

Üveg- és szénszálváz szerkezeti elemek automatizálható és gazdaságos gyártása hőre lágyuló mátrixszal

A szálváz hőre keményedő műanyagokból készített szerkezeti elemek jól ismert termékek. Hőre lágyuló műanyagokkal nagy ömledéviszkozitásuk miatt a szálváz nehezen impregnálható. Hamarosan ezt a nehézséget lehet legyőzni az új VARTM vagy IMI technológiával, amely lehetővé teszi az üvegszálás vagy szénszálás szerkezeti elemek gazdaságos, automatikus gyártását.

Tárgyszavak: műanyag-feldolgozás; szálváz műanyagok; üvegszál; szénszál; impregnálás; hőre lágyuló mátrix; epoxigyanta; VARTM technológia; IMI technológia.

A végtelen szállal erősített hőre keményedő műanyagokkal szemben a hőre lágyuló mátrixszal készített félkész áruk bármennyig tárolhatók, könnyen formázhatók, hegeszthetők, megmunkálás közben nem emittálnak kellemetlen gőzöket, ismételten feldolgozhatók és jobb az ütésállóságuk is. Mátrixuk legtöbbször polipropilén (PP), poliamid (PA) vagy poli(éter-éter-ke-ton) (PEEK), de jó mechanikai tulajdonságaik miatt poli(etilén-tereftalát)-ot (PET) és poli(butilén-tereftalát)-ot (PBT) is alkalmaznak erre a célra. A hőre lágyuló műanyagok ömledékének nagy viszkozitása miatt a végtelen szálak átítatása a polimerrel meglehetősen nehézkes, ami különösen nagy felületű, bonyolult formák előállításakor okoz gondot. Az előformázott szálváz hőre keményedő gyantákkal végzett átítatásához jól bevált a reaktív gyantaöntés (RTM, resin/reactive resin moulding); a gyantainjektálás vagy gyantainfúzió hőre lágyuló ömledékkel azonban csak akkor valósítható meg, ha az ömledék viszkozitását az impregnálás fázisában jelentősen le tudják csökkenteni.

Erre két lehetőség van:

- gyantainjektálással, amikor a hőre lágyuló mátrix reaktív „in-situ” polimerizálása mellett következik be a szálváz impregnálása a szerszámban és a darab formázása,
- fröccsöntéssel, amikor a szálvázat a szerszámban beállított megfelelő viszkozitású hőre lágyuló ömledékkel itatják át a formaadással egyidejűleg.

A következőkben mindkét típusú eljárásra mutatunk be példát.

Végtelen üvegszállal erősített hőre lágyuló szerkezeti elemek gazdaságos gyártása

Végtelen üvegszállal erősített nagy felületű szerkezeti elemek (haszonjárművek, gépkocsik, repülőgépek) gazdaságos gyártástechnológiájának kidolgozására vál-

lalkozott egy kutatócsoport egy európai közös kutatási projekt, a *Cleanmould* keretében. A gyártástechnológiában a hőre keményedő anyagok feldolgozásban jól bevált gyantainjektálást (RTM eljárást) akarták hőre lágyuló anyagokra adaptálni.

Ennek lehetőségét a **Cyclics Europe GmbH** (Schwarzweide, Németország) teremttette meg a hőre lágyuló *CBT gyantarendszer* kifejlesztésével. Ez alapvetően egy ciklikus oligomer, amely katalizátor hozzáadásával nagy molekulatömegű PBT-vé polimerizálódik. A gyanta szobahőmérsékleten granulátum formájú, és 100–170 °C között olvad meg. Olvadékának viszkozitása 190 °C-on mindössze 26 mPas. A hozzáadott katalizátorral tetszés szerint szabályozható a polimerizációs sebesség. A gyanta kis viszkozitása révén nagy száltartalmú termékek is gazdaságosan gyárthatók vele.

A program keretében nagy felületű üvegszálalás formadarabokat állítottak elő, amelyekhez az üvegszálból készített előformát a finnországi **Ahlstrom** cég (Helsinki) szállította. A projekt további részvevői: a haszonjárműveket gyártó portugáliai **Basmiler** (Viseu), egy nagy-britanniai hajógyár, a **BAE Systems** (Portsmouth), az ugyancsak nagy-britanniai **EPL Composite Solution** (Loughborough) és a németországi Műanyag-feldolgozó Intézet, az **IKV (Institut für Kunststoffverarbeitung, Aachen)**.

