

WPLYW TECHNOLOGICZNYCH ASPEKTÓW WYTWARZANIA WŁÓKNISTYCH MATERIAŁÓW KOMPOZYTOWYCH PRZY WTŁACZANIU ŻYWICY POD CIŚNIENIEM DO WNĘTRZA FORMY

RAFAŁ CHATYS*, KRZYSZTOF SZAFRAN**

*Katedra Technik Komputerowych i Uzbrojenia, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Politechnika Świętokrzyska, Al.1000-lecia P.P. 7, 25-314, Kielce

**Instytut Lotnictwa, Al. Krakowska 110/114, 02-256 Warszawa
chatys@tu.kielce.pl, krzysztof.szafraan@ilot.edu.pl

Streszczenie

W pracy omówiono i podjęto próbę analizy wpływu metod technologicznych formowania włóknistych materiałów kompozytowych (WMK) o osnowie epoksydowej (LH 289) na jakość otrzymanych laminatów z różnym udziałem i typem wzmocnienia. Przedstawiono aspekty i różnice w wytwarzaniu WMK metodami wtłaczania żywicy pod ciśnieniem do wnętrza formy na przykładzie metody infuzji i worka próżniowego. W poniższej pracy do szacowania parametrów (τ_{lok} , σ_{max}) określających wytrzymałość WMK zastosowano model najslabszej mikroobjętości bazujący na nieefektywnej (krytycznej – L_{kr}) długości wzmocnienia. W modelu założono, iż trzywarstwowy kompozyt składa się z komponentów mających indywidualne fizyko-mechaniczne właściwości. Stwierdzono, że zniszczenie kompozytów hybrydowych odbywa się poprzez ścięcie granicy międzyfazowej i warstwy żywicy pomiędzy dwoma warstwami węglowymi "biaxal" (o kącie ułożenia włókien $\pm 45^\circ$), w której znajdowała się warstwa z tkaniny szklanej. Zastosowany model obliczeniowy zapewnia z pozycji zunifikowanej, narzędzie do skoordynowanego opisu wytrzymałości. Pokazano, że model daje relatywnie dobre wyniki. Przytoczono także przykłady zastosowania tychże technologii w nowo projektowanych elementach urządzeń mechanicznych.

Słowa kluczowe: wytrzymałość, kompozyt hybrydowy, model procesu zniszczenia, technologia, konstrukcje wysokowytrzymałe.

1. WPROWADZENIE

Intensywny rozwój inżynierii materiałowej, tj. technologii wytwarzania włóknistych materiałów kompozytowych – WMK, polegający na łączeniu nowych komponentów czy też prefabrykatów (preimpregnatów w postaci płyt, prętów, taśm o różnych kształtach) na osnowie polimerowej, uwypuklił wiele nierozwiązanych kwestii i problemów w określaniu parametrów technologicznych projektowanego kompozytu (np. spowolnienie procesu utwardzania żywic w zaplanowanym etapie ich wytwarzania [1]). Optymalizacja procesów technologicznych wytwarzania nowych konstrukcji, a zwłaszcza powtarzalność właściwości wytrzymałościowych jest niezbędna w produkcji

kompozytów wysokowytrzymałych stosowanych w środkach transportu takich jak samoloty i śmigłowce. Modele zjawisk fizycznych zachodzących w procesach wytwarzania pozwalają na trafne określenie właściwości wytrzymałościowych gotowych wyrobów.

Szczególnie modelowanie przepływu cieczy (przy pomocy modelu Darcy'ego-Brinkmana-Forchheimera [2]), czy procesu wymiany ciepła (za pomocą równań energii opartych na założeniu o lokalnej równowadze termicznej) poddawane są zarówno izotropowe, jak i anizotropowe ośrodki porowate. Istnieją dwie dość ważne kwestie poruszane w literaturze w modelowaniu przepływu żywicy w formach zamkniętych, które określają proces utwardzania osnowy:

1. precyzyjna prognoza zmian temperatury, umożliwiająca zapobieganie przemianie żywicy w żel zanim forma zostanie wypełniona, lub zbyt szybkiemu utwardzeniu kompozytu [3 ÷ 6],
2. prognoza i pomiar drożności przepływu, który jest istotnym czynnikiem w projektowaniu właściwości wytrzymałościowych kompozytów wytwarzanych metodami „infuzji pod próżnią” [7 ÷ 9]. Konieczne jest precyzyjne określenie drożności w celu ustalenia z rozsądną dokładnością temperatury i prędkości włączania żywicy.

Wartość temperatury włączanej żywicy, podobnie jak ciśnienie docisku, jest tym czynnikiem, który determinuje kształtowanie się określonych właściwości mechanicznych kompozytów. Podczas procesu włączania temperatura i ciśnienie oddziałują na kinetykę krystalizacji osnowy polimerowej, a przez to na strukturę i stopień krystaliczności zestalonego laminatu. Zmiana warunków przepływu w układzie uplastyczniającym powoduje w formie różnicę orientacji makromolekuł [10 ÷ 12]. W dużym stopniu jest to związane z oszacowaniem właściwości wytrzymałościowych kompozytu w szczególności poprawności wytworzonych materiałów w elementach konstrukcji pracujących w zmiennym polu obciążeń np. łopaty wirników wentylatorów, struktury nośne aparatów latających. Efektem dobrego doboru (z utrzymaniem parametrów technologicznych w czasie wytwarzania kompozytu polimerowego) jest tolerancja wartości rozrzutu właściwości mechanicznych materiału. Rozwój metod formowania WMK wzbogacony został o techniki wykańczające stosowane przy obróbce kompozytów polimerowych (np. cięcie z wykorzystaniem strugi wodno-ścierniej, czy z użyciem wspomaganego numerycznego CNC). Spójność powyższych etapów powoduje, iż człowiek codziennie staje przed kolejnymi wyzwaniem, stwarzając nowe materiały konstrukcyjne niezbędne dla konstruktorów współczesnych urządzeń mechanicznych.


