

Mateusz Koziol<sup>1</sup>, Monika Rutecka<sup>2</sup>, Józef Śleziona<sup>3</sup>Politechnika Śląska, Katedra Technologii Stopów Metali i Kompozytów  
ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice

## OCENA WYTRZYMAŁOŚCI RESZTKOWEJ ZSZYWANYCH LAMINATÓW ŻYWICA POLIESTROWA-WŁÓKNO SZKLANE

Zaprezentowano wyniki badań resztkowej wytrzymałości na zginanie oraz na rozciąganie laminatów o osnowie poliesterowej zbrojonych włóknem szklanym. Porównano wytrzymałość i charakterystyki laminatu klasycznego oraz laminatu o zbrojeniu wzmocnionym międzywarstwowo poprzez zszywanie. Materiał zszywany wykazał istotnie lepszą (o ok. 50%) wytrzymałość resztkową na zginanie w porównaniu z laminatem klasycznym. Dało się też zauważyć korzystniejsze kształty krzywych zginania, co świadczy o zachowaniu większej części nieuszkodzonej struktury po zginaniu pierwotnym. Obserwacje mikroskopowe wykazały znacznie mniejsze rozmiary pęknięć delaminacyjnych w laminatach zszywanych, porównując z laminatami klasycznymi. Nie zauważono istotnych różnic w resztkowej wytrzymałości na rozciąganie. Stwierdzono, że wytrzymałość na rozciąganie zależy prawdopodobnie bardziej od stopnia uszkodzenia struktury zbrojenia niż od wielkości delaminacji w materiale.

Słowa kluczowe: laminaty zszywane, wytrzymałość resztkowa

## EVALUATION OF RESIDUAL STRENGTH OF STITCHED POLYESTER RESIN-GLASS FIBER LAMINATES

Residual flexural and tensile strength tests results of polyester resin reinforced with glass fibers are presented. The strength and characteristics both of classical laminates and of laminates with stitched reinforcing layers were compared. Stitched material showed visibly higher residual flexural strength (by about 50%) when compared to the classical one. Better curves shapes were observed for stitched laminates testifying more of structure free from damage after primary bending, when compared with classical laminates. Microscopic observations showed considerably lesser dimensions of delamination cracks in stitched laminates in comparison with the unstitched ones. Any significant differences in residual tensile strength were observed. It was found that tensile strength probably depends more on damage grade of reinforcing structure, than on delamination quantity in material.

Keywords: stitched laminates, residual strength

### WSTĘP

Laminaty polimerowo-włókniste oferują bardzo dobre właściwości mechaniczne w połączeniu z niską masą właściwą, dlatego też są szeroko stosowane do wytwarzania części samolotów, statków wodnych, łopatek wiatraków energetycznych, wentylatorów i wielu innych konstrukcji. Jednym z podstawowych problemów związanych z tymi materiałami jest relatywnie niska wytrzymałość w kierunku translaminarnym - zależy ona głównie od wytrzymałości polimerowej osnowy. Skutkiem niskiej wytrzymałości w obszarach międzywarstwowych może być łatwy wzrost mikroszczelin pomiędzy warstwami włókien pod wpływem obciążeń, szczególnie cyklicznych. Obecność pęknięcia międzywarstwowego powoduje obniżenie wytrzymałości i sztywności laminatu. Jednym z rozwiązań proponowanych dotychczas w celu podniesienia wytrzymałości laminatów w kierunku translaminarnym jest wprowadzenie umocnienia poprzez zszywanie warstw włókien zbrojących. Podnosi to odporność delaminacyjną lamina-

tu, utrudniając propagację pęknięcia między warstwami włókien poprzez jego mostkowanie [1]. Jednakże, właściwości sprężyste oraz wytrzymałościowe w kierunkach równoległych do ułożenia włókien są gorsze dla laminatów zszywanych niż dla odpowiednich laminatów klasycznych. Wynika to z faktu naruszenia struktury zbrojenia przez penetrującą igłę oraz nić. Przykładowo, dla laminatów poliestrowo-szklanych zszywanych z dużą gęstością przeszyci zaobserwowano spadki wytrzymałości na zginanie nawet powyżej 30% [2].

