

Wacław Królikowski¹

Politechnika Szczecińska, Instytut Polimerów, ul. Pułaskiego 10, 70-322 Szczecin

NOWOCZESNE KONSTRUKCYJNE POLIMEROWE MATERIAŁY KOMPOZYTOWE (ARTYKUŁ ZAMAWIANY)

MODERN STRUCTURAL POLYMER COMPOSITE MATERIALS

The paper presents a review of methods of producing modern thermosetting composites, particularly modern structural polymer composite materials. First the production process (Fig. 1) and the structure (Fig. 2) of sheet moulding compounds (SMC) have been briefly characterised and ways of their further processing mentioned. Then subsequent moulding methods have been described: the method of winding, the fiber placement method (Fig. 3), the pultrusion process. Three-dimensional reinforcement of composites and preforms has been touched in turn, and the following methods of its production presented: weaving (Figs 5, 6), stranding (Fig. 7), needling and sewing (Fig. 8), and knitting (Figs 9, 10). Next the fiber-reinforced thermoplastic granulated products, including long fiber thermoplastics (LFT), have been presented (Fig. 12), being followed by a description of structural composites obtained by the melt compression moulding - in mould lamination (MCM-IML) method. Then go thermoplastic materials reinforced with roving mats (TWM), and finally the method of reaction injection moulding for structural elements (S-RIM) has been described.

The paper presents also application examples of individual composites and discuss their advantages and disadvantages.

WSTĘP

Polimerowe materiały kompozytowe znalazły już od szeregu lat trwałe i szerokie zastosowanie w technice światowej, a także w Polsce. Przyczyniły się do tego dobre właściwości konstrukcyjne, mały ciężar właściwy, łatwość formowania wyrobów, także o dużych gabarytach, różnorodność technik przetwarzania oraz duża możliwość różnicowania właściwości w zależności od użytych półproduktów wyjściowych i technik przetwórczych. W pierwszym długoletnim okresie wyroby kompozytowe były wytwarzane z polimerów termoutwardzalnych, głównie żywic poliestrowych i epoksydowych wzmocnionych włóknami szklanymi (typu E). W ostatnich dziesięciu latach nastąpił znaczny rozwój wytwarzania kompozytów na podstawie termoplastów oraz zastosowań wzmocnień z włókien karbonizowanych (węglowych i grafitowych), aramidowych, specjalnych polietylenowych, organicznych włókien naturalnych, a także specjalnych mineralnych (np. Wollastonit). Rozwinięte też zostały nowe formy wzmocnień włóknistych.

KOMPOZYTY TERMOUTWARDZALNE

Wyroby z kompozytów termoutwardzalnych wytwarzane są następującymi bardzo różnymi metodami: laminowanie ręczne, natrysk, formowanie z workiem elastycznym i w autoklawach, metodą wtlaczania żywicy między dwie formy - RTM (Resin Transfer Moulding),

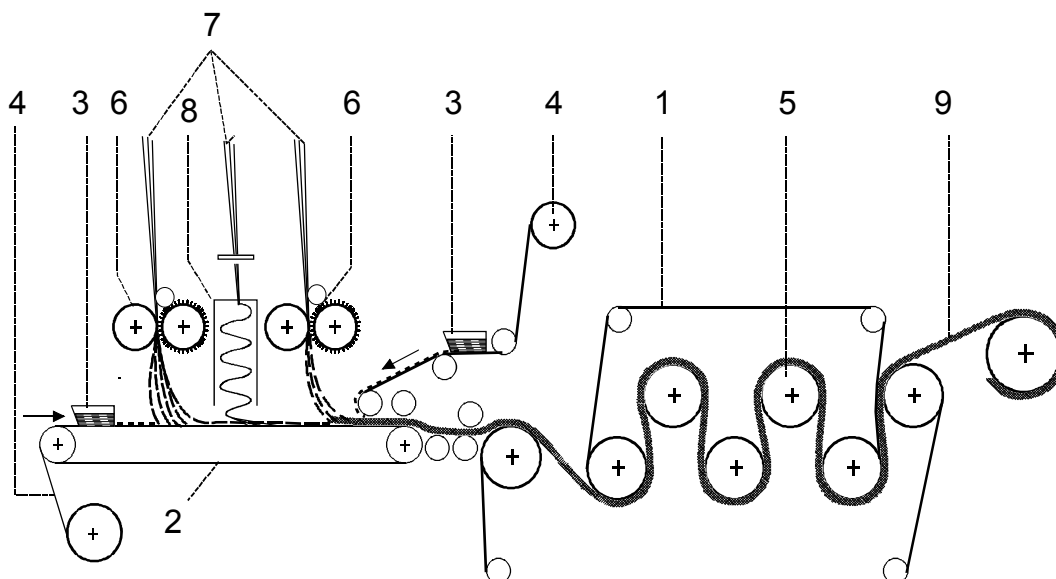
prasowanie nisko- i wysokociśnieniowe na mokro, formowanie sposobami nawijania, różne sposoby wytwarzania rur i walczków, przeciąganie profili, formowanie płyt płaskich i falistych, wreszcie wytwarzanie tłoczyw miękkich i sypkich (DMC - Dough Moulding Compounds) lub warstwowych (SMC - Sheet Moulding Compounds) i ich przetwórstwo metodami prasowania tłocznego, przetłocznego lub wtrysku.

Rosnąca konkurencja kompozytów termoplastycznych, jak i lekkich stopów metali - szczególnie w dziedzinie technik motoryzacyjnych - oraz dążenie do polepszenia jakościowych charakterystyk wyrobów i obniżenia kosztów spowodowały znaczny rozwój techniczny wielu z wymienianych wyżej metod wytwarzania kompozytowych materiałów termoutwardzalnych. Ze względu na ograniczoną objętość w tym artykule będą bliżej przedstawione tylko niektóre ciekawsze unowocześnieńia w tej dziedzinie oraz ważniejsze typy kompozytów termoplastycznych.

POLIESTROWE TŁOCZYWA WARSTWOWE SMC

SMC mają istotne tonażowo i finansowo udziały w produkcji polimerowych materiałów kompozytowych i

¹ prof. zw. dr inż.



