

Mateusz Koziół<sup>1</sup>, Józef Śleziona<sup>2</sup>

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

## WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE ZSZYWANYCH LAMINATÓW ŻYWICA POLIESTROWA-WŁÓKNO SZKLANE

Przedstawiono wyniki badań właściwości mechanicznych próbek laminatów żywica poliestrowa-włókno szklane klasyczne oraz o zbrojeniu przeszitym nicią poliaramidową (rys. 1). Przeprowadzono próby: statycznego zginania, statycznego rozciągania, ścinania międzywarstwowego przy rozciąganiu próbek z karbem, udarności Charpy'ego. Stwierdzono, że charakterystyki zależne od właściwości wytrzymałościowych oraz sprężystych laminatu w kierunkach równoległych do ułożenia warstw, takie jak: wytrzymałość i moduły na zginanie, wytrzymałość i moduły na rozciąganie, udarność, są wyraźnie gorsze dla laminatów zszywanych w porównaniu z laminatami klasycznymi (rys. rys. 2, 3 i 8, tab. 1). Wiąże się to z zaburzeniami i degradacją struktury zbrojenia przez nici zszywające. Charakterystyki zależne od właściwości wytrzymałościowych oraz sprężystych laminatu w kierunku translaminarnym, takie jak: wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowo, wskaźnik lepkości, są lepsze dla laminatów zszywanych, porównując z laminatami klasycznymi (rys. 9, tab. 2). Polepszenie tychże właściwości jest spowodowane przeniesieniem przez nici zszywające obciążeń działających w kierunku translaminarnym na warstwy zbrojące laminatu. Stwierdzono, że laminaty zszywane prezentują nieco gorszy poziom badanych właściwości sprężystych i wytrzymałościowych przy obciążaniu w kierunku prostopadłym do ułożenia linii szwów niż w kierunku równoległym do tychże linii (rys. rys. 2, 3 i 8, tabele 1, 2). Wiąże się to najprawdopodobniej z deformacją struktury zbrojenia laminatu w kierunku translaminarnym, spowodowaną naciągiem nici zszywającej.

Słowa kluczowe: laminaty zszywane, właściwości mechaniczne

## MECHANICAL PROPERTIES OF STITCHED POLYESTER RESIN-GLASS FIBER LAMINATES

Paper presents the results of mechanical properties investigations of the polyester resin-glass fiber laminates, both classic and of reinforcement stitched with polyaramide thread. Static bending test, static tensile test, interlaminar shear test by notched specimen tensile, Charpy impact resistance test were conducted. Characteristics dependent on in-plane strength and elasticity of laminates: flexural strength and moduli, tensile strength and moduli, impact resistance, were found visibly worse for stitched laminates compared with unstitched (Figs. 2, 3, 8, Table 1). It is from disturbances and degradation of the laminate reinforcement structure by stitching threads. Characteristics dependent on interlaminar strength and elasticity of laminates: interlaminar shear strength, viscosity index, were found better in stitched laminates than those of unstitched (Fig. 9, Table 2). The improvement is caused by stitching threads carrying translaminar loads to the reinforcement of laminate. Stitched laminates were found as having worse level of tested strength and elasticity when loading perpendicularly to the stitch direction than when loading parallel (Figs. 2, 3, 8, Table 1, 2). It is probably connected with deformation of reinforcement structure into translaminar direction, caused by tension of the stitching thread.

Keywords: stitched laminates, mechanical properties

### WSTĘP

Laminaty polimerowo-włókniste posiadają bardzo dobre właściwości wytrzymałościowe przy bardzo niewielkiej masie właściwej, a także dają bardzo interesującą możliwość projektowania struktury (ang. engineered materials). Są więc chętnie wykorzystywane przez konstruktorów, a ich udział w różnych zastosowaniach stale rośnie. Najpoważniejszą wadą tej grupy materiałów jest podatność na delaminację. Pęknięcie delaminacyjne powstaje w strukturze laminatu zazwyczaj po różnego rodzaju lokalnych obciążeniach dynamicznych (uderzenia). Następnie rozprzestrzenia się pod wpływem naprężeń związanych z obciążeniami roboczymi laminatu, prowadząc niejednokrotnie do zniszcze-

nia materiału [1-6]. Kwestia pęknięcia delaminacyjnego ogranicza stosowalność laminatów polimerowo-włóknistych w niektórych aplikacjach, do których świetnie by się nadawały, ale nie są brane pod uwagę ze względu na możliwość występowania obciążeń dynamicznych (części skrzydeł samolotów, niektóre elementy pojazdów samochodowych i sprzętu sportowego). W ramach ograniczenia niebezpieczeństwa powstawania i rozprzestrzeniania się delaminacji w laminatach proponowano dotychczas szereg rozwiązań. Generalnie można wyróżnić metody polegające na polepszaniu właściwości komponentów - głównie poprawianiu odporno-

