

Gyártástechnológiai fejlesztés nagy komplexitású, hőre lágyuló mátrixú kompozit előállítására

Semperger O. V., Óri Z., Hegedűs G., Molnár P.

Accepted for publication in Polimerek

Published in 2018

DOI:

Gyártástechnológiai fejlesztés nagy komplexitású, hőre lágyuló mátrixú kompozit előállítására

Semperger Orsolya Viktória^{1,2}, Őri Zoltán¹, Hegedűs Gergely^{1,2}, Molnár Péter¹

¹evopro Systems Engineering Kft.

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

Munkánkban egy konzorciumi projekt keretében megvalósuló, hőre lágyuló mátrixú kompozit gyártására szolgáló technológiai fejlesztést, a hozzá kapcsolódó T-RTM eljárást és az aktuális kompozit gyártástechnológiai fejlesztési irányokat mutatjuk be.

BEVEZETÉS

A szálerősítésű polimer kompozit az egyik leggyakrabban használt szerkezeti anyag a nagy teljesítményű műszaki alkalmazásokhoz. A kompozit ipar legnagyobb mennyiségben üvegszálát használ erősítő anyagként, amelynek mennyisége 2015-ben több mint egymillió tonna volt Európában. A második leggyakrabban használt erősítő anyag a szénszál, 2015-ben a globális ipari szükséglet körülbelül 58 000 tonna volt. A teljes termelésnek közel egyharmadát a járműipar használja fel, amelybe beleértendők a vízi-, földi-, légi- és űrközlekedés eszközei. A termelés további egyharmad része az építőipar szükségletét látja el. A felhasznált alapanyagok mennyisége mellett, az erősítő anyagtól függetlenül, a kompozit ipar is folyamatosan növekszik 2010 óta. A szénszál kompozitok piaci becsült növekedése évente 10–13%, a növekvő felhasználás hajtóereje az űr- és az autóipar. A szál erősítésű kompozitok alkalmazásával könnyű szerkezetek készíthetők, ez kulcsfontosságú az üzemanyag hatékony felhasználása érdekében. A gyártási technológiák kutatásával és fejlesztésével a kompozitok iránti kereslet a gépjárműipar növekvő felhasználása miatt tovább fog nőni [1]. A kompozit ipar technológiai kutatásainak és fejlesztéseinek köszönhetően a gépjárműiparban egyre több fémkomponens helyettesíthető különböző gyártási technikákkal előállított (pl. sheet molding compound – SMC, bulk molding compound – BMC, resin transfer molding – RTM), magas minőségű kompozit elemekkel. A hőre lágyuló mátrixú kompozit technológiák a piac leggyorsabban növekvő szegmense [2]. Ennek a növekedésnek is az autóipar a legfontosabb hajtóereje, mivel az újrafeldolgozhatóságon, a hegeszthetőségen és a mátrixanyag sajátos mechanikai tulajdonságain (pl. a dinamikus igénybevétellel szembeni jobb ellenállás, szívósság) túl a hőre lágyuló mátrix lehetőséget teremt a már jól ismert fröccsöntési technikákkal való kombinálásra is. A hőre lágyuló mátrixú, folytonos erősítő struktúrájú kompozitok előnyös tulajdonságai készítetik a rövid ciklusidejű, magas fokon automatizálható gyártástechnológiák kifejlesztését.

HŐRE LÁGYULÓ MÁTRIXÚ KOMPOZITOK

A hőre lágyuló polimerek egyik legjellemzőbb feldolgozási módja a fröccsöntés. Fröccsöntéssel készíthető aprított szálat tartalmazó kompozit alkatrész is, de ebben az esetben a jellemzően rövid szálak orientációja kevésbé irányítható. Ezzel a technológiával korlátozott erősítés érhető el, ám a ciklusidő gyorsasága miatt a technológia alkalmas burkolatok, illetve műszaki célú, nagy méretpontosságú alkatrészek gyártására. Folytonos erősítő struktúrájú kompozit termék előállítását gátolja a fröccsöntésnél az ömledék állapotban lévő polimer túlságosan nagy viszkozitása (10–100 Pa·s), ami miatt az erősítő szálak átítatása nem jöhet létre.

