientáció változásának jelentős hatása van, és a redőződés jelenségének elhagyásával a szilárdsági számításokban kapott, rétegszintű mechanikai feszültségek jellegükben és értékükben is nagy mértékben megváltozhatnak.

1. BEVEZETÉS

A kompozit szerkezeti anyagok az elmúlt két évtizedben egyre nagyobb teret kaptak a műanyag-feldolgozás területén. A kompozit ipar nagy mértékben fejlődik a kiváló tömegre vetített mechanikai tulajdonságaik miatt. Az űripar, a repülőgépipar és a hajózás után azonban az autóiiparban történő áttörés még várat magára. Ehhez gyártástechnológiai fejlesztésekre, a gyártási eljárások automatizálására és a kompozit tervezési módszerek fejlesztésére van szükség. A tervezési és szimulációs módszerek egyike a redőződés szimuláció. A kompozit termékek anizotróp, azaz irányfüggő tulajdonságokkal rendelkeznek, az alkatrésznek létezik egy vagy több kitüntetett erősítési iránya. Ezek az irányok a gyártás során síklemezek esetében könnyen tarthatóak, komplex geometriájú héjszerkezet esetén azonban az erősítőrétegek a szerszám alakját felvéve deformálódnak, a kitüntetett irányok lokálisan jelentősen változhatnak. Ezt a jelenséget nevezzük redőződésnek (angolul draping). Redőződés nem csak akkor alakulhat ki, ha az erősítőanyag egy komplex geometria alakját veszi fel, a jelenség akkor is előfordulhat, ha a szövetnek csak egy része van a szerszámra rögzítve, a nem rögzített részek a gravitáció hatására deformálódnak, amit esésnek nevezünk.

A redőződés ezen fajtáját Bidour [1] vizsgálta, emellett Halász és társai [2] egy grafikus módszert dolgoztak ki a jelenség vizsgálatára. A szálak erősítőanyagok orientációváltozásának meghatározására több módszer is használatos; az egyszerűbb és gyorsabb kinematikai szimuláció és a részletesebb, de erőforrásigényesebb, végeeselemes módszerrel alapuló redőződés szimuláció.

A végeeselemes módszert alkalmazó redőződés szimuláció az erősítőrétegek fektetésének tranziens szimulációja, anizotróp anyagmodell, sűrűlódásos érintkező felületeket és terheléseket vesz figyelembe. Collier és társai [3] az elsők közt voltak, akik módszert dolgoztak ki a redőződés VEM-alapú vizsgálatára. Ortotróp anyagmodellel és 2D-s héjelemekkel végeztek szimulációt a szálorientáció változásának előrejelzésére, majd az eredményeket valós mérési eredményekkel igazolták. VEM-alapú modellel alkalmaztak Skordos és társai [4] is, akik a szálak deformációjának gyártás előtti optimalizálására dolgoztak ki egy módszert, azzal a céllal, hogy a bonyolult geometriák esetén fel-lépő gyűrődéseket minimalizálják.

Ezekkel a módszerekkel ellentétben a kinematikai redőződés szimulációhoz nincs szükség az erősítőanyag anyagának figyelembevételére, nem vesznek figyelembe erőhatásokat, terheléseket sem, ezért egyszerűbb, gyorsabb, de jó közelítést adhat, elsősorban száraz szövetek optimális fektetésének meghatározásához. Az eljárás lényege, hogy az erősítőanyagot elemi, egységnyi oldalhosszúságú négyzetekre bontják, amit az alkatrészt jellemző 3 dimenziós felületre vetítenek. Ekkor a négyzetekből álló háló a csúcspontok elmozdulásaival és az oldalak közti szögek változásával felveszi a megadott felület alakját. A folyamat során a deformációt az oldalak egymáshoz képesti szöge, illetve az elem eredeti síkjából történő elfordulásának szöge jellemzi [5]. A szimulációhoz szükséges bemenő adatok a szálerősítés főiránya, a gyártandó alkatrész 3 dimenziós felülete, illetve a felületre való vetítés iránya. A bemenő adatokból a szoftver több lépésben határozza meg a háló deformálódott alakját úgy, hogy kiszámítja a csúcspontok módosult helyzetét pusztán geometriai feltételekből.