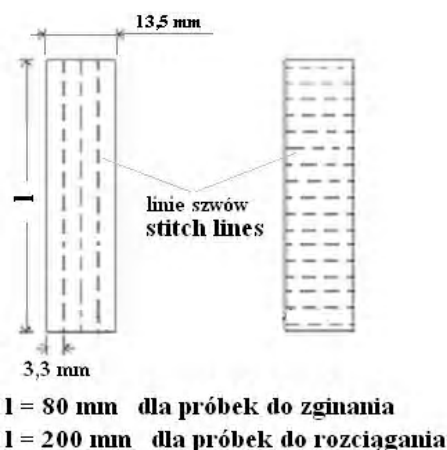
Wytrzymałość resztkowa ma duże znaczenie w przypadku materiałów konstrukcyjnych, gdyż świadczy o nośności materiału po wcześniejszym przekroczeniu punktu wytrzymałości. Może mieć to znaczenie w odpowiedzialnych konstrukcjach, w których gwałtowne zniszczenie materiału jest wyjątkowo niebezpieczne. W próbach zginania laminaty polimerowo-włókniste wykazują dość gwałtowny spadek nośności po przekro-

<sup>1,2</sup> mgr inż., <sup>3</sup> prof. dr hab. inż.

czeniu punktu wytrzymałości. Nie zachowują się jednak jak klasyczne kruche materiały i zachowują częściową zdolność do przeciwstawiania się obciążeniom. Literatura nie podaje zbyt wielu informacji na temat wytrzymałości resztkowej laminatów zszywanych. Jednym z nielicznych przykładów są badania wytrzymałości resztkowej na rozciąganie prowadzone po obciążeniach szokowych (próbka w postaci płytki) na próbkach laminatów winyloestrowo-szklanych [3]. Zarejestrowane różnice między materiałami klasycznymi a zszywanymi były bardzo niewielkie. Niniejsza praca ma na celu pokazanie różnic wytrzymałości resztkowej na zginanie oraz na rozciąganie laminatów zszywanych po wcześniejszych próbach statycznych.

## BADANE MATERIAŁY

Do badań wykorzystano próbki laminatów 8- oraz 10-warstwowego, zbrojonych tkaniną szklaną o splocie płóciennym i gramaturze  $350 \text{ g/m}^2$ ; ułożenie warstw zbrojących w kierunku  $0/90^\circ$ . Przed nasyceniem zbrojenia osnową część przykrojów (arkuszy) tkaniny zbrojącej została zszyta 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  $200 \times 270 \text{ mm}$ . Nasycanie preform prowadzono metodą kontaktową z użyciem żywicy poliestrowej Polimal 103, utwardzanej układem METOX 50 + nadtężnian kobaltu. Utwardzanie prowadzono w temperaturze pokojowej przez 24 godziny, a następnie płyty laminatu dotwardzono w temperaturze  $75^\circ\text{C}$  przez 6 godzin. Próbki wycinano z płyt mechanicznie, równolegle oraz prostopadłe do linii szwów. Wymiary próbek i schemat przebiegu szwów pokazuje rysunek 1.

