

Mateusz Kozioł*, Jerzy Myalski, Aleksandra Bogdan

Politechnika Śląska, Katedra Technologii Stopów Metali i Kompozytów, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, Poland

* Corresponding author. E-mail: Mateusz.Kozioł@polsl.pl

Otrzymano (Received) 05.02.2009

WYTWARZANIE KOMPOZYTÓW WARSTWOWYCH METODĄ RFI

Celem artykułu jest pokazanie problematyki wytwarzania wybranych struktur kompozytowych metodą RFI. Na układzie laboratoryjnym wytworzono kompozyty na bazie następujących preform: laminat wzmocniony włóknem szklanym (10 warstw tkaniny 350 g/m², splot płócienny krzyżowy), laminat z rdzeniem z pianki (okładka: 2 warstwy maty szklanej 350 g/m², rdzeń: pianka PCW o grubości 10 mm, odpowiednio nacięty w dwóch prostopadłych kierunkach), laminat na bazie włókniny lnianej (gruba mata 1050 g/m²). Jako osnowy użyto żywicy poliestrowej. Wytworzone kompozyty oceniono pod względem jakościowym i mechanicznym. Stwierdzono, że metoda RFI pozwala na bardzo skuteczne i szybkie nasycenie preform. Metoda bardzo dobrze nadaje się do nasycania wielowarstwowych preform włókna szklanego. Laminaty RFI wykazują udział objętościowy, a w szczególności właściwości mechaniczne, na wyższym poziomie niż laminaty kontaktowe. Metoda RFI sprawdza się również przy nasycaniu laminatów przekładkowych z rdzeniem z pianki. Rowki i otwory obecne w arkuszu pianki znakomicie poprawiają warunki nasycania, jednak wpływają negatywnie na właściwości mechaniczne. Kompozyt wytworzony na bazie włókniny lnianej nasycy się bardzo dobrze. Jednakże, ze względu na niski poziom właściwości mechanicznych wymaga opracowania skutecznych promotorów adhezji, które spowodują poprawę tychże właściwości. Możliwe jest zastosowanie tego typu kompozytu jako materiału rdzeniowego, zastępującego piankę. Do podstawowych problemów związanych z metodą RFI należy konieczność bardzo dokładnego uszczelnienia granicy folia-forma oraz dobre rozprzewadzenie żywicy po preformie za pomocą prawidłowo rozmieszczonych kanałów. Zaniedbanie tych elementów prowadzi do niekorzystnych efektów ubocznych. Bardzo istotne jest rozmieszczenie wlewów i wylotów w układzie do nasycania. Metoda RFI jest technologią perspektywiczną i w niedalekiej przyszłości, obok techniki RTM, będzie podstawowym sposobem produkcji wyrobów kompozytowych. Wiąże się to głównie z rosnącymi wymogami w zakresie przepisów BHP i ochrony środowiska (eliminacja szkodliwych oparów z pomieszczeń produkcyjnych) oraz z rosnącą presją na jakość i powtarzalność wyrobów. Przeprowadzone prace są częścią dużego programu badawczego, mającego na celu określenie „warunków brzegowych” dla wprowadzenia procesu RFI w konkretnych zastosowaniach przemysłowych.

Słowa kluczowe: kompozyt warstwowy, metoda RFI, kompozyt przekładkowy, kompozyt z włóknami naturalnymi

