

Krystyna Imielińska<sup>1</sup>

Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, ul. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk

Rafał Wojtyra<sup>2</sup>

Politechnika Gdańska, Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa, ul. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk

## WPŁYW ABSORPCJI WODY NA WŁAŚCIWOŚCI LAMINATÓW WINYLOESTROWYCH WZMOCNIONYCH WŁÓKNEM ARAMIDOWYM I SZKLANYM

Zbadano zachowanie dwóch laminatów o osnowie winyloestrowej, wzmocnionych włóknami aramidowymi i szklanymi w stanie suchym i po zanurzeniu w wodzie. Materiały poddawane są badaniom ze względu na potencjalne zastosowanie w okrętownictwie i brak podobnych danych w literaturze. Wzmocnienie laminatów miało postać tkaniny hybrydowej aramido-szklanej (1) lub składało się z na przemian ułożonych jednorodnych warstw włókien aramidowych (Tworon) i szklanych (2). Zbadano chłonność wody do nasycenia (70°C), określając współczynniki dyfuzji wody, zgodnie z II prawem Ficka. Określono właściwości laminatów w próbie zginania i ścinania międzywarstwowego. Laminaty (1) chłoną wodę znacznie wolniej niż laminaty (2) i nasycają się przy wyższej zawartości wody pomimo nieznacznie tylko wyższej zawartości higroskopijnych włókien aramidowych. Wytrzymałość na zginanie i ścinanie międzywarstwowo, jak i moduł sprężystości przy zginaniu są wyższe dla laminatu wzmocnionego tkaniną hybrydową. Dotyczy to zarówno stanu suchego, jak i nasycenia wodą. Woda zaabsorbowana przez laminat wywołuje widoczną degradację mikrostruktury, objawiającą się licznymi pęknięciami na granicy włókien i żywicy. Defekty te nie wywołują obniżenia wytrzymałości na ścinanie międzywarstwowo, ale znacząco zmniejszają odkształcenie próbki przy zginaniu.

Słowa kluczowe: kompozyty polimerowe, laminaty hybrydowe

## WATER ABSORPTION BEHAVIOUR OF VINYL ESTER LAMINATES REINFORCED WITH ARAMID AND GLASS FIBRES

Two vinyl ester laminates reinforced with aramid and glass fibres have been tested in dry condition and after immersion in water. Materials were tested for their potential use in marine applications. The reinforcement was in the form of woven hybrid aramid-glass fabric (1) or woven aramid fibre layers interleaved with woven glass fibre layers (2). Accelerated water immersion tests (70°C) have been conducted followed by flexure and interlaminar shear strength (ILSS) tests. Water absorption curves have been plotted (Fig. 1) and diffusion coefficients have been calculated. Despite only slightly higher fraction of hygroscopic aramid fibres moisture absorption saturation values as well as diffusion coefficients were found higher for composite (2). Flexural strength and modulus and interlaminar shear strength have also been found superior for hybrid fabric-reinforced laminates (Figs. 2, 3). This refers both to the dry and wet condition. It has been demonstrated that water causes serious damage in the microstructure of the laminates consisting mainly of fibre/matrix debonding (Figs. 4, 5). These defects have little effect on the flexural strength properties of the laminates. ILSS and flexural strength of the laminates in the dry and wet condition were very similar. However, the reduction in the elastic modulus and dramatic decrease in the deflection of the samples have been observed following water saturation.

Key words: polymer composites, hybrid laminates

## WPROWADZENIE

Włókniste kompozyty polimerowe stosowane w budownictwie okrętowym narażone są w szczególności na oddziaływanie wilgotnego środowiska i wody morskiej. Pełne wykorzystanie potencjału tych materiałów wymaga więc określenia wpływu zaabsorbowanej wody na degradację struktury wewnętrznej materiału, a w konsekwencji na jego zachowanie pod obciążeniem. Badania wpływu absorpcji wody na właściwości laminatów szklanych prowadzone były od wielu lat, istnieje więc duża baza danych zarówno odnośnie do wpływu

różnych gatunków żywic, jak też gatunków i postaci zbrojenia na obniżenie właściwości wytrzymałościowych spowodowane absorpcją wody [1-7]. Również zachowanie kompozytów węglowych [8, 9] zostało dość dokładnie zbadane w warunkach wilgotnego środowiska. Niewiele jest natomiast prac na temat obniżenia właściwości kompozytów aramidowych, coraz częściej stosowanych w konstrukcjach morskich ze względu na wysoką wytrzymałość i sztywność w połączeniu ze znaczą-