Rys. 1. Schemat urządzenia trzeciej generacji do wytwarzania tłoczyw SMC sposobem ciągłym: 1 - giętkie taśmy ściskające pakiet SMC o obiegu zamkniętym, 2 - taśma elastyczna podkładowa, 3 - rakle do nakładania masy impregnującej, 4 - folie PE, 5 - stalowe walce impregnacjne ułożone meandrycznie, 6 - krajalnice rovingu, 7 - rury prowadzące roving z nadmuchem powietrza, 8 - pasma rovingu ciągłego, układane wzdłużnie lub pętlicowo, 9 - pakiet wytworzonego SMC nawijanego na wał odbiorczy

Fig. 1. The scheme of the third generation device for continuous production of SMCs: 1 - flexible closed-circuit bands compressing SMC packet, 2 - elastic ground belt, 3 - squeegees for applying impregnating material, 4 - PE foils, 5 - steel impregnating rolls arranged in meanders, 6 - roving cutters, 7 - roving-leading pipes with air blowing, continuous roving strands laid (LAY) lengthwise or looping, 9 - packet of the produced SMC wound at the receiving roll

wykazują stosunkowo duży trend wzrostu wytwarzania i zastosowań [1].

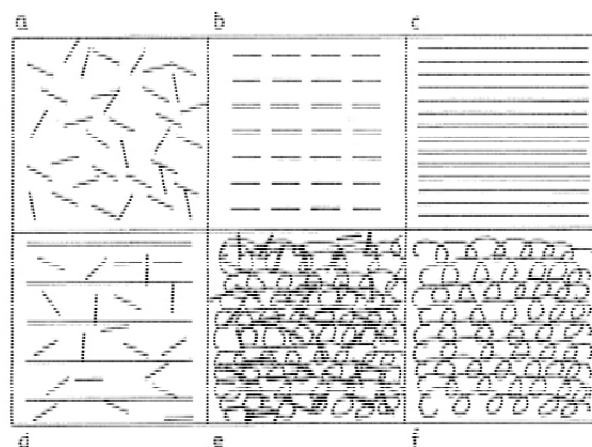
W skład tych tłoczyw wchodzi nienasycone żywice poliestrowe różnych typów, włókna szklane, wypełniacze proszkowe nieorganiczne (najczęściej węgiel wapnia), tzw. zagęszczacz chemiczny w postaci MgO, utwardzacze nadtlenkowe i bardzo różne środki modyfikujące (pigmenty, inhibitory, dodatki antyskurczowe i uniepalniające, środki poślizgowe - np. grafit, PTFE, antystatki, dodatki elektroprowadzące). Wszystkie dodatki wprowadzane są do tłoczyw w różnych zestawach zależnie od przeznaczenia wyrobu. Głównym użytkownikiem tłoczyw SMC jest przemysł motoryzacyjny (elementy karoserii) i elektromaszynowy (np. obudowy maszyn i urządzeń).

Tłoczywa te wytwarzane są w procesie ciągłym na wysoko zmechanizowanych urządzeniach trzeciej generacji (rys. 1). Umożliwiają one wytwarzanie materiału o różnej strukturze wzmocnienia (rys. 2), a więc i różnych właściwościach wytrzymałościowych i przetwórczych. Długość włókien ciętych wynosi zwykle ok. 5÷50 mm, ich zawartość najczęściej ok. 35%. Zawartość wypełniaczy mineralnych waha się w granicach 35÷50%, zaś żywicy 30÷35%. Obecnie używane urządzenia trzeciej generacji wytwarzają ok. 12 ton tłoczyw na dobę.

Formowanie wyrobów z SMC (np. elementów karoserii) odbywa się w specjalnie zmodyfikowanych prasach hydraulicznych, w formach stalowych polerowa-

nych lub chromowanych w temperaturze 130 do 160°C pod ciśnieniem 5÷10 MPa.

Stosunkowo małe ciśnienia prasowania tłoczyw SMC pozwalają na wytwarzanie wyprasek o dużych gabarytach (np. dach samochodu). Zastosowanie tłoczyw o małym, a nawet zerowym skurczu prasowniczym (z tzw. dodatkami low profile) oraz zrobotyzowanej techniki nanoszenia na powstającą wypraskę w trakcie cyklu prasowania specjalnych kompozycji powłokowych (tzw. in mould coating - IMC) umożliwia



wytwarzanie wyprasek o gładkości i połysku klasy A, wymaganej przez przemysł samochodowy.

Rys. 2. Struktura włókien różnych typów SMC: a) SMC-R - Random Fiber, b) SMC-D - Directional Fiber, c) SMC-C - Continuous Fiber, d) SMC-R/C - kombinacje układu R i C, e) SMC-R

z układem C, f) SMC wyłącznie z pasmami rovingu ułożonymi pętlicowo

Fig. 2. Fiber structure for various SMC types: a) SMC-R - random fibers, b) SMC-D - directional fibers, c) SMC-C - continuous fibers, d) SMC-R/C combined random and continuous fibers, e) SMC-R with looping C, f) SMC of looping roving strands only

Przykładem takiego zastosowania jest kabina angielskich ciężarówek ERF, składająca się z 17 wyprasek o łącznej masie 173 kg. Innym są pokrywy silników samochodów Citroën, zderzaki samochodów Renault oraz cała karoseria samochodu Renault Espace. Duże koncerny przemysłu metalowego dostarczają całe zautomatyzowane i skomputeryzowane linie produkcyjne do wytwarzania wyprasek z SMC dla przemysłu motoryzacyjnego. Obszerny opis stanu techniki SMC znajduje się w ostatnich publikacjach krajowych [1-3].

NAWIJANIE [4-7]

Formowanie metodą nawijania pozwala na stosowanie dużego stopnia automatyzacji i sterowania komputerowego oraz umożliwia znaczną redukcję kosztów robocizny. Stosowane są dwa podstawowe systemy nawijania [8]:

- nawijanie obwodowe lub śrubowo-pętlicowe urządzeniami opartymi na działaniu typu tokarki (obrotowy rdzeń, przesuwany suport),
- nawijanie planetarne pozwalające na uzyskanie nawoju obwodowego i poosiowego (wzdłużnego).

