

## Jerzy Myalski

Politechnika Śląska, Katedra Technologii Stopów Metali i Kompozytów, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, Poland  
Corresponding author. E-mail: Jerzy.myalski@polsl.pl

Otrzymano (Received) 16.02.2009

# OKREŚLENIE WARUNKÓW INFILTRACJI W INFUZYJNEJ METODZIE WYTWARZANIA LAMINATÓW POLIESTROWO-SZKLANYCH

Przedstawiono wyniki badań dotyczące możliwości wykorzystania do formowania kompozytów technologii infuzji. Badania miały na celu określenie wpływu parametrów technologicznych procesu, w szczególności stosowanego podciśnienia na jakość procesu nasycania i przepływu żywicy nasączającej włókna umacniające. Określono również, jak rodzaj i postać wzmocnienia włóknistego, jego gramatura oraz ilość zastosowanych warstw wpłynę na prędkość przepływu żywicy oraz podstawowe właściwości mechaniczne i udział procentowy wzmocnienia w laminacie. Jako osnowę wykorzystano żywicę winyloestrową o małej lepkości i włókna szklane w postaci mat, tkanin o splocie satynowym, tkanin rowingowych oraz matotkanin. Przeprowadzono także badania dla układów przekładkowych (z rdzeniem) w celu ustalenia wpływu przekładek na proces nasączania.

Stwierdzono, że o jakości i czasie trwania procesu nasączania włókien decyduje przede wszystkim ciśnienie formowania. W badaniach stosowano różne podciśnienia infiltracji wynoszące 0,4, 0,6, i 0,75 bar. Wielkość podciśnienia decyduje o prędkości nasączania warstw materiałów umacniających. Przy podciśnieniu 0,4 bar czas infiltracji był prawie sześciokrotnie dłuższy niż przy ciśnieniu 0,6 bar. Na podstawie badań właściwości mechanicznych uzyskanych laminatów stwierdzono, że ciśnienie wpływa również na wytrzymałość otrzymanych kompozytów. Przy stosunkowo małych podciśnieniach uzyskuje się jakościowo lepsze wyroby o dobrych właściwościach mechanicznych. Przy podciśnieniu wynoszącym 0,4 bar wytrzymałość na zginanie i rozciąganie laminatów kompozytowych była prawie o 30% wyższa niż przy największym podciśnieniu formowania wynoszącym 0,75 bar. Okazało się również, że niższe podciśnienie formowania przyczynia się do poprawy jakości uzyskanych kompozytów. Powoduje lepsze zwilżanie i przesączenie warstw włókien, oraz zwiększenie udziału wzmocnienia w laminacie. Przyczynia się jednak do znacznego wydłużenia czasu wypełniania formy przez żywicę. Natomiast zbyt niskie ciśnienie formowania, mimo skrócenia procesu technologicznego, może doprowadzić do powstawania zamkniętych obszarów nieprzesączonych żywicą. Skrócenie czasu formowania wyrobów kompozytowych można uzyskać, stosując dodatkowe układy wspomagające proces infiltracji. Stwierdzono, że dodatkowo wprowadzenie pomiędzy warstwy tkanin o dużej gramaturze trudnych do przesączenia warstw maty charakteryzującej się większą zdolnością do przesączania przyczynia się do zwiększenia prędkości infiltracji. W przypadku konstrukcji przekładkowych - laminat z rdzeniem piankowym - znaczne zwiększenie prędkości infiltracji uzyskano poprzez nacięcie w materiale rdzenia o strukturze porowatej dodatkowych kanałów rozprowadzających żywicę. Przeprowadzone badania pozwoliły stwierdzić, że technologia infuzji pozwala na uzyskanie kompozytów o dużym udziale włókien umacniających, nawet o bardzo dużej gramaturze, w wielowarstwowych strukturach kompozytowych, trudnych do uzyskania przy formowaniu ręcznym. Poprzez dobór odpowiednich parametrów procesów infuzji możliwe jest uzyskanie jakościowo powtarzalnych kompozytów charakteryzujących się dobrymi właściwościami wytrzymałościowymi.

