Szendvics szerkezetek gyártása reaktív fröccsöntéssel

Marton G. Zs., Mezey Z.

Accepted for publication in Polimerek
Published in 2022
DOI:

MARTON GERGŐ ZSOLT[1], MEZEY ZOLTÁN TAMÁS[1]

# SZENDVICS SZERKEZETEK GYÁRTÁSA REAKTÍV FRÖCCSÖNTÉSSEL

# MANUFACTURING OF SANDWICH STRUCTURES BY REACTION INJECTION MOULDING

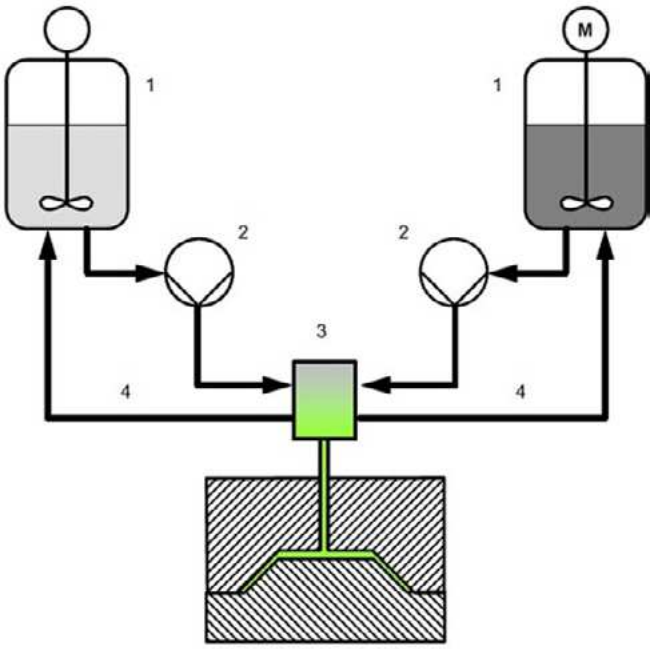
**Kutatásunk során a reaktív fröccsöntés alkalmazhatóságát vizsgáltuk szendvics szerkezetek előállítására. Különböző konstrukciókat terveztünk, majd meghatároztuk a gyártott szerkezetek egyes mechanikai jellemzőit, illetve részletesebben foglalkoztunk tönkremeneteli módjaikkal.**

**In our research, we studied the applicability of reaction injection moulding for the production of sandwich structures. We designed different constructions and determined some mechanical properties of the manufactured structures, furthermore we investigated their failure modes.**

## 1. BEVEZETÉS, SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A reaktív fröccsöntés (reaction injection moulding, RIM), mint a hőre nem lágyuló polimerek feldolgozástechnológiája, egyre elterjedtebb az iparban. Segítségével viszonylag rövid ciklusidővel állíthatók elő nagyméretű, jó mechanikai tulajdonságokkal rendelkező, akár komplex geometriájú termékek. Bár reaktív fröccsöntéssel számtalan hőre nem lágyuló alapanyag feldolgozható, a technológiához leggyakrabban felhasznált alapanyagok a poliuretánok (PUR). Előnyük, hogy tulajdonságaik tág határokon belül mozognak, így felhasználásuk rendkívül széleskörű. A RIM-mel készült termékek a következő csoportokba sorolhatók: tömör polimerek, kompozitok, habok és integrálhabok [1].

A reaktív fröccsöntés során két vagy több kis viszkozitású – általában monomer vagy oligomer – folyadékot, amelyek egymással reagálni képesek, szivattyúk segítségével továbbítanak, majd fúvókákon keresztül az erre a célra kifejlesztett nagy nyomású keverőfejbe fecskendeznek, amivel ezeket elegyítik. A reaktív keveréket azonnal zárt szerszámba injektálják, ahol a komponensekből „in situ" megy végbe a polimer képződése, illetve a térhálósodás és az alakadás is itt történik. A keverőfej recirkulációs elven működik, a felesleg anyagot visszavezetik az adagolótartályokba. A reaktív fröccsöntő gép elvi vázlatát az *1. ábra* szemlélteti. Egyszerűbb RIM rendszereknél a recirkulációs keverőfejet kisebb nyomású dinamikus keverővel vagy statikus keverőszárral helyettesítik [1-4].