<sup>1</sup> dr inż., <sup>2</sup> mgr inż.

cym oporem pęknięcia i odpornością na przebicie, jednak szczególnie narażonych na wpływ środowiska wodnego ze względu na higroskopijność włókien aramidowych [10]. Badania kompozytów aramidowych [11] wykazały, że istotny wpływ na spadek własności mechanicznych kompozytów aramidowych poddanych oddziaływaniu środowiska wodnego ma też uplastycznienie osnowy spowodowane przez absorpcję wody oraz zmiany w strukturze warstwy granicznej. Stwierdzono [12] 35% spadek wytrzymałości na zginanie dla kompozytu Kevlar 49/żywica epoksydowa przy 5% zaabsorbowanej wody. Korzystne wydaje się zatem łączenie włókien aramidowych ze szklanymi. Poza zmniejszeniem chłonności wody, a w konsekwencji poprawy niskiej wytrzymałości na ściskanie laminatów aramidowych włókna szklane obniżają cenę laminatu. Na rynku dostępne są gotowe tkaniny hybrydowe aramidowo-szklane, jednak nie ma danych literatury na temat charakterystyki laminatów zbrojonych takim zbrojeniem.

Zbrojenie hybrydowe może być jednak źródłem problemów wynikających ze znaczących naprężeń wewnętrznych spowodowanych nierównomierną absorpcją wody przez zróżnicowane włókna: aramidowe i szklane, a w konsekwencji przez cały kompozyt. Z kolei w kompozycie o zbrojeniu jednorodnym w warstwach, lecz zróżnicowanym na grubości naprężenia wewnętrzne mogą powstawać na granicach warstw. Celem niniejszej pracy było porównanie zachowania laminatów aramidowo-szklanych o osnowie żywicy winyloestrowej dla dwóch postaci zbrojenia: z tkaniny hybrydowej w każdej warstwie lub składającego się z na przemian ułożonych jednorodnych warstw włókien aramidowych i szklanych w każdej warstwie pod kątem procesu chłonności wody i wywołanym przez nią obniżeniem wybranych własności mechanicznych.

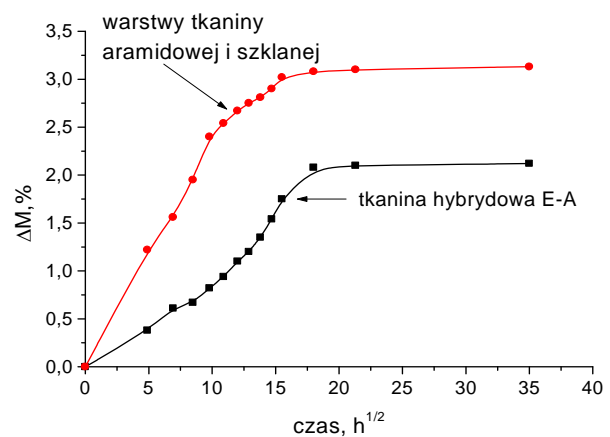
## MATERIAŁY

Przedmiotem badań były dwa rodzaje laminatów o osnowie żywicy winyloestrowej (produkcji Zakładów Organika - Sarzyna) wzmocnionych alternatywnie hybrydową tkaniną aramidowo-szklaną REA 390S (A-E) zrównoważoną, o splocie rządkowym lub tkaninami jednorodnymi: aramidową RA320H5 (A) i szklaną STR 66-110 (E), o splocie rządkowym, ułożonymi na przemian na grubości laminatu  $[A/E/A/E/A]_s$  (grubość laminatów 4÷5 mm). Tkaniny: hybrydowa i aramidowa (dostarczone przez SP Systems) wykonane były z włókien aramidowych Tworon. Producentem tkaniny szklanej są Zakłady w Krośnie. Wzmocnienie (50x50 mm) ułożone w 10 warstw nasycano żywicą metodą worka próżniowego, utwardzono w próżni przez 24 godziny, następnie dotwardzono przez 8 godzin w 60°C. Udział objętościowy włókien wynosił około  $V_f = 50\%$ .