Słowa kluczowe: kompozyty z osnową polimerową, laminaty, włókna szklane, technologia otrzymywania, infuzja

## DETERMINATION OF CONDITIONS OF INFILTRATION IN INFUSION METHOD OF GLASS FIBERS LAMINATES

The paper presents the results of investigations introducing possibilities of manufacturing of FRP composites using infusion technology. The investigations focused on evaluation of an influence of technological parameters, particularly applied underpressure, on efficiency of infiltration process and on a flow of resin through the reinforcing fibers. An effect of kind and form of fiber reinforcement, its basis weight, and amount of layers on flow speed of a resin was also evaluated, as well as the basic mechanical properties of the laminate and volume fraction of the reinforcement.

As the composite matrix a low viscosity vinyl ester resin was used. The composite reinforcement were glass fibers in the form of: mat, satin weave fabric, roving fabrics and fabric-mat cloth. An investigation was also conducted on sandwich construction in order to determine an effect of a sandwich foam-core on the infiltration process. It was found that laminate quality and duration of the process depend first of all on the pressure value. Values of pressure 0.4, 0.6, and 0.75 bar were applied within the investigations. The pressure value decides how fast the reinforcing layers soak. By 0.4 bar pressure the infiltration time is even 6 times longer than that by 0.6 bar. It was considered that the laminate composites of better mechanical properties and the enlarged volume fraction of reinforcement were obtained by comparatively low pressure. Flexural and tensile strength of composite laminates manufactured by 0.4 bar pressure were of about 30% higher than of those manufactured by 0.75 bar.

However, lower value of pressure extends considerably the time of filling of the preform. Increase in the pressure shortens time of the process, but it can bring deterioration in mechanical properties of the laminate, producing areas devoid of resin. To shorten the process duration we can apply a special arrangements introduced between the layers of reinforcement giving additional channels distributing the resin. In the case of sandwich constructions we may introduce special cross incisions in material of foam-core.

It was found that infusion technology gives high volume fraction values in composites, even by large basis areal weight of reinforcing layers. In laminates formed by contact method, the volume fraction of reinforcement is usually much lower. It is impossible to impregnate the fabric and mats of large basis weight using contact method because impossibility of infiltration of the resin through reinforcement. Infusion technique enables manufacturing of strong, good quality and good repeatability composite materials.

**Keywords:** polymer matrix composite, laminate, glass fiber composite, technology, infusion

## WSTĘP

Bardzo istotną rolę w procesie wytwarzania kompozytów stanowi dobór odpowiedniej technologii, która zagwarantuje wyrób o oczekiwanych parametrach, dobrej powtarzalności oraz dodatkowo z ekonomicznego punktu widzenia będzie opłacalna. Najtańszą oraz najczęściej do tej pory stosowaną technologią wytwarzania kompozytów polimerowych jest metoda laminowania kontaktowego. Należy jednak uwzględnić to, że jakość laminatu wykonanego tą metodą nie jest najlepsza i zależy od umiejętności pracownika wykonującego dany wyrób. Obecnie coraz częściej spotykane są bardziej zaawansowane technologie wytwarzania kompozytów polimerowych, takie jak infuzja czy RTM, które gwarantują lepszą jakość i powtarzalność wyrobów [1, 2, 5].

W Polsce technologia infuzji jest jeszcze mało popularna, jednak ze względu na swoje liczne zalety cieszy się coraz większą popularnością. Warto również zauważyć, że, reasumując wszystkie koszty związane z produkcją danego wyrobu, tj. materiały i robocizna, całkowity koszt jest porównywalny do technologii laminowania kontaktowego [3]. Dodatkowo zyskuje się wyrób o lepszej jakości oraz mniejszej masie, a sama technologia jest czysta i przyjazna dla środowiska. Technologia infuzji polega na wykonaniu laminatu w formie zamkniętej przy użyciu podciśnienia w celu nasączenia włókien wzmacniających żywicą. Proces ten łączy w sobie cechy innych metod zamkniętych, takich jak technologia worka próżniowego czy RTM.

Zalety metody infuzji związane są głównie ze zwiększeniem udziału włókien wzmacniających, usunięciem nadmiaru żywicy, wyeliminowaniem pustek i pęcherzy powietrznych, brakiem bezpośredniego kontaktu z ciekłą osnową, zmniejszeniem emisji styrenu w porównaniu z metodą laminowania kontaktowego.