Systemy te mogą być łączone. W zakresie budowy urządzeń nawijających nastąpił znaczny rozwój. Do niedużych elementów stosowane są nawijarki wielotrzpieniowe, mające nawet do 30 wrzecion obrotowych, na których montowane są rdzenie. Dostarczane są komputerowe programy do sterowania przy wytwarzaniu nawet skomplikowanych kształtów o układzie wzmocnień, zapewniającym uzyskanie optymalnych właściwości wytrzymałościowych struktury nawijanej, uwzględniające rozkład naprężeń w eksploatowanym wyrobie. Istotnym ograniczeniem techniki nawijania jest trudność uzyskania elementów o płaszczyznach wklęsłych. Problemem jest również konstrukcja i materiał rdzeni, na których powstaje nawijana struktura kompozytowa, a które w zasadzie muszą być z niej po utwardzeniu wyjęte. W tym zakresie dąży się stale do unowocześnienia rozwiązań konstrukcyjnych i materiałowych. Interesująca jest konstrukcja rdzenia poprzez tworzenie go z nawijanej na trzpienie rozporowe elastycznej taśmy stalowej bez końca. Rdzeń taki w metodzie Drostholm Prod. Inc. stanowi ok. 8 cm taśma, tworząca układ zamknięty, pozwalająca na prowadzenie nawijania metodą ciągłą wyrobów rurowych o średnicach od ok. 30 do 2000 cm. Metodą tą wytwarzane są poliestrowe rury i walczaki w firmie Nordcap Plastic koło Gdańsk. Rury te mają strukturę przekładkową, zawierającą obok włó-

kien obwodowych cięte włókna, ułożone wzdłużnie, oraz napełniacz w postaci piasku.

Problem rdzenia upraszcza się w przypadku, gdy stanowi on wewnętrzny integralny element wyrobu. Rdzenie takie określa się jako rdzenie „stracone”. Tworzą one wewnętrzną warstwę np. antykorozyjną lub uszczelniającą. Najczęściej są wykonywane ze sztywnych termoplastów lub blachy. Metoda nawijania stosowana była w USA początkowo w latach 50. w technice raketowej. Obecnie wytwarza się tą metodą przemysłowe zbiorniki stałe, cysterny samochodowe i kolejowe, rury i wyroby sportowe. Wzrasta też stosowanie obok włókien szklanych włókien karbonizowanych (C). Ważnym kierunkiem zastosowań są butle do gazów sprężonych, np. do napędu gazowego samochodu, do nurkowania i wspinaczki wysokogórskiej, gdzie zastosowanie włókien C pozwala na znaczne oszczędności ciężarowe w stosunku do butli stalowych. Ten rynek w USA szacowany jest na około 250 tys. dolarów.

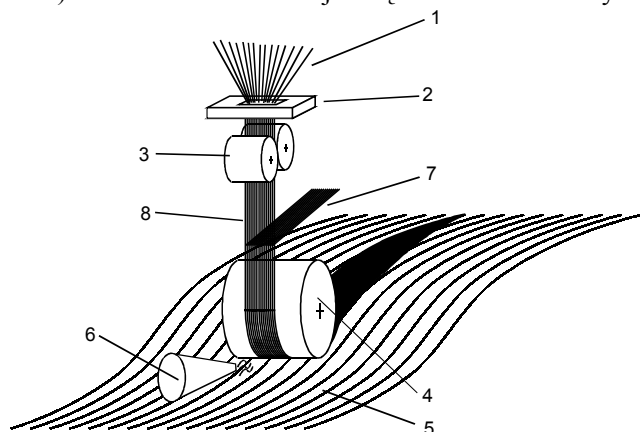
Istotnym elementem rozwoju technologii nawijania w ostatnim okresie jest stosowanie zamiast żywic termoutwardzalnych polimerów termoplastycznych. Podstawową trudnością dla dużej szybkości nawijania z użyciem termoplastów jest trudność impregnacji włókien, gdyż stopy termoplastów mają lepkość o parę rzędów większą niż żywice termoutwardzalne. Stosuje się tu więc wstępnie impregnowane pasma lub taśmy włókien, które są nawijane na rdzeń, poddawane topieniu i chłodzeniu, lub pasma przędz hybrydowych, składające się z włókien wzmacniających (szklanych, węglowych) i filamentów termoplastycznych, które topią się pod wpływem różnych sposobów nagrzewania i łatwo impregnują sąsiednie włókna strukturalne. Stosowane są też przędze rdzeniowe (rdzeń np. z włókna szklanego pokryty polimerem termoplastycznym).

FORMOWANIE METODĄ UKŁADANIA WŁÓKIEŃ LUB TAŚM [8-13]

Metoda ta została pierwotnie zastosowana w technice lotnictwa wojskowego w USA, szczególnie w przypadku elementów o powierzchniach wklęsłych i wymagających określonego zorientowania wzmocnienia (np. skrzydła i usterzenie). Pozwala ona, podobnie jak nawijanie, na uzyskanie dużego stopnia robotyzacji, automatyzacji i komputerowego projektowania i sterowania układów włókien. W tej metodzie w ostatnim okresie stosowane są już także termoplasty. Schemat metody przedstawia rysunek 3.

Ujemną cechą metody jest konieczność wielokrotnego, posuwisto-zwrotnego nakładania impregnowanego wzmocnienia w postaci płaskiego paska szerokości kilku mm w celu uzyskania wyrobu o dużej powierzchni. Stosowanie szerszych pasków utrudnia ściśle ułożenie na powierzchniach o zróżnicowanym kształcie

i może powodować luki w układzie wzmocnienia. Metodą tą wytwarza się elementy struktur samolotów (górną powierzchnia skrzydła przechylnego wiroplatu V22). W metodzie rozwija się stosowanie nowych



typów włókien i polimerów np. utwardzanych wiązką elektronów. W przypadku elementów, w których następują znaczne koncentracje naprężeń, np. wokół otworów lub gwałtownych zmian kształtu, stosuje się tzw. minifibre placement, pozwalające na optymalne, gęste ułożenie włókien, skutkujące znacznym wzrostem wytrzymałości w tych krytycznych miejscach konstrukcji.