## PRZEBIEG I WYNIKI BADAŃ

### Próby nasiąkliwości laminatów

Próbki o wymiarach 15x25 mm umieszczono w naczyniu z termostatem wypełnionym wodą destylowaną o temperaturze 70°C. Próbki ważono w odstępie 24 godzin na wadze analitycznej z dokładnością do 0,1 mg. Przed ważeniem próbki były dokładnie osuszone. Krzywe chłonności wody przedstawiono jako zależność:  $\Delta M = f(\sqrt{t})$ , gdzie  $\Delta M$  [%] jest procentowym przyrostem masy próbek odniesionym do masy początkowej. Każdy punkt na wykresie jest średnią z 5 punktów pomiarowych. Na rysunku 1 przedstawiono porównanie przebiegu chłonności wody przez badane laminaty. Na podstawie wykresów absorpcji wody obliczono współczynniki dyfuzji dla kompozytów.



Rys. 1. Krzywe chłonności wody badanych laminatów

Fig. 1. Water absorption curves for two laminates

### Określanie współczynników dyfuzji

Wykazano [3], że dyfuzja wody w wielu typach laminatów polimerowych zachodzi zgodnie z II prawem dyfuzji Ficka. Zatem w stałej temperaturze i wilgotności proces dyfuzji w płycie o nieskończonej długości przeciwnych powierzchniach, zachodzący w kierunku grubości laminatu, określa współczynnik dyfuzji  $D$ , wyrażony za pomocą wzoru

$$D = \pi [h / 4M_m]^2 [(M_1 - M_2) / (t_1^{1/2} - t_2^{1/2})]^2 \quad (1)$$

gdzie:  $M_1$  i  $M_2$  - procentowa zawartość wody zaabsorbowanej w czasie  $t_1$  i  $t_2$ ,  $M_m$  - zawartość wody odpowiadająca stanowi nasycenia,  $h$  - grubość laminatu.

Kąt pochylenia wykresu  $\Delta M = f(\sqrt{t})$  jest miarą współczynnika dyfuzji.

Biorąc pod uwagę skończone rozmiary próbek, na których były mierzone współczynniki dyfuzji, idealny współczynnik dyfuzji  $D_\infty$ , niezależny od wielkości próbki, określa zależność [13]

$$D_{\infty} = D[1 + (h/w) + (h/l)]^{-2} \quad (2)$$

gdzie:  $w$ ,  $l$ ,  $h$  - odpowiednio: szerokość, długość i grubość próbki.

Zgodnie z zależnością (1) obliczono współczynniki dyfuzji laminatów aramidowo-szklanych (1) w osnowie żywicy winyloestrowej  $D_1 = 7 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^2/\text{s}$ , (2) dla laminatu aramidowego przekładanego warstwami tkaniny szklanej  $D_2 = 12,5 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^2/\text{s}$ .

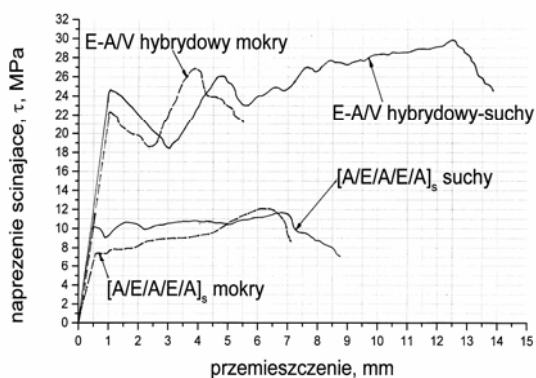
### Badania wytrzymałości na zginanie i ścinanie międzywarstwowe

Jako miarę degradacji, służącą do porównania zachowania badanych laminatów, przyjęto wytrzymałość na zginanie i wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe (WSMW) przeprowadzane w próbie trzypunktowego zginania. Próby trzypunktowego zginania przeprowadzono na próbkach 15x200 przy odległości podpór  $s = 180 \text{ mm}$ .

Badania WSMW mierzono na próbkach o wymiarach 25x15 mm zginanych trzypunktowo przy stosunku rozstawu podpór  $s$  do grubości próbki  $s/h = 4$  (zgodnie z normą ASTM-D2344-76). Na rysunku 2 pokazano przebieg wykresów naprężenie-przemieszczenie dla próbek w stanie suchym i mokrym. Naprężenie styczne określające wartość WSMW obliczono wg wzoru

$$\tau = 0,75P_b/bh \quad (3)$$

gdzie  $P_b$  jest siłą, przy której dochodzi do pęknięcia próbki.