△ 1. ábra: Reaktív fröccsöntő gép vázlata, 1: alapanyag-tárolók, 2: továbbító- és adagolóegység, 3: keverőfej, 4: alapanyag visszavezetése, 5: szerszám [5]

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

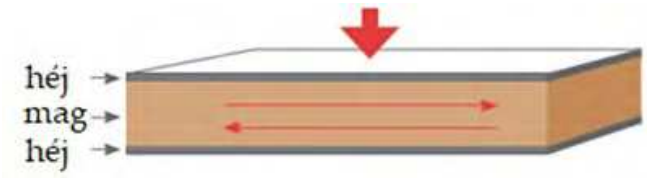
A gyártási ciklus során a befröccsöntést követheti utókitöltés (utónyomás), amely további anyagot juttat a szerszámba, ezzel kompenzálja a térfogatcsökkenést, zsugorodást. Feladata a végleges termék minőségének biztosítása. A szerszámban lejátszódó térhálósodási és alakadási folyamat befejeztével általában utóhőkezelést alkalmaznak, amelynek célja a maradó feszültségek megszüntetése, a hőállóság és a mechanikai tulajdonságok javítása [6, 7].

A reaktív fröccsöntés alkalmas kompozitok előállítására is. A kompozit anyagok reaktív fröccsöntésének léteznek különböző eljárásváltozatai az alkalmazott erősítőanyag típusa alapján. Amennyiben a reaktív keverékbe a termék szilárdságának növelése céljából erősítőanyagot (pl. rövid üvegszál) vagy töltőanyagot (pl. ásványi töltőanyag) juttatunk, akkor RRIM (Reinforced Reaction Injection Moulding) eljárásról beszélünk. További meghatározott erősítőszerkezetek alkalmazása esetén a technológiát S-RIM (Structural Reaction Injection Moulding) eljárásnak nevezzük, ennél az eljárásnál a komplex erősítő szerkezetet (pl. hosszú szál, szövet stb.) előre behelyezzük a szerszámüregbe, majd a zárt szerszámba fröccsöntjük a reaktív keveréket. Tehát az RRIM tömör polimer termék erősítő- és töltőanyag hozzáadásával történő gyártásánál használatos, míg az S-RIM klasszikus kompozitgyártási technológiának tekinthető. Az erősítés célja általában a szilárdság, a merevség, a termikus tulajdonságok és a méretstabilitás javítása [1, 8, 9].

Az S-RIM eljárás különösen nagy jelentőségű, mert kombinálja a szálerősített kompozitok előnyös tulajdonságait (pl. nagy szilárdság, rugalmassági modulusz stb.) a RIM eljárás kompozitgyártásban nagynak számító termelékenységével. Az S-RIM-nél gyakori a hosszú szálas erősítés alkalmazása. A technológia előnye, hogy a hagyományos RIM berendezésekkel és szerszámokkal működik [1, 9].

Mivel manapság a mérnöki gyakorlatban és a mindennapi életben is kiemelt figyelem hárul a könnyű, mégis merev, tehát nagy fajlagos merevséggel rendelkező szerkezetek alkalmazására, ez a RIM-mel gyártott termékek között is megmutatkozik. A merevség növelését általában bordák beiktatásával valósítják meg, amely számos konstrukciónál több szempontból is előnytelen. Hőre lágyuló polimereknél felmerülhet még a gázbefúvásos fröccsöntés, hőre nem lágyuló anyagoknál azonban ez nem lehetséges. A fajlagos merevség növelésének megvalósítására alternatívát jelenthetnek a szendvics szerkezetek [10, 11].