A kinematikai szimulációk fejlesztésével sokan foglalkoznak. Maynard [6] olyan szimulációs eljárást alakított ki, amely egy előre meghatározott terítési módokat definiáló adatbázis segítségével a gyártást már a tervezési fázisban optimalizálja. Ez a módszer a korábban Elkington és társai [7] által meghatározott terítési eljárásokon alapul, melyek definiálásának eredeti célja az volt, hogy a nagy szakértelmet igénylő kézi gyártási eljárások betanítási folyamatát egyszerűsítse, és segítsen az automatizálási folyamat fejlesztésében is. A gyártás további optimalizálására született megoldás Hancock és Potter [8] cikkében, amiben

¹ eCon Engineering Kft, Budapest

² Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, Budapest

a kinematikai redőződés vizsgálatot arra használják, hogy meghatározzák a kézi kompozit gyártási folyamatban a szőtt erősítőanyag rétegek felvitelének módját. Az így kapott előírások megadják az erősítő szövet felvitelének kezdőpontját és terítési irányát is úgy, hogy a folyamat során a lehetséges hibákat, például gyűrődéseket vagy szakadásokat, elkerüljék. Ezzel olyan gyártási előírások adhatók meg, amelyek csökkentik a gyártást végző szakember szükséges tapasztalatát, ezzel költséghatékonyabbá és egyszerűbbé téve a folyamatot. Kaufmann és társai [9] pedig bemutattak egy módszert, amelyben redőződés szimuláció segítségével lehet meghatározni a legköltséghatékonyabb gyártási eljárást több szempont szerint, figyelembe véve az anyagszükségletet és az erősítőrétegek redőződését is. Az eljárással meghatározható a gyártási eljáráshoz alkalmazandó optimális terítési irány és kezdőpont is.

A redőződés jelensége azonban nem csak gyártástechnológiai szempontok miatt fontos, a szálak orientációjának változása az alkatrész mechanikai tulajdonságaira is hatással van. A munkánk célja a redőződés hatásának vizsgálata a merevségi tulajdonságokra egy üvegszál-erősítéses, telítetlen poliésztergyanta mátrixanyagú demonstrátor alkatrészen végzett mechanikai vizsgálatok és végesselemez szimulációk segítségével, ahol a szálorientációt kinematikai redőződés szimulációval határoztuk meg.

2. FELHASZNÁLT ANYAGOK, VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

A vizsgálathoz alkalmazott kompozit mátrixanyaga Distron 5119 kereskedelmi elvezésű, telítetlen poliésztergyanta. Ennek előnye az alacsony ára és gyors térhálósodási ideje, amely az adatlapja szerint 23 °C-on 24 óra. A rugalmassági modulusza 3900 MPa, a sűrűsége 1100 kg/m³. Az erősítőanyag egy biaxiális üvegszövet, melynek fajlagos tömege 240 g/m². A mechanikai vizsgálatokhoz felhasznált próbatestekhez és a demonstrátor alkatrészhez is két-két réteg erősítőszövetet alkalmaztunk, egymáshoz képest azonos orientációval.

A demonstrátor alkatrész geometriáját az 1. ábra mutatja. A geometria egy fél T-idom, amelyben a két henger áthatása mentén biztosan megjelenik a redőződés jelensége, ezért megfelel a vizsgálatunk céljára.

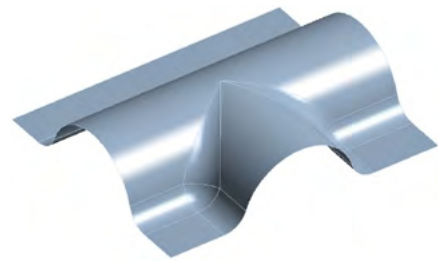
A redőződés merevségi tulajdonságokra gyakorolt hatását kísérleti és szimulációs módszerekkel vizsgáltuk a 2. ábrán látható folyamatábra szerint. Az ábra bal oldalán a szimulációs tevékenységek, a jobb oldalán a kísérleti vizsgálatok láthatók. Ezek részleteit a következő két alfejezetben mutatjuk be.