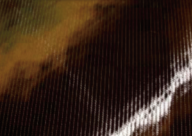

2. PROCEDURY EKSPERYMENTALNE

Do wytworzenia trój-warstwowych kompozytów hybrydowych metoda infuzji i worka próżniowego o osnowie epoksydowej (LH 289 z utwardzaczem H 289) z różnym udziałem wzmocnienia ($f = 60$ i 50% – tabela 1), wykorzystano dwukierunkową tkaninę szklaną i tkaninę węglową typu biaxal, o gramaturze odpowiednio 600 i 400 g/m² (tabela 2).

Tab. 1. Specyfikacja techniczna żywicy epoksydowej LH 289 [13]

Właściwości żywicy:	Ciecz
Temperatura zapłonu, °C	nad 150
Gęstość, g/cm ³	1,12÷1,16
Lepkość, mPa, 25°C	500÷900
Równowartość w epoksydowych, g/mol	180÷193
Indeks epoksydowy, mol/1000	0.51÷0.56

Tab. 2. Właściwości mechaniczne komponentów kompozytu warstwowego [14]

Komponenty	Gramatura	Właściwości mechaniczne komponentów
Tkanina szklana UD [0°/-90°] o gramaturze 600g/m ²		<ul style="list-style-type: none"> – moduł sprężystości $E_f = 72.5$ GPa – moduł sprężystości poprzecznej $G_f = 26.6$ GPa – liczba Poissona $\nu_f = 0.25$ – objętościowa zawartość włókien $v_f = 0.2 \div 0.17$
Tkanina węglowa typu biaxial [+45°/-45°] o gramaturze 400g/m ²		<ul style="list-style-type: none"> – moduł sprężystości $E_f = 120$ GPa – moduł sprężystości poprzecznej $G_f = 36$ GPa – liczba Poissona $\nu_f = 0.25$ – objętościowa zawartość włókien $v_f = 0.4 \div 0.33$
Żywica epoksydowa LH-289		<ul style="list-style-type: none"> – moduł sprężystości $E_m = 3.8$ GPa – moduł sprężystości poprzecznej $G_f = 1.15$ GPa – liczba Poissona $\nu_f = 0.39$ – objętościowa zawartość matrycy $v_f = 0.4 \div 0.5$

Po czym określono czas potrzebny do osiągnięcia pik temperatury, aby określić wzrost temperatury – tzw. pik temperatury, czyli moment w którym zaczyna się proces polimeryzacji przy rekomendowanej proporcji wagowej komponentów 100:33. Pik temperatury (czas użycia żywicy) wystąpił w przedziale 25 ÷ 26 minut.

2.1. Etapy wytwarzania kompozytów hybrydowych metodami wtlaczania żywicy pod ciśnieniem do wnętrza formy

Drugim etapem po przygotowaniu i wybraniu komponentów kompozytu hybrydowego z dodatkowymi materiałami niezbędnymi w przeprowadzeniu formowania laminatu metodą infuzji jak i worka próżniowego, było oczyszczenie powierzchni formy z nierówności i zabrudzeń. Kolejny etap to nałożenie środka rozdzielającego (np. wosku Spracewax 300), w celu łatwiejszego oddzielenia wytworzonego kompozytu od formy po jego utwardzeniu (Rys. 1).

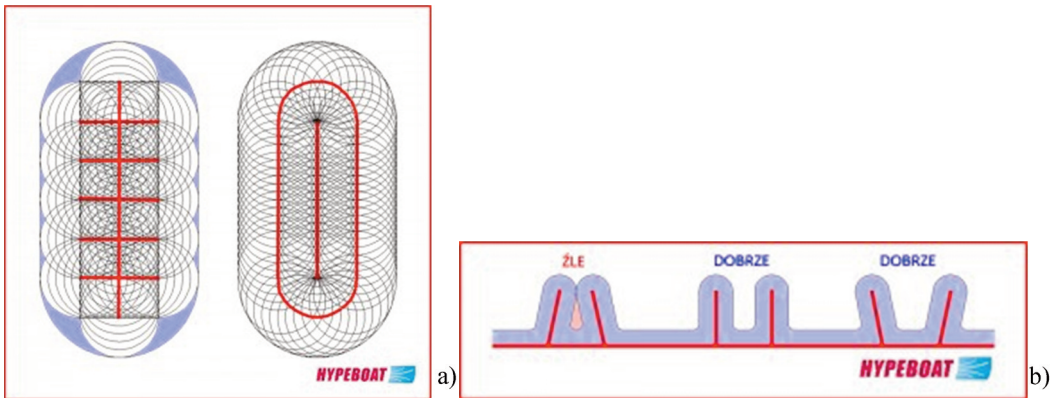


Rys. 1. Nałożenie wosku "Spracewax 300" na powierzchnię przygotowanej formy

Po czym do formy zostały nałożone pozostałe materiały pomocnicze jak siatka, rurki czy delaminaż. Założenia i uproszczenia jakie przyjęto w pierwszej fazie projektowania kompozytu hybrydowego to:

- rurki spiralne rozprawdzające żywicę mają nieskończenie wielką przepuszczalność w stosunku do medium rozpliwowego – tj. rurki dostarczają cały czas wystarczającą ilość żywicy niezależnie od zasilanego pola powierzchni,
- rurki napęlniają się błyskawicznie zanim jeszcze medium żywiczne zacznie się rozprawdzać,
- ułożenie wzmocnienia i zasysanie osnowy nie ma znaczenia w jakim układzie – poziomo, czy pionowo,
- odsysanie w każdym punkcie kołnierza ma jednakową siłę,
- wszędzie jednakowa warstwa wzmocnienia – brak zakładek.