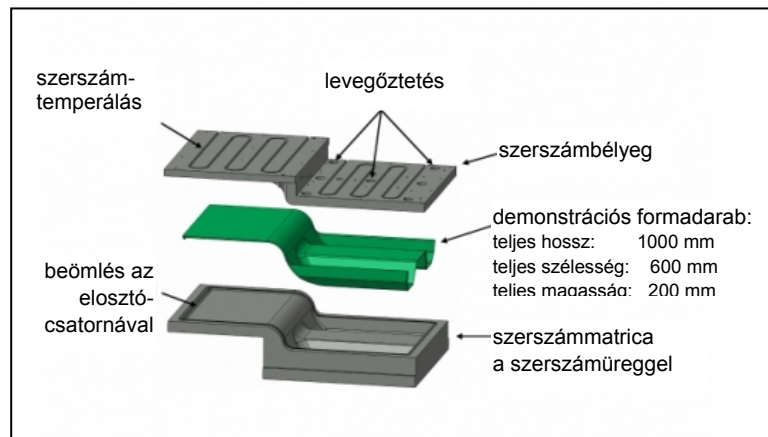
A projekten belül az IKV feladata volt a gyanta megfelelő feldolgozási technikájának kifejlesztése a szerkezeti elemek gyártásához. Két technológiát próbáltak ki: *a vákuummal segített gyantainjektálást (VARTM, Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding)* és egy *elosztóközeggel végzett vákuuminfúziós eljárást*.

A VARTM eljárással megnyílt a lehetőség arra, hogy nagyméretű, bonyolult formájú, mindkét oldalukon szép felületű darabokat hőre lágyuló mátrixszal átítatott üvegszálalás vázzal automatikusan állítsanak elő. A vákuuminfúziós eljárással is nagyon rugalmasan lehet nagy felületű terméket előállítani.

Első lépésként kidolgozták azt a technikát, amellyel nagy felületű laminátokat tudnak készíteni. A megfelelő gyártási paramétereket a kész laminátok mechanikai tulajdonságainak mérése alapján határozták meg. Átvitelüket bonyolultabb darabra demonstrációs formadarabon tanulmányozták. A gyártószerszámot és a formadarabot az *1. ábra* mutatja. A fő méretek az ábrán láthatók, a laminátum vastagsága egyenletesen 7 mm volt. A darabon különböző sugarú görbületek és átmenetek voltak, hogy a kritikus pontokat kiszűrhessek. A bélyegbe a hét levegőztető nyíláson kívül szerszámot fűtő temperálócsatornákat építettek be, de voltak ilyenek a matricában is. A különböző próbák során kiderült, hogy mind a hét levegőztető nyílásra szükség van a tökéletes impregnáláshoz. A legnagyobb kihívást a szerszámfészek egyenletes temperálása jelentette. Ezt hőérzékelők segítségével és a szerszám teljes hőszigetelésével oldották meg.

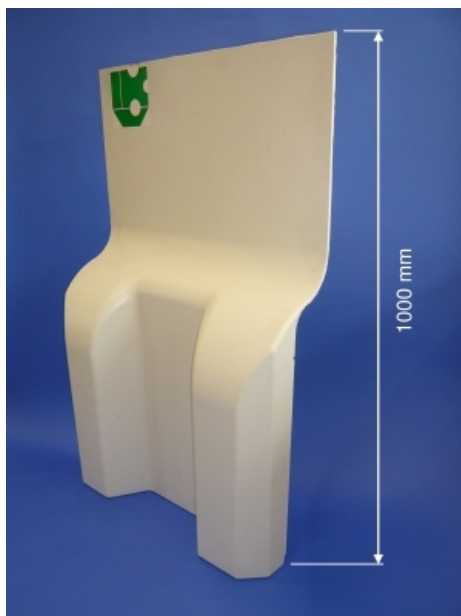
A VARTM eljárás négy lépésből áll. Első lépésként behelyezik a kétrészes szerszámba a száraz erősítőszálalából kialakított előformát. A második lépésben zárják a szerszámot és felfűtik a munkahőmérsékletre; a levegőztető nyílásokra rákapcsolják a vákuumot, egyidejűleg az ún. transzferedényben megolvasztják a gyantát. Amikor az elérte az injektálás hőfokát, hozzákeverik a katalizátort, a keveréket pedig befröccsen-tik a szerszámüregbe, hogy átítassa az előformát. Amikor az előforma teljesen átítató-

dott (a gyanta megjelenik a lélegzőnyílásoknál), valamennyi gyantát még utánnyomnak, hogy csökkentsék a laminátum pórustartalmát. A harmadik lépésben lezárják a levegőztető nyílásokat és utónyomást alkalmaznak, hogy ellensúlyozzák a gyanta polimerizációja alatt bekövetkező zsugorodást. A negyedik lépésben nyitják a szerszámot és kiemelik belőle a kész darabot.