Technologia infuzji pozwala na uniknięcie niedociągnięć laminowania kontaktowego, daje możliwość formowania dużych elementów, śledzenia przesączenia wzmacnienia, obniżenia kosztów wytwarzania [6]. Podstawową wadą procesu infuzji jest pozostawienie obszarów nieprzesączonych w elemencie, np. gdy żywica opłynie pewien obszar i zamknie możliwość odprowadzania z niego powietrza [7, 8]. Wymagana jest zatem znajomość rozmieszczenia kanałów rozprzewadzających, decydujących o efektywności przesycania wzmacnienia żywicą oraz całkowitym czasie procesu [9, 10]. Ilość wariantów rozprzewadzenia ży-

wicy podczas infuzji jest bardzo szeroka, tak więc można wybrać jej odpowiedni układ na zasadzie własnych doświadczeń lub korzystać z komputerowych programów symulacyjnych, aby zapewnić dotarcie żywicy do każdego punktu konstrukcji.

W pracy podjęto problem określenia warunków infiltracji w infuzyjnej metodzie wytwarzania laminatów w zależności od zastosowanego ciśnienia podczas formowania wyrobu, rodzaju wzmacnienia oraz materiałów przekładkowych, których celem jest wspomaganie - przyspieszanie procesu infiltracji żywicy w warstwy wzmacnienia.

Celem badań przeprowadzonych w pracy było określenie parametrów infiltracji podczas infuzji. Starano się określić, jaki wpływ ma ciśnienie formowania podczas wytwarzania płyt kompozytowych na prędkość przepływu czoła żywicy oraz właściwości wytworzonych laminatów. Ponadto dokonano oceny wpływu rodzaju wzmacnienia, jego gramatury oraz ilości zastosowanych warstw na prędkość przepływu żywicy oraz właściwości mechaniczne. Zastosowano również wariant z materiałami przekładkowymi, których zadaniem było wspomaganie procesu infiltracji podczas przesycania wzmacnienia.

Zakres pracy obejmował wytworzenie różnych wersji laminatów, pomiarze prędkości przepływu czoła żywicy oraz obserwację utwardzanego laminatu za pomocą kamery termowizyjnej. Zostały również określone właściwości mechaniczne (wytrzymałość na zginanie i wytrzymałość na rozciąganie) oraz udział procentowy wzmacnienia w laminacie w badaniach gęstości i rozkładu termicznego kompozytów.

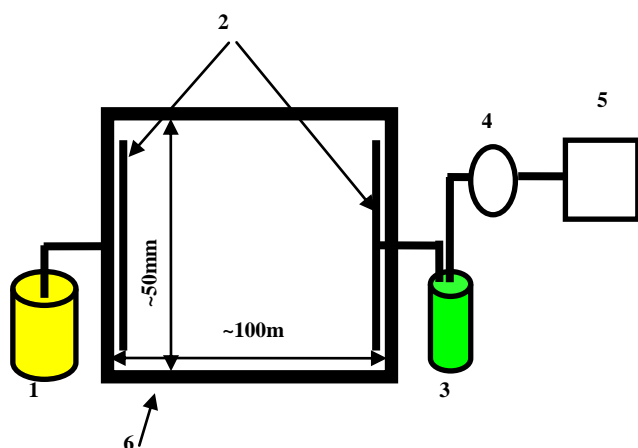
## MATERIAŁY DO BADAŃ

Materiały wzmacnienia używane do wytworzenia laminatów różniły się postacią wzmacnienia oraz gramaturą. W badaniach wykorzystano najczęściej stosowane w strukturach warstwowych wyroby włókiennicze, jak maty (mata typu E, gramatura 300 g/m<sup>2</sup>), tkaniny o splocie satynowym (T300, gramatura 300 g/m<sup>2</sup>), tkaniny rowingowe (T600, gramatura 600 g/m<sup>2</sup>), tkaniny wykonane z pasm rowingu z warstwą maty (matotkanina ELTM850/450, gramatura 850 g/m<sup>2</sup> (tkanina), 450 g/m<sup>2</sup> (mata)), oraz materiały przekładkowe (pianka PCV Herex o grubości 5 mm, gęstości 80 kg/m<sup>3</sup> oraz koremata XM4 o grubości 4 mm). Taki dobór wzmacnienia pozwalał na prze-

śledzenie wpływu struktury wzmocnienia, w szczególności przestrzeni pomiędzy włóknami, podciśnienia, udziału wzmocnienia na procesy infiltracji ciekłą żywicą.