W zaprojektowanym kompozycie hybrydowym różnymi metodami został wybrany równoległy układ wtłaczania żywicy do wnętrza formy, który wymaga najmniejszej obsługi w trakcie podawania żywicy kosztem większego doświadczenia (wprawa pracy z układem). Zaś układ szeregowy jest prostszy w projektowaniu, ale trzeba w odpowiednich momentach zmieniać punkty dostarczania żywicy – to samo dotyczy rurek i siatek. Po wyborze układu, ustalona została bezpieczna odległość, tj. 2/3 maksymalnego dystansu płynięcia medium żywicznego z utwardzaczem w formie – rysunek 2a, pamiętając, aby nie tworzyć odgałęzień schodzących się do środka; na jaką mieszanina żywiczna w wytworzonej próżni może spokojnie dopłynąć i przesączyć wzmocnienie w metodzie infuzji.



Rys. 2. Przykład określenia dystansu płynięcia medium żywicznego z utwardzaczem (a) z wariantami otwartymi i zamkniętymi suchych powierzchni (b) [15]

Brak dostatecznej odległości może spowodować zamknięcie suchych powierzchni (Rys. 2b), w których zostanie uwiecznione powietrze (odgałęzienia powinny rozchyłać się, lub być do siebie równoległe). Biorąc pod uwagę wszystkie założenia i uproszczenia korygujemy układ. Punkt dostarczający żywicę można trochę przesunąć w kierunku przeciwnym do punktu odsysania. Rurki znajdujące się dalej od punktu zasilającego w mieszaninę żywiczną delikatnie wydłużamy. Główną magistralę zasilającą (czyli średnicę rurki rozpliwowej) dajemy o większej średnicy. Te przybliżenia w dużej mierze wynikają z doświadczenia i robione są „na oko”, dlatego potrzebny jest wcześniejszy test nowego układu. Wszystkie spostrzeżenia należy wprowadzić jako korekty w kolejnych procesach i uwzględniać w kartach technologicznych.

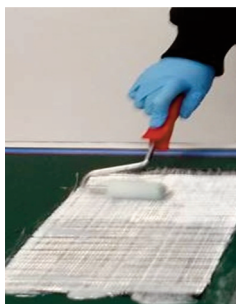
Jak widać proces formowania WMK metodami "w formach zamkniętych" nie jest prosty, lecz z doświadczeniem możliwy do przewidzenia. W tych metodach czy technikach, szczególną uwagę należy zwrócić na pierwszą warstwę wzmocnienia, która decyduje o gładkości i jakości uzyskanej powierzchni kompozytu warstwowego (oczywiście w przypadku żelkotu nie należy przesadzać z dociskaniem wzmocnienia w trakcie układania, bo można go "odspoić" od formy).

2.2. Aspekty technologiczne przy wytwarzaniu kompozytu hybrydowego metodą worka próżniowego i infuzji

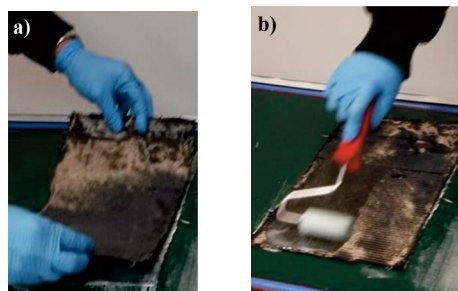
Do najważniejszych zalet przy wytwarzaniu laminatów metodami próżniowymi, takimi jak infuzja i worek próżniowy, należy odpowietrzenie formy oraz odessanie powietrza zamkniętego pomiędzy warstwami kompozytu warstwowego z jednoczesną redukcją emisji szkodliwych substancji lotnych które powstają podczas utwardzania laminatu, oraz lepsze przesączenie żywicą wzmocnienia w laminacie [16].

Różnica między zastosowanymi metodami polega na tym, iż na nawoskowaną formę w metodzie worka próżniowego nakłada się mieszaninę (żywicy i utwardzacza) na wzmocnienie przy pomocy wałka (Rys. 3), czego nie ma w metodzie infuzji.

Po każdym nałożeniu kolejnej warstwy tkaniny w kompozycie hybrydowym wytwarzanym metodą worka próżniowego zostały nasączone kolejne warstwy wzmocnienia przygotowaną mieszaniną (Rys. 4). W celu uniknięcia tworzenia się pęcherzyków powietrza przesycanie warstw tkanin odbywało się od dołu w kierunku góry.