MANUFACTURING OF LAMINAR COMPOSITES BY RFI METHOD

The paper presents a task of manufacturing of exemplary composite structures using RFI method. Following preforms were manufactured on laboratory RFI device: glass-fibre reinforced laminate (10 layers of 350 g/m², plain weave fabric), foam core - glass fibre mat laminate (facing: 2 layers of glass-fibre mat of 350 g/m², core: PVC foam 10 mm thick, properly incised into two perpendicular directions), flax unweave cloth (thick mat of 1050 g/m²). Polyester resin was applied as the composites' matrix. Quality and mechanical properties of the manufactured composites were checked. It was claimed that RFI method gives very effective and fast impregnation of the preforms. The method is very suitable for impregnation of multilayer glass-fibre preforms. The RFI laminates have a fibre volume fraction and mechanical properties on higher level, when compared with equivalent hand lay-up laminates. RFI method fits also for manufacturing of foam core - glass-fibre mat laminates. Incisions and holes present in the core excellently improves the impregnation conditions, but at the same time, cause deterioration in mechanical properties of the laminate. The flax unweave cloth based composite soaks very well. However, it shows very low level of mechanical properties, and it demands to develop effective adhesion promoters, which would cause an increase in the properties. It is possible to apply the flax unweave-cloth composite as core material, replacing PVC or PUR foams. It has of about 100% higher mass density in comparison with the foam-core laminate, but at the same time, more than 200% higher flexural strength - it compensates the negative mass effect. To main problems of RFI technology belong amongst other: necessity of very precise sealing up the vacuum bag - mold frontier and good distribution of the resin along the preform, by means of properly placed ducts. Neglecting of these elements leads to unfavourable side effects. Very important is also arrangement of inlets and outlets in the mold. RFI method is very perspective technology and in near future, together with RTM technique, it will be the main way to manufacture composite products. It comes out of increasing requirements in term of safety and work-hygiene and the environmental protection (removing the harmful vapours from production-space) and increasing pressure on quality and repeatibility of the products. The paper is a part of larger scientific programm aiming a determination of "boundary conditions" for introducing the RFI method into particular industrial applications.

Keywords: laminar composite, RFI method, core-including composite, natural fibre composite

WSTĘP

Struktury kompozytowe o charakterze warstwowym - m.in. laminaty polimerowo-włókniste, laminaty z rdzeniami (przekładkami) usztywniającymi czy też laminaty na bazie włókien są coraz częściej stosowane w różnych konstrukcjach. Do zalet tej grupy materiałów należy zaliczyć możliwość projektowania właściwości, dużą uniwersalność technologiczną (możliwość wykonywania w całości wyrobów o złożonym kształcie), a także bardzo dobre stosunki wytrzymałości i sztywności do masy. Większość wyrobów kompozytowych jest obecnie produkowana metodą kontaktową (ręczną). Technologia ta wystarczająco dobrze sprawdza się w przypadku klasycznych laminatów polimerowo-włóknistych, gdzie układanie kolejnych warstw wzmocnienia następuje w trakcie wytwarzania, na przemian z nakładaniem żywicy-osnowy. Jest ona natomiast praktycznie niestosowalna w przypadku nasycania struktur grubych lub wielowarstwowch - do takich struktur należą m.in. włókniny z włókien naturalnych czy preformy zszywane. W przypadku produkcji odpowiedzialnych elementów ze wzmocnieniem 3D (np. poszycie samolotu o podwyższonej odporności na delaminację) lub w przypadku produkcji seryjnej, gdzie występuje konieczność zmniejszenia czasu cyklu wytwórczego przy zachowaniu powtarzalności, istnieje potrzeba zastosowania zautomatyzowanych metod wytwarzania. Do podstawowych metod tego typu należą *nasycanie ciśnieniowo-próżniowe RTM* (ang. Resin Transfer Moulding) oraz *infuzja próżniowa RFI* (ang. Resin Film Infusion). Metoda RTM polega na nasycaniu żywicą preformy umieszczonej w sztywnej, całkowicie zamkniętej formie. Żywica może być wtryskiwana do formy pod ciśnieniem bądź zasysana próżniowo z użyciem odpowiedniej pompy. Metoda ta nadaje się idealnie do produkcji seryjnej, gdzie sterując temperaturą procesu da się maksymalnie skrócić czas cyklu wytwórczego (możliwość grzania lub chłodzenia całej powierzchni nasycanego wyrobu), szczególnie do wyrobów o wymaganej obustronnej gładkości oraz raczej o niewielkich i średnich gabarytach. Koszt oprzyrządowania jest tu dość wysoki (forma - szczególnie podgrzewana, układy ciśnieniowe). Procesem nieco mniej kosztownym, bardzo dobrze nadającym się szczególnie do przemysłowego wytwarzania elementów wielkopowierzchniowych - płyt lub skorup bądź np. długich profili [1, 2], jest metoda RFI. W metodzie tej stosujemy formę jednostronną (podobnie jak przy nasycaniu kontaktowym); druga część formy jest „zastąpiona” przez worek pokrywający całą preformę i uszczelniony na brzegach. Po odprowadzeniu powietrza spod worka przez pompę próżniową dociska on preformę z równą siłą na całej powierzchni, co teoretycznie gwarantuje równomierne nasycenie laminatu i równy, wysoki udział objętościowy włókien w całości wyrobu. Technologia RFI jest z powodzeniem stosowana m.in. do produkcji paneli poszycia skrzydeł i kadłubów samolotów, części nadwozi samochodów (np. wszystkie ele-