Osnowę laminatów stanowiła preakcelerowana, nietoksotopowa żywica winyloestrowa żywica winyloestrowa Ashland AME 6000 INF, o lepkości 250 mPas, utwardzanej 2% ilością Trigonoxu 239, zapewniającym czas żelowania około 90 minut.

Wytworzone metodą infuzji laminaty poliestrowo-szklane zostały wykonane na formie o wymiarach 100 x 50 cm. Schemat stanowiska laboratoryjnego wraz ze sposobem rozmieszczenia układu doprowadzającego żywicę oraz odprowadzającym powietrze przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Schemat stanowiska do wytwarzania materiałów: 1 - pojemnik z żywicą; 2 - układ doprowadzenia żywicy i odprowadzenia powietrza; 3 - zbiornik na nadmiar żywicy; 4 - manometr; 5 - pompa próżniowa; 6 - forma

Fig. 1. The scheme of stand to infusion technology: 1 - container from resin; 2 - the arrangement of lead of resin and the transferring the air; 3 - the reservoir on excess of resin; 4 - manometer; 5 - vacuums pump; 6 - mould

Wytworzone laminaty zostały podzielone na trzy grupy w zależności od postaci wzmocnienia. Wytwarzanie laminatów określanych nazwą Mata (M) przeprowadzono przy różnych podciśnieniach procesu infuzji ( $p = 0,4, 0,6$  i  $0,75$  bar). W laminatach typu Tkanina (T) i Sandwicz (S) zastosowano stałe ciśnienie infiltracji wynoszące  $0,75$  bar. Laminat przekładkowy uzyskano, wprowadzając pomiędzy dwie warstwy maty piankę, piankę z nacięciami zwiększającymi szybkość procesu infiltracji, korematę.

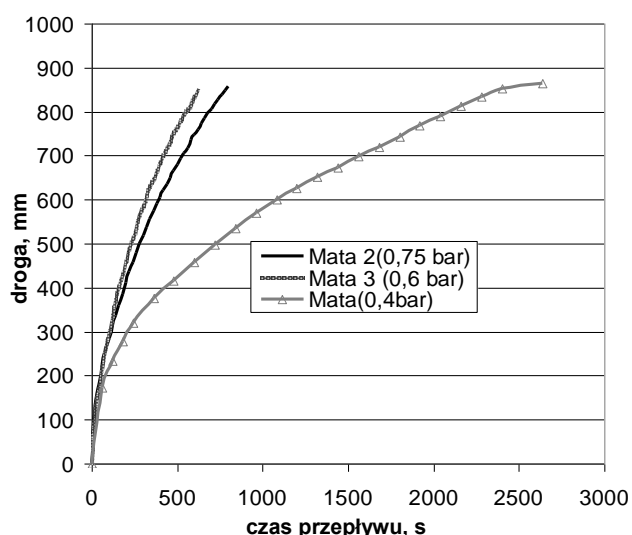
W trakcie procesu wytworzenia laminatów metodą infuzji mierzono drogę przepływu czoła żywicy w środku płyty w celu określenia prędkości przepływu żywicy. Z wykonanych laminatów pobrane zostały próbki do badań właściwości mechanicznych (wytrzymałość na rozciąganie i zginanie) oraz do określenia udziału włókien zbrojących na podstawie badań gęstości i porowatości.