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

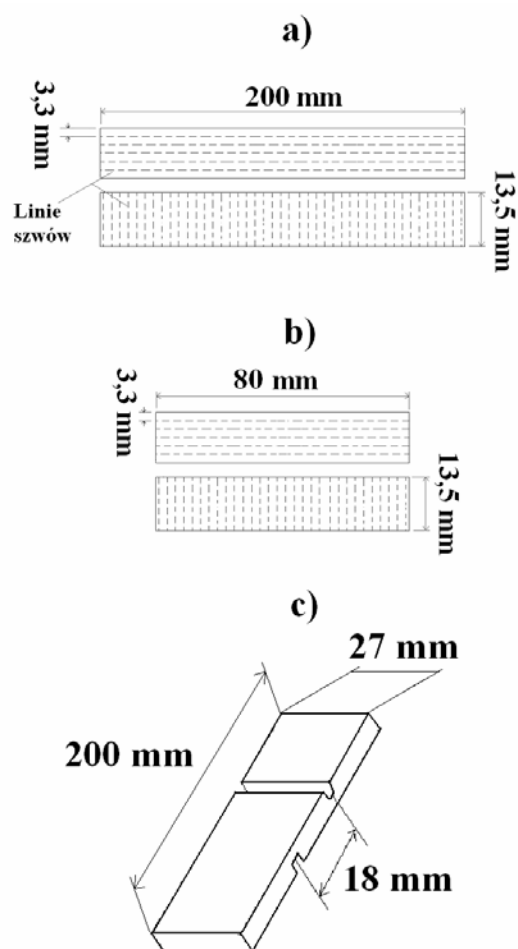
ści na pęknięcie żywic - oraz metody polegające na odpowiednich modyfikacjach architektury zbrojenia - wytwarzanie kompozytów o zbrojeniu trójwymiarowym 3D [7, 8]. Jedną z metod związanych z modyfikacją zbrojenia jest zszywanie warstw zbrojących nicią o dużej sztywności i wytrzymałości. Szwy spajające materiał w kierunku międzywarstwowym zapewniają ochronę przed rozprzestrzenianiem się pęknięć delaminacyjnych poprzez ich mostkowanie [9]. Zszywanie prowadzi się zazwyczaj na suchych, nienasyconych warstwach zbrojenia, ale istnieją również inne możliwości, np. zszywanie warstw prepregów [9] bądź wykorzystywanie zszywania do wzmacniania konstrukcji lub połączeń między laminatami [10, 11]. Zszywanie wiąże się z wprowadzeniem dodatkowych kroków technologicznych do procesu wytwarzania laminatów, co finalnie podraża koszt ich wytworzenia. Jednakże w metodach wykorzystujących preformy zbrojenia (metody ciśnieniowo-próżniowe, ang. RTM - Resin Transfer Moulding, RFI - Resin Film Infusion) krok zszywania może być połączony z krokiem wytwarzania preform, co sprawia, że podwyższenie kosztów jest minimalne. Do tej pory zszywanie preform włóknistych nie jest szeroko stosowane w przemyśle, chociaż istnieje duża ilość publikacji i projektów badawczych dotyczących tego zagadnienia, co świadczy o dużym zainteresowaniu. Przykładowe zastosowania przemysłowe to zszywanie paneli skrzydeł samolotów [12] lub części statków marynarki wojennej, takich jak kutry patrolowe lub małe jednostki podwodne [13, 14]. Większość publikacji na temat zszywanych laminatów dotyczy zbrojenia włóknami węglowymi. Jednakże istnieją też prace dotyczące włókien szklanych, szczególnie związanych z aplikacjami w jednostkach pływających [13-18]. Jako potencjalne obiekty zastosowania dla zszywanych preform szklanych można wymienić wentylatory przemysłowe.

Celem niniejszego artykułu jest zaprezentowanie dotychczasowych wyników badań właściwości mechanicznych laminatów zszywanych, przeprowadzonych w Katedrze Technologii Stopów Metali i Kompozytów Politechniki Śląskiej.

## BADANE MATERIAŁY

Próbnom mechanicznym poddano próbki laminatów 8- oraz 10-warstwowych zbrojonych tkaniną szklaną o splocie płóciennym i gramaturze  $350 \text{ g/m}^2$ , z ułożeniem warstw zbrojących w kierunku  $0/90^\circ$ . Przed nasyceniem zbrojenia osnową przykroje (arkusze) tkaniny zbrojącej zostały zszyte nicią poliaramidową typu Kevlar 50, z gęstością szycia ok.  $11 \text{ szwów/cm}^2$  (długość ściegu  $2,7 \text{ mm}$ , odległość między liniami szwów  $3,3 \text{ mm}$ ). Po obcięciu krawędzi uzyskano zszyte preformy o wymiarach  $250 \times 300 \text{ mm}$ . Nasycanie preform

przeprowadzono metodą kontaktową z użyciem żywicy poliestrowej Polimal 103 utwardzanej układem Metox 50 + naftian kobaltu. Utwardzanie prowadzono w temperaturze pokojowej przez 24 godziny, a następnie płyty laminatu dotwardzono w temperaturze  $75^\circ\text{C}$  przez 6 godzin. Próbki wycięto z płyt mechanicznie: równoległe oraz prostopadłe do kierunku zszywania. Wymiary próbek i schemat przebiegu szwów pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Próbki: a) do prób rozciągania, b) do prób zginania 3-punktowego i prób udarowości Charpy'ego, c) do prób ścinania międzywarstwowego

