

Mateusz Kozioł

Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, Katedra Technologii Materiałów, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, Poland
Corresponding author. E-mail: Mateusz.Kozioł@polsl.pl

Otrzymano (Received) 02.02.2010

WPLYW OSNOWY POLIMEROWEJ NA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE LAMINATÓW WZMOCNIONYCH WŁÓKNEM SZKLANYM

Praca przedstawia wpływ właściwości mechanicznych osnów: epoksydowej, winyloestrowej i poliestrowej na właściwości mechaniczne laminatów wzmocnionych tkaniną szklaną (ułożenie 0/90°), klasycznych oraz zszywanych, wytworzonych metodą RTM. Ocenę właściwości mechanicznych żywic oparto na próbach rozciągania i zginania statycznego oraz udarności Charpy'ego. Właściwości mechaniczne kompozytów wyznaczano w próbach: zginania statycznego (R_g), ścinania międzywarstwowego przy rozciąganiu (τ), udarności Charpy'ego (u). Spośród badanych żywic najlepsze właściwości mechaniczne ($R_m = 41$ MPa oraz $R_g = 77$ MPa) prezentuje żywica epoksydowa. Najlepsze właściwości mechaniczne wykazują również jej kompozyty ($R_g = 588$ MPa, $\tau = 16,4 \div 19,3$ MPa, $u = 202$ kJ/m²). Żywica epoksydowa ma największą spośród badanych żywic odkształcalność ($\epsilon_z = 3,8\%$), co jest bardzo istotną cechą, korzystnie wpływającą na właściwości mechaniczne jej kompozytów - daje możliwość większego wyłączenia włókien wzmacniających oraz szwów w laminatach zszywanych. Ogólnie stwierdzono, że rodzaj osnowy wpływa istotnie na właściwości mechaniczne laminatów, zarówno klasycznych, jak i zszywanych. Stwierdzono też, że kompozyty z osnową winyloestrową tylko nieznacznie ustępują kompozytom epoksydowym pod względem właściwości mechanicznych, pomimo znacznej różnicy w odkształcalności (różnica ϵ_z na poziomie ok. 45%).

Słowa kluczowe: osnowa polimerowa, żywica poliestrowa, żywica winyloestrowa, żywica epoksydowa, właściwości mechaniczne, laminat wzmocniony włóknem szklanym, laminat zszywany

AN EFFECT OF POLYMER MATRIX ON MECHANICAL PERFORMANCE OF LAMINATES REINFORCED WITH GLASS FIBRE

The paper presents an effect of mechanical properties of: epoxy, vinylester and polyester matrix resins on mechanical performance of laminates reinforced with glass fabric (0/90° layout), classic and stitched, manufactured by RTM method. Applied resins are Polish products: ESTROMAL 14 LM - 01 (polyester), POLIMAL VE 2MM (vinylester), EPIDIAN 53 (epoxy). Evaluation of mechanical properties of the resins was based on: tensile, bending and Charpy impact resistance tests. Performance of the composites was evaluated in: static bending (R_g), interlaminar shear (τ) and Charpy impact resistance (u) tests. It was found that sort of applied matrix significantly affects a mechanical performance of the laminates: classic and stitched as well. Among tested resins the best mechanical performance showed the epoxy matrix ($R_m = 41$ MPa and $R_g = 77$ MPa). The best performance showed also its composites ($R_g = 588$ MPa, $\tau = 16,4 \div 19,3$ MPa, $u = 202$ kJ/m²). Epoxy resin has also the highest deformability among three tested resins ($\epsilon_z = 3,8\%$), which is essential quality affecting advantageously mechanical performance of its composites. It gives possibility of better effort of reinforcing fibres and of the stitches in stitched laminates. Thereby it improves a failure process. It was found that vinylester matrix composites are only insignificantly inferior in terms of mechanical performance when compared with the epoxy ones, in spite of big difference in deformability (difference in ϵ_z by about 45%). It was also found that irrespective of matrix sort, stitching of the laminates has advantageous influence on interlaminar shear strength (τ) and disadvantageous effect on impact resistance (u) and flexural strength (R_g) of the laminates.