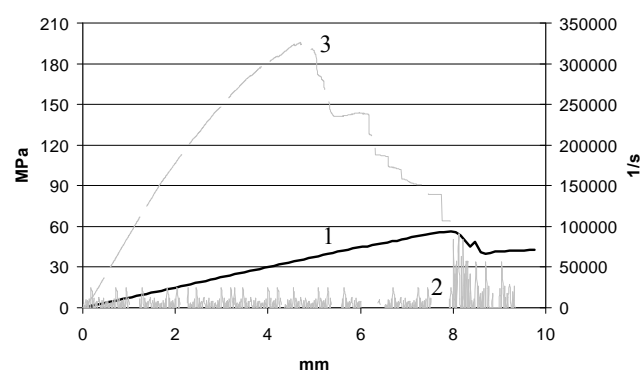


Rys. 1. Kształt i wymiary próbek do badań

Fig. 1. Shapes and dimensions of tested specimens

## PROCEDURA BADAWCZA

Próby trójpunktowego statycznego zginania wykonano zgodnie z normą PN-79/C-89027 na maszynie wytrzymałościowej Instron 4469, przy rozstawie podpór  $60 \text{ mm}$  i przy prędkości odkształcania  $5 \text{ mm/min}$ . Próbom poddano po 7 próbek laminatów 8- i 10-warstwowego o zbrojeniu niezszywanym oraz zszywanym z liniami szwów wzdłuż kierunku obciążania i poprzecznie do kierunku obciążania. Próby prowadzono do momentu osiągnięcia ugięcia  $8 \text{ mm}$ , a następnie materiał odciążano. Przy ugięciu  $8 \text{ mm}$  próbki wszystkich badanych grup materiału przekraczały ugięcie odpowiadające maksymalnej sile. Podczas gdy laminaty klasyczne osiągały maksymalne naprężenie przy ugięciu ok.  $4 \div 5,5 \text{ mm}$ , laminaty zszywane osiągały je w zakresie ugięcia ok.  $6,5 \div 7 \text{ mm}$ . Biorąc pod uwagę, że wymiary próbek klasycznych oraz zszywanych w obrębie każdego z badanych laminatów (8- lub 10-warstwowego) są zbliżone, można stwierdzić, że wyznaczenie wspólnej



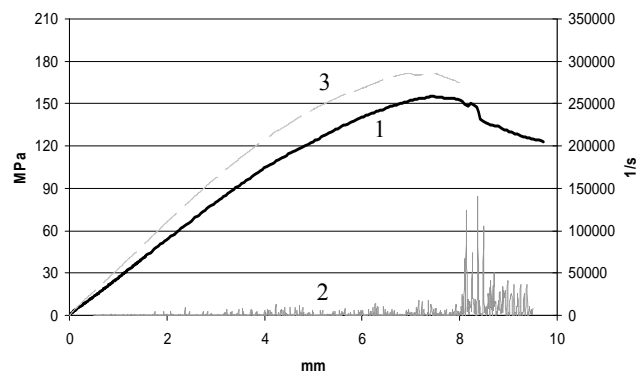
granicy ugięcia na poziomie  $8 \text{ mm}$  pozwala w zadowalający sposób pokazać różnice między materiałami podczas ich zginania.

Rys. 2. Przykładowa krzywa zginania resztkowego (1) oraz odpowiadająca jej krzywa emisji akustycznej (2) i krzywa pierwotna (3) - laminat niezszywany

Fig. 2. Exemplary residual bending curve (1) and complied acoustic emission curve (2), and primary curve (3) - unstitched laminate

Próbki materiału po próbach statycznego zginania zostały następnie zbadane w próbach statycznego zginania oraz rozciągania. Zginanie odbywało się w warunkach analogicznych jak próby pierwotne. Kierunek obciążania był również ten sam co w próbach pierwotnych (ułożenie próbek na podporach tą samą stroną). Jako metodę wspomagającą określenie przebiegu zniszczenia badanych laminatów podczas prób zginania była rejestracja sygnału emisji akustycznej. Rejestrację realizowano za pomocą urządzenia Techpan DEMA-10 produkcji polskiej sprzężonego z komputerem za pomocą karty - przetwornika analogowo-cyfrowego AMBEX. Obróbkę danych przeprowadzono na komputerze przy użyciu specjalistycznego programu MULT. Krok czasowy (przedział czasu próbkowania) ustalono na poziomie  $100 \text{ ms}$ . Z uzyskanych danych sporządzono wykresy przyrostu impulsów (zdarzeń akustycznych) na jednostkę czasu  $dN/dt$ , skorelowanego z odpowiednią