2.1. MECHANIKAI SZIMULÁCIÓK

2.1.1. KOMPOZIT RÉTEGEK ORTOTRÓP MEREVSÉGI JELLEMZŐINEK MEGHATÁROZÁSA

Első lépésben meghatároztuk a kompozit rétegek merevségi paramétereit. A biaxiális szövetet rétegelt héjelemekkel két, egymásra merőleges unidirekcionális réteggént modelleztük homogén, lineáris ortotróp anyagmodellel. Így a két réteg erősítőszövetet négy réteg unidirekcionális erősítőanyagként vettük figyelembe szimmetrikus réteggrenddel [0°, 90°, 90°, 0°]. Ezzel a módszerrel jól modellezhető a kompozit deformációs viselkedése. A szövetek

tönkreemeneteli mechanizmusa eltérő az unidirekcionális szál-erősítéshez képest, de mivel esetünkben a merevségi jellemzők vizsgálata a cél, így ez a közelítés megtehető. Egy unidirekcionális réteg esetében az ortotróp anyagmodell egy speciális fajtájával, az ún. transzverzálisan izotróp anyagmodellel dolgozhatunk, amelynek egy kitüntetett iránya van, ami esetünkben a szálirány. Ekkor öt független paraméter írja le a merevségi jellemzőket, ezek a rugalmassági modulusz szálirányban (E_x) és szálirányra merőlegesen (E_y), a síkbeli Poisson-tényező (ν_{12}), a síkbeli nyíró rugalmassági modulusz (G_{12}) és a síkra merőleges nyírórugalmassági modulusz (G_{13}). Ez utóbbi Halpin-Tsai egyenletekkel becsülhető, de mivel rétegek közötti nyírófeszültségeket kiértékelni, rétegelválást becsülni nem célunk, ezért az előbbi négy jellemzőt szükséges meghatározni. Ezeket a gyanta és az üveg adatlapjai értékei alapján a keverékszabályokkal becsültük, amihez tömegméréssel meghatároztuk a kompozit száltartalmát tömegszázalékban, majd adatlapjai sűrűséggel átváltottuk térfogatszázalékra, ami 13,5%-ra adódott. A szimulációban alkalmazott rétegszintű merevségi jellemzőket az 1. táblázat foglalja össze.



1. ábra: Demonstrátor alkatrész 3D geometriája



2. ábra: Az alkalmazott munkafolyamat

2.1.2. PRÓBATESTEK HÚZÓVIZSGÁLATA SZIMULÁCIÓVAL

A szükséges merevségi jellemzők meghatározása után, az ISO 527 húzóvizsgálati szabvány alapján 25 mm x 150 mm méretű próbatestek húzóvizsgálatát szimuláltuk. A szimulációt Ansys végeeselemes szoftverrel végeztük, a kompozitspecifikus beállításokat, mint anyagjellemzők és rétegrend, az Ansys Composite Prepost szoftverben tettük meg. A mérésekkel összhangban négy különböző terítési irányt vizsgáltunk: 0°, 15°, 25° és 45°. A modellben az átlagos elemméret 4 mm. Peremfeltételként 1 mm elmozdulást definiáltunk a próbatest felső 25 mm-es részén, míg az alsó 25 mm-es részen fix megfogást alkalmaztunk. Az elmozdulásterhelés hatására kapott reakcióerőt mértük. A peremfeltételeket és a terítési irányokat a 3. ábra mutatja.

2.1.3. KOMPLEX ALKATRÉSZ REDŐZŐDÉS SZIMULÁCIÓJA

A demonstrátor alkatrész redőződés szimulációjához a kinematikai redőződés szimulációs módszert alkalmaztuk. Ez a módszer elemi cellákra bontja a kezdetben sík felületű erősítőanyagot, amelyeknek oldalhosszúságai állandóak, csak a csúcspontok mentén deformálódnak. Az elemi cellákat egyesével fektetjük a 3D-s geometriára úgy, hogy minden pontjuk érintkezzen a felülettel. Az egységek felfektetésének módját mutatja a 4. ábra.