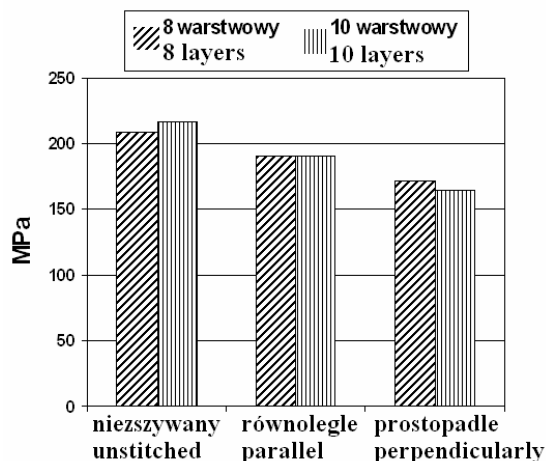
Fig. 1. Specimens: a) for tension tests, b) for 3-point bending tests and for Charpy impact tests, c) for interlaminar shear tests

## BADANIE WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH

### Próby 3-punktowego zginania

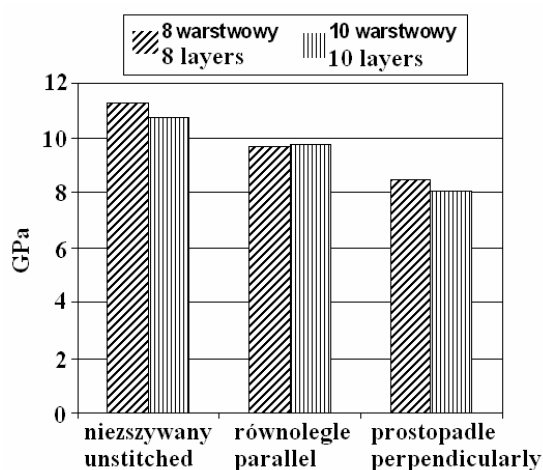
Próby 3-punktowego zginania statycznego prowadzono zgodnie z normą PN-79/C-89027 na maszynie wytrzymałościowej INSTRON 4469, przy prędkości odkształcania  $v = 10 \text{ mm/min}$  i przy rozstawie podpór  $l = 60 \text{ mm}$ . Zginaniu poddano po 7 próbek z każdej grupy. Podczas prób wyznaczono takie parametry, jak: maksymalne naprężenie (rys. 2 - wytrzymałość na zginanie),

moduł sprężystości (rys. 3) [19]. Przykładowe wykresy naprężenie-ugięcie zamieszczono na rysunku 4.



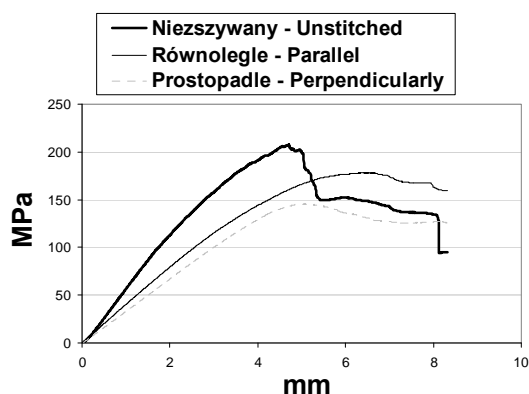
Rys. 2. Wytrzymałość na zginanie laminatów niezszywanych oraz zszywanych, badanych równoległe i prostopadłe do kierunku ułożenia szwów [19]

Fig. 2. Flexural strength of the both unstitched and stitched laminates, tested parallel and perpendicular to stitch direction [19]



Rys. 3. Moduł przy zginaniu laminatów niezszywanych oraz zszywanych, badanych równoległe i prostopadłe do kierunku ułożenia szwów [19]

Fig. 3. Flexural modulus of the both unstitched and stitched laminates, tested parallel and perpendicular to stitch direction [19]