## WYNIKI BADAŃ

Pierwsza część badań obejmowała określenie wpływu podciśnienia i wyznaczenie prędkości przepływu czoła żywicy w trakcie infiltracji wzmocnienia podczas infuzji dla kompozytów wzmocnianych matą. Rysunek 2 przedstawia zmiany przemieszczenia czoła żywicy podczas infuzji w zależności od czasu jej trwania. Niskie ciśnienie podczas formowania znacznie przyspiesza i usprawnia proces infiltracji włókien przez żywicę, co istotnie skraca procesy wytwarzania laminatów. Przy ciśnieniach  $0,6$  i  $0,75$  bar prędkości przemieszczania żywicy są porównywalne, a największa prędkość przepływu żywicy wystąpiła przy ciśnieniu  $0,75$  bar. Znaczne wydłużenie procesu stwierdzono dla ciśnienia  $0,4$  bar, przy którym prędkość przepływu żywicy obniżyła się prawie 8-krotnie (tab. 1). W przypadku ciśnienia  $0,4$  i  $0,6$  bar przemieszczanie czoła żywicy następowało w sposób liniowy na całej szerokości formy. Przy ciśnieniu  $0,75$  bar zauważono, że szybciej osnowa wypełnia obszary tuż przy krawędziach laminatu, a najwolniej jego środek. Przy brzegach laminatu tworzą się „zakola” o promieniu kilku centymetrów. Stwarza to jednak zagrożenie pojawienia się obszarów nienasyconych żywicą, co można eliminować poprzez większą ilość punktów wprowadzenia żywicy podczas wypełniania większych elementów w dużych projektach przemysłowych. Natomiast małe wartości ciśnienia infiltracji znacznie wydłużają czas procesu technologicznego, ograniczając gabarytowo wielkość produkowanych elementów. Jednakże przy niskim ciśnieniu infiltracji ( $0,4$  bar) uzyskano jakościowo lepsze laminaty, charakteryzujące się większą gęstością i ilością włókna wzmocniającego (tab. 1). Ciśnienie ( $0,4$  bar) zapewnia lepsze właściwości mechaniczne, zarówno na rozciąganie, jak i zginanie, niż ciśnienie  $0,75$  bar. Różnice właściwości mechanicznych pomiędzy laminatami formowanymi przy  $0,6$  i  $0,75$  bar są nieznaczne (tab. 1). Chcąc zatem uzyskać lepsze właściwości mechaniczne, należałoby stosować niższe ciśnienia formowania, trzeba jednak pamiętać, że małe ciśnienie zmniejsza prędkość przepływu czoła żywicy, dlatego jego zastosowanie może się w zasadzie ograniczyć tylko do małych konstrukcji.

W dalszej części badań starano się określić wpływ innej postaci wzmocnienia, gramatury oraz ilości zastosowanych warstw na proces infiltracji podczas infuzji.

Na rysunku 3 przedstawiono przebieg wypełnienia formy żywicą przy zastosowaniu różnego typu tkanin wzmocniających. Laminaty wzmocniane tkaninami zostały wytworzone na tym samym podciśnieniu  $0,75$  bar. Użyto tkanin satynowych o gramaturze  $300 \text{ g/m}^2$  - tkanina satynowa T300, tkanin rowingowych (jednokierunkowych) o gramaturze  $600 \text{ g/m}^2$  - T600, matotkanin składających się z połączonych ze sobą warstw tkaniny rowingowej o gramaturze  $850 \text{ g/cm}^2$  i maty o gramaturze  $450 \text{ g/m}^2$  - ELTM85/450.



Rys. 2. Droga przepływu żywicy od czasu w zależności od podciśnienia dla laminatów wzmacnianych matą

Fig. 2. The distance of flow of resin in dependence from underpressure for laminates with mat reinforcement

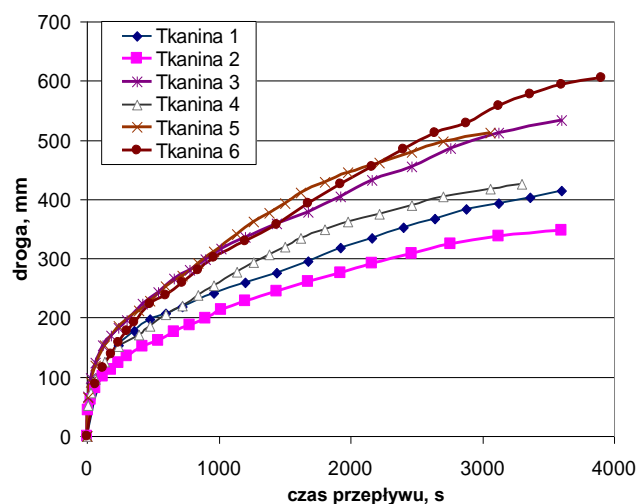
TABELA 1. Wpływ podciśnienia i postaci wzmocnienia na średnią prędkość przepływu żywicy w laminatach  
TABLE 1. The influence of underpressure and the reinforcement on the average velocity of flow of resin in laminates