menty nadwozia wojskowego pojazdu HUMVEE [3, 4]), a nawet całych kadłubów łodzi [5]. Zaletą metody RFI jest możliwość zastosowania jej dla preform złożonych, np. preform laminatów przekładkowych z rdzeniami usztywniającymi. Stosuje się je w wielu konstrukcjach, w których niewielka ilość kompozytu włóknistego spełnia wymagania wytrzymałościowe, natomiast nie zapewnia odpowiedniej sztywności. Od pewnego czasu prowadzone są też prace nad stosowaniem technologii RFI dla wzmocnień pochodzenia naturalnego (len, juta, konopie), których kompozyty mają w przyszłości częściowo zastąpić niektóre tworzywa sztuczne. Obecnie z kompozytów wzmocnionych włóknami naturalnymi produkuje się seryjnie metodą RFI m.in. meble [6].

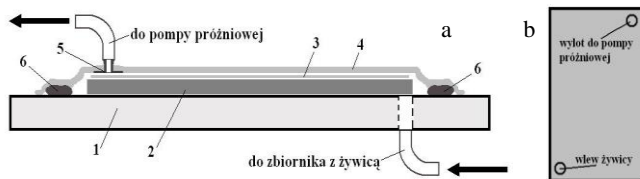
Celem artykułu jest pokazanie problematyki wytwarzania przykładowych struktur kompozytowych o charakterze warstwowym (*laminat wzmocniony włóknem szklanym, laminat z rdzeniem z pianki, laminat na bazie włókniny z włókna naturalnego*) metodą RFI w skali laboratoryjnej. Postarano się również ocenić wytworzone kompozyty pod względem jakościowym i mechanicznym. Przeprowadzone prace są częścią dużego programu badawczego, mającego na celu określenie „warunków brzegowych” dla wprowadzenia procesu RFI w konkretnych zastosowaniach przemysłowych.

WYTWORZENIE METODĄ RFI KOMPOZYTÓW NA BAZIE WYBRANYCH STRUKTUR WARSTWOWYCH

Przygotowanie materiałów oraz układu do realizacji procesu

Kompozyty warstwowe wytworzono metodą RFI na bazie następujących struktur wzmacniających: 1) preformy 10 warstw tkaniny szklanej - gramatura 350 g/m², splot płócienny krzyżowy; 2) preformy przekładkowej - okładka: 2 warstwy maty szklanej o gramaturze 350 g/m², rdzeń: pianka PCW sztywna o grubości 10 mm; 3) preformy włókniny lnianej (gruba mata) o gramaturze 1050 g/m².

Wytwarzanie kompozytów metodą RFI realizowano z użyciem układu laboratoryjnego (rys. 1). Preformy za każdym razem miały kształt prostokąta o wymiarach 20 na 30 cm. Jako dolnej formy użyto płyty metalowej z odpowiednio umieszczonym poprzecznym rowkiem rozprowadzającym. Preformę przykrywano arkuszem folii polietylenowej o grubości 0,04 mm. Pomiędzy preformą a folią układano warstwę drobno tkanej tkaniny poliamidowej, nadającej równomierną fakturę powierzchni - tzw. peel-ply. Nie zastosowano dodatkowych warstw pochłaniających i rozprowadzających (breather, bleeder). Uszczelnienie worka zrealizowano za pomocą specjalnego wysokoadhezyjnego kitu o małej porowatości. Jako osnowy użyto we wszystkich przypadkach żywicy poliestrowej ESTROMAL 14 LM-03.