Keywords: polymer matrix, polyester resin, vinylester resin, epoxy resin, mechanical performance, GFRP laminate, stitched laminate

WSTĘP

Technologie ciśnieniowe RTM oraz infuzji próżniowej są ostatnio intensywnie wdrażane w przemyśle wyrobów kompozytowych w krajach rozwiniętych, w tym w Polsce. Mają one zastąpić tradycyjną metodę kontaktową, która jest uciążliwa dla środowiska oraz dla pracowników, a także cechuje się słabą powtarzalnością i wydajnością produkcji [1, 2]. Jednym z pod-

stawowych problemów związanych z technologiami ciśnieniowymi jest konieczność odpowiedniego doboru żywicy. Musi ona gwarantować doskonałą zwilżalność włókien, odpowiednio niską lepkość oraz dobre właściwości mechaniczne kompozytu. Dobór żywicy musi również uwzględniać jej cenę, a także specyficzne właściwości wynikające z zastosowania kompozytu - np.

żywica winyloestrowa jest wykorzystywana w przemyśle stoczniowym.

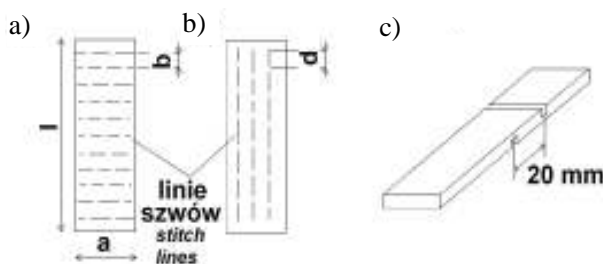
Celem pracy jest ocena przydatności trzech typów żywic produkowanych w Polsce do technologii RTM. Zastosowano żywice: poliestrową, epoksydową i winyloestrową. Przydatność technologiczną tych żywic dla procesów RTM i infuzji oceniono już we wcześniejszych pracach [1-4]. W ramach pracy przeprowadzono analizę właściwości mechanicznych samych żywic oraz kompozytów warstwowych wzmacnianych tkaniną szklaną, klasycznych i zszywanych, wytworzonych na ich bazie. Laminaty wytworzono metodą próżniową RTM. Ocenę właściwości mechanicznych żywic oparto na próbach rozciągania i zginania statycznego oraz udarności Charpy'ego. Właściwości mechaniczne kompozytów weryfikowano w próbach: zginania statycznego, ścinania międzywarstwowego przy rozciąganiu, udarności Charpy'ego. Niniejsza praca jest częścią programu badań prowadzonego od kilku lat na Politechnice Śląskiej, mającego na celu optymalizację wdrożenia procesów ciśnieniowych RTM i infuzji w polskim przemyśle.

MATERIAŁY I PROCEDURA BADAWCZA

Do wytworzenia wszystkich laminatów wykorzystano tkaninę szklaną firmy Saint - Gobain Vetrotex o splocie płóciennym i prostokątnym ułożeniu pasm rovingu 0/90°. Gramatura tkaniny wynosi 350 g/m². Jako osnów użyto trzech gatunków żywic: epoksydowej EPIDIAN 53, winyloestrowej POLIMAL VE 2MM oraz poliestrowej ESTROMAL 14 LM - 01.

Z tkaniny szklanej wycięto arkusze o wymiarach 200 na 260 mm. Następnie ułożono stosy 10 warstw z zachowaniem równoległości pasm włókien. Każdy stos fastrygowano wzdłuż krawędzi, ok. 1 cm od brzegu, tworząc preformy. Część wykonanych preform zszyto ścięciem maszynowym prostym o długości 4 mm, odległość między liniami szwów wynosiła 5 mm, naciąg nici 6 jednostek (1 jednostka = ok. 1,5 N). Do zszywania użyto nici poliaramidowej KEVLAR 50 firmy DU PONT.