Rys. 3. Schemat wytwarzania kompozytu metodą układania włókien: 1 - indywidualne impregnowane pasma rovingu S lub C o kontrolowanym napięciu, 2 - kolimator łączący pasmo w taśmę, 3 - wałki ciągnące i zagęszczające, 4 - wałek nakładający, 5 - powierzchnia elementu konstrukcyjnego, 6 - nagrzewacz, 7 - nóż do odcinania taśmy, 8 - taśma włókien

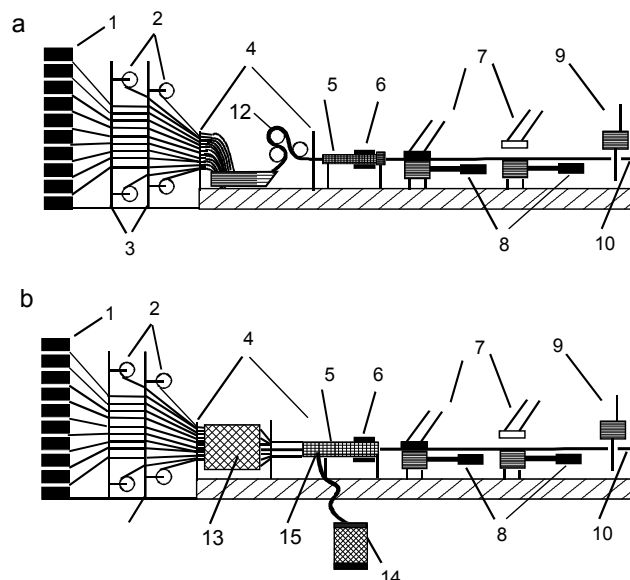
Fig. 3. Scheme of production of the composite by the fiber placement method: 1 - individual impregnated S or C roving strands of controlled tension, 2 - collimator joining strands into a band, 3 - driving and compacting rolls, 4 - placing roll, 5 - structural element surface, 6 - heater, 7 - band cutting knife, 8 - band of fibers

FORMOWANIE PROFILI (PULTRUSION) [16-21]

Ogólnie proces „pultruzji” polega na impregnacji ciągłych pasm włókien (np. szklanych, węglowych) ciekłą żywicą, przeciągnięciu ich przez ustniki formujące, przez zespół grzejny o określonym profilu temperaturowym dla utwardzenia, a dalej pocięciu produktu na odpowiednie odcinki. Metoda ta stanowi prawdziwie ciągły proces wytwarzania strukturalnych elementów kompozytowych z dużą wydajnością, stosunkowo niskimi kosztami, bez odpadów i przy dużej automatyzacji. Została ona wprowadzona do techniki w latach 50., np. przy wytwarzaniu prętów elektroizolacyjnych, spinin-gów, anten prętowych i profili konstrukcyjnych w wersjach ceowników i teowników. W dalszym okresie po rozwoju urządzeń i głowic formujących asortyment profili objął kształty bardzo skomplikowane, np. ram okiennych, rur o przekroju kołowym i prostokątnym, posiadających w strukturze nie tylko włókna wzdluzne, ale tak-

że warstwy tkanin lub mat, zapewniające wytrzymałość poprzeczną lub obwodową (rys. 4).

Powiększyły się także rozmiary poprzeczne wytwarzanych profili. Zastosowano też ogrzewanie prądami wysokiej częstotliwości, co zapewniało równomierne sieciowanie żywic termoutwardzalnych w przekrojach o dużych wymiarach (np. prętów masywnych). Wprowadzono też kombinacje typowego przeciągania wzdluznych włókien z procesem równoczesnego nawijania obwodowego (proces zwany „pullwinding”). Proces ten pozwala na wytwarzanie profili z ciągłym rdzeniem obcym. Rozpoczęto też wytwarzanie profili z użyciem termoplastów np. przy zastosowaniu preimpregnowanych włókien. Wprowadzono też specjalny segment, w którym stopiony termoplast jest tłoczony pod ciśnieniem, co przypomina metodę RTM, ale pracującą dynamicznie (w ruchu) - rys. 4b.



Rys. 4. Schematy urządzeń do wytwarzania profili: a) urządzenie typowe z wanną impregnacijną do pasm włókien, b) urządzenie z wprowadzeniem tkanin oraz z segmentem impregnacji pod ciśnieniem; 1 - nawoje rovingu, 2 - zwoje tkanin, 3 - prowadnice formujące, 4 - prowadnice, 5 - narzędzie formujące profil, 6 - urządzenie grzewcze, 7 - odciąg profilu, 8 - suwaki hydrauliczne odciągu, 9 - przesuwana piła tnąca, 10 - gotowy profil ciągniony, 11 - wanna impregnacyjna, 12 - wałki napinające i odciskające, 13 - podgrzewacz wstępny wzmocnienia, 14 - naczynie ciśnieniowe z żywicą, 15 - wtlaczanie ciekłego polimeru (żywicy)

Fig. 4. Schemes of devices for pultrusion process: a) typical device fitted with fiber band impregnation tank, b) the device introducing cloths fitted with pressure impregnation unit; 1 - roving beams, 2 - cloth rolls, 3 - shaping guides, 4 - guides, 5 - section shaping tool, 6 - heater, 7 - section broaching device, 8 - hydraulic sliders, 9 - sliding cut-off saw, 10 - finished drawn section, 11 - impregnation tank, 12 - tightening rollers, 13 - initial heater of the reinforcement, 14 - resin pressure tank, 15 - liquid resin injection

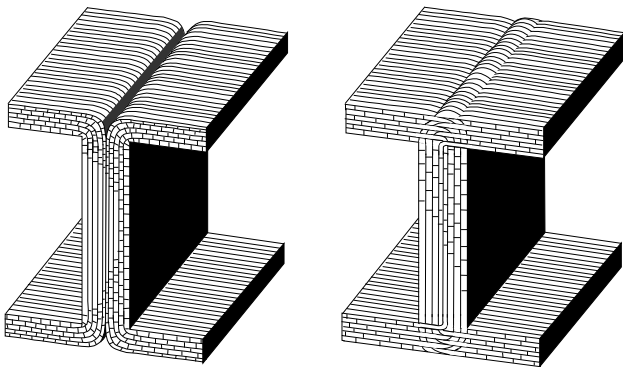
WZMOCNIENIA TRÓJWYMIAROWE KOMPOZYTÓW I PREFORMY [22-35]

Wzmocnienia o strukturze przestrzennej (3D) wytwarzane są różnymi technikami, takimi jak: tkanie,

splatanie i oplatanie, igłowanie i dzianie. Tymi metodami wytwarzane są trójwymiarowe preformy różnych kształtów do otrzymywania kompozytów różnymi technologiami.