1. ábra A demonstrációs szerszám és a formadarab vázlatja

A hőre keményedő gyanták RTM eljárásához használt szerszámokban a VARTM technológia alkalmazásához ki kell cserélni a tömitéseket és a tömlőket, mert az előbbiek 70–100 °C-os feldolgozási hőmérséklete helyett az utóbbiban 200 °C-t kell elviselniük, és ennek megfelelő leválasztószerre is szükség van. A szerszámot nemcsak az egyenletes fészkehőmérséklet elérése, hanem munkavédelmi célból is teljes egészében hőszigetelni kell.



2. ábra A kész formadarab

A gyanta szerszámba injektálásához fűthető transzferevény és fűthető összekötő tömlő szükséges. A transzferevény fémből készül, mert ennek jó a hővezető képessége, az edény alatt fűthető fémlap, oldalán fűthető mandzsetta van. Az összekötő tömlő mellett a levegőztető nyílásokat is fűteni kell, nehogy bárhol bedermedjen a gyanta.

A 2. ábrán látható kész darab 58% üvegszálat tartalmaz. Az üvegszál előforma 4,5 perc alatt injektálással teljesen telítődött. Hasonló demonstrációs formadarabot 60% üvegszállal és (jóval nagyobb viszkozitású) epoxigyanta mátrixszal 25 perces injektálással állították elő. Az egyirányú szálakkal erősített de-

monstrációs darabon mért merevség >37 GPa, a szilárdság >950 MPa volt. A kísérletek során azt is bizonyították, hogy a laboratóriumi kísérletek alatt meghatározott feldolgozási paraméterek a bonyolultabb formájú demonstrációs darab előállításakor is alkalmazhatóak voltak.

Szénszálás betét impregnálása poliamiddal a fröccsszerszámban formázás közben

A fröccsöntő szerszámba helyezett szálváz impregnálását hőre lágyuló műanyaggal (*IMI, in-mould impregnation*) a **Friedrich Alexander Egyetem Műanyagtechnikai Tanszéke** (Erlangen-Nürnberg) és a **Neue Materialien Fürth GmbH** (Fürth) fejlesztette ki. Az eljárás egyik előnye az energiatakarékosság, mert itt a szobahőmérsékletű száraz szénszálás betétet helyezik a formázó szerszámba, amelynek formázását a bezáródó szerszám vagy egy robot végezheti, emellett ha a szénszálás betétet áramforrással kapcsolják össze, a szénszálak villamos vezetőképessége, ill. villamos ellenállása révén felmelegszik, és megkönnyíti a hőre lágyuló ömledék behatolását a szálak közé. Ha szénszálás félkész termékből, ún. *szerves bádogból* készítenek formadarabot, az egész lemezt fel kell melegíteni, formázásával pedig ugyancsak sietni kell, mert a szénszálak jó vezetőképessége miatt a lemez gyorsan lehül.

Az *IMI eljárás négy lépésből áll. Az első lépésben* a két szerszámfél közé helyezik a szénszálás betétet. *A második lépésben* a betétet áramforrással kötik össze. A szénszálak villamos ellenállása következtében azok néhány másodperc alatt a kívánt hőmérsékletre melegsznek fel; a kissé nyitott szerszámba egyidejűleg kis sebességgel ömledéket fröccsentenek be. A nyílást ún. prégeelőkeret veszi körül és zárja el a külvilágtól. *A harmadik lépésben* a szerszámot óvatosan zárják, eközben az ömledék szétterül a szénszövet felületén, majd behatol a száraz szálszerkezetbe. Amikor a levegő kinyomódik a szénszálak közül, és kialakul az egyensúly (konszolidálódik a rendszer), megszüntetik a szénszálak villamos csatlakozását. A szénszálak jó hővezető képessége következtében az ömledék néhány másodperc alatt megszilárdul. *A negyedik lépésben* kinyílik a szerszám, kiveszik a kész darabot.