A hőre nem lágyuló mátrixú kompozitok préseléses BMC és SMC gyártástechnológiájához hasonlítható eljárás kiindulási félkész terméke hőre lágyuló mátrix esetén az úgynevezett organo sheet lemez, azzal a lényeges különbséggel, hogy amíg az SMC, BMC anyagoknál az erősítő jellemzően hosszú szál, orientálatlan formában, addig az organo sheetek szinte minden esetben szövetek alapú erősítőrendszerrel rendelkeznek. Ezen folytonos erősítő struktúrájú, hőre lágyuló mátrixú lemez előtermékek a gyártás során sajtolással, fűtött prészsámok között nyerik el végső geometriájukat [3]. Jellemzően korábban fröccsöntéssel készült, rövidszál elemeket cserélnek



1. ábra. Légzsák modul [4].

le folytonos szállal erősített a jobb mechanikai tulajdonságok elérése érdekében. Ezen hőre lágyuló mátrixú kompozit termékekre fröccsöntéssel a következő lépésben akár bordákat is ki lehet alakítani. Erre példa az 1. ábrán látható légszak modul. Az új technológiával 30%-os tömegcsökkenést értek el a jól megtervezett erősítőstruktúrának köszönhetően. A merevítőbordákat a korábbi technológiának megfelelően rövid szákkal töltött poliamid fröccsöntésével készítették. A technológia előnye a reprodukálhatóság, a rövid ciklusidő, a folytonos szákkal erősített héjszerkezet jobb mechanikai tulajdonsága, de a késztermék geometriája, az erősítő textília drapírozhatósága miatt korlátozott és nehezen megoldható egy alkatrészben belül a különböző rétegrendek alkalmazása. A technológia további hátránya, hogy az eddigi egy gyártási lépés helyett kettőre van szükség, ami a gyártási költséget növeli [4].

T-RTM GYÁRTÁSTECHNOLÓGIA

Folytonos szálal erősítésű, hőre lágyuló mátrixú kompozitok gyárthatók reaktív módon, in-situ polimerizációval is. A reaktív kompozitgyártási folyamat (T-RTM – thermoplastic resin transfer molding) során a polimer monomerje, esetleg oligomerje itatja át az erősítő struktúrát, majd polimerizálódik a hozzáadott katalizátor és aktivátor hatására. Több polimer eltérő módon történő feldolgozására van laboratóriumi példa [5], amely közül a poliamidok (PA6 és PA12) reaktív feldolgozása igényli a legkisebb feldolgozási hőmérsékletet és a legalacsonyabb nyomást [6]. Több kutatócsoport [7–8] kísérleti eredményeivel is alátámasztható, hogy az eljárás alkalmas kiváló mechanikai tulajdonságokkal rendelkező, poliamid mátrixú kompozit alkatrészek előállítására. Ezen reaktív feldolgozás alapanyaga az ϵ -kapolaktám, amely ömledék állapotban kis viszkozitással ($3\text{--}5 \cdot 10^{-3}$ Pa·s) rendelkezik [9], így kiválóan

alkalmas a folytonos erősítő struktúra átítatására. A kaprolaktám ($C_6H_{11}NO$), vagy más néven ϵ -kapolaktám, a laktámok közé tartozó szerves vegyület. Szintelen, kristályos anyag, olvadáspontja $68^\circ C$ és jó nedvszívó tulajdonsággal rendelkezik, ezért nagy figyelmet kell fordítani a környezeti nedvességtől elzárt tárolására.