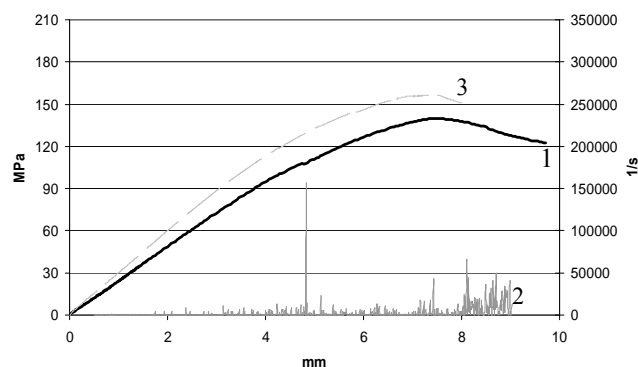
wielkością ugięcia. Statyczne rozciąganie odbywało się zgodnie z normą PN-81/C-89034 na maszynie wytrzymałościowej Instron 4469, przy rozstawie szczęk 100



mm

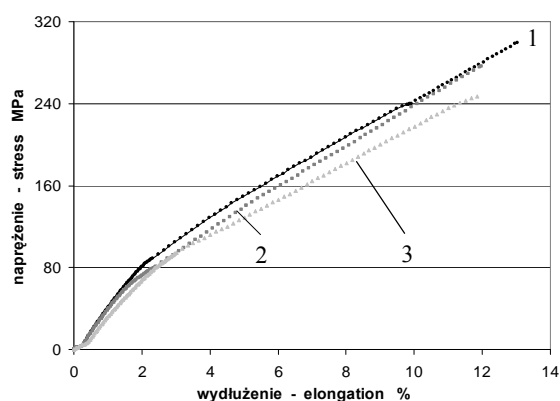
i prędkości odkształcania 5 mm/min.

Zdjęcia struktur laminatów po próbach statycznego zginania wykonano podczas obserwacji na mikroskopie stereoskopowym NIKON SMZ 1000.



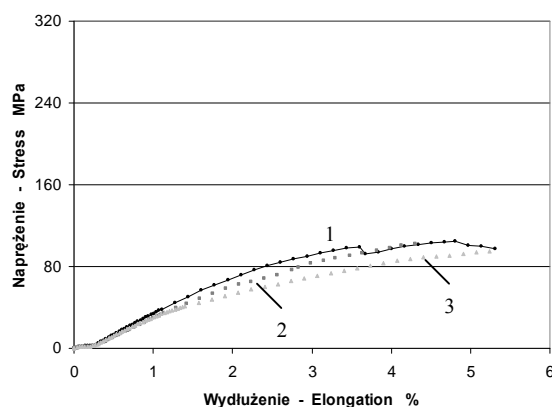
Rys. 3. Przykładowa krzywa zginania resztkowego (1) oraz odpowiadająca jej krzywa emisji akustycznej (2) i krzywa pierwotna (3) - laminat zszywany, kierunek zginania równoległy do ułożenia szwów

Fig. 3. Exemplary residual bending curve (1) and complied acoustic emission curve (2), and primary curve (3) - stitched laminate, bending direction parallel to stitch direction



Rys. 4. Przykładowa krzywa zginania resztkowego (1) oraz odpowiadająca jej krzywa emisji akustycznej (2) i krzywa pierwotna (3) - laminat zszywany, kierunek zginania prostopadły do ułożenia szwów

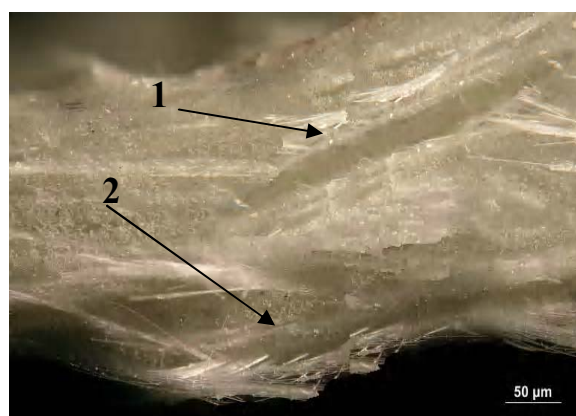
Fig. 4. Exemplary residual bending curve (1) and complied acoustic emission curve (2), and primary curve (3) - stitched laminate, bending direction perpendicular to stitch direction