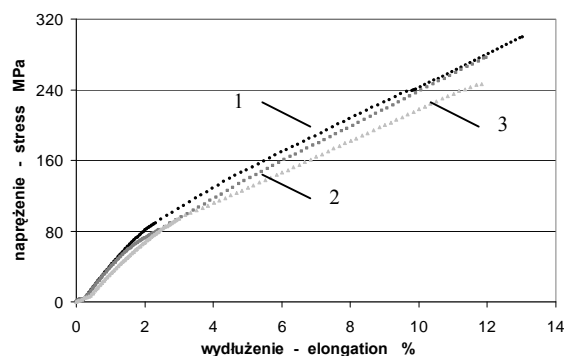


Rys. 4. Przykładowe krzywe zginania dla 10-warstwowych laminatów niezszywanego oraz zszywanych, badanych równoległe i prostopadłe do kierunku szwów

Fig. 4. Typical bending curves of 10 layers laminates both unstitched and stitched, tested parallel and perpendicular to stitch direction

## Próby rozciągania

Próby statycznego rozciągania prowadzono zgodnie z normą PN-79/C-89034, na maszynie wytrzymałościowej Instron 4469. Próbom poddano po 7 próbek z każdej grupy. Prędkość odkształcania wynosiła  $v = 10$  mm/min, a długość bazy pomiarowej  $l = 100$  mm. Podczas prób wyznaczono: wytrzymałość na rozciąganie, moduł sprężystości, całkowite wydłużenie. Przykładowe wykresy naprężenie-wydłużenie zamieszczono na rysunku 5, a wyniki badań zawarto w tabeli 1.



Rys. 5. Przykładowe wykresy naprężenie-wydłużenie badanych laminatów: 1 - laminat niezszywany, 2 - zszywany; rozciąganie równoległe do ułożenia szwów, 3 - zszywany; rozciąganie prostopadłe do ułożenia szwów

Fig. 5. Typical stress-elongation curves of the tested laminates: 1 - unstitched laminate, 2 - stitched laminate; stretched parallel to stitch direction, 3 - stitched laminate; stretched perpendicular to stitch direction

TABELA 1. Wyniki prób rozciągania w zależności od kierunku ułożenia szwów

TABLE 1. Results of the tensile tests for various stitch directions

Ułożenie linii szwów w stosunku do kierunku obciążania	Wytrzymałość na rozciąganie $R_m$ MPa		Moduł sprężystości $E$ MPa		Wydłużenie całkowite $\varepsilon$ %	
	8 warstw	10 warstw	8 warstw	10 warstw	8 warstw	10 warstw
niezszywany unstitched	299 ±33	304 ±26	3740 ±179	3988 ±201	13,03 ±2,34	11,68 ±3,69
równoległe parallel	276 ±28	282 ±29	3589 ±248	3665 ±239	11,97 ±4,57	10,75 ±4,85
prostopadłe perpendicularly	246 ±22	257 ±22	3999 ±285	3326 ±236	11,84 ±4,55	10,72 ±5,98

## Próby ścinania międzywarstwowego

Ścinanie międzywarstwowe badano podczas rozciągania odpowiednio naciętej próbki (rys. 1). Wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe przy rozciąganiu prowadzono również na maszynie Instron 4469 z prędkością odkształcania 0,5 mm/min. Próbom poddano po 7 próbek z każdej grupy. Warunki badań są zgodne z normą ASTM SPT 876. Wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe przy rozciąganiu wyliczono ze wzoru

$$\tau = \frac{P}{d \cdot b}, \text{ MPa} \quad (1)$$

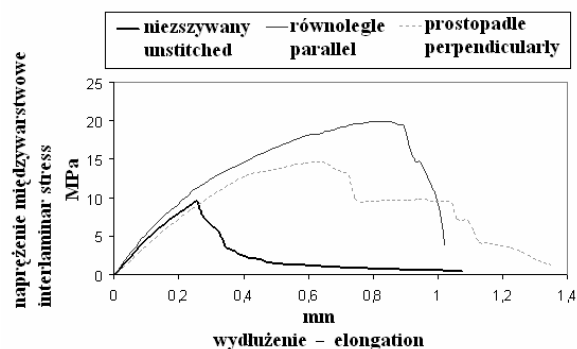
gdzie:  $\tau$  - wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe, MPa,  $P$  - maksymalna siła uzyskana w próbie, N,  $d$  - odległość między nacięciami - dla wszystkich badanych próbek  $d = 9$  mm,  $b$  - szerokość próbki, mm.

Badaniom poddano próbki 10-warstwowe: niezszywane, zszywane wzdłuż kierunku szwów, zszywane prostopadle do kierunku szwów. Oprócz wyznaczenia wytrzymałości na ścinanie zarejestrowano też odpowiadające jej wartości wydłużenia i przeanalizowano krzywe uzyskane w próbach [20]. Wyniki prób zamieszczono w tabeli 2, zaś reprezentatywną krzywą rozciągania przedstawiono na rysunku 6.

