

MŰANYAGOK FELDOLGOZÁSA, ADDITÍV TECHNOLÓGIÁK

Hajlított pultrudált termékek gyártása

Pultrudálással alapvetően egyirányban rendeződő szálakkal erősített egyenes és merev profilokat gyártanak. A szálak átítására eredetileg hőre keményedő gyantát használtak, ma már hőre lágyuló polimerekkel is készülnek pultrudált termékek. Erre a viszonylag egyszerű és költségtakarékos technológiára nagyobb volna az igény, ha nem csak egyenes, hanem pl. hajlított termékeket is lehetne készíteni vele. Az első termék, egy gépkocsiütköző már a piacon van, és vannak további ötletek is.

Tárgyszavak: műanyag profilok; autógyártás; pultrudálás; köríves meghajlítás; utóformázás; „radius pultrusion” technológia.

A pultrudálás (magyarul szálításos profilhúzásnak vagy húzva sajtolásnak is nevezik) hagyományosan a szállal erősített hőre keményedő műanyagok költségtakarékos profilgyártási technológiája, mert a térhálósítás előtt kis viszkozitású gyantákkal könnyen át lehet itatni az erősítő szálkötegeket. Újabban hőre lágyuló mátrixszal készített profilokat is gyártanak a polimer megömlesztésével vagy in situ polimerizálással. Ilyenkor a szálköteget kis viszkozitású monomerrel itatják át, amely a profilhúzás folyamata alatt a hozzáadott katalizátor és aktivátor hatására polimerizálódik. A pultrudált profilok különösen az autógyártásban népszerűek, ezeket helyi erősítő betétként vagy szerkezeti elemekként alkalmazzák. Az egydimenziós geometriájú merev profilokat néha azonban meg kellene hajlítani, ami hőre lágyuló mátrixú termékek esetében nem tűnik lehetetlennek. Próbálkoznak is ezzel. Az egyenes profilt utómegmunkálásként a meghajlítandó részen felmelegítik és húzás közben a kívánt sugarú körben a kívánt szögben meghajlítják. Az eddigi kísérletek során azonban nem sikerült olyan technológiát kialakítani, amellyel eközben biztosítani tudták volna a profil minőségének megőrzését, pl. keresztmetszetének változatlanóságát vagy a felületen kialakuló redők kialakulásának megakadályozását.

A GM 2020-ban forgalomba állított *Corvette* márkájú sportkocsijának hátsó ütközője a világon az első pultrudálással gyártott hajlított termék. A technológiát egy német autóiipari cég fejlesztette ki, és ennek a technológiának a megvásárlása után egy amerikai cég tervezte és gyártja a hátsó ütközőket. A *Radius Pultrusion* nevű technológia nem utólagos formázáson, hanem a teljes gyártási útvonalon végig haladó szerszámon alapul, és nagy jövőt jósolnak neki.

Ugyancsak egy német kutatócsoport próbálkozik hajlított pultrudált termékek gyártásával. Ez a csoport a hagyományos technológiával (de hőre lágyuló mátrixszal) készített profilok utóformázásával igyekszik lokális körívben meghajlított termékeket előállítani. ún. nyújtva húzással.

A GM új sportkocsija Radius Pultrusion technológiával gyártott hátsó ütközőt kapott

A General Motors (GM, Detroit, USA) 2020 MY Chevrolet Corvette sportkocsijának hátsó ütközője (1. ábra) a világon elsőként szénszálal pultrudált profilból köríves meghajlítással kialakított gépkocsielem. Az ütköző tömege 2,2 kg-mal kevesebb, mint az alumíniumból korábban gyártott ütközőé. Az új ütköző nemcsak a gépkocsi tömegét csökkenti, hanem jobban kielégíti a formatervezők igényeit is, és nem utolsósorban általa bővíteni lehetett a hátsó csomagtér térfogatát a nagyon szűk helyen.



1. ábra A GM Corvette gépkocsija (balra) és a kocsira felszerelt ütköző közelről (jobbra)

Az ütközők gyártását egy gépkocsielemeket gyártó német vállalat, a Thomas GmbH + Co. Technik + Innovation KG (TTI, Bremervörde) „Radius Pultrusion”-nak elnevezett új szénszálal technológiájának kifejlesztése tette lehetővé. Az ütközőket az amerikai Shape Corp. (Grand Haven, Michigan) tervezte és gyártotta le.