A szimuláció egy előre definiált kezdőponton indul, és egy előre definiált terítési irány mentén folytatódik. A módszer az elemi cellák nyírási energiájának minimumát keresi. Ha a cella két csúcspontja már a felületen van, akkor az alábbi összefüggéssel számolható a nyírási energia [10]:

$$E = \frac{1}{2} G \gamma^2 \quad (1)$$

ahol G az erősítőanyag nyírási rugalmassági modulusza, γ pedig az elemi cella eredetileg 90°-os α csúcshögeinek pótszöge, amit az 5. ábra szemléltet.

Kis szögdeformációk esetén alkalmazhatjuk a következő összefüggést [11]:

$$\gamma \approx \cos \alpha \quad (2)$$

ahol α a négyszög csúcshöge, γ pedig a csúcshög pótszöge kétszerese. Elvégezve az energiaszámítást mind a négy csúcshögre, a nyíró rugalmassági moduluszt és az állandó $\frac{1}{2}$ szorzót kiemelve a (3) összefüggést kapjuk:

$$E_{min} = \sum_{i=1}^4 \cos^2(\alpha_i) \quad (3)$$

ahol E_{min} a minimális nyíróerő, α_i pedig a torzult négyszög belső szöge. Ezt az összefüggést egy iteratív algoritmussal megoldva a program meghatározza a cella másik két csúcspontjának helyét.

Az így kapott hálót végül a program ráteríti a mechanikai modellre, és az elemeken megjeleníthető a β nyírási szög a (4) számú összefüggés alapján:

$$\beta = 90^\circ - \alpha \quad (4)$$

ahol β a nyírási szög, α pedig a torzult elemi cella belső szöge. A β nyírási szög modellen való megjelenítése segít a problémás területek felismerésében, a maximális szögtorzulás a legtöbb erősítőanyag esetében 30° és 40° között van, e fölött a nyírási energia ugrásszerűen növekszik már kis deformációk hatására is [12].

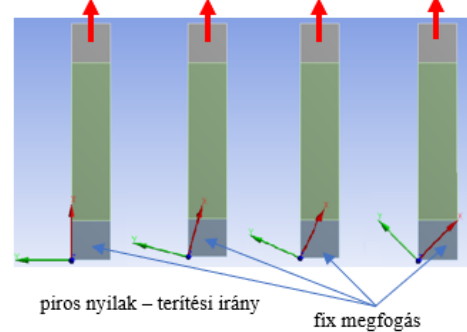
2.1.4. KOMPLEX ALKATRÉSZ MECHANIKAI SZIMULÁCIÓJA

A demonstrátor alkatrészt a kísérleti vizsgálattal megegyező módon terheltük meg a mechanikai szimulációban. A modellben

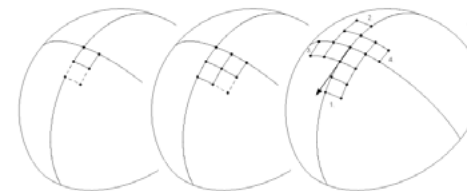
1. táblázat: Rétegszintű merevségi paraméterek

Megnevezés	Jel	Mértékegység	Mennyiség
Rugalmassági modulusz – szálirányban	E_x	MPa	12 820
Rugalmassági modulusz – szálirányra merőlegesen	E_y	MPa	4 470
Poisson-tényező	ν_{xy}	-	0,296
Síkbeli nyíró rugalmassági modulusz	G_{xy}	MPa	1 720
Rétegvastagság	h	mm	0,17

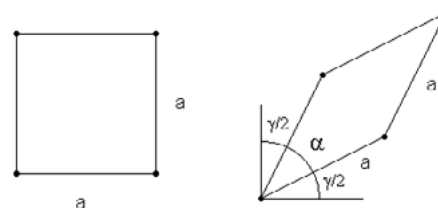
terhelés: 1 mm hosszirányú elmozdulás (piros nyilak), a reakcióerőt mérjük