TABELA 2. Wyniki prób ścinania międzywarstwowego przy rozciąganiu w zależności od kierunku ułożenia szwów [20]

TABLE 2. Results of the interlaminar shear tests (notched specimen) for various stitch directions [20]

Ułożenie linii szwów w stosunku do kierunku obciążenia	Wytrzymałość na międzywarstwowe ścinanie $\tau$ MPa	$\frac{\tau_{\text{zszyw.}} - \tau_{\text{niezs.}}}{\tau_{\text{niezs.}}}$	Wydłużenie odpowiadające maks. naprężeniu $\epsilon$ %	$\frac{\epsilon_{\text{zszyw.}} - \epsilon_{\text{niezs.}}}{\epsilon_{\text{niezs.}}}$
		%		%
niezszywany unstitched	9,6 ± 0,38	-	0,52 ± 0,02	-
równoległe parallel	20,0 ± 1	109	1,64 ± 0,06	212
prostopadle perpendicularly	14,9 ± 0,6	55	1,28 ± 0,06	148



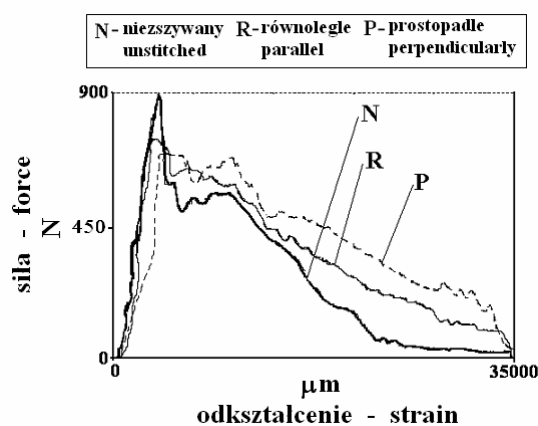
Rys. 6. Przykładowe wykresy naprężenie międzywarstwowe-wydłużenie badanych laminatów (próba rozciągania próbek naciętych) [20]

Fig. 6. Typical interlaminar stress - elongation curves of the tested laminates (notched specimen tensile test) [20]

## Próby zginania uderowego

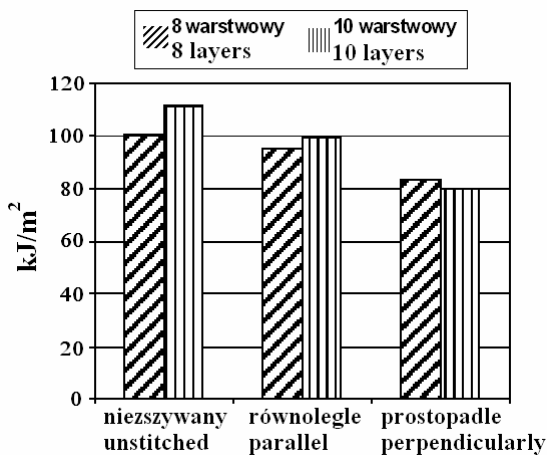
Próby zginania uderowego przeprowadzono metodą Charpy'ego, zgodnie z zasadami normy PN-81/C-89029, na młocie uderowym typu CEAST, wyposażonym

w układ czujników obciążenia. Rozstaw podpór wynosił 40 mm, a zakres wahadła 15 J. Rejestracji danych dokonano za pomocą przetwornika MC-101, zaś do obróbki zarejestrowanych informacji wykorzystano program komputerowy CAŁKA J, opracowany przez pracowników Katedry Technologii Stopów Metali i Kompozytów Politechniki Śląskiej. Próbom poddano próbki laminatów 8- i 10-warstwowego o zbrojeniu niezszywanym oraz zszywanym wzdłuż i poprzecznie do kierunku szwów.



Rys. 7. Przykładowe wykresy siła-odkształcenie wyznaczone w próbach zginania uderowego dla laminatów 8-warstwowego [19]

Fig. 7. Typical force-strain curves obtained in impact bending tests of the 8 layer laminates [19]



Rys. 8. Udarność laminatów niezszywanych oraz zszywanych, badanych równoległe i prostopadłe do kierunku ułożenia szwów [19]

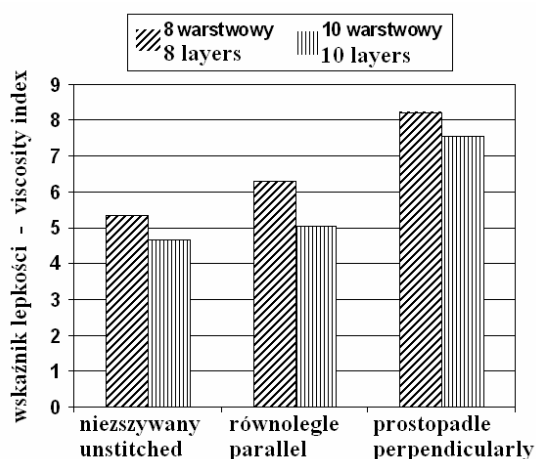
Fig. 8. Impact strength of the both unstitched and stitched laminates, tested parallel and perpendicularly to stitch direction [19]

W wyniku prób udarowego zginania otrzymano dla poszczególnych próbek wykresy zależności siła-odkształcenie. Wyznaczono takie parametry, jak: udarność (całkowita energia - powierzchnia ograniczona przez krzywą, odniesiona do przekroju próbki), wskaźnik lepkości  $DJ$ , wyznaczony na podstawie wzoru

$$DJ = \frac{U_p}{U_e} \quad (2)$$

gdzie:  $U_e$  - praca wydatkowana na powstanie defektów wewnętrznych,  $J$ ,  $U_p$  - praca wydatkowana na rozwój defektów i powstanie złomu,  $J$ .