A szendvics szerkezetek az összetett anyagok különleges csoportját alkotják. Általános jellemzőjük, hogy két vékony, merev, jó mechanikai tulajdonságokkal rendelkező héjból és az őket elválasztó kis sűrűségű, vastagabb magból állnak, amelyek felületi adhézióval kötődnek egymáshoz. A szendvics szerkezetek lényege, hogy segítségükkel megnövelhető a keresztmetszet inerciája, ezáltal pedig a hajlítómerevség is. Fontos, hogy mindez a tömeg szignifikáns mértékű megváltozása nélkül tehető meg. A szendvics szerkezetek fő előnye tehát kiemelkedő tömegre vonatkoztatott fajlagos merevségükben és fajlagos hajlítószilárdságukban nyilvánul meg. Ezen tulajdonságaik teszik a szendvics szerkezeteket akár a laminált kompozitoknál és a hagyományos anyagoknál is vonzóbbá számos alkalmazási területen. Egy szendvics szerkezet vázlatát mutatja be a *2. ábra*. A szendvics szerkezetekben maganyagként hab-, méhsejtes-, illetve balsafa mag fordul elő széles körben. Polimer héjak esetén gyakori a szálerősítés, ezek az ún. kompozit szendvics szerkezetek. Ezeknél egyre népszerűbbek az újszerű, gyantaáramlást segítő maganyagok. Ezek jellemzően rugalmas, nemszőtt poliészter maganyagok, amelyek méhsejtes cellákból és a cellák közti gyantavezető csatornákból épülnek fel [12-14].




△ 2. ábra: Egy szendvics szerkezet felépítése [15]

## 2. SZENDVICS SZERKEZETEK TERVEZÉSE ÉS GYÁRTÁSA

Munkánk során először megterveztük az előállítani kívánt szendvics szerkezeteket. A rétegrendek meghatározásakor egy konkrét alkalmazás terhelési esetét vizsgáltuk, ahol egy 450 mm széles lemez 850 mm-es támaszközű hajlításra van igénybe véve, a terhelő erő pedig középen vonal mentén eloszló, 250 N nagyságú. Célunk a lehető legalacsonyabb felületi sűrűség mellett a lehajlás minimalizálása volt, alkalmazkodva a kereskedelmi forgalomban kapható habmag vastagságokhoz. Ezeknél a szerkezeteknél a RIM-nél kedvelt PUR héjakat, illetve PVC habmagot alkalmaztunk.

Szendvics szerkezetek tervezésekor azonban nem elegendő a konstrukció mechanikai értelemben vett megfelelőségét vizsgálni, figyelembe kell venni az esetlegesen bekövetkező tönkremenetelek lehetséges módjait is. A szendvics szerkezetek tönkremenetelei rendkívül sokfélék lehetnek, de adott igénybevételekre definiálhatók bizonyos alap tönkremenetelek. A konstrukció paramétereinek meghatározásakor arra kell törekedni, hogy adott igénybevétel hatására ne egyfajta domináns tönkremeneteli mód legyen tapasztalható, hanem többféle tönkremenetel is jelentkezzen, ezáltal elkerülhető, hogy a szerkezet valamely méretét tekintve alul- vagy túlméretezett legyen. Ehhez nyújtanak segítséget az úgynevezett tönkremeneteli mód térképek [11].

Előzetes számítások alapján a tervezett habszendvics konstrukció 10 mm vastag magból és 1 mm vastag héjakból épült fel.

A habmaggal megtervezett konstrukción kívül igyekeztünk további lehetőségeket is megvizsgálni, amelyekkel gyárthatók könnyített, merev szerkezetek hőre nem lágyuló polimer alapanyag felhasználásával. Alternatívát jelentettek a nemszőtt textil maganyagok, amelyek a gyantaáramlást is elősegítik. A vizsgálatokhoz választott maganyag a Lantor Composites Soric termékcsaládjából az XF (eXtra Flow) típus, mivel ez biztosítja a legnagyobb mértékű tömegcsökkentést, és leginkább elősegíti a gyanta gyors áramlását, ami a RIM-nél alkalmazott rendkívül rövid fazékidejű anyagok esetén fontos szerepet tölt be [13].