Rys. 1. Schemat laboratoryjnego układu od nasycania próżniowego RFI: a) przekrój boczny: 1 - forma-płyta, 2 - preforma, 3 - peel-ply, 4 - worek próżniowy, 5 - łącznik gumowy, 6 - uszczelniające pasmo kitu, b) rzut z góry na dolną część formy

Fig. 1. Schema of laboratory RFI device: a) side cross-section: 1 - mold-panel, 2 - preform, 3 - peel-ply, 4 - vacuum-bag, 5 - rubber outlet (towards vacuum pump), 6 - band of sealing putty, b) top view on lower part of the mold

Proces prowadzono z użyciem pompy próżniowej. Regulacja podciśnienia odbywała się ręcznie z użyciem zaworu kulowego na podstawie wskazań manometru. Dla wszystkich preform przyjęto podciśnienie nasycania na poziomie ok. $-0,5$ bar. Zaobserwowano, że jest to wartość gwarantująca równomierne i dość szybkie przemieszczanie żywicy przez strukturę preform. Podczas procesu mierzono czas jego trwania. Wzięto pod uwagę czas nasycania jednej preformy, będący średnią z trzech skutecznych nasyceń preform danego typu. Preformy po nasycaniu poddano obserwacji wizualnej, pozwalającej ocenić ich jakość oraz skuteczność nasycenia (prześwietlanie światłem lampy i ocena równomierności prześwitywania). Przeprowadzono też pomiary udziału wagowego osnowy metodą porównania mas ekwiwalentnych wycinków preformy i utwardzonego laminatu, a także próby mechaniczne zginania. Statyczne zginanie trójpunktowe prowadzono na maszynie INSTRON 4469, w temperaturze pokojowej, na głowicy pomiarowej o zakresie 5 kN. Warunki pomiarów zostały ustalone na podstawie stosownej normy [7]. Wyniki badań porównano ze znanymi z wcześniejszych prac badawczych wynikami dla podobnych materiałów wytworzonych metodą kontaktową.

Realizacja procesu RFI i ocena uzyskanych kompozytów

Laminat wzmocniony tkaniną szklaną

Podczas procesu nasycania preform z tkaniny szklanej metodą RFI zaobserwowano dość szybki i równomierny rozptył żywicy. Średni czas nasycania pojedynczej preformy (20 x 30 cm) wynosił ok. 19 min (tab. 1). Żywica rozchodziła się od obszaru w okolicy wlotu wzdłuż krawędzi preformy (rys. 2), co stwarzało niebezpieczeństwo „zamknięcia” obszaru środka preformy i przemieszczania żywicy od wlotu do wylotu w obszarach przykrawędziowych. Podobne zachowanie zaobserwowano przy technologii RTM [8]. Przemieszczanie się żywicy przy krawędzi jest ułatwione ze względu na to, że folia (mimo przylegania do preformy pod wpływem próżni) tworzy przy krawędziach preformy kanały ułatwionego przepływu. Finalnie jednak

żywica przemieszcza się w głąb preformy po najkrótszej możliwej drodze, czyli od wlotu do wylotu (po przekątnej - rys. 1b). Jest to kierunek zgodny z gradientem ciśnienia. Rozptył żywicy od krawędzi w głąb preformy jest dodatkowo ułatwiony dzięki ciśnieniu kapilarnemu spowodowanemu dobrą zwilżalnością włókien przez żywicę. W efekcie cała preforma ulega skutecznemu nasyceniu (rys. 3c).

TABELA 1. Czas nasycania poszczególnych struktur metodą RFI w układzie laboratoryjnym
TABLE 1. Impregnation time of individual structures using RFI method in laboratory device

Struktura wzmacniająca	Czas nasycania t_{nas} , min
Preforma tkaniny szklanej Glass fabric preform	19
Preforma z rdzeniem Glass mat + core preform	6,5
Włóknina lniana Flax unwoven cloth	8



Rys. 2. Etapy rozptyłu żywicy podczas procesu RFI - preforma 10 warstw włókna szklanego: a) i b) żywica przemieszcza się wzdłuż krawędzi preformy, c) po całkowitym nasyceniu

Fig. 2. Sequence-stages of a resin propagation during RFI process - 10 layers glass fibre preform: a) and b) the resin flows along the edges of a form, c) after complete impregnation

Podczas obserwacji wizualnej płyta uzyskana metodą RFI wykazuje prześwitywanie równe na całej powierzchni, co świadczy o równomiernym nasyceniu

preformy. Udział wagowy żywicy jest niższy niż udział żywicy w porównywalnym laminacie wytworzonym metodą kontaktową (tab. 2).