Tkanie

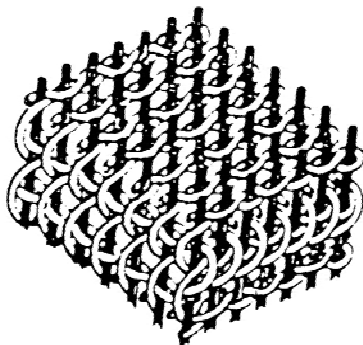
Przy niewielkich modyfikacjach typowych maszyn tkackich można wytwarzać wielowarstwowe wzmocnienia tkane o dużej różnicy struktury. Mogą tu być stosowane różne włókna lub ich kombinacje, np. włókien szklanych z węglowymi. Tak wytwarza się preformowane wielowarstwowe wzmocnienia, np. o kształcie dwuteownika (rys. 5).



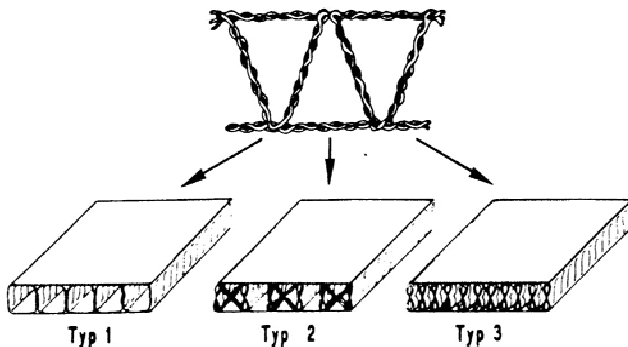
Rys. 5. Schemat struktury tkanej preformy dwuteownika o budowie tekstylnej

Fig. 5. Scheme of the woven preform of textile structure I-section

a)



b)



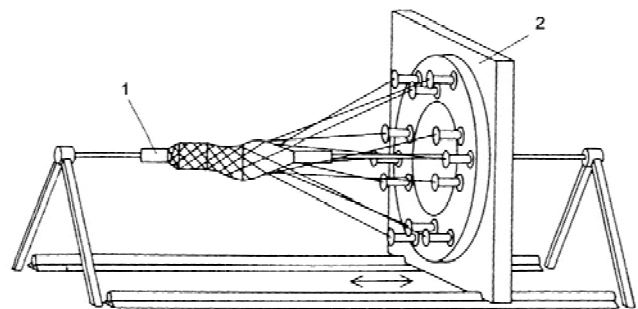
Rys. 6. Schemat struktury różnych wzmocnień 3D: a) tkanina 3D, b) tkaniny dystansowe

Fig. 6. Scheme of structure of various 3-D reinforcements: a) 3-D cloth, b) distance clothes

Wadą takich preform jest ułożenie włókien dwukierunkowo, tj. pod kątem 0 lub 90° do osi preformy. Prowadzi to, że kompozyty tak wzmocnione mają małą wytrzymałość na ścinanie i skręcanie. Prowadzone są więc prace nad rozwojem urządzeń pozwalających na wytwarzanie preform z włóknami ułożonymi pod kątem 0, 45 i 90°. Stosunkowo wysokie koszty wytwarzania preform tkanych ogranicza ich zastosowanie do celów specjalnych w technikach lotniczych i kosmicznych. Prowadzi się więc prace nad obniżeniem kosztów wytwarzania przez konstrukcje ulepszonych krosien. Rozwojowym kierunkiem zastosowania tkania 3D jest wytwarzanie struktur warstwowych i przekładkowych (ang. Distance lub Spacer Fabrics) - rys. 6, służących jako lekkie konstrukcje lotnicze.

Splatanie

Tą metodą wytwarza się wzmocnienia tak płaskie 2D, jak i trójwymiarowe 3D. Te ostatnie wprowadzono do techniki w końcu lat 60. Wytwarza się takie preformy splatane z włókien szklanych, węglowych, aramidowych, przy zastosowaniu różnych urządzeń splatających



(rys. 7).

Rys. 7. Schemat horizontalnego splatania preformy o skomplikowanej geometrii: 1 - stały rdzeń, 2 - obrotowe i przesuwnie urządzenie

Fig. 7. Scheme of horizontal stranding of a geometrically complicated preform: 1 - constant core, 2 - rotating and sliding device

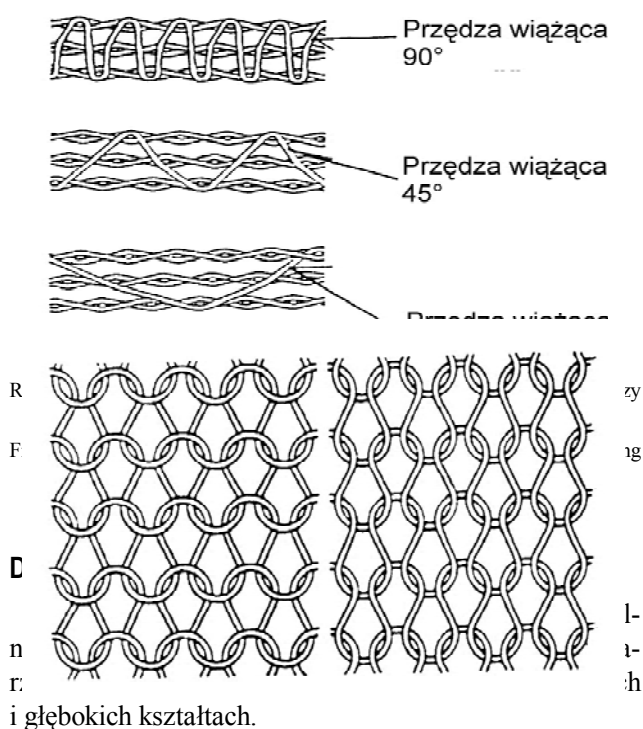
Wytwarza się splatane preformy o strukturze przestrzennej (np. zakończenie dziobowe rakiet). Ułożenie włókien we wzmocnieniach splatanych może być różnokątowe. Limitem jest tu wymiar poprzeczny preformy, co ogranicza konstrukcja urządzeń splatających. Wydajność procesu splatania nie jest duża, gdyż proces jest dość wolny, co ogranicza szersze jego stosowanie.