Przygotowane preformy zbrojenia poddano nasycaniu metodą próżniową RTM. Do żywicy poliestrowej dodano 1,5% wagowych utwardzacza METOX 50 oraz 0,05% wagowych naftenianu kobaltu (przyspieszcz), natomiast do żywicy epoksydowej 10% wagowych utwardzacza Z1. Proces prowadzono w temperaturze pokojowej. Czas nasycania jednej preformy wynosił ok. 15 minut. Utwardzanie laminatów w temperaturze pokojowej na wolnym powietrzu trwało ok. 72 godziny. Z utwardzonego laminatu ręcznie wycięto próbki. Z laminatów zszywanych próbki wycinano równolegle oraz prostopadłe do linii szwów (rys. 1a, b) w celu uwzględnienia anizotropii ich właściwości mechanicznych. Próbki przeznaczone do ścinania międzywarstwowego wymagały wycięcia odpowiednich korbów (naciąg) w kierunku translaminarnym (rys. 1c).



Rys. 1. Kształty oraz oznaczenie wymiarów próbek do badań: wytrzymałości na zginanie i udarności wycięte poprzecznie (a) i wzdłuż (b) linii szwów, wytrzymałości na ścinanie międzywarstwowo (c); l - długość, a - szerokość, b - odległość między liniami szwów, d - długość ścięgu

Fig. 1. Shape and dimensions of specimens dedicated for: bending and impact tests taken across (a) and along (b) the stitch lines, interlaminar shear tests (c); l - length, a - width, b - stitch spacing, d - stitch length

W celu oceny wpływu właściwości mechanicznych żywicy na właściwości kompozytu przygotowano też próbki nienapełnionych żywic. Otrzymano je przez odlanie żywic z ekwiwalentnymi układami utwardzającymi do otwartych form stalowych w kształcie prostokątnych rylinek o wymiarach przekroju 5 x 20 mm.

Ocenę właściwości mechanicznych kompozytów przeprowadzono w próbach: zginania statycznego, udarności Charpy'ego oraz ścinania międzywarstwowego. Nienapełnione utwardzone żywice poddano próbom zginania, udarności oraz rozciągania. Próby statycznego zginania przeprowadzono na maszynie Instron 4469 w temperaturze pokojowej, w następujących warunkach: rozstaw podpór 60 mm, prędkość odkształcania 10 mm/min, zakres głowicy pomiarowej 5 kN. Szerokość próbek wynosiła 20 mm. Badania wykonano zgodnie z wymogami normy [5]. Próby udarności przeprowadzono z użyciem młota Charpy'ego w temperaturze pokojowej. Zakres wahadła był równy 6 J, prędkość w momencie uderzenia 3,7 m/s, rozstaw podpór 40 mm. Szerokość próbek wynosiła 10 mm. Próby zrobiono według wskazań normy [6]. Próby ścinania międzywarstwowego przy rozciąganiu przeprowadzono na maszynie Instron 4469 przy zachowaniu warunków: rozstaw szczepek (baza pomiarowa) 75 mm, prędkość odkształcania 5 mm/min, zakres obciążenia 50 kN. Każdorazowo próbkę zamontowaną w głowicy umieszczano między stalowymi płytkami w celu uniknięcia jej wybożenia. Badania wykonano zgodnie z wymogami normy [7]. Próby statycznego rozciągania przeprowadzono tylko dla próbek wykonanych z nienapełnionych żywic (osnów). Rozstaw podpór ustalono na 100 mm, a prędkość odkształcania na 5 mm/min. Zakres głowicy pomiarowej wynosił 5 kN. Badania przeprowadzono według wskazań normy [8].

ANALIZA WYNIKÓW

Przeprowadzone próby mechaniczne wskazują, iż rodzaj zastosowanej osnowy znacząco wpływa na właściwości kompozytu. Wyniki zamieszczono w tabelach 1-5.