3. ábra: Húzóvizsgálat szimulációval – peremfeltételek



4. ábra: Elemi cellák fektetése 3D-s felületre



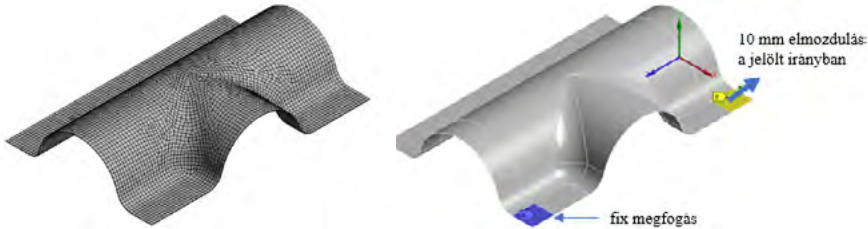
5. ábra: Elemi cella szögdeformációja

alkalmazott átlagos elemméret 4 mm volt. A kompozit anyag tulajdonságok megegyeztek a próbatestek esetében alkalmazottakkal. A mechanikai szimulációt a redőződés szimuláció eredményeinek felhasználásával, a valós szálorientációk figyelembe vételével futtattuk. A végeeselemes hálót és a peremfeltételeket a 6. ábra mutatja. A terhelés ismét elmozdulás volt és a reakcióerőt értékeltük ki.

2.2. KÍSÉRLETI VIZSGÁLATOK

A szálorientáció változás merevségre gyakorolt hatásának vizsgálatára és a szimulációs modell igazolására próbatesteket gyártottunk vákuuminfúzióval. A próbatestek mérete az ISO 527 szabvány szerinti 25 x 150 mm volt. A húzóvizsgálatot Zwick 020 szakítógépen végeztük 5 mm/min vizsgálati sebességgel. A próbatesteken végfüleket nem alkalmaztunk, a kompozit és a befozópofa közé csiszolópapírt tettünk. A vizsgálathoz 0°, 15°, 25° és 45° orientációjú darabokat alkalmaztunk, minden típusból 5-5 próbatestet mértünk.

A próbatestekhez gyártott síklap után a demonstrátor alkatrészt is legyártottunk vákuuminfúzióval. A terítési irányt a redőződés szimuláció eredménye alapján határoztuk meg. Az alkatrészt az 7. ábra mutatja.



6. ábra: Demonstrátor alkatrész mechanikai szimuláció – háló és peremfeltételek

Az alkatrész mechanikai vizsgálatát szakítógépen végeztük, a gépbe az alkatrészt a 6. ábrán szemléltetett módon fogtuk be. A vizsgálati sebesség itt is 5 mm/min volt.

3. EREDMÉNYEK

A 8. ábra foglalja össze a próbatesteken végzett mechanikai vizsgálatok és szimulációk eredményei alapján meghatározott merevségi értékeket, az erősítőrétegeket a négy különböző orientációban vizsgálva. Az ábrán narancssárga kör jelöli a mérés eredményeit, hozzá a szórásmezőket, a kék kör pedig a szimulációval számolt értékeket. A relatív szórás a 15°-os esetben 11%, a többinél 10% alatt marad, ami a vákuuminfúziós technológia és az erősítőrétegek kézi fektetése esetén kifejezetten jónak mondható. A szimulációval számolt értékek kissé túlbecsülik a merevséget, a 0°-os esetben 9%-kal. Ez a különbség az alkalmazott anyagjellemzők meghatározásának bizonytalansága miatt adódott.

A 9. ábra mutatja a redőződött hálót (draping mesh). A szabályos négyzetből álló háló 3D-s geometriára vetítve torzul, a négyzetek belső szögei változnak. A változás mértékét mutatja a skála.

Az ábrák alapján látható, hogy a redőződés szempontjából legkedvezőbb terítési irány a b) jelű, itt a szögváltozás mértékének maximuma 30–35° között van. A jelenség szemléletesebb demonstrációja miatt azonban az alkatrész gyártásánál az e) jelű terítési irányt alkalmaztuk, ahol szimmetrikusan az alsó lekerekítések mentén 40° fölötti a szögváltozás.

A szövet szögtorzulása mellett a másik lényeges tényező a referencia-orientáció, tehát az ortotrop anyagmodell referencia irányainak megváltozása (draped fiber orientation) az alkatrész különböző helyein. Ezt szemlélteti a 10. ábra.