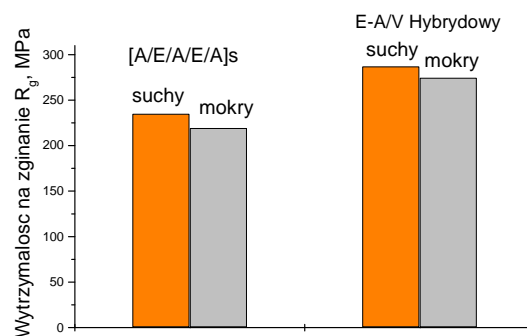
Rys. 2. Wykresy naprężenie-przemieszczenie w próbie ścinania międzywarstwowego dla laminatów winyloestrowych w stanie suchym i nasyconych wodą: 1 - laminat z warstw tkaniny hybrydowej aramidowo-szklanej A-E, 2 - laminat z warstw jednorodnych tkanin aramidowej A i szklanej E (A/E/A/E/A)<sub>s</sub>

Fig. 2. Stress-deflection curves in short beam interlaminar shear test for vinyl ester laminates in dry and wet condition: 1 - hybrid glass E-aramid A (E-A) fibre fabric-reinforced laminate, 2 - laminate reinforced with woven glass fibre interleaved with woven aramid fabric layers (A/E/A/E/A)<sub>s</sub>

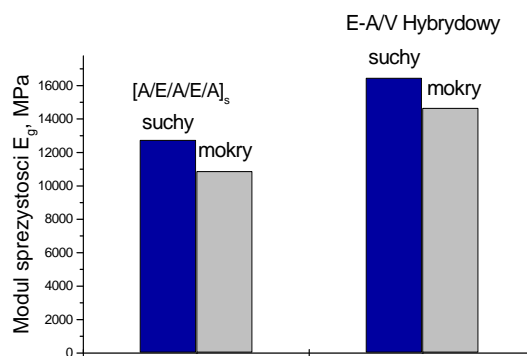
Wyniki badań na zginanie próbek laminatów o wymiarach 15x150 przedstawiono na rysunku 3a, b (śred-

nia z pięciu wyników). Widać znaczącą przewagę laminatu (1) z tkaniny hybrydowej pod względem wytrzymałości na zginanie, ścinanie międzywarstwowe i modułu sprężystości zarówno w stanie suchym, jak i nasyconym wodą.

a)



b)



Rys. 3. Wytrzymałość na zginanie (a) i moduł sprężystości (b) przy zginaniu laminatów w stanie suchym i nasyconym wodą: laminat z warstw tkaniny hybrydowej aramidowo-szklanej A-E (1) oraz laminat z warstw jednorodnych tkanin aramidowej A i szklanej E (A/E/A/E/A)<sub>s</sub> (2)

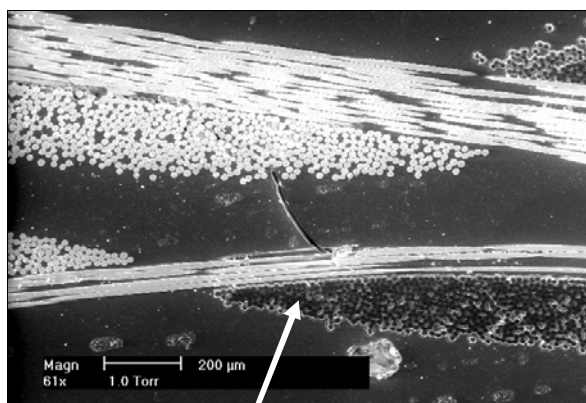
Fig. 3. Flexural strength (a) and modulus (b) for laminates in dry and wet condition: (1) hybrid glass E-aramid A (E-A) fibre fabric-reinforced laminate, (2) laminate reinforced with woven glass fibre interleaved with woven aramid fabric layers (A/E/A/E/A)<sub>s</sub>