A kész darab mechanikai tulajdonságai döntő mértékben az impregnálás minőségétől függenek. Az impregnálás foka (D_{imp}) a következő egyenlettel számítható ki:

$$D_{imp} = \frac{1 - \phi_L}{1}, \text{ ahol } \phi_L = \text{pórustérfogat}, \quad 1. \text{ egyenlet}$$

Magas mechanikai követelményeket kielégítő darabok pórustérfogata nem haladhatja meg az 1%-ot. A pórustérfogat kiszámítható a következő egyenletből:

$$\phi_L = 1 - \frac{\rho_g}{\rho_t}, \quad 2. \text{ egyenlet}$$

ahol ρ_g piknométeres sűrűség, ρ_t termogravimetriásan meghatározott száltartalomból számított elméleti sűrűség.

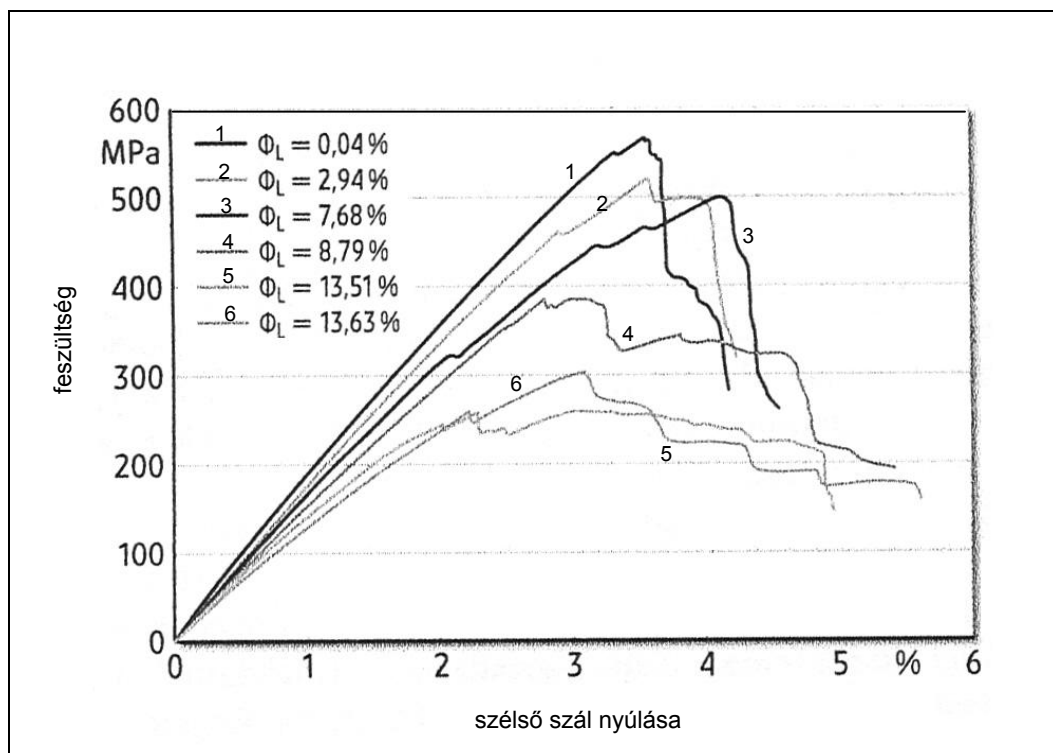
A teljes átítatódáshoz szükséges idő (t) egyirányú (x, szövetre merőleges) gyan-tamozgást feltételezve kiszámítható a 3. egyenletből:

$$t = \frac{\eta \cdot \Delta x^2}{K_x \cdot \Delta p}, \quad \text{3. egyenlet}$$

ahol η = viszkozitás, Δx = folyási út, K_x = a száraz szálrendszer áteresztőképessége, folyásirányban, Δp = nyomáskülönbség.

Az egyenletből kiderül, hogy az impregnálás ideje rövid, ha a folyási út rövid és a viszkozitás kicsi, a nyomáskülönbség és az áteresztőképesség pedig nagy. A rövid impregnálási idő rövid ciklusidőt eredményez. Az áteresztőképesség a szálszerkezet anyagi jellemzőin kívül a szál és a mátrix közötti felületi feszültségtől, a szálak görbületi sugaraitól és a betét porozitásától függ. A felfűtés és a lehűlés időtartama mellett az impregnálás időtartama a legfontosabb paraméter, amely megszabja a gyártás gazdaságosságát.