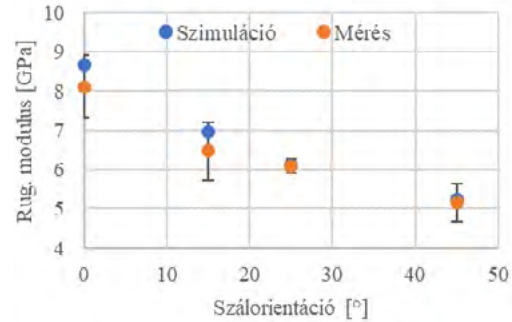
Az általunk kiválasztott helyen, a zöld nyilakkal jelölt kezdeti orientációhoz képest, a kék nyilak jelzik a gyártás – sík szövet 3D-re fektetése – utáni állapotot.

A skálázott ábrán a program az orientációváltozást a globális koordináta-rendszerben jeleníti meg, ezért az ábrán jelzett 4,9°-os maximum azt jelenti, hogy az eredeti – a henger hossz tengelyével 45°-os szöget bezáró – orientáció 40,1°-kal változott meg.

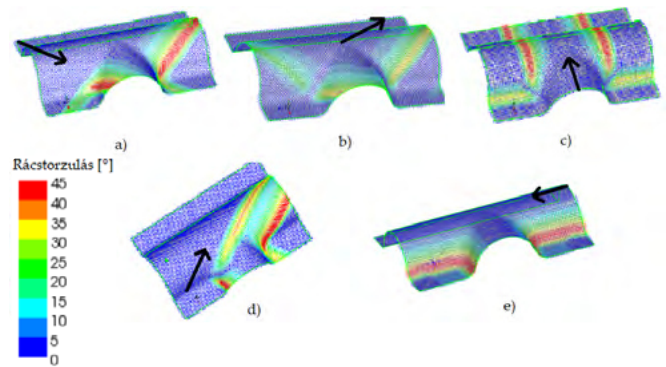
A 11. ábra mutatja a kiválasztott helyen (lásd 10. ábra) az egyes rétegekben ébredő feszültségeket szálirányban és arra merőlegesen a keresztmetszet mentén. A terhelés a 6. ábra szerinti 10 mm elmozdulás, a hozzá tartozó számított reakcióerő 183 N, ez kis igénybevételt jelent az anyagban, a feszültségek abszolútértékei alatta maradnak a tönkremenetelt jelző feszültség szintnek. Mivel a cél a merevség, a deformációs viselkedés modellezése volt, a tönkremenetel ez esetben nem képezi a vizsgálat tárgyát. A felső diagram mutatja a redőződés figyelembe vételével számolt eredményeket, az alsó a kezdeti szálorientációval számoltakat. A diagramok alapján látszik, hogy a feszültségértékek



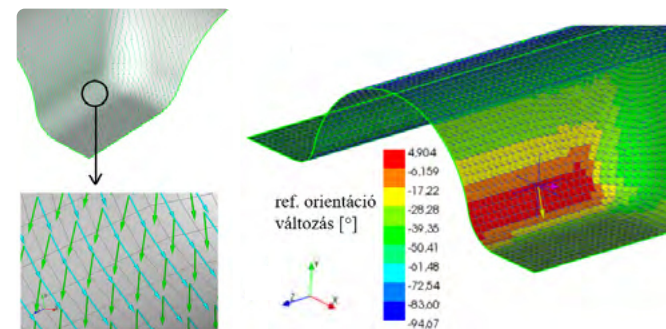
7. ábra: Demonstrátor alkatrész



8. ábra: Szálorientáció hatása a rugalmassági moduluszra



9. ábra: Rácstorzulás különböző terítési irányoknál: (a) hátsó síkfelületről, (b) a hengerek metszévonalainak metszéspontjából, (c) a rövidebb henger csúcsából, (d) a redőződés szempontjából kritikus elemről, (e) a hosszabb henger csúcspontjából indított terítés esetén. A nyilak a terítési főirányt jelölik



10. ábra: Az elemek referencia-orientációjának változása

jelentősen különböznek egymástól, a redőződés figyelembe vételével a feszültségeloszlás jellegében jelentősen módosul, ahogy a maximum értékek helye is. A felső diagramon a szálirányban értelmezett maximum feszültségérték a felső rétegben adódik, az alsón egy középső rétegben, ahol a felsőre merőlegesen helyezkednek el a szálak. Így egy kompozit alkatrész szilárdítási méretezése során a redőződés, a szálorientáció változása fontos tényező, aminek a hatása nem elhanyagolható.