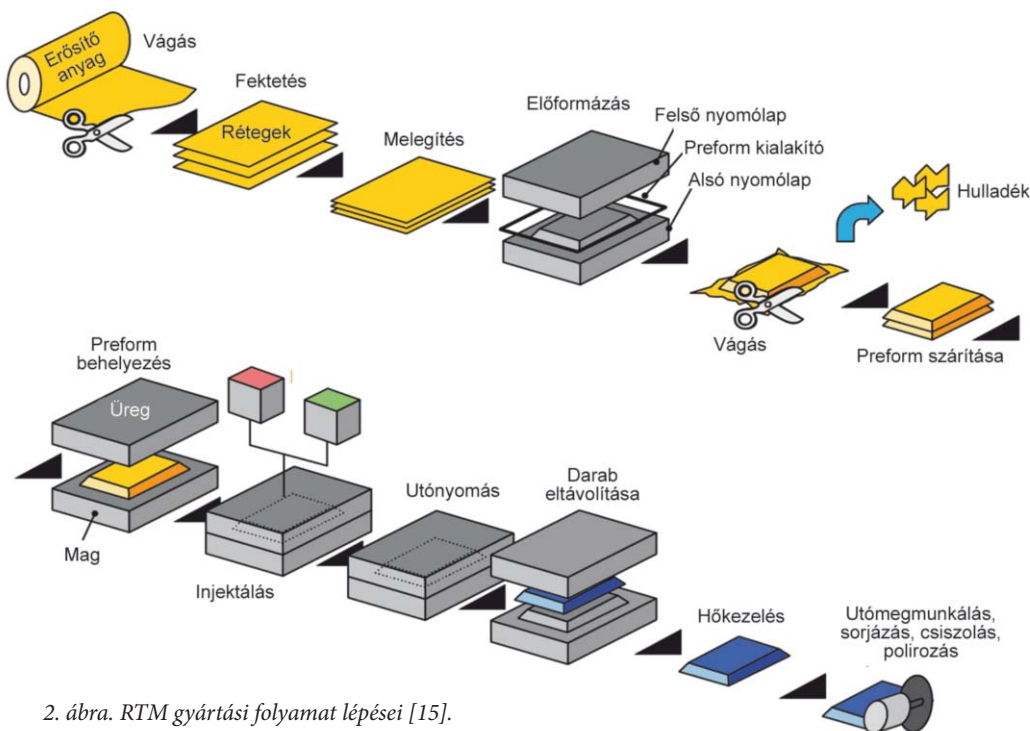
T-RTM GYÁRTÁSTECHNOLÓGIA LÉPÉSEI

Több ipari szereplő kínál megoldást a T-RTM technológiát kiszolgáló berendezésekre (szerszámhordozó prés, adagoló egység, keverő fej), jellemzően a korábban kifejlesztett eljárásokhoz (pl. RTM) alkalmazott egységek átalakításával [10–14]. Ezen berendezések egy sorba integrálása lehetővé teszi, hogy folytonos szállal erősített, hőre lágyuló mátrixú, utómegmunkálás nélküli kompozit terméket hozzunk létre rövid ciklusidővel, a kor kívánalmainak megfelelő automatizáltsággal. A T-RTM az iparban már az 1980-as évek óta használt RTM technológiára épül. RTM technológiával hőre nem lágyuló mátrixú kompozit termékek állíthatók elő, amelyek jellemző mátrix anyaga az epoxi, poliészter és vinilészter gyanta [15]. A T-RTM folyamat lépései is nagymértékben hasonlíthatnak az RTM technológia gyártási lépéseéhez (2. ábra), amely technológiára már kiviteleztek teljesen automatizált gyártósort. Az első ilyen automatizált RTM gyártósort a COMPOSITE TECHNOLOGY CENTRE GMBH fejlesztette az Airbus repülőgépek kisebb alkatrészeinek gyártására. A cél az volt, hogy gyorsabban, több terméket gyártva, a szigorú repülőgép ipari követelmények szintjén kevesebb selejtet gyártsanak. Egy ilyen automatizált gyártósor látható a 3. ábrán.

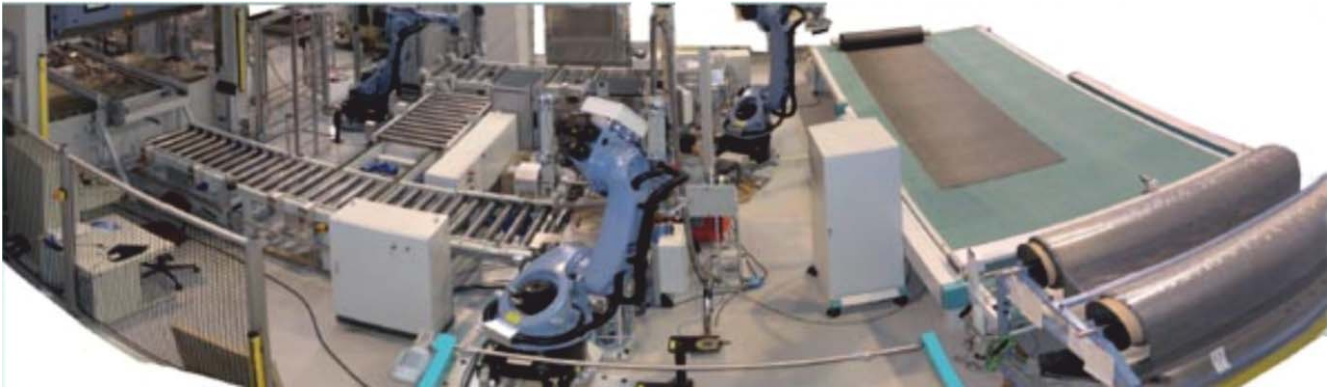
Az automatizált RTM gyártósor elején egy revolveres automata tekercsadagoló-berendezés tekeri le a megfelelő mennyiségű szövetet egy számítógép vezérelt vágóberendezés asztalára.