Rys. 3. Nałożenia na nasączoną warstwę węglową warstwy szklanej



Rys. 4. Nałożenia drugiej warstwy węglowej na nasączoną warstwę szklaną i węglową (a) przy pomocy wałka (b)

W metodzie infuzji suche wzmocnienie nie nasączone żywicą z utwardzaczem układa się w formie pod folią tworząc worek próżniowy. Przed zamknięciem nieutwardzonych nasączonych i suchych odpowiednio w metodzie worka próżniowego i infuzji komponentów laminatu, nakleja się na obwodzie formy dwustronną taśmę uszczelniającą, pod którą znajdował się tzw. delaminaż, ułożony tak aby przylegał w każdym miejscu formy, folia perforowana o grubości ok. 0,025 mm zapobiegająca przywarciu laminatu do powierzchni, materiał przepuszczalny tzw. oddychający, którego głównym zadaniem jest równomierny rozkład próżni wzdłuż całej powierzchni pod folią z jednoczesną eliminacją nadmiaru żywicy, oraz siatka (w metodzie infuzji – rysunek 5).



Rys. 5. Suche wzmocnienie w metodzie infuzji przykryte delaminażem, materiałem "oddychającym", oraz siatką z przyklejaną folią do dwustronnej taśmy uszczelniającej na obwodzie formy

Infuzja jako metoda wytwarzania kompozytu o osnowie polimerowej (Rys. 6a) łączy techniki dwóch metod, tj. metody RTM-u (procesu wytwarzającego podciśnienie powodując zassanie żywicy do wnętrza formy [16, 17], oraz worka próżniowego.

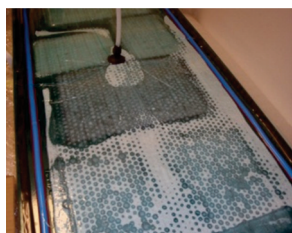


Rys. 6. Sprawdzenie instalacji na szczelność w metodzie infuzji (a) i worka próżniowego (b)

Ostatnią warstwę stanowił elastyczny worek, który został podłączony do instalacji podciśnieniowej, tj. pompy próżniowej z zamontowanym manometrem w celu sprawdzenia hermetyczności układu w metodzie infuzji i worka próżniowego. Pracująca instalacja przy ciśnieniu 0,6 i 0,9 atm. (tabela 3), odpowiednio w metodzie worka próżniowego (Rys. 7) i infuzji, pozwala na docisk poszczególnych warstw w pakiecie oraz odessanie powietrza.

Tab. 3. Parametry technologicznych kompozytów hybrydowych wytworzonych metodą infuzji i metodą worka próżniowego

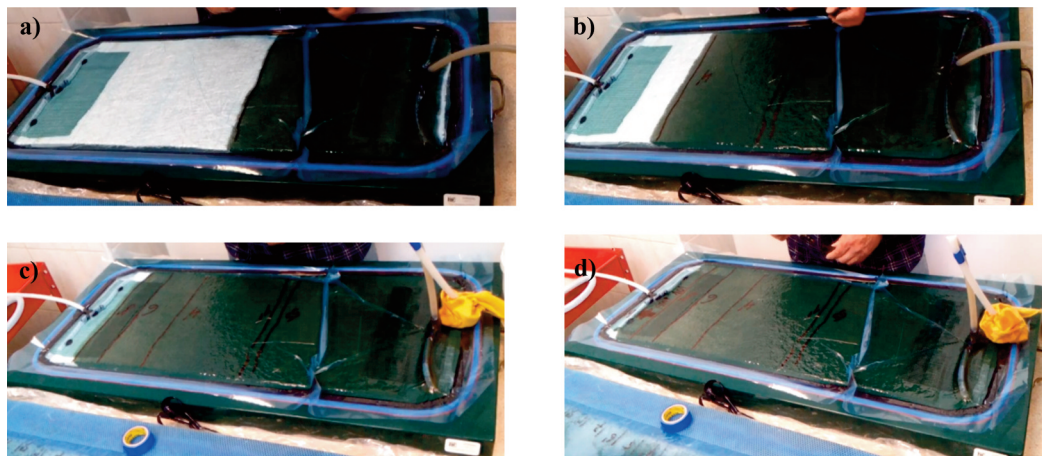
kompozyt hybrydowy wytworzony metodą infuzji	
Stosunek objętościowy komponentów, %	45:55 (50:50)
Czas żelowania (ustalony na poziomie), min	10 (25÷26)
Czas dotwardzania, h	60
Cisnienie, atm.	0,9
worka próżniowego	
Stosunek objętościowy komponentów, %	50:50
Czas żelowania (ustalony na poziomie), min	3-4 (25÷26)
Czas dotwardzania, h	60
Cisnienie, atm.	0,6



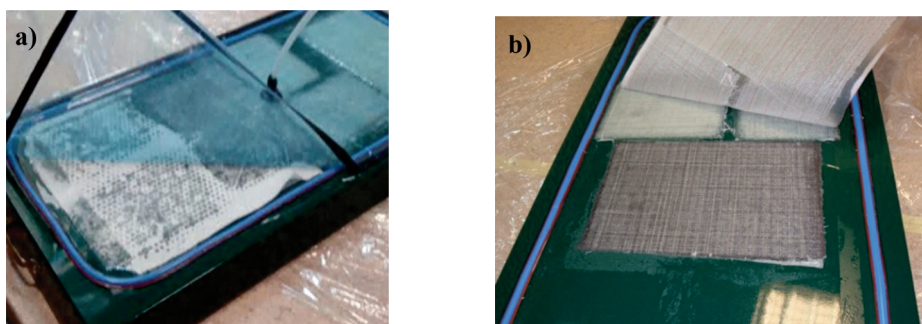
Rys. 7. Proces wtlaczania mieszaniny żywicznej przy wytwarzaniu kompozytu hybrydowego metodą worka próżniowego

Po sprawdzeniu układu próżniowego i określeniu stosunku wagowego żywicy do utwardzacza (zgodnie z rekomendacją karty technologicznej), przystąpiono do odsysania nadmiaru mieszaniny żywicznej i powietrza w metodzie worka próżniowego (Rys. 7), oraz zalewanie mieszaniny żywicznej z utwardzaczem w metodzie infuzji (Rys. 8).