### Badania mikrostrukturalne

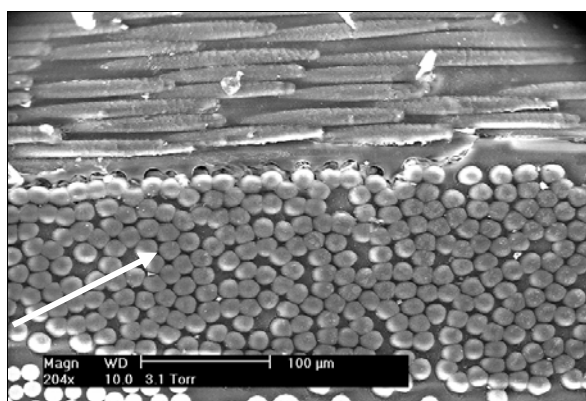
Z próbek laminatów w stanie suchym i mokrym przygotowano zglądy przez szlifowanie na papierach ściernych i polerowanie tlenkiem aluminium ( $3 \mu\text{m}$ ). Próbki poddano obserwacji na mikroskopie optycznym i elektronowym skaningowym. W części próbek przed badaniem na WSMW (w stanie suchym i mokrym) zeszlifowano i wypolerowano powierzchnie boczne próbek, co umożliwiło obserwacje (*in situ*, za pomocą układu optycznego) przebiegu zniszczeń podczas zginania próbki. Dla obciążenia odpowiadającego charakterystycznym punktom krzywej siła-przemieszczenie badanie przerywano i przeprowadzano obserwacje rodzaju zniszczeń za pomocą SEM. Na rysunkach 4 i 5 pokaza-

no przykładowe mikrostruktury otrzymane dla laminatu z tkaniny hybrydowej: E-A oraz kompozytu z warstwami zbrojenia aramidowymi i szklanymi w stanie suchym i mokrym, przedstawiające pierwsze zniszczenia obserwowane w badanych próbkach przy pierwszym załamaniu na wykresie P- $\delta$  w próbie na WSMW.

a)



b)



Rys. 4. Mikrostruktury laminatów w stanie suchym w pierwszym stadium odkształcenia w próbie ścinania międzywarstwowego: a) laminat z warstw tkaniny hybrydowej aramidowo-szklanej A-E (1) - pęknięcie osnowy, b) laminat z warstw jednorodnych tkanin aramidowej A i szklanej E (A/E/A/E/A)<sub>s</sub> (2) - „odspojenie” włókien aramidowych na granicy warstw

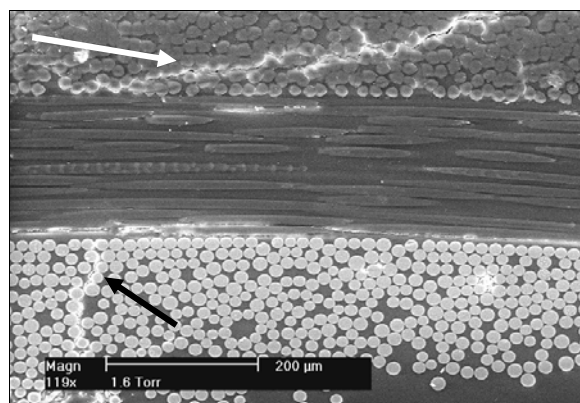
Fig. 4. SEM microphotographs of laminates in dry condition in the first stage of deformation in short beam interlaminar shear test: a) hybrid glass E-aramid A (E-A) fibre fabric-reinforced laminate, b) laminate reinforced with woven glass fibre interleaved with woven aramid fabric layers (A/E/A/E/A)<sub>s</sub>

## Dyskusja

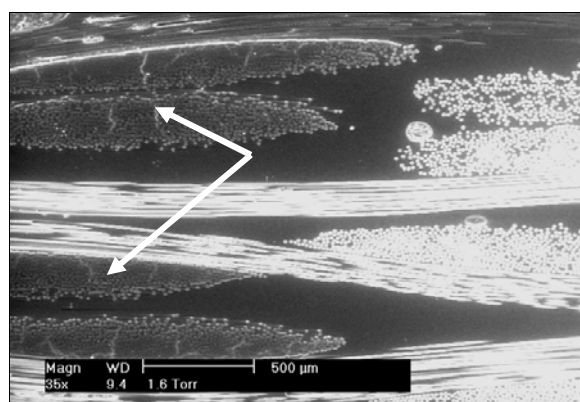
Z danych literaturowych wynika, że maksymalna chłonność wody laminatów epoksydowych zbrojonych ciągłymi włóknami aramidowymi zanurzonych w wodzie może wynosić 4÷7% (zależnie od rodzaju żywicy epoksydowej i temperatury) [11, 12]. Natomiast producent włókien [13] podaje 6% jako wartość maksymalnej chłonności wody tych laminatów w temperaturze pokojowej. Z kolei dla laminatów szklanych w osnowie żywicy winyloestrowej zanurzonych w wodzie chłonność wody podawana w literaturze (w temperaturze pokojo-

wej) nie przekracza 1% [7]. Tak więc wartości maksymalnej chłonności wody uzyskane w niniejszej pracy: 2,1 i 3,1% wydają się być uzasadnione. Widać też, że wprowadzenie do laminatu aramidowego włókien szklanych obniża chłonność wody kompozytu w porównaniu z kompozytem wzmocnionym tylko włóknami aramidowymi.