Ezen konstrukcióknál 3 mm-es magvastagság mellett 1,5 mm vastag héjakat terveztünk. A maganyag felhasználásával kompozit szendvics szerkezeteket is gyártottunk, a PUR héjakat 1-1,

illetve 2-2 réteg üvegszövettel erősítettük.

A próbatestek gyártása egy Dekumed Unidos 200 típusú reaktív fröccsöntő géppel történt, amely a poliuretánok mellett epoxi-, akril- és szilikongyanták feldolgozására is használható. A berendezés alkalmas az egyik komponens fűtésére, keverési aránya manuálisan szabályozható. A komponensek megfelelő keveredését egy dinamikus keverőpisztoly biztosította.

A mintagyártást kompozit prototípusszerszámban, a héj közepén történő egyoldali meglövéssel, központosított gáttal végeztük. A maganyagot távtartók segítségével pozícionáltuk a szerszámon belül, és biztosítottuk, hogy a gyantafront a maganyag mindkét oldalán egyenletesen terjedhessen. További technológiafejlesztési lehetőségként a magon egymástól és a mag széleitől 25 mm távolságra 2,5 mm átmérőjű furatokat hoztunk létre. Ezáltal biztosítottuk a nyomáskiegyenlítődést, a jobb gyantaáramlást, az egyenletesebb héjvastagságot és kitöltést a gáttal ellentétes oldalon, továbbá csökkenthetővé vált a gyantadúsulás a gát környékén. A reaktív fröccsöntési ciklust követően a lemezeket 60 °C-on 4 órás utóhőkezelésnek vetettük alá.

## 3. FELHASZNÁLT ALAPANYAGOK

A szendvics szerkezetek előállításához Sikaaxson Biresin RG53-FR típusú PUR alapanyagot alkalmaztunk, amelynek tulajdonságait az *1. táblázatban* foglaltuk össze.

1. táblázat: A PUR alapanyag jellemzői [16]

| Jellemző | Érték |
|---|---|
| **Sűrűség [g/cm³]** | 1,27 |
| **Fazékidő [s]** | 75 |
| **Rug. modulusz [MPa]** | 2200 |
| **Hajlítószilárdság [MPa]** | 70 |

Az egyes szerkezetek maganyagaként szolgáló DIVINYCEL H80 elnevezésű PVC hab jellemzőit a *2. táblázat* tartalmazza.

2. táblázat: A PVC maganyag jellemzői [17]

| Jellemző | Érték |
|---|---|
| **Sűrűség [kg/m³]** | 80 |
| **Nyírószilárdság [MPa]** | 1,15 |
| **Nyíró rug. mod. [GPa]** | 0,027 |

Az alkalmazott 3 mm vastag gyantaáramlást segítő mag típusa Lantor Soric XF3. A kompozit szendvics szerkezetekhez erősítőanyagként 310 g/m² felületi sűrűségű üveg rovingszövetet használtunk, amely a Kelteks RTN 310 g/m² elnevezésű terméke.

## 4. VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

Elsőként a habmagot tartalmazó szendvics szerkezeteket vizsgáltuk. 240 mm támaszközű hárompontos hajlítással végeztünk méréseket 25 mm széles próbatesteken. Mivel ez a mérési elrendezés a koncentrált terhelés miatt szendvics szerkezeteknél a mag alacsony nyomószilárdsága miatt korlátozottan alkalmas, ezért a hárompontos hajlítást a látszólagos rugalmassági modulusz és ezáltal az egyenértékű hajlítómerevség meghatározásához használtuk. A tönkremenetelt azonos geometriájú próbatesteken, azonos alátámasztással, 120 mm terhelési köz mellett, négypontos hajlítással vizsgáltuk. A próbatestek kialakítása, illetve a vizsgálatok elvégzése és kiértékelése során az ASTM C393 szabvány előírásait követtük. A szabvány összefüggéseinek felhasználásával meghatároztuk továbbá a próbatestek hajlítószilárdságát mind a hárompontos, mind a négypontos hajlítás esetében [18].