Rys. 5. Przykładowe krzywe rozciągania nieuszkodzonego materiału: (1) laminat niezszywany, (2) laminat zszywany - kierunek rozciągania równoległy do ułożenia szwów, (3) laminat zszywany - kierunek rozciągania prostopadły do ułożenia szwów

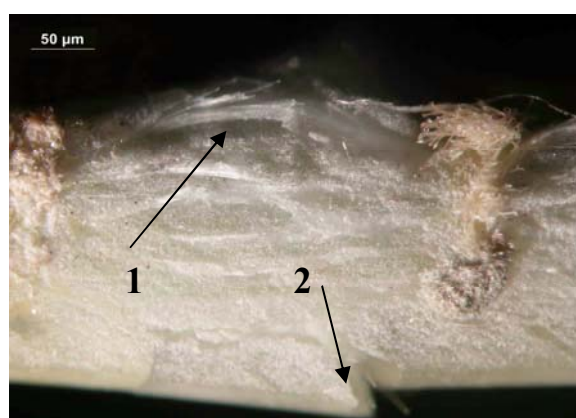
Fig. 5. Exemplary tensile curves of free from damage material: (1) unstitched laminate, (2) stitched laminate - tensile direction parallel to stitch direction, (3) stitched laminate - tensile direction perpendicular to stitch direction

Rys. 6. Przykładowe krzywe rozciągania resztkowego (po wcześniejszej



próbie zginania): (1) laminat niezszywany, (2) laminat zszywany - kierunek rozciągania równoległy do ułożenia szwów, (3) laminat zszywany - kierunek rozciągania prostopadły do ułożenia szwów

Fig. 6. Exemplary residual tensile curves (following bending test): (1) unstitched laminate, (2) stitched laminate - tensile direction parallel to stitch direction, (3) stitched laminate - tensile direction per-



pendicular to stitch direction

Rys. 7. Fotografia struktury laminatu niezszywanego po statycznej próbie zginania. Widoczna duża delaminacja (1) oraz dekohezja materiału w rozciąganej części próbki (2)

TABELA 1. Uśredniona wytrzymałość na zginanie pierwotna i resztkowa oraz wielkości spadku wytrzymałości na zginanie po próbach pierwotnych dla poszczególnych grup próbek. Laminat 8-warstwowy

TABLE 1. Average primary and residual flexural strength and flexural strength decrease after primary tests for particular specimens groups. 8 layers laminate

Laminat 8-warstwowy	Niezszywany	Zszywany (zginanie wzdłuż linii szwów)	Zszywany (zginanie poprzecznie do linii szwów)
Wytrzymałość na zginanie, MPa	206 ±19	185 ±16	165 ±16
Resztkowa wytrzymałość na zginanie, MPa	38 ±13	80 ±11	81 ±20
Spadek wytrzymałości, %	82	57	51

TABELA 2. Uśredniona wytrzymałość na zginanie pierwotna i resztkowa oraz wielkości spadku wytrzymałości na zginanie po próbach pierwotnych dla poszczególnych grup próbek. Laminat 10-warstwowy

TABLE 2. Average primary and residual flexural strength and flexural strength decrease after primary tests for particular specimens groups. 10 layers laminate

Laminat 10-warstwowy	Niezszywany	Zszywany (zginanie wzdłuż linii szwów)	Zszywany (zginanie poprzecznie do linii szwów)
Wytrzymałość na zginanie, MPa	212 ±22	181 ±8	155 ±16
Resztkowa wytrzymałość na zginanie, MPa	35 ±11	75 ±18	69 ±19
Spadek wytrzymałości, %	83	59	55

TABELA 3. Wytrzymałość na rozciąganie oraz resztkowa wytrzymałość na rozciąganie dla poszczególnych grup próbek

TABLE 3. Tensile strength and flexural strength and residual tensile strength for particular specimens groups