Właściwości mechaniczne wytworzonego laminatu zostały zweryfikowane w próbach statycznego zginania. Wartości wytrzymałości na zginanie wyznaczone dla laminatu wytworzonego metodą RFI zaprezentowano w tabeli 2. Dla porównania zamieszczono też wyniki dla takiego samego laminatu wytworzonego metodą kontaktową. Wyniki wskazują na wyraźną przewagę laminatu RFI, co może być związane z lepszą jakością struktury wzmocnienia - w laminacie kontaktowym warstwy zbrojenia są narażone na uszkodzenia na skutek mechanicznego oddziaływania na ich powierzchnię pędzla i wałka.

TABELA 2. Udział wagowy osnowy oraz wytrzymałość na zginanie laminatów z tkaniną szklaną wytworzonych metodami RFI oraz kontaktową

TABLE 2. A matrix mass fraction W_o and a flexural strength R_g of glass fabric reinforced laminates obtained by RFI and hand lay-up methods

Technologia wytworzenia laminatu	Udział wagowy osnowy W_o , %	Wytrzymałość na zginanie R_g , MPa
RFI	35,1	471 ± 66
Kontaktowo Hand lay-up	36,1	440 ± 42

Laminat z rdzeniem z pianki PCW

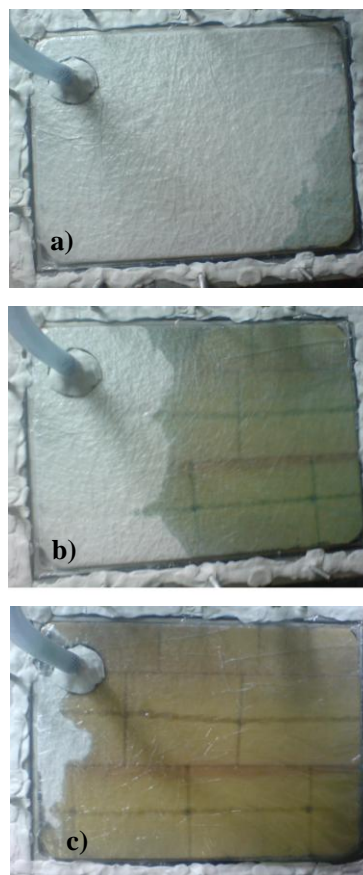
Technika RFI daje możliwość wytworzenia konstrukcji laminatu przekładkowego w całości podczas operacji nasycania. W przypadku metody kontaktowej kompozyt tego typu wymaga dodatkowej operacji naklejania spienionego rdzenia.

Podczas nasycania laminatu z pianką zaobserwowano dobry i równomierny rozplw żywicy (rys. 3). Pianka, w celu umożliwienia nasycania laminatu przekładkowego metodą RFI, miała nacięte rowki o głębokości ok. 2 mm, wzdłuż i w szerokości arkusza. W punktach przecięć rowków wydrążono otwory na wylot dla zrównoważenia przepływu żywicy wzdłuż górnej i dolnej powierzchni preformy. Żywica przemieszczała się wzdłuż rowków, w efekcie czego uzyskano równomierny rozplw na całej szerokości preformy (rys. 3) i obustronne dobre przesycenie warstw maty.

Relatywnie duża wartość udziału wagowego żywicy-osnowy (60%) wskazuje na chłonięcie żywicy przez obszary przypowierzchniowe pianki. Mniejszy udział w przypadku odpowiedniego kompozytu wytworzonego metodą kontaktową (52%) jest spowodowany brakiem rowków i otworów w piance - w laminacie RFI napełniają się one żywicą, zwiększając jego masę.

Wyznaczone dla kompozytu wytworzonego metodą RFI wartości wytrzymałości na zginanie zaprezentowano w tabeli 3. Dla porównania zamieszczono też wyniki dla takiego samego kompozytu wytworzonego metodą kontaktową. Stwierdzono nieco lepszą wytrzymałość kompozytu wytworzonego metodą kontaktową. Jest to

najprawdopodobniej związane z obecnością nacięć i otworów w arkuszu pianki, prowadzącą do jej znacznego osłabienia; w laminatach przekładkowych inicjacja zniszczenia następuje poprzez pęknięcie pianki lub zerwanie spójności pomiędzy pianką a kompozytową okładką.