A demonstrátor alkatrész merevségének kísérleti úton történő

megállapításához öt alkatrészt gyártottunk. Ezeket a szakítógépen a 6. ábra szerinti módon terheltük. Az adott peremfeltételekre vonatkozóan az alkatrész globális merevségi értékeinek átlaga 16,73 N/mm-re adódott. A szimulációval számított merevség 18,29 N/mm. A szimulációval számolt érték ~9%-kal több, ami jól korrelál a 8. ábrán bemutatott eredményekkel is, miszerint az alkalmazott anyagjellemzők meghatározásának bizonytalansága miatt a szimulációs modellben kissé túlbecsüljük a szerkezet merevségét, elsősorban szálirányban.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A munkánkban az erősítőrétegek gyártás közbeni redőződésének (draping) a mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatását vizsgáltuk egy polimer kompozit szerkezet esetében. Húzópróbatesteken és egy demonstrátor alkatrészen mechanikai vizsgálatokat végeztünk, és szimulációval is meghatároztuk a merevségi jellemzőket. Az általunk vizsgált kompozit két réteg biaxiális üvegszövet-erősítésű, telítetlen poliészter mátrixanyagú szerkezet volt.

A vákuuminfúzióval gyártott húzópróbatesteken elvégzett mérések igazolták, hogy a szálak irányának növekvő eltérése a terhelés irányától a merevség jelentős csökkenésével jár. Biaxiális erősítőszövetet vizsgálva a merevség változása értelemesen 45° eltérésnél a legjelentősebb.

A szimulációkban a kompozit szerkezetet rétegelt héjelemekkel modelleztük, homogén ortotrop anyagmodell feltételezve. A merevségi paramétereket a keverékszabályok segítségével határoztuk meg, az erősítőanyag, és a mátrixanyag adatlapi értékei és az

általunk meghatározott száltartalom alapján. A próbatesteken végzett szimulációk a szálirányban végzett vizsgálatokat illetően maximum 9%-kal túlbecsülik az anyag merevségét a méréshez képest. Ezt az alkalmazott anyagjellemzők meghatározásának bizonytalansága okozza.

Demonstrátor alkatrésznek egy fél T-idomot terveztünk, ahol a redőződés jelensége jól megfigyelhető módon jelenik meg két henger áthatásánál. A demonstrátor alkatrészen bemutattuk a terítési irány jelentőségét kinematikai redőződés szimulációs módszert alkalmazva. A mechanikai szimulációt elvégeztük a redőződés figyelembe vételével, valamint annak elhagyásával is, majd a szerkezet egy kritikus pontján bemutattuk, hogy a jelenség figyelmen kívül hagyása a rétegekben ébredő feszültségekben mekkora változást mutat. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a feszültségek nagysága és jellege jelentősen módosul a gyártás miatti szálorientáció változás elhanyagolásával, így komplex geometriájú alkatrészek mechanikai méretezésekor nem elhanyagolható a jelenség figyelembe vétele.