Igłowanie i zszywanie

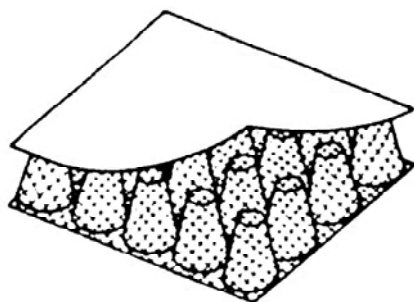
Proces wytwarzania preform metodą igłowania jest stosowany dla technik lotniczych i kosmicznych. Pierwotnie igłowanie stosowano do wytwarzania wielowar-

stwowych preform z tkanin dla ich złączania i uzyskania wyrobu o pożądanym kształcie (rys. 8).

Dalszym celem było uzyskanie podwyższonej udatności kompozytów otrzymywanych z wielowarstwowych wzmocnień preformowanych o skomplikowanych kształtach. Takie struktury wymagają specjalnych wieloigłowych maszyn, działających na zasadzie robotów, co podraża jednak koszty inwestycyjne. Obecnie stosowane maszyny igłujące wytwarzają wielowarstwowe wzmocnienia preformowane o szerokości do 1 m i grubości 5 mm. Prowadzone są prace nad dalszym rozwojem wytwarzania preform tą metodą np. w koncernie Boeinga do wytworzenia preformy skrzydła samolotu, a także w Advanced Composite Technology Center w NASA.



i głębokich kształtach.



Rys. 9. Sche

Fig. 9. Sche

Tą metodą można wytwarzać wzmocnienia 2D i 3D (rys. 10).

Rys. 10. Schemat struktury dzianego wzmocnienia 3D (dystansowego)

Fig. 10. Scheme of the structure of knitted 3-D (distance) reinforcement

Kompozyty wytwarzane ze wzmocnieniem dzianym cechuje stosunkowa duża udatność, lecz mała wytrzymałość na rozciąganie i zginanie. Znajdują one różne zastosowania specjalne w przemyśle maszynowym, lotniczym, kosmicznym i protez medycznych. Ostatnio prowadzone są prace nad kombinacją procesów dziania i tkania w celu uzyskania wzmocnień zapewniających kompozytom dużą wytrzymałość i udatność.

WZMOCNIONE GRANULATY TERMOPLASTYCZNE [36-44]

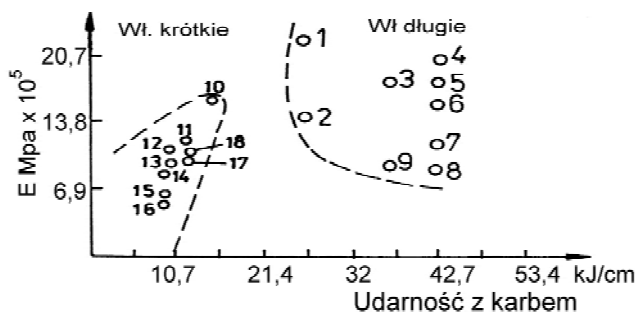
Obecnie na rynku znajdują się praktycznie wszystkie polimery termoplastyczne wzmocnione włóknami, głównie szklanymi. Jednak tonażowo najważniejsze są poliamidy i polipropylen. W przypadku termoplastów, jak to powiedziano już wcześniej, istotnym problemem jest impregnacja i zwilżanie włókien polimerami w stopie o dużych lepkościach, znacznie większych niż lepkość oligomerycznych żywic termoutwardzalnych. Tradycyjne już granulaty termoplastyczne z włóknem krótkim są wytwarzane w wyciarkach ślimakowych, do których obok granulatu termoplastu wprowadzane jest ok. 15÷35% ciętych włókien szklanych o długości zwykle 3 mm. Mieszanie i zwilżanie włókien następuje w stopie. Jako produkt otrzymuje się granulaty wzmocnione, w którym włókna rozmieszczone chaotycznie w przestrzeni mają długość mniejszą niż wprowadzonych wskutek łamania w procesie wytłaczania. Wytwarzanie wyrobów z takich granulatów odbywa się metodą wtrysku. Wskutek dalszego uszkodzenia i łamania we wtryskarce ślimakowej włókna w gotowym wyrobie są bardzo krótkie, a ich długość wynosi na ogół mniej niż 0,5 mm i jest zwykle mniejsza niż długość krytyczna, a więc i efekt wzmacniający jest niewielki.

W ostatnim okresie opracowano metody wytwarzania termoplastycznych granulatów z włóknem długim. W Europie wprowadzono je do techniki na początku lat 90. pod nazwą Long Fibre Thermoplastics (LFT). W wyrobach wtryskiwanych z tych nowych granulatów przy zoptymalizowanych parametrach wtrysku włókna są stosunkowo długie, sięgające kilku milimetrów, a więc na ogół przekraczające długość krytyczną. Właściwości wytrzymałościowe takich wyprasek są więc

wysokie, znacznie większe niż tradycyjnych z włóknem krótkim (rys. 11).

Z różnych stosowanych przemysłowo metod wytwarzania granulatów długowłóknistych można wymienić dwie główne, z których pierwsza jest szerzej stosowana:

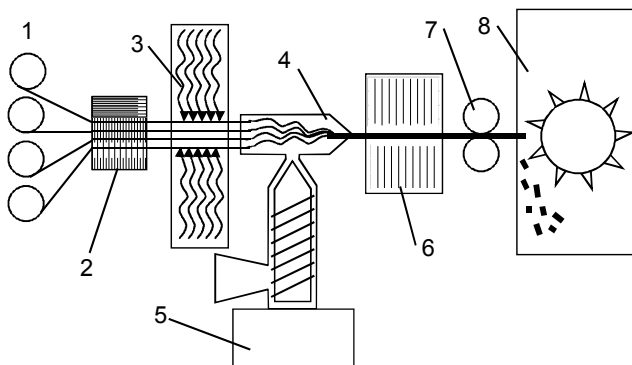
- impregnacja ciągłego rovingu w głowicy krzyżowej wylączarki (rys. 12) i następnie cięcie na sztabki (peletki) o długościach: 6, 12, 18, 25 i 50 mm. Włókna o tych długościach ułożone są równoległe do osi sztabki. Zawartość włókien od ok. 30 do 50% wag.;
- wprowadzenie do dwuślimakowej wylączarki korotacyjnej ciągłego rovingu, który owija się na rdzeniu ślimaka i zostaje rozrywany zwojami drugiego. W efekcie otrzymuje się granulaty o bardzo różnej długości włókien i różnym ich rozkładzie przestrzennym.