Ułożenie szwów	N8	N10	W8	W10	P8	P10
Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	299 ±33	304 ±26	276 ±28	282 ±29	246 ±22	257 ±22
Resztkowa wytrzymałość na rozciąganie, MPa	97 ±20	95 ±24	96 ±19	96 ±21	88 ±17	86 ±21
Spadek wytrzymałości na rozciąganie po próbie zginania, %	67,6	68,8	65,2	66	64,2	66,5

N8 - niezszywany 8-warstwowy, W8 - zszywany 8-warstwowy; szwy równoległe do obciążenia, P8 - zszywany 8-warstwowy; szwy prostopadłe do obciążenia, N10 - niezszywany 10-warstwowy, W10 - zszywany 10-warstwowy; szwy równoległe do obciążenia, P10 - zszywany 10-warstwowy; szwy prostopadłe do obciążenia

N8 - unstitched 8 layers, W8 - stitched 8 layers; stitches parallel to loading direction, P8 - stitched 8 layers; stitches perpendicularly to loading direction, N10 - unstitched 10 layers, W10 - stitched 10 layers; stitches parallel to loading direction, P10 - stitched 10 layers; stitches perpendicularly to loading direction

Fig. 7. Micrography of the unstitched laminate structure following static bending test. Big delamination (1) and decohesion in stretched part of the specimen (2) are visible

Rys. 8. Fotografia struktury laminatu zszywanego po statycznej próbie zginania. Widoczna delaminacja i wybojenie w części ściśniętej (1) oraz dekohezja materiału w rozciąganej części próbki (2)

Fig. 8. Micrography of the stitched laminate structure following static bending test. Delamination and buckling in compressed part of the specimen (1) and decohesion in stretched part of the specimen (2) are visible

Przykładowe krzywe zginania i rozciągania resztkowego pokazano na rysunkach 2-6, a wyniki prób resztkowych dla poszczególnych materiałów zamieszczono w tabelach 1-3. Struktury laminatów po pierwotnych próbach zginania zaprezentowano na rysunkach 7 i 8.

## ANALIZA WYNIKÓW

Badane laminaty niezszywane wykazały podczas prób zginania charakterystykę prostoliniową w dużym zakresie ugięcia (rys. 2). Istotne skoki naprężenia pojawiają się dopiero przy bardzo dużym ugięciu. Niewielka

liczba zliczeń akustycznych rejestrowanych w jednostce czasu podczas prób resztkowych świadczy o ograniczonej liczbie zdarzeń związanych z pęknięciami włókien i żywicy. Bardzo niewielkie wartości wytrzymałości resztkowej (tabela 1 i 2), jak również wyniki obserwacji struktur laminatów po pierwotnych próbach zginania (rys. 7) wskazują, że w obszarze zginania powstała duża ilość silnie rozwiniętych szczelin delaminacyjnych. Podczas pierwotnej próby zginania następuje dość gwałtowna, skokowa utrata nośności laminatów po przekroczeniu punktu wytrzymałości na zginanie, co wiąże się w dużym stopniu ze wzrostem pęknięć delaminacyjnych [4]. Nie dało się zauważyć istotnych różnic w zachowaniu się pomiędzy laminatami 8- i 10-warstwowym.

Laminat o zbrojeniu zszywanym wykazał w próbach resztkowych charakterystykę podobną do laminatów nieuszkodzonych, posiadającą punkt maksymalnego naprężenia oraz cechującą się łagodnym spadkiem naprężenia po przekroczeniu tego punktu (rys. rys. 3 i 4). Przebieg krzywych emisji akustycznej świadczy o większej licz-