Po utwardzeniu (tj. czasie żelowania 10 i ok. 4 min. odpowiednio w metodzie infuzji i worka próżniowego), oraz dotwardzaniu (24h), kompozyty hybrydowe, zostają z formy wyjęty w wyniku usunięcia foli, materiału oddychającego i delaminażu (Rys. 9).



Rys. 8. Wprowadzanie mieszanki żywicznej do układu próżniowego w metodzie infuzji po 0,5 (a), 4 (b), 8 (c) i 10 (d) minutach

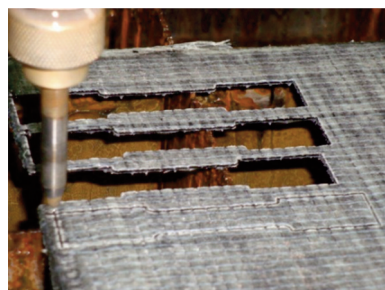


Rys. 9. Usunięcie folii (a) oraz materiału oddychającego z delaminacją z wytworzonego kompozytu hybrydowego metodą worka próżniowego

2.3. Przygotowanie próbek

Z wytworzonego kompozytu hybrydowego o grubości 0,6-0,7 mm wycięto próbki o geometrycznych wymiarach według normy PN-EN 10002-1 + ACI. Próbki o bazie pomiarowej 10 mm zostały wycięte z wytworzonych płyt laminatów za pomocą strugi wodnej "WaterJet A.P.W2010BB" bez dodatku ścierniwa z prędkością cięcia 1,5 m/s (Rys. 10).

W celu określenia właściwości mechanicznych wytworzonych laminatów, próbki zostały poddane próbie quasi-statycznego rozciągania wg normy ISO 14129:1997 z prędkością 2 mm/min [18]. Badanie przeprowadzono na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej INSTON 8501 znajdującej się w Laboratorium Wytrzymałości Materiałów – Centrum Laserowych Technologii Metali PŚk.



Rys. 10. Kompozyt hybrydowy podczas cięcia próbek strugą wody

Zastosowano następujące oznaczenia próbek poddanych statycznej próbie rozciągania:

- 'I_EPOXY_A(B)-xxxx': gdzie, 'I_EPOXY' oznacza kompozyt epoksydowy z 50% (A) i 60% (B) udziałem wzmocnienia wytworzony metoda infuzji – z numerem próbki 'xxxx');
- 'W_EPOXY_C-xxxx': gdzie, 'W_EPOXY' oznacza kompozyt epoksydowy z 60% (C) udziałem wzmocnienia wytworzony metodą worka próżniowego – z numerem próbki 'xxxx').

3. ANALIZA WYNIKÓW

Otrzymane wartości ze statycznej próby rozciągania parametrów wytrzymałościowych trzywarstwowych kompozytów hybrydowych z różnym udziałem wzmocnienia (Tab. 4), wytworzonych metoda infuzji i worka próżniowego, nie wykazują dużego rozrzutu, których wartość oszacowano na poziomie ok. 4-6 % odnośnie średniej wytrzymałości (tj. z trzech próbek kompozytów z 60%: I_EPOXY_B, W_EPOXY_C i 50%: I_EPOXY_A udziałem objętościowym wzmocnienia). Określono wyższą wartość wytrzymałości o ok. 2 ÷ 3% kompozytu hybrydowego wytworzonego metodą infuzji niż metoda worka próżniowego (przy wyższym ciśnieniu wtlaczania żywicy do wnętrza formy i z tym samym udziałem objętościowym wzmocnienia). Wszystkie próbki pękały w obszarze bazy pomiarowej, dlatego wyniki uznać można za wiarygodne.

Rozrzut w dużej mierze spowodowany był defektami w strukturze o zasięgu lokalnym lub obejmującym całą objętość bryły rozpatrywanego elementu wytworzonego laminatu (tj. aspektami technologicznymi, czy też jakością cięcia próbek). Zniszczenie próbek kompozytu trzywarstwowego następowało poprzez ścięcie granicy międzyfazowej i warstwy żywicy pomiędzy dwoma warstwami węglowymi typu biaxal (o ułożeniu włókien $\pm 45^\circ$), w której znajdowała się warstwa z tkanina szklanej.

Tab. 4. Właściwości mechaniczne kompozytów hybrydowych z różnym udziałem wzmocnienia wytworzonych metodą infuzji i metodą worka próżniowego

Nr próbki	Modułu ścinania, σ_{max} , MPa	Wydłużenie włókna, ε , mm	Moduł sprężystości, E , GPa
50 % wzmocnienia w kompozycie hybrydowym (m. infuzji)			
I_EPOXY_A -1	546	1,25	4,9
I_EPOXY_A -2	510	1,34	5.1
I_EPOXY_A -3	478	1,31	5,2
Średnia	511,33	1,30	5,07
60 % wzmocnienia w kompozycie hybrydowym (m. infuzji)			
I_EPOXY_B -1	537	1,44	4,9
I_EPOXY_B -2	-	-	-
I_EPOXY_B -3	584	1,52	5,3
Średnia	560,50	1,48	5,10
60 % wzmocnienia w kompozycie hybrydowym (m. worka próżniowego)			
W_EPOXY_C -1	532	1,44	4,9
W_EPOXY_C -2	572	1,68	5.1
W_EPOXY_C -3	538	1,38	4,9
Średnia	547,30	1,50	4,97