A Radius Pultrusion technológia lényege

A német cég új technológiáját Párisban, 2019 márciusában, az évente ott megrendezett JEC World nemzetközi kompozit-kiállításon mutatta be. Ennek lényege, hogy a szerszám a gyártósor elején egy markolóval fogja be a gyantával átítatott szénszálal anyagot, majd végigvezeti egy körív alakú pályán, eközben a profil folyamatosan térhálósodik. A pálya végén egy ebben a fázisban nyitott és rögzített befogószerkezet van, amelyen a már térhálós profil át tud haladni a vágószerszám felé. Amikor az ütköző érintkezésbe kerül az nyitott befogóval, az bezáródik, a szerszám a markolóval együtt kinyílik és visszamegy a kiindulási helyére. A bezáródott befogó a vágószerszámhoz viszi a terméket, ahol az a terméket méretre vágja, egyúttal megindul a következő profil gyártása.

Az hagyományos pultrudálásakor a szerszám rögzítve van, és két befogó húzza át a gyantával impregnált szálakat a meleg szerszámon. Ezzel a technikával egyirányban elrendezett (párhuzamos) szálakkal erősített profilokat lehet gyártani. A köríves pultrudálás újdonsága



2. ábra A TTI *Radius-Pultrusion* gyártósora

a mozgó szerszám. Ezzel az új eljárással komplikált formákat is lehet gyártani, és ebben göndörödésmentes erősítő anyagokat kell alkalmazni. Az új eljárás kevés emberi munkát igényel, és a gyártási folyamat jól automatizálható.

A TTI új technológiájának gyártási licencét meg lehet vásárolni, a cég ehhez *Radius-Pultrusion* gyártóberendezést is kínál (2. ábra). A 2019-es JET World vásáron kiállított gépkocsiütközők a technológiát elsőként alkalmazó Shape Corp. termékei voltak, amely a terméket maga fejlesztette ki és amelyhez térhálósítható gyantát, a szénszálalás tűzött fátlyat és szálköteget (rovingot) alkalmazott.

Az ütköző tervezése és anyagainak kiválasztása

A Sharpe Corp. az ütköző tervezésekor mindenekelőtt az erősítő szálak kiválasztására és azok elrendezésére koncentrált. Voltak olyan szálak, amelyek az új technológiához alkalmazhatatlanok voltak, és voltak alkalmasnak tűnőek. A szálak kiválasztásában a cég a szénszálalásban jártas Vectorpy Corp. (Phenix City, Alabama) segítségét vette igénybe. Kiderült, hogy a lágyabb esésű, hajlékonyabb szénszál alapú tűzött, nem göndörödő kelmék (non crimp fabrics) jobban használhatók, mint a merev szövött szálalás anyagok. Kiderült az is, hogy a szövött textilekbe nem lehet diagonális (45°-ban elhelyezkedő) szálakat beépíteni, mert ezek feszültség hatására elmozdulnak, ami megváltoztatja az erősítő anyag szerkezetét. A tűzött kelmékben az ilyen szálak a helyükön maradnak.

A kutatók számos variációt kipróbáltak, amelyeket a Vectorply cég szállal erősített laminátumok vizsgálatára kifejlesztett eljárással és az ún. *VestorLam* kóddal értékelték. Ezek és az ugyancsak elvégzett végeelemes vizsgálatok alapján egy hétréteges laminátumot választottak ki, amely két duplán diagonális NFC rétegből, három különböző tengelyirányban rendeződő és kétféle szénszálalás tartalmazó rétegből, továbbá két egyirányban rendeződő, kétféle szénszálalás tartalmazó rétegből épül fel.

A szálszerkezet fejlesztésével párhuzamosan egy másik kutatócsoport az alkalmas impregnáló gyantát kereste. Először poliuretánokra gondoltak, és számos típust kipróbáltak, amelyet prepolimerként gyakran alkalmaznak a pultrudálásban. A fejlesztéskor figyelembe kellett venni azt, hogy az ütköző az autógyártás folyamatában elkerülhetetlenül találkozik a GM ELPO nevű elektroforikus rozsdavédő bevonatának felvitelével, ahol vetemedés nélkül 238 °C-t kell elviselnie. A szokásos poliuretánokkal ez nem sikerült, de végül találtak egy alkalmas poliuretán-akril hibridet, amelynek feldolgozhatósága, tulajdonságai, gyártási sebessége, és ára is kielégíti a követelményeket. Ezt az Egyesült Királyságban a Scott Bader Co. Ltd

(Wellingborough) gyártja *Crestapol 1250* márkanévvel, amely kémiai jellegére nézve egy-komponensű peroxidral térhálósodó készítmény. Gyártásakor a poliolt és az izocianátot összekeverve reaktív prepolimert hoznak létre, és a végcsoportokra akrilátot visznek fel. Peroxid hatására az akrilátcsoportok között alakul ki a térháló. A gyártó a polimer üvegesedési (T_g) értékét 105–300 °C közé tudja beállítani.