Egy mozgó kés a szövetet elvágja, majd megkezdődik az egyes rétegek geometriáinak kivágása. A berendezés mellett elhelyezkedő robotkar vákuumos tappancaival fogja meg a szövetdarabokat és helyezi egymásra a rétegrendnek megfelelő sorrendben (4. ábra).

Az így összekészített „csomagokat” görgős szállítószalag juttatja az előformázó egységbe. Az előformázás megkezdése előtt mikrohullámú sugarakra érzékeny binder (kötő)anyagot juttatnak a szövetre. A binder



2. ábra. RTM gyártási folyamat lépései [15].



3. ábra. Automatizált RTM gyártósor [16].



4. ábra. Robotkar pakol a CNC vezérelt vágóasztalról [17].

anyag aktiválására 12 kW teljesítményű mikrohullámú, vákuumos kemencét használnak. A vákuum a binder nedvességtartalmának gyorsabb eltávolítása érdekében szükséges. Az előforma kialakítása présben történik. Az elkészült előformát egy robotkar, szintén vákuumos tappancsok segítségével, távolítja el a szerszámból és helyezi egy futószalagra, amely az RTM szerszámhoz szállítja. A kétoldalas, zárt szerszámot minden egyes ciklus után eltávolítják a présből, hogy kitisztítsák és formaleválasztóval kezeljék. Az előformák is még a présen kívül kerülnek bele. Az előforma és a termék mozgását, valamint a tisztítást egy harmadik robotkar végzi, amely a műveletek közt automatikusan szerszámot cserél. A bemutatott technológiával 5800 darab terméket gyártottak évente, ami 30–40 perces ciklusidőt jelent az alkatrész méretétől függően [16]. A közelmúltban megjelent Fast RTM technológiával már akár 2–5 perces ciklusidővel is gyárthatók a hőre nem lágyuló mátrixú kompozit termékek [17].

Az RTM technológia egyes lépéseinek megfelelői megjelennek az automatizált T-RTM gyártósorban is, így ez az eljárás is a 2D-s erősítőanyag méretre vágásával kezdődhet. Ezután a kivágott szöveteket egymásra fektetve kialakítható a termék mechanikai igénybevételétől függően előre megtervezett rétegrendje. A rétegek között kötőanyaggal biztosítható később az előformázott erősítő anyag geometriájának rögzítése, de ügyelni kell arra, hogy a polimerizációt ez a kötőanyag ne gátolja. Fontos továbbá, hogy az erősítő szövethez olyan felületkezelést választunk, ami a kialakult poliamiddal megfelelő kapcsolatot létesít, biztosítva a jó tapadást, és amit a kaprolaktám jól nedvesít. A rétegek felmelegítése után az erősítőanyag egy előformázó présbe kerül, ahol nyomás és hűtés segítségével létrehoz-

ható a végtermék geometriáját megközelítő alakot. Préselés után a felesleges anyagrészeket, túllógásokat az előformált erősítő anyagról el kell távolítani [15]. Az így kapott előformát (preform) a fűtött szerszámok közé kell fektetni. Az adagoló berendezés a polimerizációhoz szükséges aktivátort és katalizátort a kaprolaktámmal külön tartályban összekeveri, és az injektálásig 80–90 °C-on tárolja, a nedvességre való érzékenysége miatt, a környezeti levegőtől elzárva. Ilyen hőmérsékleten az olvadt alapanyagok viszkozitása a vízéhez hasonló. Összekeverésük közvetlenül a szerszám előtt történik 100–140 °C-on, ekkor indul meg a polimerizációs folyamat (5. ábra). Ezután a keverék a 140–170 °C-os zárt, nitrogénnel töltött vagy vákuumozott szerszámfelek közé vezethető. A szerszámokban a polimerizáció hatására kialakul a poliamid 6 mátrix. A folyamat a poliamid olvadáspontja alatt megy végbe, ezért a termék hűtés nélkül is eltávolítható a szerszámból. A polimerizáció sebességét befolyásolja a katalizátor és az aktivátor

típusa és mennyisége, valamint a hőmérséklet, de akár 3–5 perces ciklusidő is elérhető a technológiai paraméterek helyes megválasztásával [3]. A technológia során az erősítőanyagot a szabad levegőtől nem lehet elzárni, ami hatással van a szövet nedvességtartalmára. Ez a nedvesség akadályozhatja a kaprolaktám polimerizációját, ami miatt szükséges az erősítőanyag nedvességtartalmának monitorozása, és ennek hatásának feltérképezése a végtermék mechanikai tulajdonságaira. Az RTM eljárással szemben az eltávolított terméket nem szük-