Przykładowe wykresy siła-odkształcenie dla prób udarowych zamieszczono na rysunku 7, zaś wyniki prób na rysunkach 8 i 9.



Rys. 9. Wskaźnik lepkości laminatów niezszywanych oraz zszywanych, badanych równoległe i prostopadłe do kierunku ułożenia szwów [19]

Fig. 9. Viscosity index of the both unstitched and stitched laminates, tested parallel and perpendicularly to stitch direction [19]

## Analiza wyników

Uzyskane wyniki wskazują, że laminaty zszywane posiadają gorsze właściwości mechaniczne w kierunkach równoległych do płaszczyzny warstw zbrojących (ang. in-plane directions) w porównaniu z laminatami niezszywanymi. Dowodzą tego wyniki statycznego zginania, gdzie zaobserwowano niższą wytrzymałość na zginanie laminatów zszywanych w porównaniu z laminatami niezszywanymi, odpowiednio: dla ułożenia szwów w kierunku prostopadłym do kierunku zginania - o 18% (laminat 8-warstwowy) i o 24,4% (laminat 10-warstwowy), dla ułożenia szwów w kierunku równoległym do zginania - o 8,8% (laminat 8-warstwowy) i o 12,2% (laminat 10-warstwowy). Laminaty zszywane wykazują też niższy w stosunku do niezszywanych moduł sprężystości wyznaczony przy zginaniu: dla ułożenia szwów w kierunku prostopadłym do kierunku zginania - o 24,8% (laminaty 8- oraz 10-warstwowy), dla ułożenia szwów w kierunku równoległym do zginania - o 14% (laminat 8-warstwowy) i o 8,8% (laminat 10-warstwowy). Również wyniki prób rozciągania pokazują istotny negatywny wpływ zszywania struktury zbrojącej na właściwości mechaniczne w głównych kierunkach obciążania laminatów. Wytrzymałość na rozciąganie laminatów zszywanych jest niższa w porównaniu z laminatami niezszywanymi: dla ułożenia szwów w kierunku prostopadłym do kierunku obciążania - o 17,7% (laminat 8-warstwowy) i o 15,4% (laminat 10-warstwowy), dla ułożenia szwów w kierunku równoległym do obciążania - o 7,7% (laminat 8-warstwowy) i o 7,1% (laminat 10-warstwowy). Laminaty zszywane wykazują też niższy w stosunku do niezszywanych moduł sprężystości: dla ułożenia szwów w kierunku prostopadłym do kierunku rozciągania - o 19,8% (laminat 8-warstwowy) i o 16,6% (laminat 10-warstwowy), dla ułożenia szwów w kierunku równoległym do rozciągania - o 4% (laminat 8-warstwowy) i o 8,1% (laminat 10-warstwowy). Na obniżenie właściwości mechanicznych laminatów zszywanych w kierunkach płaszczyzny warstw zbrojących, porównując z laminatami niezszywanymi, wskazuje też ich gorsza udarność: w próbkach o ułożeniu szwów prostopadłym do kierunku zginania - o 17,6% (laminat 8-warstwowy) i o 28,1% (laminat 10-warstwowy), w próbkach o ułożeniu szwów równoległym do kierunku zginania - o 5,8% (laminat 8-warstwowy) i o 10,8% (laminat 10-warstwowy).

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują jednocześnie na wyraźną poprawę właściwości mechanicznych w kierunku translaminarnym laminatu (ang. interlaminar direction), porównując z laminatem klasycznym. Zbadana wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe jest dla laminatu zszywanego wyższa o: 109% dla kierunku rozciągania równoległego do ułożenia szwów i o 55% dla kierunku rozciągania prostopadłego do ułożenia

szwów. Wielkością, która okazała wyraźnie wyższy poziom dla laminatów zszywanych, w porównaniu z laminatami niezszywanymi, jest również wskaźnik lepkości wyznaczony w próbach udarowych. Wzrósł on: przy obciążaniu prostopadłym do kierunku ułożenia szwów o 53,8% dla laminatu 8-warstwowego i o 62,4% dla laminatu 10-warstwowego, przy obciążeniu równoległym do kierunku szwów o 8,5% dla laminatu 10-warstwowego i o 17,8% dla laminatu 8-warstwowego.