Rys. 11. Udarność i moduł sprężystości termoplastów wzmocnionych włóknem krótkim (tradycyjne) i długim wg nowych technologii: 1-9 kompozyty z różnymi termoplastami z włóknem długim, 10-18 z włóknem krótkim

Fig. 11. Impact resistance and elasticity modulus of thermoplastics reinforced with short fibers (traditional) and long fibers according to the new LFT technology: 1-9 composites with various thermoplastics with long fibers, 10-18 with short fibers

Kompozyty typu LFT znajdują szybko rosące zastosowanie w przemyśle maszynowym.



Rys. 12. Schemat otrzymywania kompozytów termoplastycznych (granulatów) z włóknem długim (LFT) w głowicy krzyżowej wylączarki: 1 - nawoje rovingu, 2 - strefa ewentualnego nanoszenia preparacji powierzchniowej, 3 - strefa ogrzewania i suszenia, 4 - głowica krzyżowa, 5 - wylączarka, 6 - strefa chłodzenia, 7 - wałki odciągowe, 8 - krawalnica

Fig. 12. Scheme of production of granulated long fiber thermoplastic composites by means of extrusion cross head: 1 - roving beams, 2 - zone of possible applying of surface preparation, 3 - heating and

drying zone, 4 - cross head, 5 - extruder, 6 - cooling zone, 7 - broaching rollers, 8 - cutter

KOMPOZYTY KONSTRUKCYJNE OTRZYMYWANE METODĄ WYTŁACZANIA, DEPOZYCJI I NISKOCIŚNIENIOWEJ KOMPRESJI [45]

Sposób ten, rozwijany w ostatnich kilku latach z zastosowaniem głównie na elementy samochodowe i przemysłu maszynowego, zwany z ang. Melt Compression Moulding - In Mould Lamination - MCM-IML, polega na wytworzeniu w wylączarce materiału typu LFT i wytłaczaniu przez ustnik szczelinowy w głowicy taśmy, która jest układana w dwuczęściowej formie umieszczonej w prasie. Głowica porusza się w trzech osiach xyz , co umożliwia równomierne ułożenie taśmy w formie o powierzchni sfalowanej i skomplikowanej. Po pokryciu całej formy następuje etap niskociśnieniowego sprasowania, schłodzenia wypraski i jej wyjęcia. W tym procesie można włożyć do formy przed sprasowaniem powierzchniowy materiał dekoracyjny (np. tkanina welurowa) i uzyskać gotową wypraskę, np. wewnętrznej strony drzwi samochodowych. Proces może być wysoko zautomatyzowany. Cykl wytwarzania takiej wypraski wynosi ok. 60 s. Właściwości wytrzymałościowe są wysokie, ponieważ włókna nie ulegają uszkodzeniu jak w procesie wtrysku.

TERMOPLASTY WZMOCNIONE MATĄ ROVINGOWĄ - TWM [40, 46-49]

Stosunkowo nowymi materiałami konstrukcyjnymi o charakterze płyt są termoplasty wzmocnione matą rovingową lub ciętym rovingiem. Głównymi polimerami używanymi w tej technologii są poliamidy, polipropylen, a ostatnio także ABS, poliwęglany, poliestry nasycone i stopy (PC/PBT). Stosowanych jest kilka metod wytwarzania tych materiałów. Klasyczna technologia firmy amerykańskiej Azdel Inc., stosowana także przez szereg firm europejskich, polega na wytłaczaniu z głowicy szczelinowej wylączarki płyty termoplastu i wtłaczaniu w nią na gorąco dwu warstw maty szklanej z rovingu ciętego w prasie taśmowej, po czym przejściu tego materiału do chłodzonej sekcji prasy taśmowej, a następnie pocięciu kompozytu na płyty o grubości 1÷6 mm. W tej technologii są stosowane także maty pętlicowe z rovingu ciągłego (Unifilo), a może być wprowadzona także tkanina szklana. Produkcja tą metodą jest procesem ciągłym. W zależności od rodzaju stosowanego polimeru produkty wg technologii Azdel mają nazwy Azdel, Azmet i Azloy.

Stosowana jest też metoda „papiernicza”, polegająca na wytworzeniu w zbiorniku suspensji wodnej polimeru w postaci drobnego proszku oraz ciętych włókien rovin-

gu szklanego długości ok. 12 mm. Suspensja ta jest podawana na taśmę dziurkowaną, z której woda jest odsysana, a wytworzona warstwa polimeru i włókien przechodzi do sekcji grzejnej i dalej jest obrabiana jak w metodzie Azdel lub podawana na ogrzewany kalander. W tej metodzie cięty roving ulega defilamentacji i w efekcie powstaje produkt wzmocniony wysoko zdyspergowanymi w polimerze monowłóknami szklanymi (o średnicy ok. $10\div 13\ \mu\text{m}$). Właściwości mechaniczne tak wytworzonego materiału są lepsze niż opisanego poprzednio, ale mamy do czynienia z dużymi ilościami wody.

Wytwarzanie elementów konstrukcyjnych z TWM polega na formowaniu w prasach hydraulicznych, takich jak dla SMC, na gorąco pod ciśnieniem metodą tzw. stampingu (ciśnienie ok. $5\ \text{N/mm}^2$) lub prasowania z płynięciem materiału (flow moulding) pod wyższym ciśnieniem (ok. $15\div 20\ \text{N/mm}^2$) i w istotnie wyższej temperaturze. TWM stosowane są od końca lat 70. w europejskim przemyśle samochodowym do wytwarzania elementów podlegających silnie korozji, jak np. progi, nadkola, misy olejowe, obudowy skrzyni biegów, zderzaki, a także szkielety siedzeń.