Nazwa	Układ warstw	Ciśnienie bar	Prędkość przepływu mm/s	Gęstość g/cm <sup>3</sup>	Udział włókien %
M2	3 x 300E	0,6	1,27	1,39	31
M3	3 x 300E	0,75	1,36	1,39	34
M4	3 x 300E	0,4	0,16	1,41	37
T1	4 x T600	0,75	0,12	1,71	54
T2	2 x T600		0,10	1,52	47
T3	2 x T600 + 300E		0,15	1,59	44
T4	2 x T300		0,13	1,33	35
T5	2 x T300 + 300E		0,15	1,43	33
T6	2 x ELTM 850/450		0,16	1,64	53
S1	300E/pianka/ 300E	0,75	0,95	0,55	25
S2	300E /pianka nacięta/ 300E		4,34	0,54	25
S3	300E/ koremata XM4/300E		0,12	0,95	34

W badaniach wykorzystano również laminaty składające się z dwóch warstw tkaniny satynowej, pomiędzy które wprowadzono warstwę maty 300E. Trudność infiltracji tkanin jest związana z tym, że włókna występują w postaci krzyżujących się pasm, zawierających określoną ilość pojedynczych włókien, zależnych od gramatury tkaniny. Infiltracja poszczególnych pasm jest wtedy ograniczona. W wyniku tego przepływ żywicy i prędkość infiltracji są o wiele mniejsze (prawie dziesięciokrotnie), niż ma to miejsce przy wzmocnieniu matą. Zwiększenie oporów przepływu

jest związane z niewielką średnicą kapilar tworzących się pomiędzy elementarnymi włóknami.

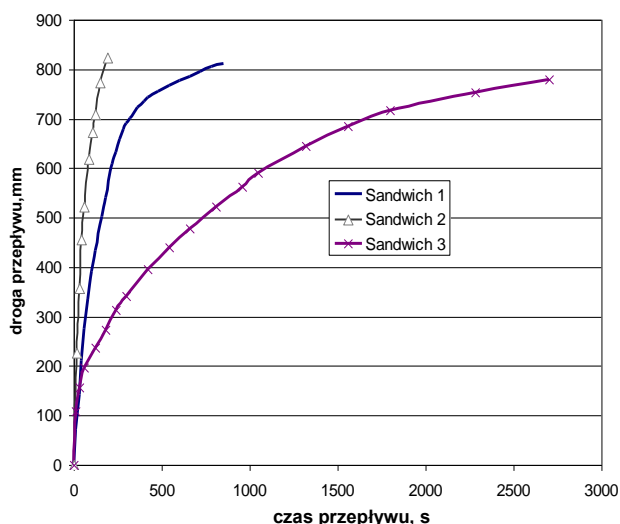
Wprowadzenie pomiędzy warstwy tkaniny warstwy maty (laminat T3 i T5) lub wykorzystanie fabrycznie tworzonej matotkaniny ELTM850/450 w laminacie T6 zdecydowanie skraca czas przepływu żywicy przez warstwy wzmocnienia szklanego w porównaniu z laminatem T4, składającym się tylko z dwóch warstw tkaniny (rys. 3). Wprowadzona warstwa tkaniny powodowała równomierny, liniowy przepływ czoła żywicy na szerokości laminatu bez tworzenia się obszarów nienasyconych żywicą.