A kutatócsoport a kísérleti munkához mátrixként a **Lanxess Deutschland GmbH** egyik kis viszkozitású poliamid 6 polimerjét választotta. A **Panex 23** típusú szénszálakból (gyártja **Zoltek Corporation**) a **Liba Maschienenfabrik** készítette a szövetbetéteket, amelyek hat rétegből – egyenként 150 g/m^2 felületi sűrűségű szénszál-rétegből – álltak, a szálirány az impregnálás irányához viszonyítva $+45^\circ$, 90° , -45° , $+45^\circ$, 90° , -45° volt. Különös figyelmet fordítottak a szálrendszer villamos ellenállására és felmelegedésére, amely eltért a fémszálak hasonló tulajdonságaitól.



3. ábra A különböző hőmérsékleten dekonszolidált (különböző pórustérfogatú) üveg-szálás poliamidlemezek 3-pontos hajlítóvizsgálatakor kapott feszültség-nyúlás görbék

A pórusterfogat mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatásának tanulmányozására különböző hőmérsékletű kemencében utóhőkezelt (dekonszolidált) szerves bádógból származó próbatesteken 3-pontos hajlítóvizsgálatot végeztek *DIN EN ISO 14125* szabvány szerint. A **Bond-Laminates GmbH**-nál gyártott, 45 % (V/V) üvegszálat tartalmazó, poliamidalapú, négyrétegű lemez feszültség-nyúlás görbéit a pórustartalom függvényében a 3. ábra mutatja. A legfelső görbét adó, 0,04% pórust tartalmazó mintát termikusan nem dekonszolidálták. A pórustartalom növekedésével folyamatosan csökkent a hajlítoszilárdság és a hajlítómodulus. Ez bizonyítja, hogy *mennyire fontos a szálvázás műanyagok gyártásakor a jó impregnálás*. Meg kell jegyezni, hogy a vizsgált szerves bádoglemezekben a termikus dekonszolidálás alatt képződött pórusok a későbbi nyomás és hőmérséklet alatti formázás közben ismét eltűntek, és a belőlük készített darabok tulajdonságai optimálisak voltak.

A szénzálak hővezető képességét speciális berendezésen vizsgálták. A rákapcsolt feszültség révén kialakult felületi hőmérsékletet hőkamerával mérték és megfelelő szoftverrel értékelték. Termoelemes összehasonlító mérés alapján számították ki emissziós együtthatójukat.

A **Fürth GmbH** készítette el szokványos fröccsgépen IMI eljárással a 100x200 mm-es, szénzálás betétet tartalmazó poliamid próbatesteket. A próbatestek belső ellenállásának csökkenésével a felületi hőmérséklet folyamatosan növekedett, 92 ohm ellenállás mellett 30 °C, 82 ohm mellett 150 °C volt, ami negatív hőmérsékleti együtthatóra utal. Ennek általános képlete:

$$R_i(T) = R_i(T_0) e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}, \text{ ahol } B \text{ anyagi jellemző. Az adott esetben } B = 121 \text{ K.}$$

Már az első feldolgozási kísérleteknél kiderült a mikroszkópos felvételekből, hogy a poliamid tökéletesen impregnálta a szénzálás betétet, ami bizonyította, hogy az eljárás megvalósítható. A folyamat optimalizálásával mérsékelni kell a szélső rétegek nagyobb mátrixtartalmát és tovább kell növelni a száltartalmat. Egy törésfelület elektronmikroszkópos felvétele azt is mutatta, hogy a mátrix és a szálak között jó tapadás alakult ki.

A bemutatott első kísérletek alapján állítható, hogy *az IMI eljárás a fröccsöntésnek egy új különleges változata, amellyel hőre lágyuló mátrixszal állíthatók elő szénzálás formadarabok*. A további fejlesztés során mélyebben kell elemezni a szénzálás villamos és termikus tulajdonságai közötti összefüggést és ennek alapján el kell készíteni az ezt szimuláló szoftvert.

Összeállította: Pál Károlyné

Winkelmann, L.: Großflächige Bauteile in Sicht = Plastverarbeiter, 61. k. 10. sz. 2010. p. 136–138.

Müller, Th.; Drummer, D. stb.: Ein energieeffizientes Verfahren für den Leichtbau = Kunststoffe, 102. k. 6. sz. 2012. p. 70–73.