Gorsze właściwości mechaniczne w kierunkach równoległych do płaszczyzny warstw zbrojących laminatów zszywanych w porównaniu z laminatami niezszywanymi należy tłumaczyć degradacją struktury zbrojenia laminatu, spowodowaną procesem zszywania i obecnością szwów. Możemy wyróżnić następujące rodzaje uszkodzeń struktury laminatu spowodowane zszywaniem: 1) rozrywanie pasm oraz przerywanie pojedynczych włókien elementarnych, 2) zaburzenie (zmiana pierwotnego kierunku) ułożenia pasm włókien, 3) tworzenie obszarów o zmniejszonym udziale objętościowym włókien, tzw. kieszonek żywicznych (ang. resin rich pockets) [9, 21], 4) deformacja struktury zbrojącej laminatu w kierunku translaminarnym, spowodowana naciągiem nici zszywającej [22]. Szwy przeszywające warstwy zbrojące zapobiegają z kolei rozwojowi pęknięć delaminacyjnych poprzez ich mostkowanie (ang. bridging) [9]. Powoduje to znaczne podwyższenie właściwości sprężystych i wytrzymałościowych laminatu w kierunku translaminarnym. Można powiedzieć, że wysokowytrzymałe i sztywne nici zszywające pracują podczas mostkowania i naprężenie jest za ich pośrednictwem przenoszane na strukturę zbrojącą warstw (pasma włókien) laminatu. Energia,

która w laminacie klasycznym jest zużywana na postęp delaminacji, w materiale zszywanym jest przekazywana na szwy, a poprzez nie - na strukturę, powodując koncentrację naprężeń w okolicach punktów przesyć. Zjawiska te tłumaczą lepsze właściwości mechaniczne laminatów zszywanych w kierunku translaminarnym i zarazem gorsze w kierunkach głównych, porównując z laminatami klasycznymi.

*Przebieg krzywych statycznego zginania.* W laminatach zszywanych nie zauważamy skokowego obniżenia obciążenia po przekroczeniu punktu wytrzymałości na zginanie, obecnego w laminatach klasycznych (rys. 4). W okolicach szczytowego poziomu naprężenia w próbach zginania laminatu zszywanego obserwujemy charakterystyczne „plateau”, co ma również ogromny wpływ na znaczną, porównując z laminatami klasycznymi, wytrzymałość resztkową laminatów zszywanych [23]. Można zatem przypuszczać, iż skokowy spadek obciążenia po osiągnięciu granicy wytrzymałości w laminacie niezszywanym wynika z nagłej utraty połączenia między warstwami na znacznej powierzchni.

W przypadku struktury zszywanej tego typu zachowanie jest ograniczone przez szwy mostkujące pęknięcia.

*Wskaźnik lepkości* jest równy stosunkowi energii wydatkowanej na kontynuację zniszczenia próbki materiału do energii koniecznej na zainicjowanie zniszczenia w próbce. Na wykresach zginania udarowego (rys. 7) możemy zaobserwować, że maksymalna siła oraz powierzchnia wykresu (energia) do punktu odpowiadającego maksymalnej sile jest wyraźnie większa dla laminatu niezszywanego. Z kolei część wykresu związana z rozwojem zniszczenia cechuje się wyraźnie większą powierzchnią w przypadku laminatów zszywanych. Można stwierdzić, że wielkość energii wydatkowana na odkształcenie sprężyste i na zainicjowanie procesu zniszczenia (część wykresu do punktu odpowiadającego maksymalnej sile) jest silnie zależna od właściwości sprężystych i wytrzymałościowych laminatu w kierunkach równoległych do płaszczyzny warstw zbrojących, zaś wielkość energii zużyta na rozwój zniszczenia w laminacie (część wykresu po przekroczeniu punktu odpowiadającego maksymalnej sile) zależy głównie od tychże właściwości w kierunku translaminarnym. Wiąże się to z występującymi mechanizmami zniszczenia (m.in. inicjacja pęknięcia warstw zbrojących w okolicach punktów przesyć, rozwój zniszczenia poprzez rozprzestrzenianie szczelin delaminacyjnych).

*Zróznicowanie właściwości laminatów zszywanych dla różnych kierunków obciążania.* Analizując wyniki prób, można zauważyć, że laminaty zszywane prezentują wyraźnie gorszy poziom właściwości sprężystych i wytrzymałościowych przy obciążaniu w kierunku prostopadłym do ułożenia linii szwów niż w kierunku równoległym do tychże linii (rys. rys. 2, 3 i 5, tabele 1 i 2). Wiąże się to najprawdopodobniej z deformacją struktury zbrojenia laminatu w kierunku translaminarnym, spowodowaną naciągiem nici zszywającej. Podczas procesu zszywania szwy ściągają warstwy zbrojenia, tworząc rowki (liniowe obszary mocno ściśniętych warstw zbrojących). Wpływają one szczególnie na właściwości laminatu związane ze zginaniem, stając się liniami ułatwionego zginania (lokalne zmniejszenie wskaźnika przekroju) [22].