TABELA 1. Wytrzymałość na rozciąganie R_m oraz odkształcenie przy zerwaniu ε_z utwardzonych osnówTABLE 1. Tensile strength R_m and a break strain ε_z of the cured matrix resins

Typ osnowy/matrix type	R_m , MPa	ε_z , %
Winyloestrowa/Vinylester	39 ± 7	2,1 ± 0,3
Epoksydowa/Epoxy	41 ± 2	3,8 ± 0,5
Poliestrowa/Polyester	35 ± 9	2,0 ± 0,2

TABELA 2. Wytrzymałość na zginanie R_g oraz udarność u utwardzonych osnówTABLE 2. Flexural strength R_g and Charpy impact resistance u of the cured matrix resins

Typ osnowy/matrix type	R_g , MPa	u , kJ/m ²
Winyloestrowa/Vinylester	71 ± 2	0,4 ± 0,1
Epoksydowa/Epoxy	77 ± 9	3,4 ± 1,2
Poliestrowa/Polyester	64 ± 5	0,6 ± 0,1

Na podstawie wyników prób rozciągania żywic nienapełnionych stwierdzono, że najwyższą wytrzymałością na rozciąganie cechuje się żywica epoksydowa (tab. 1). Żywica winyloestrowa wykazała jednakże zaledwie o ok. 5% niższą wytrzymałość. Nieco gorzej (różnica ok. 15% do epoksydu) wypadła żywica poliestrowa. Najwyższe odkształcenie przy zerwaniu ε_z wykazała także żywica epoksydowa (tab. 1), dla której wydłużenie jest większe o 44% w porównaniu do żywicy winyloestrowej i o 47% do poliestrowej. Podczas zginania statycznego próbek z nienapełnionych żywic najwyższą wytrzymałością wykazała się żywica epoksydowa, nieznacznie (ok. 8%) niższą wartością charakteryzował się winyloester. Najgorzej (różnica do epoksydu ok. 17%) wypadła żywica poliestrowa (tab. 2). Podczas prób udarności Charpy'ego zdecydowanie najwyższą udarność cechowała się żywica epoksydowa (tab. 2). Dwie pozostałe osnowy wykazały odpowiednio o 82 i 88% mniejszą udarność.

TABELA 3. Wytrzymałość na zginanie R_g kompozytów z różnymi osnowami. Kierunek obciążania: (P) - poprzecznie do linii szwów, (W) - wzdłuż linii szwówTABLE 3. Flexural strength R_g of the composites containing various matrix. Loading direction: (P) - transverse to the stitch lines, (W) - parallel to the stitch lines

Typ laminatu/laminate type	R_g , MPa
Winyloestrowa/Vinylester	
Laminat niezszywany/unstitched	571 ± 12
Laminat zszywany/stitched (P)	490 ± 20
Laminat zszywany/stitched (W)	431 ± 22
Epoksydowa/Epoxy	
Laminat niezszywany/unstitched	588 ± 38
Laminat zszywany/stitched (P)	521 ± 22
Laminat zszywany/stitched (W)	555 ± 16
Poliestrowa/Polyester	
Laminat niezszywany/unstitched	566 ± 46
Laminat zszywany/stitched (P)	405 ± 25
Laminat zszywany/stitched (W)	371 ± 7

TABELA 4. Wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe τ kompozytów z różnymi osnowami. Kierunek obciążania: (P) - poprzecznie do linii szwów, (W) - wzdłuż linii szwówTABLE 4. Interlaminar shear strength τ of the composites containing various matrix. Loading direction: (P) - transverse to the stitch lines, (W) - parallel to the stitch lines

Typ laminatu/laminate type	τ , MPa
Winyloestrowa/Vinylester	
Laminat niezszywany/unstitched	16,3 ± 0,5
Laminat zszywany/stitched (P)	19,0 ± 0,3
Laminat zszywany/stitched (W)	19,9 ± 0,2
Epoksydowa/Epoxy	
Laminat niezszywany/unstitched	16,4 ± 0,1
Laminat zszywany/stitched (P)	19,3 ± 0,3
Laminat zszywany/stitched (W)	19,2 ± 0,2
Poliestrowa/Polyester	
Laminat niezszywany/unstitched	12,8 ± 1,1
Laminat zszywany/stitched (P)	15,1 ± 3,6
Laminat zszywany/stitched (W)	14,9 ± 0,5