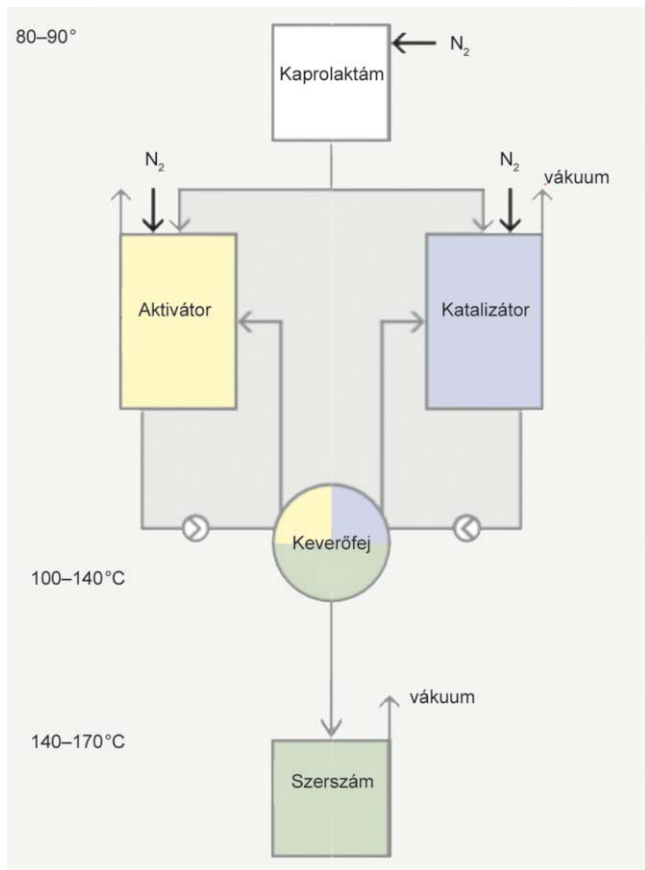
séges utóhőkezelni, a technológiai paramétereiktől függően az utómegmunkálás a termék lehűlése után végrehajtható [18, 3].

IPARI FELHASZNÁLÁS

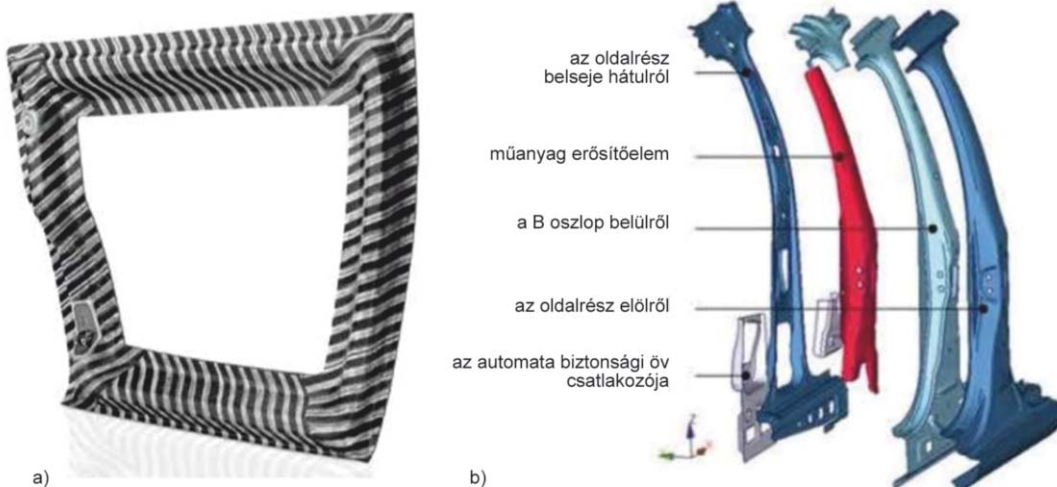
Az autógyártásban már megjelentek T-RTM technológiával gyártott alkatrészek. Elsősorban sport- és versenyautókba, valamint elektromos hajtáslánccal szerelt járművekbe szereltek ilyen alkatrészeket. Szériában először a Roding Roadster R1 típusú autó tetővázát készítették T-RTM technológiával (6. ábra). Mátrixként PA6-ot, erősítőanyagként üvegszál-szénszál hibridet használtak. Az alkatrész fejlesztése során sikerült elérni a 70%-os száltartalmat, amivel igen jó minőségű és kis tömegű termékek gyárthatók [19]. Tendencia az autógyártásban, hogy az eddig RTM technológiával gyártott, hőre nem lágyuló alkatrészeket cserélik le hőre lágyuló mátrixú alkatrészekre, a már korábban említett jó tulajdonságaik miatt. Erre példa a VOLKSWAGEN wolfsburgi kutatása, amely során RTM szerszámot alakítottak T-RTM technológiához, hogy a B-oszlop belső merevítését hőre lágyuló anyagból készíthessék. A ráfröcsöntés lehetősége miatt komplexebb, merevebb termék állítható elő azonos tömeg mellett [20].