A gyantaáramlást segítő maganyagot tartalmazó szendvics szerkezetek esetében az MSZ EN ISO 178 szabvány alapján hárompontos, illetve az ASTM D7264 szabványnak megfelelően négypontos hajlítóvizsgálatokat végeztünk. Előbbi vizsgálatoknál a vastagság tizenhatszorosát vettük fel alátámasztási távolságnak, míg utóbbi kísérleteket 240 mm támaszközzel és 120 mm terhelési közzel hajtottuk végre. A hárompontos hajlítóvizsgálatok adatsoraiból kiszámítottuk a látszólagos rugalmassági modulusz értékét, ennek felhasználásával pedig az egyes konstrukciók hajlítómerevségét is. Emellett mindkét mérési elrendezésben meghatároztuk a hajlítószilárdság értékét [19, 20].

A hajlítóvizsgálatokhoz Zwick Z020 típusú univerzális szakítógépet alkalmaztunk. A kísérleteket 10 mm/min vizsgálati sebességgel és 2 N előterheléssel hajtottuk végre. Emellett tömegméréssel meghatároztuk az egyes konstrukciók felületi sűrűségét.

## 5. EREDMÉNYEK

A hajlítóvizsgálatok eredményeiből meghatároztuk az egyes szerkezetek hajlítószilárdságát. A hárompontos hajlítóvizsgálatok során a gyantaáramlást segítő maggal készült, de szálerősítést nem tartalmazó próbatesteknél nem következett be tönkremenetel a szabványban előírt, az alátámasztási távolság 10%-ával megegyező határlehajlás elérését megelőzően, ezért ebben az esetben határhajlító feszültséget számoltunk. A hárompontos hajlítóvizsgálattal mért adatsorokból meghatározásra került a szerkezetek látszólagos hajlító rugalmassági modulusza. Ezt a szabványnak megfelelően a 0,05 [%] és 0,25 [%] értékű nyúlásokhoz tartozó lehajlások felhasználásával húrmoduluszként számítottuk ki [18-20].

A három-, illetve négypontos elrendezésben meghatározott hajlítószilárdság, továbbá a hajlító rugalmassági modulusz átlagos értékeit és szórását a *3. táblázat* tartalmazza. A táblázat adataiból látható, hogy a kompozit szendvics szerkezetek kiemelkednek hajlítószilárdság tekintetében. A hárompontos elrendezésben meghatározott hajlítószilárdság értékek alapján megállapítottuk, hogy a 250 N értékű próbaterhelésnek mindegyik konstrukció megfelel. A rugalmassági modulusz tekintetében szintén a kompozit szendvics szerkezeteknél jelentkezett a legmagasabb érték,