RIM STRUKTURALNY - S-RIM [19, 50-53]

RIM - Reaction Injection Moulding - tzw. wtrysk reaktywny polega na stosowaniu jako substratów substancji monomerycznych, ewentualnie oligomerycznych, o małej lepkości, wymieszaniu ich w udarowej głowicy mieszającej i wpompowaniu ich do form, w których ułożone jest wzmocnienie włókniste (maty, tkaniny, preformy). W formie następuje polimeryzacja i powstaje gotowy wielkocząsteczkowy wyrób kompozytowy. Metodą tą wytwarzane są głównie wyroby z poliuretanów i w mniejszym zakresie z poliamidów. Opracowuje się również stosowanie substratów do otrzymywania innych polimerów. Tą metodą można wytwarzać duże elementy konstrukcyjne głównie dla przemysłu samochodowego. Nowo rozwinięte systemy pozwalają na stosowanie tanich form z tworzyw wzmocnionych (np. laminatów epoksydowych), zamkniętych mechanicznie i przy bardzo małym ciśnieniu tłoczenia. Temperatury reakcji egzotermicznej powstawania polimeru sięgają $80\div 100^\circ\text{C}$ przy wyrobach grubości $5\div 7\ \text{mm}$. Wytwarzane są elementy karoseryjne o dużych masach aż do 50 kg i przy cyklach formowania od 3 do 20 min. Metoda jest energooszczędna. Materiały typu S-RIM, TWM, LFT, SMC można traktować jako komplementarne i uzupełniające się w zależności od przeznaczenia i warunków eksploatacji wyrobów.

LITERATURA

[1] Królikowski W., Spaay A., Polimery 1999, 54, 716.

- [2] Królikowski W., Materiały III Szkoły Kompozytów, Wisła 10-12 grudnia 2001, Politechnika Warszawska, 159.
- [3] Królikowski W., Inżynieria Materiałowa 2002, 1-2 (w druku).
- [4] Bannister M., Composites 2001, Part A, 32, 901.
- [5] Jacobs A., Reinf. Plast. 1998, 42, September, 48.
- [6] Strover D., High Perform. Comp. 1994, May/June, 26.
- [7] Leek C., Reinf. Plast. 1998, 42, September, 52.
- [8] Królikowski W., Kłosowska-Wońkiewicz Z., Penczek P., Żywiec i laminaty poliestrowe, WNT, Warszawa 1986, 570.
- [9] Pasanen M. i in., Proceedings of the 5th Japan Intern. SAMPE Symposium 1996, 1055.
- [10] Evans D., 38th Intern. SAMPE Symposium 1993, 80.
- [11] Fisher K., High Perform. Comp. 1995, July/August, 23.
- [12] Anon., High Perform. Comp. 1999, March/April, 7.
- [13] Anon., High Perform. Comp. 1999, May/June, 7.
- [14] Goodman D. i in., 44th Intern. SAMPE Symposium 1999, 269.
- [15] Dierdjovic B. i in., 44th Intern. SAMPE Symposium 1999, 1240.
- [16] Królikowski W., Jak odnośnik 8, 564.
- [17] Anon., Rein. Plast. 1991, 35, November 37.
- [18] Jürss D., Michaeli W., Kunststoffe 1992, 82, 59.
- [19] Fanucci J.P., Nolet S.C., Polym. Comp. 1996, 673.
- [20] Weaver A., Books N., Reinf. Plast. 1996, 40, May, 22.
- [21] Stickler P. i in., 44th Intern. SAMPE Symposium 1999, 156.
- [22] Brandt J. i in., 23 Intern. AVK Tagung, Mainz 1990, Sect. B2, 1.
- [23] Mouritz A. i in., Composites 1999, 30, Part A, 1445.
- [24] Bannister M., Herszberg J., Resin Transfer Moulding for Aerospace Structures - Advanced Reinforcements, Chapman and Hall, London 1998.
- [25] Bannister M., Nicolaidis A., 4th Intern. Symposium for Textile Composites 1998, 0-36-1.
- [26] Wilsons S. i in., 43th Intern. SAMPE Symposium 1998, 1330.
- [27] Dickinson L. i in., 44th Intern. SAMPE Symposium 1999, 303.
- [28] Verpepest i in., 35th Intern. SAMPE Symposium 1990, 461.
- [29] Nakatani T. i in., 4th Japan Intern. SAMPE Symposium 1995, 1473.
- [30] Rosenbaum U., Michaeli W., 22 Intern. AVK Tagung, Mainz, 1989 Sect. 9, 1.
- [31] Hörsch F., 23 Intern. AVK Tagung, Mainz 1990, Sect. B2, 1.
- [32] Dexter M., 28th Intern. SAMPE Symposium 1996, 404.
- [33] Mouritz A., Composites 1997, 28, Part A, 979.
- [34] Van Vuure i in., 44th Intern. SAMPE Symposium 1999, 293.
- [35] Bibo G. i in., Comp. Sci. Technology 1997, 57, 129.
- [36] De S.K., White J.R., Short Fibre - Polymer Composites, Woodhead Publ. Ltd., Cambridge 1996.
- [37] Schmidt B., Kunststoffe 1989, 79, 624.
- [38] Zettler M. Doering, Kunststoffe 1989, 79, 797.
- [39] Ehrenstein G., Schemme M., Materiały Symp. nt. Kompozyty i kompozycje polimerowe, Szczecin, czerwiec 1994, 33.
- [40] Dittmar H., Intern. AVK-Tagung, Baden-Baden 1999.
- [41] Edelmann K. i in., Intern. AVK-Tagung, Baden-Baden 1999.

- [42] Brussel R., Kuhfusz R., Intern. AVK-Tagung, Baden-Baden 1998.
- [43] Edelmann K., Naitzel, Intern. AVK-Tagung, Baden-Baden 1998.
- [44] O'Brian K. i in., 43rd Ann. Conf. Composite Institute SPJ 1988 Sect. 3D.
- [45] Kulmann G., Intern. AVK-Tagung, Baden-Baden 1998.
- [46] Six J., Intern. AVK-Tagung, Mainz 1987, Sect. 22, 1-8.
- [47] Jung N., Fachtagung Faserverbundwerkstoffe auf dem Weg in die Zukunft, Würzburg 1989, 140.
- [48] Anon., Reinf. Plast. 1999, 43, July/August, 48.
- [49] Oelgarth G. i in., Kunststoffe 1998, 71, 480.
- [50] Klepek O., Materiały Sympozjum nt. Kompozyty i kompozycje polimerowe, Szczecin, czerwiec 1994, 52.
- [51] Begemann M., Michael W., 22-AVK Tagung, Mainz 1989, Sect. 11, 1.
- [52] Echler J., Wilkinson T., 41th Ann. Conf. Composite Institute SPJ 1986, 9.
- [53] Kuhlman P. i in., 21 AVK Tagung, Mainz 1987, 33.