a)



b)



Rys. 5. Mikrofotografie SEM nieobciążonych laminatów nasyconych wodą: a) laminat z warstw tkaniny hybrydowej aramidowo-szklanej A-E (1) - pęknięcia w pękach włókien aramidowych oraz szklanych, b) laminat z warstw jednorodnych tkanin aramidowej A i szklanej E (A/E/A/E/A)<sub>s</sub> (2) - pęknięcia w pękach włókien aramidowych

Fig. 5. SEM microphotographs of internal damage in laminates in wet, saturated condition: a) (1) hybrid glass E-aramid A (E-A) fibre fabric-reinforced laminate - interfacial cracks in the bundles of aramid (dark) as well as glass (bright) fibres, b) (2) laminate reinforced with woven glass fibre interleaved with woven aramid fabric layers (A/E/A/E/A)<sub>s</sub> - interfacial cracks in aramid fibre layers (dark)

Współczynniki dyfuzji wody w czystej żywicy epoksydowej [11] i w laminatach Kevlarowo-epoksydowych są rzędu odpowiednio:  $3 \cdot 10^{-7}$  i  $20 \cdot 10^{-7}$  mm<sup>2</sup>s<sup>-1</sup> (70°C/woda destylowana). Z kolei dla próbek z żywicy winyloestrowej zanurzonej w wodzie morskiej [5] (30°C) [13] współczynnik dyfuzji jest rzędu  $25 \div 30 \cdot 10^{-7}$  mm<sup>2</sup>/s. A dla laminatu z tej samej żywicy wzmocnionego tkaniną i matą szklaną współczynnik dyfuzji wody w tych samych warunkach wynosi  $D = 4,3 \cdot 10^{-7}$

$\text{mm}^2\text{s}^{-1}$ .

Zatem wartości uzyskane w niniejszej pracy:  $D_1 = 12,5 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^2\text{s}^{-1}$  oraz  $7 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^2\text{s}^{-1}$  wskazują na umiarkowaną szybkość dyfuzji wody, niższą niż w przypadku kompozytów aramidowo-epoksydowych i wyższą niż kompozytów szklano-winyloestrowych w wodzie morskiej. W przypadku konstrukcji zanurzonych stale w wodzie dane takie mają jednak mniejsze znaczenie niż w przypadku laminatów na konstrukcje lotnicze, gdzie powtarzające się cykle absorpcji i desorpcji wody mogą mieć wpływ na przebieg eksploatacji materiału.

W pracy [12] jako przyczynę spadku właściwości mechanicznych w wyniku zaabsorbowania wody podaje się uplastycznienie osnowy, ułatwiające wyboczenie włókien aramidowych w części ściskanej zginanej próbki kompozytu aramidowego. Badania laminatów zbrojonych włóknami Tworon-HM w osnowie epoksydowej [14] wykazały w przybliżeniu 50% spadek zarówno w WSMW, jak i modułu sprężystości otrzymanego w tej próbie przy 5% zawartości wody, podczas gdy redukcja wytrzymałości na rozciąganie kompozytów Kevlar 49 /żywica epoksydowa wyniosła 35% [10] oraz 14% obniżenie modułu sprężystości. W badaniach przeprowadzonych w niniejszej pracy nie zaobserwowano tak znacznego obniżenia własności mechanicznych kompozytów. Prawdopodobnie wprowadzenie do laminatu aramidowego włókien szklanych skutecznie zmniejszyło wpływ uplastycznienia żywicy spowodowanego zaabsorbowaną wodą, na skłonność do wyboczeń ściskanych włókien aramidowych, co wpłynęło korzystnie na wytrzymałość na zginanie badanych laminatów w stanie mokrym. Ostatecznie różnica w wytrzymałości na zginanie laminatów hybrydowych w stanie suchym i „mokrym” wynosiła zaledwie 4÷7% (w granicach rozrzutu wyników).