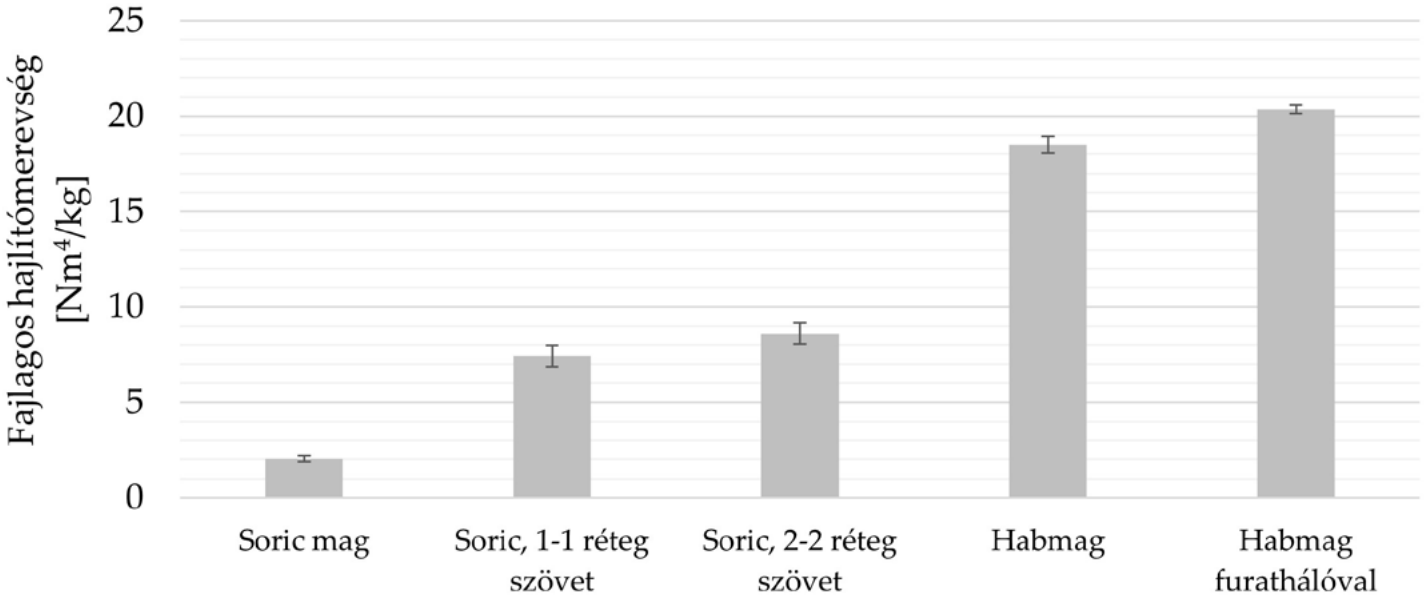
3. táblázat: A hajlítószilárdság – a csillaggal jelölt esetben határhajlító feszültség – átlagos értéke

| Konstrukció | $\sigma_{bh,3pontos}$ [MPa] | | $\sigma_{bh,4pontos}$ [MPa] | | $E_h$ [MPa] | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Átlag | Szórás | Átlag | Szórás | Átlag | Szórás |
| **Soric mag** | 21,28* | 0,94* | 14,54 | 0,59 | 1040,4 | 82,3 |
| **Soric mag és 1-1 erősítőréteg** | 62,12 | 6,55 | 44,61 | 4,76 | 4074,5 | 302,8 |
| **Soric mag és 2-2 erősítőréteg** | 68,63 | 4,33 | 48,66 | 5,90 | 5229,2 | 338,9 |
| **Habmag** | 34,25 | 1,99 | 34,96 | 0,23 | 977,1 | 23,8 |
| **Habmag furathálóval** | 33,90 | 1,46 | 35,80 | 1,25 | 1145,1 | 12,7 |

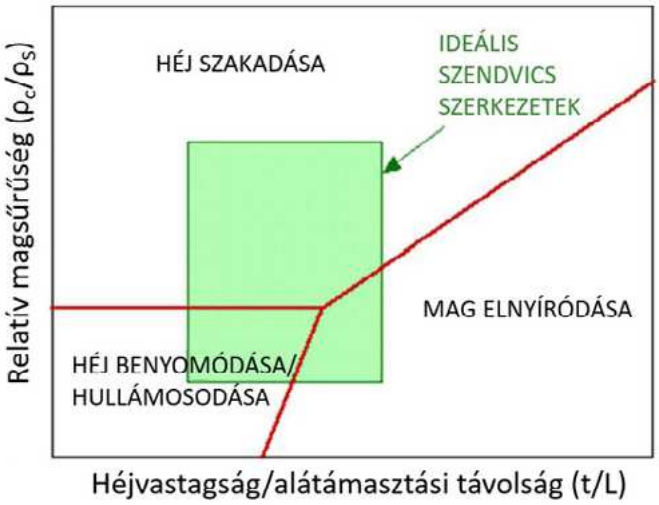
míg a másik három konstrukció esetében nem tapasztaltunk szignifikáns különbséget.