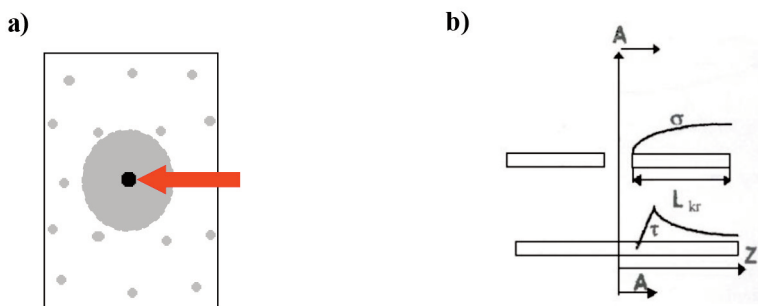
Nie jest to wprawdzie czyste ścinanie, gdyż w płaszczyźnie ścinania występują także naprężenia normalne, ale przy takiej orientacji włókna wzmacniające kompozyt nie ulegają zerwaniu, a jedynie „wyciągnięciu” z osnowy czyli następuje zniszczenie warstwy żywicy pomiędzy nimi. Oznacza to,

że właściwości wytrzymałościowe kompozytu warstwowego o osnowie polimerowej w dużej mierze zależą od wytrzymałości zastosowanych komponentów, oraz adhezji między komponentami kompozytu. W badanym przypadku adhezji między włóknem szklanym i węglowym, oraz żywicy z różnym udziałem wzmocnienia.

Na wartość modułu ścinania, a tym samym na parametr σ , ma wpływ nie tylko adhezja między warstwą szklaną i węglową, ale kąt ułożenia wzmocnienia, tj. włókien węglowych względem działającego obciążenia.

3.1. Parametry modelu przy szacowaniu wytrzymałości kompozytu hybrydowego

Przyjmując, iż mechanizm współpracy między komponentami WMK – włóknem, a osnową, oraz między oddzielnymi włóknami w powyższym modelu, nie zmienia się, podjęto próbę oszacowania właściwości wytrzymałościowych trzywarstwowego kompozytu hybrydowego wzmocnionego włóknem szklanym i włóknem węglowym.



Rys. 11. Mikroobjętość składająca się z n - ilości włókien (a) wraz ze zniszczonym włóknem (\bullet), oraz przegrupowanie (b) naprężeń (σ) na sąsiednie włókna pod wpływem stycznych naprężeń (τ) [19]

Model oparto na zniszczeniu najsłabszej mikroobjętości [18] w kompozycie warstwowym (włóknistym) poprzez nieefektywną długość krytyczną, którego rozkład naprężeń w objętości założono równomierny (Rys. 11).

Zniszczenie najsłabszej mikroobjętości (równanie 1) będzie określała wytrzymałość otrzymanego metoda worka próżniowego trzy-warstwowego kompozytu (tj. minimalne naprężenie w n - mikroobjętości) poniższa zależność (2) i parametry modelu (Tab. 5):

$$\sigma = \frac{P}{\phi \cdot F_i \cdot n_i} \quad (1)$$

gdzie:

- n_i – ilość włókien ($i = 1, 2, 3, \dots, n$);
- F_i – pole poprzeczne przekroju włókna;
- P – siła (obciążenie);
- ϕ – poziom obciążenia, przy którym włókno efektywnie pracuje z matrycą.

$$\sigma_{komp} = \min(\sigma_{mikroobjetosci}) \quad (2)$$

Określenie lokalizacji rozerwanych włókien jest dość trudne, ponieważ ich rozmieszczenie jest przypadkowe, a proces zniszczenia wzrasta w wyniku zwiększenia obciążenia między włóknami. Przy zniszczeniu włókna w kompozycie włącza się mechanizm dystrybucji naprężeń pomiędzy sąsiadującymi włóknami. Wielkość i objętość tej strefy zależy od nieefektywnej długości (L_{kr}), na której rozerwane włókno pod wpływem stycznych naprężeń (τ) przegrupowuje naprężenia na sąsiednie włókna.

Proces zniszczenia trwa nadal, gdyż zostaje zwiększone obciążenie włókna o wartość przegrupowanej części naprężenia z pękniętego włókna. W wyniku tego zostaje przekroczona graniczna wytrzymałość laminatu, co powoduje powtórny rozkład lokalnych naprężeń między sąsiadującymi komponentami kompozytu.

Tab. 5. Parametry modelu szacującego właściwości wytrzymałościowe trzy-warstwowego kompozytu hybrydowego

L.p.	Charakterystyka	3-warstwowy kompozyt hybrydowy
1.	niefektywna długość	$L_{kr} = d_f \left[\left(\frac{1 - v^{0,5}}{v^{0,5}} \right) \cdot \frac{E_f}{G_m} \right]^{0,5} \text{ across } h \left[\frac{1 - (1 - \varphi)^2}{2 \cdot (1 - \varphi)} \right] \quad (3)$ <p>gdzie: d - średnica włókna; v - objętość włókna; E_f - moduł Younga włókna; G_m - moduł Kirchoffa matrycy; φ - poziom współpracy włókna z matrycą ($\varphi=0,97\%$).</p>
2.	naprężenia styczne (lokalne)	$\tau_{lok} = \frac{\beta r}{2} \cdot \varepsilon E_i \tanh \left(\frac{\beta l}{2} \right) \quad (4)$ <p>gdzie: β - const.; $\left(\beta = \frac{1}{B} \right)$; r - promień włókna; ε - wydłużenie włókna i-tego komponentu kompozytu; l - długość włókna – długość krytyczna.</p>
3.	maksymalne naprężenia	$\sigma_{max} = \frac{2\tau_{lok}}{\beta r} \left[\frac{1}{\tanh \left(\frac{\beta l}{2} \right)} - \frac{1}{\sinh \left(\frac{\beta l}{2} \right)} \right] \quad (5)$