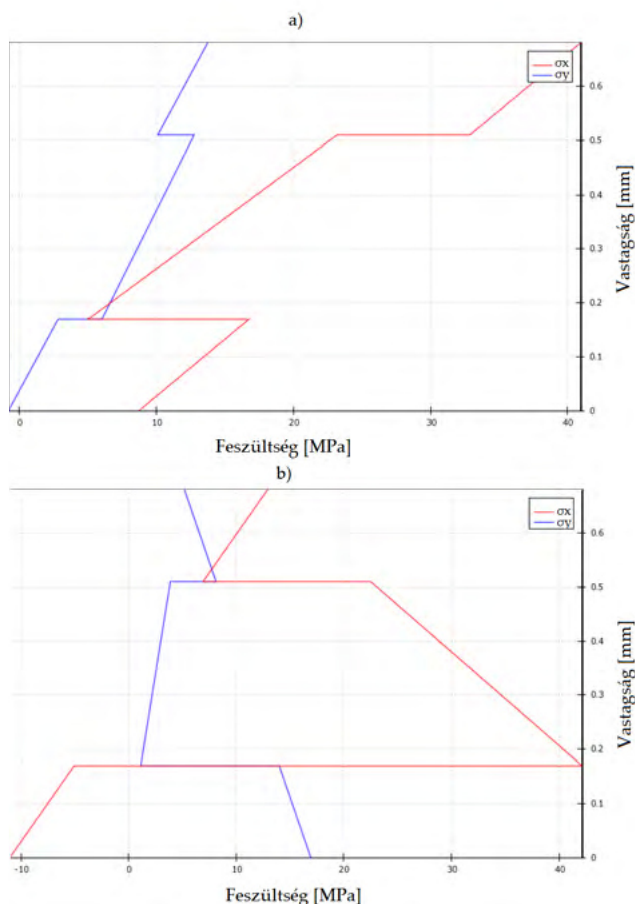
A demonstrátor alkatrészt szintén vákuuminfúzióval gyártottuk, és szakítógépen, majd szimulációval is vizsgáltuk a szerkezet globális merevségét. Az eredmények közti különbség összhangban van a próbatesteken végzett kísérleti vizsgálatok és szimulációk eredményeivel.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A projekt a Nemzeti Kutatási és Innovációs Hivatal támogatásával az NKFIH Alapból valósul meg, a projekt címe: „Polimer kompozit termékek előállítására rövid ciklusidejű, automatizált gyártástechnológia segítségével, gépjárműipari alkalmazásokra, különös tekintettel a kompozit elemek komplexitására és újrafeldolgozhatóságára”; a pályázat azonosító száma: NVKP_16-1-2016-0046. A kidolgozók köszönik a támogatást!

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Bidour, A.: Szőtt kompozit erősítő szerkezetek 3D-s deformációs tulajdonságainak elemzése, PhD értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék (2012).
- [2] Halász, M.; Tamás, P.; Gräff, J.; Szabó, L.: Computer Aided Measuring of Textile-Mechanical Parameters, Materials Science Forum, 589, 311-316 (2008).
- [3] Collier, J. R.; Collier, B. J.; O'Toole, G.; Sargand, S. M.: Drape Prediction by Means of Finite-element Analysis, The Journal of The Textile Institute, 82(1), 96-107 (1991).
- [4] Skordos, A.; Aceves, C. M.; Sutcliffe, M.: Drape Optimization in Woven Composite Manufacturing, in 5th International Conference on Inverse Problems in Engineering, Cambridge, United Kingdom (2009).
- [5] Vanclooster, K.; Lomov, S. V.; Verpoest, I.: Simulating and validating the draping of woven fiber reinforced polymer, International Journal of Material Forming, 1, 961-964 (2008).
- [6] Maynard, V.: A new approach to simulating the draping of prepreg composites manufactured by hand layup, Msc Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm (2017).
- [7] Elkington, M.; Bloom, D.; Ward, C.; Chatzimichali, A.; Potter, K.: Hand layup: understanding the manual process, Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science, 1(3), 138-151 (2015).
- [8] Hancock, S. G.; Potter, K. D.: The use of kinematic drape modelling to inform the hand lay-up of complex composite components using woven reinforcements, Composites Part A, 37(3) 413-422 (2006).
- [9] Kaufmann, M.; Zenkert, D.; Åkermo, M.: Cost/weight optimization of composite prepreg structures for best draping strategy, Composites Part A, 41(4), 464-472 (2010).
- [10] Van West, B.P.; Luby, S. C.: Fabric draping simulation in composites manufacturing Part II. Analytical methods, Journal of Advanced Materials, 28(3), 36-41 (1997).
- [11] Van der Ween, F.: Algorithms for draping fabrics on doubly-curved surfaces, International Journal of Numerical Methods in Engineering, 31, 1415-1426 (1991).
- [12] Mohammed, U.; Lekakou, C.; Bader, M. G.: Experimental studies and analysis of the draping of woven fabrics, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 31(12), 1409-1420 (2000).



11. ábra: Feszültség a kiválasztott helyen: a) redőződés figyelembevételével b) eredeti szálorientációval