Az átlagos hajlító rugalmassági modulusz és a keresztmetszeti másodrendű nyomaték ismeretében kiszámítottuk a különböző konstrukciók hajlítómerevségét. Mivel azonban szendvics szerkezetek esetében a fajlagos jellemzők bírnak kiemelt jelentőséggel, a felületi sűrűség meghatározását követően a fajlagos hajlítómerevség értékeit hasonlítottuk össze. A *3. ábra* szemlélteti a felületi sűrűségre fajlagosított hajlítómerevség átlagos értékét és szórását az egyes konstrukcióknál. Látható, hogy a habmagot tartalmazó szendvics szerkezetek ezen jellemző tekintetében kiemelkednek. Ezek közül is a 2,5 mm-es furathálóval ellátott maggal gyártott konstrukció ér el megközelítőleg 10%-kal magasabb értéket, ami igazolja az általunk alkalmazott technológiafejlesztési lépés helyességét. A gyantaáramlást segítő maganyagot tartalmazó szerkezetek esetében a szálerősítés számottevő hatást gyakorol a hajlítómerevségre, de még a kompozit szendvics szerkezetek fajlagos hajlítómerevsége is jelentősen elmarad a habmagot tartalmazó konstrukcióknál tapasztalható értékektől. Ennek oka, hogy a kompozit szendvics szerkezetek nagyobb rugalmassági modulusza nem képes ellensúlyozni a lényegesen kisebb keresztmetszeti inerciát.

Végül kvalitatív módon vizsgáltuk a klasszikusnak tekinthető, habmagot tartalmazó szendvics szerkezetek tönkremeneteleit. Várakozásainknak megfelelően a hárompontos hajlítóvizsgálat minden esetben lokális tönkremenetelt okozott, elsősorban lokális benyomódás, néhány esetben lokális törés következett be, ezért a tönkremeneteli módok vizsgálata négypontos hajlítással történt. Egy hajlításra vonatkozó, általános tönkremeneteli mód térképet szemléltet a *4. ábra.* A diagram tengelyein a mag héjsűrűségre vonatkoztatott relatív sűrűsége, illetve a héjvastagságnak és a hajlítás alátámasztási távolságának aránya szerepel. Hajlítás, mint igénybevétel esetén három alaptönkremenetel definiálható: a héj szakadása, a héj hullámosodása, illetve a mag elnyíródása. A három tönkremenetel mindegyike egy területet jelent a diagramon, az optimális szerkezetek pedig ezek találkozásánál helyezkednek el.




△ 3. ábra: Az egyes szerkezetek felületi sűrűségre fajlagosított hajlítómerevségének átlaga és szórása




△ 4. ábra: Hajlításra vonatkozó tönkremeneteli mód térkép [21]

Azt tapasztaltuk, hogy mindhárom, hajlítás hatására bekövetkező alaptönkremenetel jelentkezett, ami arra utal, hogy egyik paraméter tekintetében sem túlméretezett a szerkezet, hanem az optimális konstrukciót közelíti az alkalmazott igénybevétel esetén. A szerkezetek egy tönkremeneteli mód térképen megközelítőleg a három zóna találkozásánál helyezkednének el, ahová a szendvics szerkezeteket tervezik.

## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

Az eredményeket összefoglalva kijelenthető, hogy reaktív fröcscsöntéssel előállíthatók az általunk felvett terhelési esetnek megfelelő szendvics szerkezetek. A gyantaáramlást segítő Soric maggal gyártott, szendvicsszerű szerkezetekkel szálerősítés esetén a habmagból és PUR héjakból felépülő konstrukciókhoz képest lényegesen nagyobb hajlítószilárdság és hajlító rugalmassági modulusz érhető el. A szendvics szerkezetek esetében legfontosabbnak mondható jellemző, a fajlagos hajlítómerevség tekintetében azonban utóbbiak emelkednek ki. A klasszikusnak tekinthető, habmagot tartalmazó szendvics szerkezeteknél mindhárom, hajlítás esetén definiálható alaptönkremeneteli mód előfordult, ez alapján kijelenthető, hogy a konstrukciók paraméterei megfelelnek a szendvics szerkezetek tervezésére vonatkozó irányelveknek és az optimum közelében vannak.

IRODALOMJEGYZÉK

[ 1 ] Rosato, D. V.; Rosato, D. V.; Rosato, M. V.: Plastic Product Material and Process Selection Handbook, Elsevier Science and Technology Books, Oxford (2004).

[ 2 ] Czvikovszky, T.; Nagy, P.; Gaál, J.: A polimertechnika alapjai, Műegyetemi Kiadó, Budapest (2000).

[ 3 ] Koltzenburg, S.; Maskos, M.; Nuyken, O.: Polymere: Synthese, Eigenschaften und Anwendungen, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg (2014).

[ 4 ] Lee, L. J.: Polyurethane reaction injection molding: process, materials, properties, Rubber chemistry and Technology, 53, 542-599 (1980).

[ 5 ] Bonnet, M.: Kunststofftechnik, Grundlagen, Verarbeitung, Werkstoffauswahl und Fallbeispiele, Springer Fachmedien, Wiesbaden (2016).

[ 6 ] Muc, A.; Saj, P.: Optimization of the reactive injection moulding process, Structural and Multidisciplinary Optimization, 27, 110–119 (2004).

[ 7 ] Romeo RIM: Romeo RIM Design Guide, https://www.romeorim.com/wp-content/uploads/2017/08/Design-Guide-8.25.17-R1.pdf (2021.11.28.).

[ 8 ] Eyerer, P.; Hirth, T.; Elsner, P.: Polymer Engineering, Technologien und Praxis, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg (2008).

[ 9 ] Eckler, J. H.; Wilkinson, T. C.: Processing and designing parts using structural reaction injection molding, Journal of Materials Shaping Technology, 5, 17–21 (1987).

[ 10 ] Macosko, C. W.: RIM, fundamentals of reaction injection molding, Carl Hanser Verlag, München (1989).

[ 11 ] Zenkert, D.: The Handbook of Sandwich Construction. Engineering Materials Advisory Services, Cradley Heath (1997).

[ 12 ] Altenbach, H.; Altenbach, J.; Kissing, W.: Mechanics of composite materials, Springer Nature, Szingapúr (2018).

[ 13 ] Stewart, R.: Sandwich composites excel at cost-effective, lightweight structures, Reinforced Plastics, 55, 27-31 (2011).

[ 14 ] Jacob, A.: Sandwich structures on track for continued growth, Reinforced Plastics, 46, 14-19 (2002).

[ 15 ] https://www.diabgroup.com/en-GB/Knowledge/Sandwich-technology/Basics-of-sandwich-technology (2021.12.02.).

[ 16 ] Sika Group, Technikai adatlap: Biresin RG53 FR, https://industry.sika.com/en/home.html (2021.09.27.).

[ 17 ] Diab Group, Technikai adatlap: DIVINYCEL H80, https://www.diabgroup.com/ (2021.10.02.).

[ 18 ] ASTM C393-00: Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions (2000).

[ 19 ] MSZ EN ISO 178: Műanyagok. A hajlítási tulajdonságok meghatározása (2019).

[ 20 ] ASTM D7264-07: Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials (2007).

[ 21 ] http://www.mse.mtu.edu/~drjohn/my4150/sandwich/sp3.html (2019.11.21.)