Po osiągnięciu maksymalnego naprężenia (σ_{max}) w najszabszej warstwie ulegnie zniszczeniu kompozyt hybrydowy złożony z n - ilości włókien, poprzez styczne naprężenie (τ_{lok}) w mikroobjętości. Takie uszkodzenie nie wyklucza całego obiektu z pracy, aż do momentu, gdy wzrastający poziom naprężeń osiąga granicę, w której dana mikroobjętości słabych włókien ulegnie zniszczeniu. W sytuacji mniejszych naprężeń od granicy wytrzymałości, mikroobjętość będzie pracowała niezmiennie rozkładając naprężenia na sąsiednie włókna poprzez lokalne naprężenie styczne.

Po przekroczeniu maksymalnego naprężenia odpowiadającego σ_{max} , mechanizm rozpoczyna się od nowa. Zniszczenie najszabszej mikroobjętości w wytworzonym kompozycie hybrydowym metodą infuzji i worka próżniowego określono odpowiednio na poziomie 562,37 i 550,57 MPa (z 60% udziałem wzmocnienia), których wartości pokrywają się z wartościami eksperymentalnymi otrzymanymi ze statycznej próbie rozciągania (Tab. 6).

Natomiast obserwujemy zawyżoną wartość zamodelowanej wytrzymałości (o ok. $6 \div 7\%$) z wartością eksperymentalną laminatu hybrydowego z mniejszym udziałem procentowym wzmocnienia wytworzonego metodą infuzji – tabela 6. Należy podkreślić, iż zamodelowane właściwość kompozytów hybrydowych o osnowie polimerowej z większym udziałem objętościowym wzmocnienia wytworzonych metodą infuzji, polepszają parametry modelu (τ_{lok} , σ_{max}) kosztem mniejszej długości krytycznej.

Tab. 6. Zamodelowane parametry modelu z uwzględnieniem udziału objętościowego komponentów w wytworzonym kompozycie hybrydowym

Udział objętościowy wzmocnienia, %	Pole przekroju F_s, L_{kr}, mm	Naprężenie styczne τ_{lok}, MPa	Naprężenie maksymalne σ_{max}, MPa
60 (Infuzja)	0,492	6,0578	562,37 (560,50)*
60 (worek próżniowy)	0,486	5,9723	550,57 (547,30)*
50 (Infuzja)	0,585	5,3865	544,00 (511,33)*

* wartość eksperymentalna

4. ZASTOSOWANIE TECHNOLOGII WORKA PRÓŻNIOWEGO I INFUZJI

W procesie wytwarzania elementów konstrukcji kompozytowych takich jak płyty podłogowe, łopaty wentylatorów, wirniki, wysokowytrzymałe osłony napędów, otunelowania śmigieł, stosowane są powyższe metody. Szczególnie metoda podciśnieniowego worka próżniowego stosowana jest do produkcji elementów poduszkowców typu PRP-560 w Instytucie Lotnictwa [20]. Opracowane nowe technologie łopat do wentylatorów wykorzystywały podciśnienie jako element zwiększenia powtarzalności i uzyskania lepszego współczynnika wypełnienia włóknem kompozytu szklanego. W nowych konstrukcjach kompozytowych elementów bezzałogowych aparatów latających technologie podciśnienia pozwalają uzyskać minimalizację masy przy utrzymaniu dobrych właściwości wytrzymałościowych. Na rysunku 12 przedstawiony jest kompozytowy kadłub poduszkowca Instytutu Lotnictwa. Do wykonania niektórych wysoko obciążonych elementów konstrukcji zastosowano technologię podciśnieniową.



Rys. 12. Kompozytowy kadłub poduszkowca PRC-600

5. WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonych badań i analiz stwierdzono:

1. wyższą wytrzymałość kompozytu hybrydowego o ok. $2 \div 3\%$, wytworzonego metodą infuzji w porównaniu z kompozytem wytworzonym metodą worka próżniowego (dla ciśnienia włączania żywicy do wnętrza formy $0,9 \text{ atm.}$),
2. zwiększoną wytrzymałość kompozytu hybrydowego (o ok. $6 \div 7\%$) wytworzonego z większym udziałem wzmocnienia w stosunku do próbek bez wzmocnienia,
3. zniszczenie mechaniczne trzywarstwowych kompozytów hybrydowych nastąpiło w wyniku ścięcia granicy międzyfazowej i warstwy żywicy pomiędzy dwoma warstwami węglowymi "biaxial" (o kącie ułożenia włókien $\pm 45^\circ$), w której znajdowała się warstwa z tkaniny szklanej,

4. rozrzut w dużej mierze spowodowany był defektami w strukturze o zasięgu lokalnym lub z przyczyn obejmujących całą objętość bryły rozpatrywanego elementu wytworzonego laminatu, tj. warunkami technologicznymi, lub też, jakością cięcia próbek,
5. zaproponowany model szacuje właściwości kompozytu hybrydowego poprzez określenie długości krytycznej w laminacie, która przy większym udziale objętościowym wzmocnienia zwiększa parametry modelu (τ_{lok} , σ_{max}) kosztem niższych wartości L_{kr} .