Rys. 3. Droga przepływu żywicy od czasu w zależności od podciśnienia dla laminatów wzmacnianych tkaniną

Fig. 3. The distance of flow of resin in dependence from underpressure for laminates with fabric reinforcement

W laminatach wzmacnianych tkaniną jednokierunkową, różniących się względem siebie ilością warstw (T1 i T2), infiltracja przebiegała najwolniej. Przy czym prędkość przepływu była minimalnie większa przy zastosowaniu większej ilości warstw. Było to prawdopodobnie wynikiem pojawienia się dodatkowych przestrzeni pomiędzy większą ilością warstw. Okazało się, że postać wzmocnienia wpływa na proces infiltracji przepływu żywicy, wersja z tkaniną satynową posiadała minimalnie większą prędkość przepływu. Zastosowanie tkanin zmniejsza prędkość przepływu żywicy, ale w znaczący sposób poprawia właściwości mechaniczne (tab. 1), które zmieniają się w zależności od zastosowanej tkaniny, jej gramatury oraz ilości warstw. Największy udział wzmocnienia został uzyskany dla Tkaniny 1 (tkanina jednokierunkowa, 4 warstwy) oraz Tkaniny 6 (matotkanina ELTM). Większą ilość włókien wzmocnienia zapewniają więc tkaniny o dużej gramaturze oraz większej ilości warstw. Tkanina 6 posiada większy udział wzmocnienia niż Tkaniny 2 i 3, a pomimo tego jej wytrzymałość na rozciąganie jest mniejsza, tylko wytrzymałość na zginanie jest minimalnie większa.



Rys. 4. Droga przepływu żywicy od czasu w zależności od podciśnienia dla laminatów przekładkowych

Fig. 4. The distance of flow of resin in dependence from underpressure for sandwich laminates

Właściwości mechaniczne są związane z samą postacią wzmocnienia, jej gramatury oraz ilością warstw. Najlepszymi właściwościami charakteryzuje się Tkanina 1, natomiast najslabszymi Tkanina 5, w której wykorzystano wzmocnienie z warstwy maty szklanej. Należy jednak nadmienić, że dzięki metodzie infuzji, można zastosować wzmocnienia o bardzo dużej gramaturze 600 i 850 g/m<sup>2</sup>, niemożliwe do przesycenia w metodzie laminowania kontaktowego.

TABELA 2. Wpływ podciśnienia i postaci wzmocnienia na właściwości mechaniczne laminatów

TABLE 2. The influence of underpressure and the reinforcement on the mechanical properties of laminates

Nazwa	Układ warstw	Ciśnienie bar	Wytrzymałość na rozciąganie MPa	Wytrzymałość na zginanie MPa
M2	3 x 300E	0,6	82	153
M3	3 x 300E	0,75	98	133
M4	3 x 300E	0,4	120	184
T1	4 x T600	0,75	381	269
T2	2 x T600		331	199
T3	2 x T600 + 300E		350	165
T4	2 x T300		103	125
T5	2 x T300 + 300E		116	142
T6	2 x ELTM 850/450		206	247
S1	300E/pianka/ 300E	0,75	28	14
S2	300E /pianka nacięta/ 300E		24	15
S3	300E/ koremata XM4/300E		48	27

Ostatnia część badań dotyczyła oceny wpływu materiałów rdzeniowych w konstrukcjach typu sandwiczowego na proces infiltracji podczas infuzji. Badania były prowadzone przy podciśnieniu wynoszącym

0,75 bar. Materiały przekładkowe zostały umieszczone pomiędzy dwoma warstwami maty szklanej 300E, tworząc rdzeń jak w klasycznych układach sandwiczowych. Jako rdzeń wykorzystano piankę PVC oraz korematę XM o grubości 5 mm. Dodatkowo w piance PVC zostały wykonane krzyżujące się nacięcia w odległości 50 mm (kanały) w celu szybszego rozprowadzenia żywicy. Opory pojawiające się podczas przepływu żywicy przez materiał rdzenia spowodowały obniżenie prędkości infiltracji w porównaniu z laminatem umacnianym matą M3. Wyniki badań pokazały (rys. 4), że, biorąc pod uwagę prędkości przepływu, lepszym materiałem rdzeniowym jest pianka PVC, a nie dość często wykorzystywana w konstrukcjach koremata. Dodatkowe zastosowanie na piance nacięć rozprowadzających żywicę ponad 4-krotnie zwiększyło prędkość przepływu, przyspieszając procesy infiltracji. Można zatem znacznie usprawnić procesy nasycania poprzez zastosowanie odpowiednio przygotowanych materiałów rdzeniowych, w których materiał rdzenia będzie dodatkowo pełnił funkcję materiału przyspieszającego proces infiltracji, nie powodując jednocześnie zmian charakterystyk mechanicznych (tab. 2) kompozytu.