Összefoglalás

A GM Corvette gépkocsijának hátsó ütközője az első köríves pultrudálással előállított gépkocsialkatrész, és egyúttal Észak-Amerikában az első köríves meghajlítással pultrudált termék. Egy-egy profil gyártásához 75 orsónyi anyagot használnak fel. A gyártási sebesség hasonló a lineáris pultrudáláséhoz: 31 cm/min. A GM a technológiával kapcsolatban jelenleg 1, a *Shape 4* szabadalomnak a tulajdonosa. A termék eddig két kitüntetést kapott a műanyagmérnökök társaságától (SPE), egyiket az eljárás/megvalósítás/újszerű technológia kategória győzteseként, a másikat (amelyet a Corvette valamennyi közreműködőjének együttesen címeztek) a járművek műszaki munkacsoportjának kitüntetéseként.

Pultrudált csövek utólagos lokális nyújtva hajlítása

A Fraunhofer ICT több együttműködő intézménnyel közösen (Fraunhofer Project Center am Ulsan National Institute for Science and Technology – FPC@Unist –; Large Co Ltd; LG Hausys Ltd; Katech; SKC und Dyotec Fertigungsverfahren) Unist-HIM projektje keretében dolgozik hőre lágyuló műanyagokkal impregnált üvegszálal félkész termékek utólagos meghajlítására alkalmas technológiájának kifejlesztésén. Ezek lehetnek üreges testek (Hollow Intermediate Material, HIM) vagy szendvicsszerkezetű rétegelt termékek (Sandwich Intermediate Material SIM). Elsőként az egyirányú (unidirektional, UD) szálakkal erősített pultrudált csőprofilokra koncentrálnak, amelyeknek kicsi a tömege, nagyon kevés anyagot tartalmaznak, ennek ellenére nagyon merevek és nagy a K keresztmetszeti tényezőjük (Widerstandsmoment). Ezeket az előnyöket a hajlítás által kölcsönzött geometrikus rugalmassággal szeretnék kombinálni a profil lokális meghajlításával. Ezt célozták meg a „lokális nyújtva húzás” elnevezésű technológiával.



3. ábra Húzva hajlított, gyűrődéseket tartalmazó (lent) és nyújtva hajlított gyűrődésmentes csőprofil (fent)

A profilok meghajtásakor fellépő feszültségek elemzésekor egyértelművé vált, hogy a meghajlítás ívének külső sugaránál húzófeszültség, belső sugaránál nyomófeszültség lép fel. Az utóbbi hozza létre az ív belső oldalán megjelenő gyűrődéseket (3. ábra), amelyek negatívan hatnak a mechanikai tulajdonságokra és rontják a profil optikai megjelenését. A lokális nyújtva húzás alkalmazásakor megakadályozzák a gyűrődést. Ezt úgy érik el, hogy a hajlítás

belső ívéhez közeli végtelen szálakat szelektíven befogószerkezetbe fogják be és húzóterheléssel előfeszítésnek teszik ki őket. Ezt a feszültséget a hajlítás teljes időtartama (felmelegítés,

meghajítás, hűtés) alatt fenntartják. Emiatt a belső ívben a szálak kifeszülnek és nem tudnak meggyűrődni.

A hajlítási ív felső részén lévő és előfeszítés nélküli végtelen szálakat egy rugalmas fémspirálon (4. ábra) és egy magon keresztül vezetik, amely meg akadályozza a cső behorpadását, átmérőjének változását vagy a szálak eltörését. Mivel a végtelen szálak hosszúsága változatlan, ezek hajlításkor óhatatlanul elcsúsznak egymáson, ezért a szálköteg vége profil két végén ferde lesz.



4. ábra. A csövet körülvevő rugalmas fémhüvely

Az eljárás előkísérleteit egy automatikus hajlítóberendezésen végezték el. Ehhez egy 60% UD üvegszálát tartalmazó PETG csövet használtak, amelynek hossza 330 mm, külső átmérője 20 mm, falvastagsága 3 mm volt. A cső hajlítási ívének 93 mm-es sugara mellett 130°-os belső meghajlási szögig alig

észleltek gyűrődést. A mag és a rugalmas fémhüvely meggátolta a cső keresztmetszetének torzulását és az üvegszálak eltörését. A hajlításkor elferdült szálkötegek végeit eltávolították. A belső rádiusznál mechanikailag befogott üvegszálak miatt a cső végén a fal vastagsága valamennyit csökkent, de a profil végétől számított 40-50 mm-re ezt már nem lehetett észlelni.