Porównanie laminatu (1) i (2) w stanie suchym i „mokrym” pod względem wytrzymałości na zginanie i WSMW wyraźnie wskazuje na wyższość laminatu z tkaniny hybrydowej (1). Przyczyny znacznych różnic we własnościach laminatów próbowano określić za pomocą badań mikrostrukturalnych. Badania mikroskopowe prowadzone na suchych próbkach wskazują na odmienny mechanizm rozwoju zniszczeń w próbie ścinania międzywarstwowego. Po pierwszym spadku siły na wykresie naprężeń ścinających w próbce zaobserwowano pierwsze objawy pęknięcia materiału (rys. 3a). W próbce laminatu (1) były to głównie wyraźne pęknięcia poprzeczne osnowy, co świadczy o dobrym powiązaniu zbrojenia i osnowy. W laminatach A/E/A/E/A nie wykryto pęknięć osnowy, ale znaczące „odspojenia” (odklejenie) na granicy warstw włókien aramidowych i szklanych, tak więc najsłabszym ogniwem laminatu wydaje się granica warstw. Na rysunku 3b widać „odspojenia” (odklejenie) włókien szklanych na granicy z warstwą włókien aramidowych, powstałe pod wpływem naprężeń (strzałka na rys. 2). Niskie właściwości

mechaniczne laminatów można wytłumaczyć złym łączeniem żywicy winyloestrowej z daną tkaniną aramidową, przy braku specjalnej powłoki proadhezyjnej. Na rysunku 4 widać z kolei zniszczenia zaobserwowane w badanych laminatach na skutek samej tylko absorpcji wody przy braku zewnętrznego obciążenia. Widać rozległe „odspojenia” rozciągające się w obszarach pęków włókien aramidowych, jak i szklanych w laminacie (1) i w samych tylko pękach włókien aramidowych (w laminacie 2). Zniszczenia te można wytłumaczyć różnicą w absorpcji wody (i współczynnika rozszerzalności objętościowej), żywicy i włókna, co jest przyczyną powstawania naprężeń w warstwie granicznej na granicy włókien i osnowy. W laminacie z tkaniny hybrydowej (1) silne naprężenia związane ze zmianami objętości włókien aramidowych przenoszą się na pęki włókien szklanych, dlatego również tam obserwuje się pęknięcia. Z kolei w laminacie (2) silne naprężenia w warstwie włókien aramidowych ulegają rozładowaniu przez powstanie rozwarstwień na granicy warstwy aramidowej i szklanej i dlatego w warstwie włókien szklanych nie obserwuje się znaczących pęknięć. W obu przypadkach tak wyraźne defekty istniejące w materiale nasyconym wodą znacząco wpływają na przyspieszenie procesów zniszczenia pod wpływem obciążeń, co objawia się zmniejszeniem odkształcenia próbki w próbie zginania i WSMW.

Badania przeprowadzono w wodzie destylowanej w warunkach przyspieszonej absorpcji wody w podwyższonej temperaturze. Należy się spodziewać, i będzie to przedmiotem dalszych prac, że w środowisku naturalnym dla konstrukcji morskich, tzn. wody morskiej w temperaturze otoczenia, degradacja struktury i właściwości materiału będzie mniejsza niż zaobserwowana w niniejszej pracy (wynika to z hamowania absorpcji wody przez wydzielenia NaCl). W pracy celowo zastosowano „ostrzejsze” warunki środowiskowe, aby uchwycić ogólne tendencje w zachowaniu badanych laminatów. Biorąc pod uwagę wyniki uzyskane w niniejszej pracy, jak też wyniki badań udarowych i innych przeprowadzonych na laminatach z tym samym rodzajem zbrojenia, ale z osnową epoksydową, które zostaną przedstawione w oddzielnej publikacji [15], wydaje się jednak, że badane kompozyty, a w szczególności laminat (2) nie posiadają zadowalających własności w stanie suchym i mokrym i dalsze badania będą celowe dopiero po modyfikacji parametrów wytwarzania, gwarantujących lepsze nasycenie włókien przez żywicę lub zastosowaniu dodatkowej, proadhezyjnej obróbki tkanin aramidowej i aramidowo--szklanej.