## PODSUMOWANIE

Podjęte w pracy badania pozwoliły na określenie możliwości wykorzystania metody infuzji do formowania materiałów kompozytowych z osnową polimerową. Uzyskane wyniki pozwoliły ocenić, w jaki sposób parametry formowania (ciśnienie), postać wzmocnienia, jego gramatura, sposób ułożenia warstw wzmocnienia mogą decydować o jakości uzyskanego kompozytu.

Jednym z podstawowych elementów technologii jest ciśnienie formowania wyrobów. Wpływa ono przede wszystkim na czas trwania procesu. Małe wartości ciśnienia podczas infuzji znacznie wydłużają czas wypełniania formy przez żywicę, ale przyczyniają się do uzyskania kompozytu o dobrych właściwościach mechanicznych. Zwiększenie ciśnienia infiltracji znacznie skraca czas trwania procesu, może jednak doprowadzić do pogorszenia właściwości mechanicznych wyrobów, powstawania obszarów nieprzesączonych żywicą. Skrócenie czasu formowania można uzyskać, stosując dodatkowe układy wspomagające proces infiltracji, np. wprowadzone pomiędzy warstwy tkanin warstw maty, stosowanie złożonych postaci wzmocnienia, jakimi są matotkaniny, a w przypadku konstrukcji sandwiczowych naciętych pianek, spełniających funkcję rdzenia i kanałów rozprowadzających żywicę. Technologia infuzji pozwala na uzyskanie kompozytów o dużym udziale włókien umacniających. W laminatach formowanych metodą kontaktową udział włókien wzmacniających z reguły nie jest większy niż 30÷35%, a w przypadku procesów infuzji może przekroczyć 50%. W procesach infuzji można rów-

niez zastosować wzmocnienia o bardzo dużej gramaturze, których nie stosuje się w przypadku laminowania ręcznego z uwagi na niemożliwość przesączenia ich żywicą.

## LITERATURA

- [1] Belingardi G., Cavatorta M., Paolino D.S., Repeated impact response of hand lay-up and vacuum infusion thick glass reinforced laminatem, *International Journal of Impact Engineering* 2008, 35, 609-619.
- [2] *Handbook Composite Materials*, Praca zbiorowa, R&G, Waldenbuch 2003.
- [3] Govignon Q., Bickerton S., Morris J., Kelly P.A., Full field monitoring of the resin flow and laminate properties during the resin infusion process, *Composites, Part A* 2008, 39, 1412-1426.
- [4] Antonucci V., Giordano M., Nicolais L., Calabro A., Cusano A., Cutolo A., Inserra S., Resin flow monitoring in resin film infusion process, *Journal of Materials Processing Technology* 2003, 143-144, 687-692.
- [5] Thagard J.R., Okoli O.I., Liang Z., Wang H.P., Zhang C., Resin infusion between double flexible tooling: prototype development, *Composites, Part A* 2003, 34, 803-811.
- [6] Williams C.D., Grove S.M., Summerscales J., The compression response of fibre-reinforced plastic plates during manufacture by the resin infusion under flexible tooling method, *Composites, Part A* 1998, 29, 111-114.
- [7] Lunn P., Tooling materials ideal for resin infusion, *Reinforced Plastics* 2004, 48, 8, 345-368.
- [8] Sevostianov I.B., Verijenko V.E., von Klemperer C.J., Chevallereau B., Mathematical model of stress formation during vacuum resin infusion process, *Composites, Part B* 1999, 30, 513-521.
- [9] Correia N.C., Robitaille F., Long A.C., Rudd C.D., Simacek P., Advani S.G., Analysis of the vacuum infusion moulding process, *Composites, Part A* 2005, 36, 1645-1656.
- [10] Andersson H.M., Lundstrom T.S., Gebart B.R., Numerical model for vacuum infusion manufacturing of polymer composites, *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow* 2003, 13, 3, 383-394.