A lokális nyújtva hajlítás folyamatának jobb megismerése érdekében – ugyancsak 93 mm-es belső rádiusszal és 130-os hajlítási szöggel – különböző kezdeti hőmérséklettel és a hajlítás közbeni előtolás variálásával végeztek kísérleteket. Már az előkísérleteknél kiderült, hogy lépcsőzetes előtolással könnyebben elkerülhetők a gyűrődések, mint folyamatos előtolással. A lépcsőzetes előtolással végzett kísérletekben az előtolás hosszát és az egyes lépéseknél alkalmazott tartózkodási időt is változtatták. A gyűrődésképződést a megvilágított csőszakaszon fényképeken dokumentálták. Kiderült, hogy fényes felületen és matt felületen a gyűrődések másképpen reflektálnak, amit a képfeldolgozás szoftverjében figyelembe kellett venni. Ennek alapján a gyűrődésképződés mérőszámaként bevezették a gyűrődési indexet. (Faltenindex). 0%-os gyűrődési index az ideális érték, azaz egyetlen előtoláskor sem képződött a cső felületén gyűrődés; 100%-os ez az index, ha minden egyes előtoláskor meggyűrődött a felület. A kísérletekben a gyűrődés mellett a cső keresztmetszetének stabilitását és a csőprofil mechanikai tulajdonságait is mérték.

A kísérletek alapján megállapították, hogy a vizsgált csőprofil meghajlításakor az optimális hőmérséklet a vizsgálatban alkalmazott 110–130 °C közötti tartomány alatt volna, de ezen a hőmérsékleten a cső nagy K-értéke miatt nem hajlítható meg 130°-os szögben. Ezért kompromisszumként 130 °C-on végezték a hajlítást, nagyon kis előretolásokkal és nagyon rövid tartózkodási időkkel. A legkisebb gyűrődési indexet 1 s tartózkodási idővel és a legkisebb alkalmazott előtolással (25 mm) érték el. Ezzel számos előtolási lépcsővel kellett dolgozni, és az elérhető ideális felület eléréséhez 60 mm/s sebességet lehetett elérni. A vizsgált paraméterek változtatása a profil keresztmetszetének stabilitását nem érintette.

A gyártási paraméterek köztudomásúan hatnak a termék mechanikai tulajdonságaira. A minimális gyűrődést kiváltó paraméterek emiatt egyúttal a legnagyobb terhelhetőséget is szavatolják. A 40-45%-os gyűrődési indexű próbatestek 3-pontos hajlítási vizsgálatban 6,1%-kal kisebb (1175 N) terhelésnél törtek el, mint az 1200 N-ig kitartó 10%-os gyűrődési indexűek. A szokásos húzással meghajlított profilcsövön mély gyűrődések képződtek, és ez 20,5%-kal kisebb, 954 N terhelésnél tört el.

A kutatócsoport az elvégzett kísérletekből azt a következtetést vonta le, hogy a pultrudált profilok lokális nyújtva hajlítása ígéretes új eljárás ezek formázására. Úgy gondolják, hogy a szálak szelektív rögzítésére használt befogóeszközök és a folyamat továbbfejlesztése, a profilokhoz kiválasztott anyagok optimalizálása a jövőben lehetővé teszi majd a pultrudált profilok utólagos továbbformázását komplex geometriai szerkezetek felépítéséhez is.

Összeállította: Pál Károlyné

Malnati, P.: Curved pultrusions enter production = Composites World, 2020. máj.

<https://www.compositesworld.com/articles/curved-profiles-radius-pultrusion>

Malnati, P.: Material choices for the Corvette rear bumper beam = Composites World, 2020.

jún. <https://www.compositesworld.com/articles/material-choices-for-the-corvette-rear-bumper-beam>

TTI to showcase automotive mass-production pultrusion processes at JEC = CIM composites in Manufacturing = <https://www.composites.media/tti-to-showcase-automotive-mass-production-pultrusion-processes-at-jec/>

Haas, J.; Bose, B.: Geförmte Pultrusionsprofile = Kunststoffe, 2020. 12. sz. p. 40-43.