KOMPOZIT GYÁRTÁSTECHNOLÓGIA FEJLESZTÉSI IRÁNYAI

A korábban említettekkel összhangban a legújabb fejlesztési irányokban megjelenő célpont az autógyártás. Mint minden évben, idén is megrendezésre került március 6. és 8. között Párizsban a kompozitokkal foglalkozó iparágak világiállítása, a JEC 2018. A kiállításon kiemelt területet biztosítanak az egyes kiállítóknak az újdonságok bemutatására a szakmai közönség felé. Ezen területek alapvetően 5 fő kategóriát ölelnek át (Make it real planet – ipari formatervezéshez kapcsolódó újdonságok, alkotások; Composites in action – gyártástechnológia; Aero planet – repülőgép/űrrepülőgép ipar; Building planet – építőipar; Auto planet – autógyártás), ahol bemutatják az egyes iparágak fejlesztési irányait és az azokban elért új eredményeket. Az újdonságok és eredmények egyértelműen azt az irányt mutatják, hogy az egyes gyártók töreked-



5. ábra. A T-RTM injektálás folyamatábrája [18].



6. ábra. a) Roding Roadster tetőkeret [19], b) összetett B-oszlop [21].

kednek a minél rövidebb gyártási idő elérésére, ezzel növelve a kompozit alkatrészek versenyképességét a rövid ciklusidejű ipari termelésben. Továbbá, a bemutatott előállítás technológiák fejlesztése is egyértelműen a teljesen automatizált gyártás felé mutat, amely technológia kezelői behatástól mentes és bizonyos lépéseknél

megfelelő szintű minőségellenőrzési eljárás beiktatására alkalmas. A gyártási időszükséglet csökkentése mellett megfigyelhető volt a kompozit alkatrészek felépítésének, összetettségének kihasználása, előnnyé formálása, amely lehetőséget teremt több típusú és fajtájú anyag egy alkatrészben történő integrálására. Szintén látható volt a magasabb funkcióintegrálásra való törekvés a helyenkénti plusz erősítés használatában, többfajta anyagcsalád vegyítésében, mint például a fém-betétek és alkatrészek, valamint különböző maganyagok beépítése. A különböző előgyártmányok integrálásával elérhetővé válik összetett funkciójú, bonyolult alkatrészek előállítása, ami csökkenti a beépítendő elemek számát a teljes konstrukcióba, ez a gyártási, összeszerelési költségek csökkentését eredményezi. A bemutatott, hőre nem lágyuló mátrixú termékeken észrevehető volt az a törekvés, hogy a kompozitok már ne csak szerkezeti elemként jelenjenek meg, hanem a különböző felületkezelési eljárások segítségével vagy anyagcsoportok vegyítésével magas esztétikai értékkel rendelkező alkatrészekként is használhatóak legyenek. Mindezen előnyös tulajdonságok mellett további megfigyelhető trend, hogy a kiállított alkatrészek jelentős részének mátrix anyaga hőre lágyuló polimer volt. A legtöbb bemutatott termék gyártástechnológiájának kiindulási alapanyaga hőre lágyuló polimerrel átítatott, folytonos/hosszú szálú erősítő struktúrájú lemez előtermék volt (organo sheet), amelyet fűtött kétoldali szerszámokban alakítottak a kívánt geometriára. A hőre lágyuló mátrix lehetővé teszi helyi erősítés alkalmazását ráfröccsöntéssel kialakított bordákkal, amely lehetőség bemutatásával a legtöbb kiállító élt is.