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzono próby zginania, rozciągania, udarowości Charpy'ego klasycznych laminatów żywica poliestrowa-włókno szklane oraz podobnych laminatów o zbrojeniu zszywanym nicią poliaramidową. Wyniki przeprowadzonych badań pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- Charakterystyki zależne od właściwości wytrzymałościowych oraz sprężystych laminatu w kierunku równoległym do ułożenia warstw, takie jak: wytrzymałość i moduły na zginanie, wytrzymałość i moduły

na rozciąganie, udarność, są wyraźnie gorsze dla laminatów zszywanych w porównaniu z laminatami klasycznymi. Wiąże się to z zaburzeniami i degradacją struktury zbrojenia przez nici zszywające.

- Charakterystyki zależne od właściwości wytrzymałościowych oraz sprężystych laminatu w kierunku translaminarnym, takie jak: wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe, wskaźnik lepkości, są lepsze dla laminatów zszywanych, porównując z laminatami klasycznymi. Polepszenie tychże właściwości jest spowodowane przeniesieniem przez nici zszywające obciążeń działających w kierunku translaminarnym na warstwy zbrojące laminatu.
- Stwierdzono, że laminaty zszywane prezentują nieco gorszy poziom badanych właściwości sprężystych i wytrzymałościowych przy obciążaniu w kierunku prostopadłym do ułożenia linii szwów niż w kierunku równoległym do tychże linii. Wiąże się to najprawdopodobniej z deformacją struktury zbrojenia laminatu w kierunku translaminarnym, spowodowaną naciągiem nici zszywającej.

## LITERATURA

- [1] Prichard J.C., Hogg P.J., Composites 1990, 21, 503-11.
- [2] Liu D., J. Reinforced Plastics and Composites 1990, 9, 59-69.
- [3] Su K.B., ASTM STP 1989, 1044, 279-300.
- [4] Chung W.C., Jang B.Z., Chang T.C., Hwang L.R., Wilcox R.C., Mater. Sci. Eng. 1989, A112, 157-173.
- [5] Jang B.Z., Cholakara M., Jang B.P., Shih W.K., Polym. Eng. Sci. 1991, 31, 40-6.
- [6] Cantwell W.J., Morton J., Composites 1991, 22, 347-62.
- [7] Mayadas A., Pastore C., Ko F.K., Proc. 30<sup>th</sup> Int. SAMPE Symposium, 19-25 March 1985, 1284-1293.
- [8] Chan W.S., J. Comp. Tech. and Res. 1991, 14, 91-96.
- [9] Jain L.K., Mai Y.-W., Recent work on stitching of laminated composites - theoretical analysis and experiments, Proc. ICCM - 11, Gold Coast, Australia 1997.
- [10] Stickler P.B., Ramulu M., Mat. and Design 2002, 23, 751-758.
- [11] Reeder J.R., Glaessgen E.H., J. Reinf. Plastics and Composites 2004, 23, 3, 249-263.
- [12] Brown A.S., Cutting composite costs with needle and thread, Aerospace America 1997, Nov., 24-25.
- [13] Mouritz A.P., Bannister M.K., Folsom P.J., Leong K.H., Composites: Part A 1999, 30, 1445-1461.
- [14] Rhee K.Y., Kim H.J., Park S.J., Composites: Part B 2006, 37, 21-25.
- [15] Mouritz A.P., Comp. Sci. and Tech. 1995, 55, 365-374.
- [16] Mouritz A.P., Composites: Part A 1996, 27, 525-530.
- [17] Mouritz A.P., Composites: Part B 2001, 32, 431-439.
- [18] Shah Khan M.Z., Mouritz A.P., Comp. Sci. and Tech. 1996, 56, 695-701.
- [19] Koziół M., Hyla I., Rutecka M., Mat. Konf. Nowe technologie i materiały w metalurgii i inżynierii materiałowej, XII Seminarium Naukowe, Katowice 2004, 173-178.
- [20] Koziół M., Hyla I., Mat. Konf. XXXII Szkoła Inżynierii Materiałowej, Kraków-Krynica 2004, 567-572.
- [21] Mouritz A.P., Leong K.H., Herszberg I., Composites: Part A 1997, 28, 979-9 91.
- [22] Koziół M., Mat. Konf. Materiały i technologie XXI, VII Międzynarodowa Studencka Sesja Naukowa, Katowice 2005, 40-43.
- [23] Koziół M., Rutecka M., Śleziona J., Mat. Konf. Inżynieria i edukacja 2005, Kraków-Białka Tatrzańska 2005, 105-110.

Recenzent  
Marian Klasztorny