bie zjawisk, takich jak pękanie włókien lub żywicy osnowy, porównując z laminatem niezszywanym. Dowodzi to faktu zachowania w laminatach - po próbach pierwotnych - pewnych obszarów nieuszkodzonej struktury, zdolnych do przenoszenia obciążeń. Potwierdzeniem są tu duże, w stosunku do laminatów klasycznych, wartości wytrzymałości resztkowej (tabele 1 i 2) oraz wyniki mikroskopowych obserwacji struktury (rys. 8), gdzie widać mniejsze pęknięcia delaminacyjne (ograniczone przez szwy) w porównaniu z laminatami klasycznymi. Jak widać z charakterystyk prób pierwotnych, spadki naprężenia po przekroczeniu punktu wytrzymałości są w laminatach zszywanych stosunkowo łagodne i nawet przy dużych wartościach ugięcia nie następują praktycznie żadne skokowe zmiany („plateau”). Jest to związane z mostkowaniem pęknięć delaminacyjnych przez nici zszywające [1, 4]. Nie zauważono istotnych różnic w zachowaniu pomiędzy laminatami 8- i 10-warstwowym. Wyraźne różnice w wytrzymałości (próby pierwotne) pomiędzy laminatami o zszywanym zbrojeniu badanymi w kierunku równoległym i prostopadłym do linii szwów są spowodowane faktem wystąpienia deformacji struktury zbrojenia wzdłuż linii szwów pod wpływem naciągu nici [5].

Wynik prób rozciągania próbek nieuszkodzonych oraz próbek po wstępnym zginaniu (tab. 3) wskazują, że uszkodzenia struktury po zginaniu zarówno w laminatach klasycznych, jak i tych o zszywanym zbrojeniu są bardzo znaczne. W przypadku wszystkich badanych rodzajów próbek (niezszywane, zszywane przy różnym ułożeniu w stosunku do kierunku obciążania) mamy do czynienia ze spadkiem wytrzymałości na rozciąganie o ok. 70%. Laminaty zszywane wykazały minimalnie większe spadki wytrzymałości w porównaniu z laminatami niezszywanymi. Może to oznaczać, że wielkość pęknięć delaminacyjnych (która prawdopodobnie jest mniejsza w laminatach zszywanych) nie ma tak dużego wpływu na wytrzymałość przy rozciąganiu jak uszkodzenia struktury zbrojenia (występują po zginaniu zarówno w laminatach zszywanych, jak i niezszywanych; w laminatach zszywanych mamy do czynienia dodatkowo z uszkodzeniami pochodzącymi z procesu zszywania).

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzono wstępne próby zginania, a poddane nim próbki testowano później w próbach statycznego zginania oraz rozciągania. Wyniki przeprowadzonych badań pozwalają stwierdzić, że:

- wytrzymałość resztkowa na zginanie laminatów o zszywanym zbrojeniu jest znacznie (o ok. 50%) wyższa niż odpowiednich laminatów klasycznych,
- laminat zszywany zachowuje, po wcześniejszym przekroczeniu granicy wytrzymałości na zginanie, istotnie większą część struktury zdolną do przenoszenia obciążeń w porównaniu z laminatem niezszywanym,
- wytrzymałość resztkowa na rozciąganie laminatów klasycznych oraz laminatów o zszywanym zbrojeniu nie wykazuje znacznej różnicy.

## LITERATURA

- [1] Jain L.K., Mai Y.-W., Recent work on stitching of laminated composites - theoretical analysis and experiments, Mat. ICCM - 11, Australia 1997.
- [2] Koziół M., Hyla I., Rutecka M., Mat. XII Seminarium Naukowego Nowe technologie i materiały w metalurgii i inżynierii materiałowej, Katowice 2004, 173-178.
- [3] Mouritz A.P., Composite Science and Technology 1995, 55, 365-374.
- [4] Koziół M., Hyla I., Kompozyty (Composites) 2005, 5, 3, 30-34.
- [5] Koziół M., Mat. VII Międzynarodowej Studenckiej Sesji Naukowej Materiały i technologie XXI wieku, Katowice 2005, 40-43.
- [6] PN-79/C-89027: Tworzywa sztuczne. Oznaczanie cech wytrzymałościowych przy statycznym zginaniu.
- [7] PN-81/C-89034: Tworzywa sztuczne. Oznaczanie cech wytrzymałościowych przy statycznym rozciąganiu.

Recenzent  
Marian Klasztorny