A fejlesztési irányokat tekintve elmondható, hogy az iparágban jelen levő cégek, kutatócsoportok a rövid ciklusidejű, automatizált gyártástechnológiai fejlesztését, funkcióintegrált, magas esztétikai értékkel rendelkező, látható szerkezeti elemként szolgáló, hőre lágyuló mátrixú kompozit alkatrészek előállítását tűzték ki célul. Fejlesztésenként külön-külön megjelent a különböző anyagcsoportok integrálása, hőre nem lágyuló mátrixú kompozitok látható felületeinél a magas esztétikai érték, a maganyag használata, hőre lágyuló mátrixú termékeknél a ráfröccsöntéssel kialakított bordák és a fém-betétek integrálása, de gyártási eljárással egy olyan alkatrészbe integrálva, amelynek mátrixa hőre lágyuló, és amelyen különböző funkciók nem szerepeltek.

HŐRE LÁGYULÓ MÁTRIXÚ KOMPOZIT GYÁRTÁSTECHNOLÓGIA FEJLESZTÉSE

A NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI ÉS INNOVÁCIÓS HIVATAL által támogatott NVKP_16-2016-0046 jelű, „Polimer kompozit termékek előállítása rövid ciklusidejű, automatizált gyártástechnológia segítségével, gépjárműipari alkalmazásokra, különös tekintettel a kompozit termékek komplexitására és újrafeldolgozhatóságára” című pályázatban négy konzorciumi tag működik együtt ilyen integrált funkciójú kompozit alkatrész kifejlesztése érdekében. A konzorciumban részt vesz az EVOPRO SYSTEMS ENGINEERING KFT., a BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM POLIMERTÉCHNIKA TANSZÉK, a MAGYAR

TUDOMÁNYOS AKADÉMIA TERMÉSZETTUDOMÁNYI KUTATÓINTÉZET és az ECON ENGINEERING KFT. A konzorcium célja egy olyan komplex, több funkciót magában hordozó kompozit termék létrehozása, amely tartalmaz folytonos szálerősítést, merevségnövelő habmagot, ráfröccsöntött bordákat és fém-inzerteket. Fő célcsoportunk a járműipar, ezen belül is a nagy sorozatban gyártó autóiipar, ezért alapvető elvárás a stabil sorozatgyártás, a nagy megbízhatóságú és intelligens, az IPAR 4.0 elveinek megfelelően felépített rendszer, és ebből adódóan a ciklusidő minimálisra való csökkentése, valamint a teljes minőségmenedzsment. Mindemellett az újrafeldolgozható termék előállításából fakadóan elengedhetetlen, hogy hőre lágyuló mátrixú polimerből készüljön. Továbbá célunk, hogy a különböző, eddig fémből készült alkotóelemeket, termékeket ki lehessen váltani a megfelelő mechanikai tulajdonsággal rendelkező kompozitból gyártottakkal. Ezen felül ebből az alapanyagból, ezzel az eljárással egy olyan A+ felületű (úgynevezett class A surface) kompozit termék kialakítása, amely látszó alkatrészként, de akár a járművek szerkezeti elemeként is szolgáló külső-belső burkolásként alkalmazható. Ez az A+ felületi megnevezés arra utal, hogy miután elkészült a termék, nem igényel további speciális felületkezelést a felhasználás előtt. Célunk a kompozit iparban külön-külön megjelenő újdonságok integrálása, így a projekt keretében megvalósuló technológia a piacon a legújabb fejlesztési irányokat egyesíti és valószínűleg meg egy végtermékben. A K+F projekt keretében célunk az új technológiával létrehozott komplex termék tulajdonságainak teljes feltérképezése, ami magában foglalja az egyes gyártási lépések paramétereinek és hatásának megismerését, valamint a tervezhetőség érdekében a végtermék mechanikai tulajdonságainak meghatározását is. Ezzel az ismerettel képessé válunk nem csak ezen funkcióintegrált termék gyártására és a hozzá kapcsolódó technológiai sor kialakítására, de a kívánalmaknak megfelelően az anyagi tulajdonságok irányított kihasználásával a kompozit alkatrész előre tervezett tulajdonságokkal való felruházására is. Ez az ismeret lehetővé teszi az autóiiparban a fém elemek kiváltására szolgáló kompozit termék tervezését az ismert külső mechanikai hatások és követelmények figyelembe vételével. Ezen túlmenően a gyártás előtti szimuláció segítségével a követelmények teljesülésének validálását is, ami nagy mértékben alátámasztja a termék megfelelőségét. A projekt alatt elsajátított know-how és technológiai fejlesztés megfelelő alapot nyújt komplex és újrafeldolgozható kompozit alkatrész tervezéséhez, valamint nagy sorozatban való gyártásához gépjárműipari alkalmazásokra.