BIBLIOGRAFIA

- [1] Królikowski W., 2012, „Polimerowe kompozyty włókniste”. WNT, Warszawa.
- [2] Layeghi M., Karimi M., Nouri-Borujerdi A., Reza Seyf H., 2008, "A Numerical Analysis of Heat Transfer in Resin Transfer Molding Process", *J. of Porous Media*, 11, pp. 48-67.
- [3] Chiu H., Yu B., Chen S.C., Lee L.J., 2000, "Heat transfer during flow and resin reaction through fiber reinforcement, *Chemical Engineering Science*", 55, pp. 3365-3376.
- [4] Henne M., Ermanni P., Deleglise M., Krawczak P., 2004, "Heat transfer of fiber beds in resin transfer molding: an experimental approach", *Composites Science and Technology*, 64, Pergamon, Elsevier Science Ltd., UK.
- [5] Hsiao K.T., Advani S.G., 1999, "Modified effective thermal conductivity due to heat dispersion in fibrous porous media", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 42, pp. 1237-1254.
- [6] Hsiao K., Laudorn H., Advani S.G., 2001, "Experimental investigation of heat dispersion due to impregnation of viscous fluids in heated fibrous porous during composites processing", *ASME J. of Heat Transfer*, 123, pp. 178-187.
- [7] Choi M.A., Lee M.H., Chang J., Lee S.J., 1998, "Permeability modeling of fibrous media in composite processing", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 79, pp. 585-598.
- [8] Kim S.K., Opperer J.G., Daniel I.M., 2002, "Determination of permeability of fibrous medium considering inertial effects", *Int. Comm. Heat Mass Transfe*, 29, pp. 879-885.
- [9] Starov V.M., Zhdanov V.G., 2001, "Effective viscosity and permeability of porous media", *Colloids and Surfaces*, pp. 363-375.
- [10] Diez-Gutierrez S., Rodriguez-Perez M.A., De Saja J.A., Velasco J.I., 1999, "Dynamic mechanical analysis of injection-moulded discs of polypropylene and untreated and silane-treated talc-filled composites", *Polymer* 40, pp. 5345-5353.
- [11] Mutder J., Gaymans R.J., 1998, "Fracture of polypropylene: The effect of crystallinity", *Polymer*, 39, pp. 5477-5481.
- [12] Sikora R., 1991, „Tworzywa wielkocząsteczkowe. Rodzaje, właściwości i struktura”, Wyd. PL, Lublin.
- [13] <http://www.havel.composites.pl/index.php?menu=produkt&id=105>.
- [14] katalog firmy HAVEL.
- [15] <http://forumwodne.pl/hypeboat-polski-producent-szybkich-rowerow-wodnych-t27.html>
- [16] Chatys R., 2008, "Modeling of Mechanical Properties with the Increasing Demands in The Range of Qualities and Repeatability of Polymers Composites Elements", *Monograph "Polymers and Constructional Composites"*, 185, pp. 36-47.
- [17] Chatys R., 2009, "Mechanical Properties of Polymer Composites Produced by Resin Injection Molding for Applications Under Increased Demands for Quality and Repeatability", *Journal Ultrasound*, 64(2), pp. 35-38.
- [18] Chatys R., 2013, „Analiza statystyczna parametrów wytrzymałościowych w procesie zniszczenia kompozytów włóknistych z wykorzystaniem procesu Markowa”. „Monografie, studia, rozprawy”, M52, wyd. PŚk.
- [19] Blumbergs I., Chatys R., Kleinhofs M., 2011, "Experimental Research Date Series Quality Analysis", XIX International Scientific-Technical Conference on “trans & MOTAUTO’11”,

Proceeding Journal Vol.1, "Vehicle Engines. Application of Types of Fuels. Efficiency", pp. 96-98.

- [20] Pałowski Z. T., Szafran K., 2013, "The Ecological Hovercraft – Dream or Reality!" Marine Transport & Shipping; Marine navigation and safety of sea transportation. ISBN:978-1-138-00105-3; pp. 44-48.

IMPACT OF TECHNOLOGICAL ASPECTS OF PRODUCTION OF FIBROUS COMPOSITE MATERIALS WITH INJECTING RESIN UNDER PRESSURE INSIDE THE FORMS

Abstract

The paper discusses and attempts to analyze the impact of technological methods of forming fibrous composite materials (FCM) epoxy matrix (LH 289) on the quality of the obtained laminates with different participation and the type of reinforcement. Presented aspects and the differences in production methods FCM injection of resin under pressure into the mold cavity, for example, the infusion methods and vacuum bag. In this paper for estimating parameters (τ_{lok} , σ_{max}) defining the strength FCM model was used the weakest micro volume is based on ineffective (critical – L_{kr}) the length of the gain. The model assumes that the three layer composite consists of components having an individual physico-mechanical properties. It was found that the destruction of hybrid composites made by decapitation and the boundary interface of the resin layer between two layers of carbon "biaxial" (with an angle of $\pm 45^\circ$ fiber orientation), which was a layer of glass fabric. The model calculation provides the unified position, a tool for coordinated description of strength. It is shown that the model gives relatively good results.

Keywords: strength, composite hybrid, model of the process of destruction, technology, high strength construction