Rys. 3. Etapy rozplwu żywicy podczas procesu RFI - preforma 2 x 2 warstwy maty szklanej + rdzeń z pianki PCW

Fig. 3. Sequence-stages of a resin propagation during RFI process - 2 x 2 layers of glass mat + PVC foam core preform

TABELA 3. Udział wagowy osnowy oraz wytrzymałość na zginanie kompozytów przekładkowych wytworzonych metodami RFI oraz kontaktową

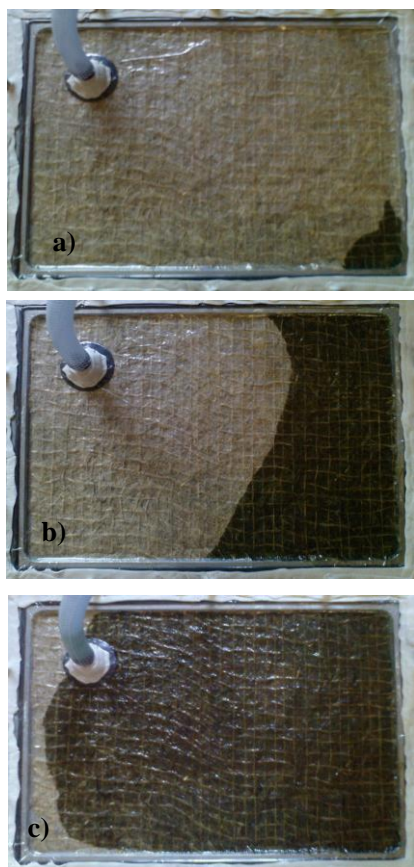
TABLE 3. A matrix mass fraction W_o and a flexural strength R_g of glass mat + PVC core laminates obtained by RFI and hand lay-up methods

Technologia wytworzenia laminatu	Udział wagowy osnowy W_o , %	Wytrzymałość na zginanie R_g , MPa
RFI	60,3	13,6 ± 1,4
Kontaktowa Hand lay-up	51,9	14,7 ± 1,2

Laminat z włókniny lnianej

Podczas nasycania włókniny lnianej metodą RFI zaobserwowano bardzo dobry, równomierny rozplw żywicy po preformie (rys. 4). Nasycanie całości przebiegało stosunkowo szybko (tab. 1) i równomiernie po całej szerokości preformy. Podczas oględzin wytwo-

zonego kompozytu zaobserwowano liczne niedosyccenia i rozwłóknienia struktury na powierzchni. Są to bez wątpienia efekty słabej zwilżalności włókien lnu żywicą poliestrową. Dalsze badania w kierunku stosowania włókien tego typu do produkcji kompozytów powinny się skupić przede wszystkim na opracowaniu optymalnych promotorów adhezji.



Rys. 4. Etapy rozplywu żywicy podczas procesu RFI - preforma włókniana lnianej

Fig. 4. Sequence-stages of a resin propagation during RFI process - flax unweven cloth preform

Udział wagowy osnowy w kompozycie jest porównywalny z ekwiwalentnym laminatem wytworzonym kontaktowo (tab. 4).

Wyznaczone dla kompozytu wytworzonego metodą RFI wartości wytrzymałości na zginanie zaprezentowano w tabeli 4. Dla porównania zamieszczono też wyniki dla takiego samego kompozytu wytworzonego metodą kontaktową. W obu przypadkach próby zginania wykonano w dwóch prostopadłych kierunkach, ponieważ zastosowana włóknina lniana wykazuje anizotropię struktury i właściwości mechanicznych. Anizotropia wynika z orientacji włókien tworzących włókninę, wymuszonej warunkami technologicznymi wytwarzania. Uzyskane wartości wytrzymałości na zginanie są bardzo niskie i nie kwalifikują wytworzonego kompozytu jako tworzywa konstrukcyjnego. Niska wytrzymałość jest zapewne wynikiem słabego połączenia na granicy włókno-osnowa. Zastosowanie właściwego promotora adhezji z całą pewnością znacząco poprawi wytrzymałość.