A kutatást a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) NVKP_16-1-2016-0046 pályázata támogatta. A cikk az Emberi Erőforrások



Minisztériuma ÚNKP-17-3-I. kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Witten, E.; Kraus, T.; Kühnel, M.: Composites market report 2016, pp. 1–46 (2016).
- [2] Forintos, N.; Hegedűs, G.; Czigány, T.: Health monitoring of high performance polymer composites with multifunctional fibers (2017).
- [3] Bersee, H. N.; van Rijswijk, K.: Reactive processing of textile fibre-reinforced thermoplastic composites – An overview, Composites: Part A (2017).
- [4] Sherman, L. M.: The new Lightweights: Injection Molded ‘Hybrid’ Composites Spur Auto Innovation, ptonline.com (2012/2).
- [5] Füzes, L.: Poliamid 6 reaktív feldolgozása, Műanyagipari szemle (2015).
- [6] Péter, B.; Hegedűs, G.; Czigány, T.: T-RTM eljárással gyártott alkatrészek gyártási folyamatának kihívásai, különös tekintettel az erősítőanyagok kezelésére, Gép, (2017).
- [7] Bersee, H. N.; Beukers, A.; Lindstedt, S.; van Rijswijk, K.; Vlasveld, D. P. N.: Reactive processing of anionic polyamide-6 for application in fibre composites: A comparative study with melt processed polyamides and nanocomposites, Polymer Testing (2006).
- [8] Ben, G.; Nakamura, K.; Hirayama, N.; Nisida, H.: Effect of molding condition on impact property of glass fiber reinforced thermoplastics using in-situ polymerizable polyamide 6 as the matrix (2011).
- [9] <https://www.compositesworld.com/news/engel-developing-in-situ-polymerization-to-allow-injection-molding-of-continuous-fiber-forms> (2018.03.04.).
- [10] <http://www.jeccomposites.com/knowledge/international-composites-news/thermoplasticrtm-process-large-series>, 2017.10.02.
- [11] <https://www.engel.at/fr/fr/actualites-presse/actualites-communiqués-depresse/details/news/detail/News/composites-europe-2017-more-efficiency-in-frplightweight-engineering.html>, 2017.10.02.
- [12] <http://www.compositesworld.com/blog/post/video-krausmaffei-t-rtm-demo-at-k-2016>, 2017.10.02.
- [13] <http://www.compositesworld.com/news/engel-to-present-pre-series-productionsolutions-at-composites-europe>, 2017.10.02.
- [14] Bitterlich, M.; Ehleben, M.; Wollny, A.; Desbois, P.; Renkl, J.; Schmidhuber, S.: Tailored to reactive polyamide 6, Kunststoffe international, 3, 47–51 (2014).
- [15] Cé, V.; De Almeida, O.; Cantarel, A.; Gé, B.: Experimental study of polymerization and crystallization kinetics of polyamide 6 obtained by anionic ring opening polymerization of ϵ -caprolactam, Polymer (2017).
- [16] Herrmann, A.; Fastert, C.: Fully automated RTM production line <http://www.jeccomposites.com/knowledge/international-composites-news/fully-automated-rtm-production-line-0>
- [17] <https://pinetteemidecau.eu/en/news/automotive-composites-fast-rtm-platform>
- [18] Brüggemann Chemical: AP-Nylon additives catalogue (2016).
- [19] Verlag, C. H.: It couldn't be more hybrid, Kunststoffe International (2017/1–2).
- [20] Verlag, C. H.: Tailored to reactive polyamide 6, Kunststoffe International (2014/3).
- [21] Pál, Kné: Új Technológiák könnyűszerkezetes autóelemek gyártására, Műanyagipari Szemle (2014/06).