## WNIOSKI

1. Chłonność wody laminatów hybrydowych aramidowo-szklanych wynosi 2÷3% (zależnie od rozłożenia zbrojenia) i jest wyższa niż laminatów szklanych.
2. Laminaty z tkaniny hybrydowej (1) chłoną wodę w mniejszym stopniu niż kompozyty zbudowane z jednorodnych warstw aramidowych i szklanych o rozłożeniu  $[A/E/A/E/A]_s$  (2).
3. Współczynniki dyfuzji obliczone dla obu laminatów wskazują, że w laminatach z tkaniny hybrydowej (1) absorpcja wody zachodzi wolniej niż w przypadku zbrojenia warstwami włókien jednorodnych  $[A/E/A/E/A]_s$  (2).
4. Laminat (1) charakteryzuje się znacznie lepszymi właściwościami przy zginaniu i w próbie ścinania międzywarstwowego zarówno w stanie suchym, jak i nasyconym wodą.
5. Różnice w wytrzymałości na zginanie i ścinanie międzywarstwowe w stanie suchym i mokrym są dla poszczególnych laminatów nieznaczne, natomiast moduł sprężystości przy zginaniu ulega obniżeniu o ok. 10÷15% po nasyceniu laminatu wodą.
6. Spośród badanych właściwości najistotniejszy był spadek wydłużenia w stanie mokrym zaobserwowany dla obu laminatów, spowodowany licznymi, rozległymi pęknięciami na granicy włókien i osnowy.
7. Ze względu na uzyskanie niskich własności mechanicznych laminatów aramidowo-szklanych o osnowie żywicy winyloestrowej konieczna jest modyfikacja parametrów nasycania włókien żywicą lub zastosowanie dodatkowej, proadhezyjnej obróbki tkanin aramidowej i aramidowo-szklanej.

## LITERATURA

- [1] Gellert E.P., Turley D.M., Seawater immersion ageing of glass-fibre reinforced polymer laminates for marine applications, *Composites: Part A* 1999, 30, 1259-1265.
- [2] Kozłowski J., Wilczopolski M., Wituszyński K., Konstrukcje okrętowe z kompozytów polimerowych, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1982.
- [3] Springer G.S., Environmental Effects, (w:) Environmental effects on composite materials, ed. G.S. Springer, Technomic, Basel, 1988, 1, 1-32.
- [4] Gutierrez J., Lelay F., Hoarau P.A., Study of the aging of glass fibre-resin resin composites in a marine environment, (w:) P. Davies, L. Lemoine, (eds), *Nautical construction with composite materials*, Ifremer - Centre de Best, Paris 1992, 338.
- [5] Berger M., Królikowski W., Miziger G., Poliestry wzmocnione w budownictwie okrętowym, Wyd. Morskie, Gdynia 1961.
- [6] Lundgren J-E., Gudmundson P., Moisture absorption in glass-fibre/epoxy laminates with transverse matrix cracks, *Composites Science and Technology* 1999, 59, 1983-1991.
- [7] Springer G.S., Saunders B.A., Tung R.W., Environmental effects on glass fibre reinforced polyester and vinyl ester composites, *Environmental effects on composite materials*, ed. G.S. Springer, Technomic, Basel 1988, 2, 10.
- [8] Springer G.S., Moisture and temperature induced degradation of graphite epoxy composites, (w:) Environmental effects on composite materials, ed. G.S. Springer, Technomic, Basel 1988, 6-19.
- [9] Selzer R., Friedrich K., Mechanical properties and failure behaviour of carbon fibre-reinforced polymer composites under the influence of moisture, *Composites Part A* 1997, 28A, 595-604.
- [10] Akay M., Kong Ah Mun, Stanley A., Influence of moisture on the thermal and mechanical properties of autoclaved and oven-cured Kevlar-49/epoxy laminates, *Composites Science and Technology* 1997, 57, 565-571.
- [11] Gopalan R., Rao R.M., Murthy M.V.V., Dattaguru B., Diffusion studies on advanced fibre/epoxy composites, (w:) Environmental effects on composite materials, ed. G.S. Springer, Technomic, Basel 1988, 7, 96-106.
- [12] Allred R.E., The effect of temperature and moisture content on the flexural response of Kevlar/epoxy laminates: 1. [0/90] filament orientation, *Journal of Composite Materials* 1981, 15, 100-114.
- [13] Clark G., Saunders D.S., van Blaricum T.J., Richmond M., Moisture absorption in graphite/epoxy laminates, *Composites Science and Technology* 1990, 39, 355-375.
- [14] Verpoest I., Springer G.S., Effects of moisture on the compressive and interlaminar shear strengths of aramid-epoxy composites, *Journal of Reinforced Plastics Composites* 1988, 7, 23-32.
- [15] Imielińska K., Guillaumat L., Wojtyra R., Touzet M., Lataillade J-L., The effect of water immersion aging and low velocity impact on the mechanical behaviour of hybrid aramid-glass fibre/epoxy composites, *Proc. Conf. Environmental Degradation of Engineering Materials (EDEM 2003)*, Bordeaux 2003 (in press).

Recenzent  
Józef Koszkuł