TABELA 4. Udział wagowy osnowy W_o oraz wytrzymałość na zginanie R_g kompozytów wzmocnionych włókniną lnianą, wytworzonych metodami RFI oraz kontaktową

TABLE 4. A matrix mass fraction W_o and a flexural strength R_g of unweven cloth preform reinforced composites obtained by RFI and hand lay-up methods

Technologia wytworzenia laminatu	Udział wagowy osnowy W_o , %	Wytrzymałość na zginanie; kierunek wzdłuż preformy $R_g(w)$, MPa	Wytrzymałość na zginanie; kierunek w poprzek preformy $R_g(p)$, MPa
RFI	70,1	38 ± 5	19 ± 2
Kontaktowa Hand lay-up	67,1	29 ± 1	24 ± 3

Biorąc pod uwagę to że właściwości wytrzymałościowe kompozytu wzmocnianego włókniną lnianą są znacznie lepsze od laminatu przekładkowego (przy optymalnym ułożeniu wykazują ok. 3-krotnie wyższą wytrzymałość na zginanie), istnieje perspektywa zastosowania go jako materiału rdzeniowego do usztywniania okładek z bardziej wytrzymałych kompozytów warstwowych. Gęstość nasyczonego kompozytu lnianego wynosi $0,91 \text{ g/cm}^3$, podczas gdy gęstość badanego laminatu przekładkowego to $0,4 \text{ g/cm}^3$. Różnica w wytrzymałości niweluje więc różnicę gęstości.

Podstawowe problemy z uzyskaniem wyrobu dobrej jakości metodą RFI

Metoda RFI pozwala na uzyskanie wyrobu wysokiej jakości, jednak przy jej stosowaniu wymagane jest ściśle przestrzeganie zaplanowanego reżimu technologicznego oraz bardzo duża dokładność podczas przygotowywania procesu.

Bardzo istotne podczas realizacji technologii RFI jest uszczelnienie na granicy folia próżniowa-forma. Brak szczelności prowadzi do zasysania powietrza przez pompę próżniową zamiast żywicy i zatrzymanie procesu nasycania. Z kolei rozszczelnienie formy w późniejszym etapie nasycania powoduje usunięcie części bądź całości żywicy z nasyconej już preformy i zastąpienie jej zassanym powietrzem (rys. 5a). Główną trudnością związaną z zapewnieniem szczelności na granicy folia-forma przy procesach RFI jest często duża łączna długość krawędzi przeznaczonych do uszczelnienia - często sięgająca kilkudziesięciu metrów, np. w przypadku nasycania łopat do wiatraków energetycznych lub kadłubów łodzi. Zapewnienie dobrej szczelności na tak długich odcinkach wymaga dużej dokładności i doświadczenia. Pomocne jest też stosowanie automatycznych układów detekcyjnych wykrywających nieuszczelnienia.

Innym ważnym zagadnieniem jest odpowiedni rozpliw żywicy w całym obszarze preformy podczas procesu. Aby go zapewnić, należy zastosować, szczególnie przy nasycaniu dużych elementów, odpowiednie kanały rozprowadzające żywicę (przeważnie w postaci rowków w dolnej części formy, albo w postaci perforowanych rurek umieszczonych, przy krawędziach preformy

i usuwanych po utwardzeniu). Częstokroć stosuje się też specjalne luźno tkane tkaniny lub innego typu struktury łatwo przepuszczające ciekłą żywicę, a niezaburzające w istotny sposób właściwości wyrobu. Przykładem może tu być zastosowana w niniejszej pracy przekładka z pianki z naciętymi kanałami i otworami. W przypadku niewłaściwego odbioru żywicy obszaru preformy może dojść do zaburzenia procesu, polegającego na pojawieniu się w obrębie wlewu nadmiaru żywicy ponad powierzchnią preformy (rys. 5b), co prowadzi do nieudanego nasycenia. Nadmiar żywicy powstaje na skutek bezwładności cieczy przemieszczającej się ze względnie dużą szybkością we wczesnym stadium nasycenia (szybki rozplływ po preformie). Po pewnym czasie, bez odpowiedniego układu kanałów, następuje spowolnienie odbioru cieczy z obszaru w okolicy wlotu. Prowadzi to do jej gromadzenia i nadmiaru w tym obszarze. Spowolnienie odbioru może być też spowodowane nieszczelnością układu. W celu zagwarantowania optymalnego rozplwy żywicy i równomiernego nasycenia preformy, szczególnie przy jej dużych rozmiarach i złożonym kształcie, w układzie należy zastosować odpowiednią ilość wlewów i wylotów. Ich ilość oraz rozmieszczenie można zoptymalizować przy użyciu odpowiednich programów, takich jak np. PAM-RTM [9] czy FDEMS [2].



Rys. 5. Przykłady problemów związanych z technologią RFI: a) laminat z osnową „wysaną” podczas procesu na skutek nieszczelności pomiędzy folią i formą, b) nadmiar żywicy powstały na skutek niewłaściwego rozprowadzenia żywicy lub nieszczelności formy w czasie nasycania

Fig. 5. Examples of problems in RFI technology: a) laminate with „outsucked” resin due to leak between form and vacuum bag, b) resin surplus due to bad distribution of the resin during process or due to leakage of the form

PODSUMOWANIE

Metoda RFI bardzo dobrze nadaje się do nasycania wielowarstwowych preform włókna szklanego. Laminaty RFI wykazują udział objętościowy, a w szczegól-

ności właściwości mechaniczne na wyższym poziomie w porównaniu z kontaktowymi.

Metoda RFI sprawdza się również przy nasycaniu laminatów przekładkowych z rdzeniem z pianki. Rowki i otwory obecne w arkuszu pianki znakomicie poprawiają warunki nasycania. Są one jednak prawdopodobnie przyczyną nieznacznego obniżenia wytrzymałości na zginanie gotowego laminatu.

Kompozyt wytworzony na bazie włókniny lnianej okazał się źle zwilżony i słaby mechanicznie. Jego zastosowanie w przyszłości jest uzależnione od opracowania skutecznych promotorów adhezji, które zapewne spowodują poprawę właściwości mechanicznych. Obiecująca wydaje się być perspektywa zastosowania tego typu kompozytu jako materiału rdzeniowego, zastępującego piankę.

Do podstawowych problemów występujących podczas wytwarzania wyrobów metodą RFI należy zaliczyć m.in.: konieczność bardzo dokładnego uszczelnienia granicy folia-forma, konieczność odpowiedniego rozmieszczenia kanałów rozprowadzających żywicę po preformie oraz rozmieszczenie wlewów i wylotów w układzie do nasycania.

Metoda RFI jest technologią perspektywiczną i w niedalekiej przyszłości, obok techniki RTM, będzie podstawowym sposobem produkcji wyrobów kompozytowych. Wiąże się to głównie z rosnącymi wymogami w zakresie przepisów BHP i ochrony środowiska (eliminacja szkodliwych oparów z pomieszczeń produkcyjnych) oraz z rosnącą presją na jakość i powtarzalność wyrobów. Nie bez znaczenia jest też rozszerzanie gamy wyrobów kompozytowych - szczególnie o odpowiedzialne elementy konstrukcyjne, w których nasycanie ręczne nie zapewniłoby odpowiedniej jakości.

LITERATURA

- [1] Qi B., Ness R., Tong L., A Stitched Blade-Stiffened RFI Composite Panel under Shear Loading, *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 2002, 21, 255-276.
- [2] Dow M.B., Dexter H. B., Development of stitched, braided and woven composite structures in the ACT program and at Langley Research Center (1985 to 1997), raport NASA TP-97-206234, Langley 1997.
- [3] <http://carscoop.blogspot.com> (22.01.2009)
- [4] www.tpicomposites.com (22.01.2009)
- [5] www.armateurboatbuilding.com (22.01.2009)
- [6] Sapuan S.M., Maleque M.A., Design and fabrication of natural woven fabric reinforced epoxy composite for household telephone stand, *Materials and Design* 2005, 26, 65-71.
- [7] Norma PN-EN ISO 14125: 2001/AC: 2003: Kompozyty tworzywowe wzmocnione włóknem, Oznaczenie właściwości przy zginaniu.
- [8] Kozioł M., Śleziona J., Charakterystyka płyt kompozytowych wytworzonych metodą RTM na bazie zszywanych preform włókna szklanego, *Inżynieria Materiałowa* 2008, XXIX, 2 (162), 109-113.
- [9] www.esi-group.com (22.01.2009)