TABELA 5. Udarność Charpy'ego u kompozytów z różnymi osnowami. Kierunek obciążania: (P) - poprzecznie do linii szwów, (W) - wzdłuż linii szwówTABLE 5. Charpy impact resistance u of the composites containing various matrix. Loading direction: (P) - transverse to the stitch lines, (W) - parallel to the stitch lines

Typ laminatu/laminate type	u , kJ/m ²
Winyloestrowa/Vinylester	
Laminat niezszywany/unstitched	174 ± 10
Laminat zszywany/stitched (P)	172 ± 18
Laminat zszywany/stitched (W)	155 ± 3
Epoksydowa/Epoxy	
Laminat niezszywany/unstitched	202 ± 15
Laminat zszywany/stitched (P)	174 ± 13
Laminat zszywany/stitched (W)	165 ± 10
Poliestrowa/Polyester	
Laminat niezszywany/unstitched	159 ± 10
Laminat zszywany/stitched (P)	141 ± 12
Laminat zszywany/stitched (W)	152 ± 5

W próbach zginania statycznego najwyższą wytrzymałością charakteryzował się laminat klasyczny na osnowie żywicy epoksydowej (tab. 3). Niewiele ustępują jej laminaty z żywicą winyloestrową oraz poliestrową (słabsze odpowiednio o ok. 3 i 4%). W przypadku laminatów zszywanych najwyższą wytrzymałością na zginanie w kierunku poprzecznym do linii szwów cechuje się laminat z żywicą epoksydową, jednak już w kierunku równoległym do szwów wykazuje znaczny spadek wytrzymałości w porównaniu do laminatu niezszywanego (o ok. 18%). Zszywany laminat poliestrowy również charakteryzuje się znacznymi spadkami wytrzymałości względem niezszywanego (o ok. 24%

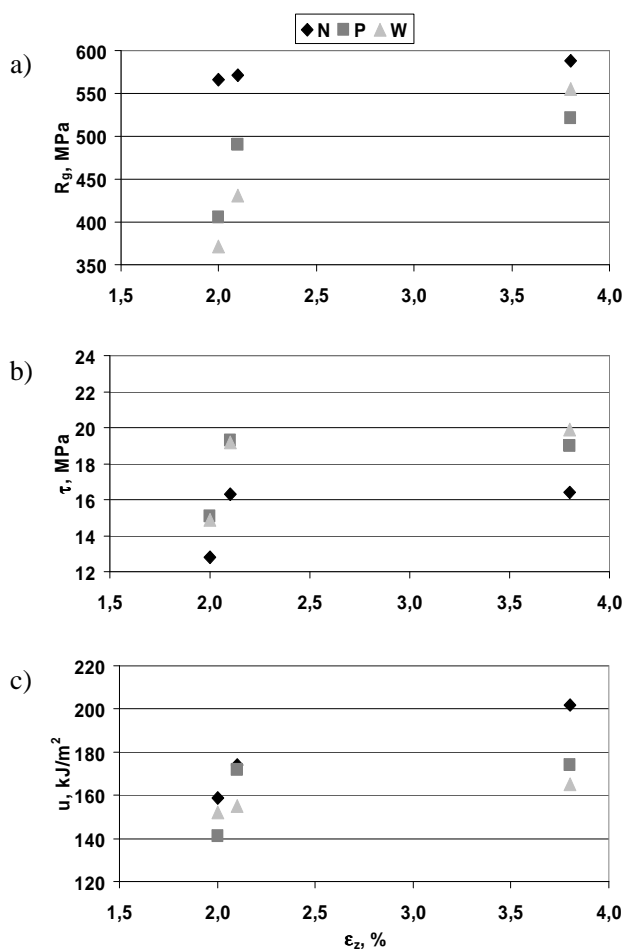
dla kierunku poprzecznego i o ok. 34% dla kierunku wzdłuż linii szwów). Użycie osnowy epoksydowej zapewniło największą stabilność wytrzymałości laminatu zszywanego w porównaniu z niezszywanym (spadek o ok. 11% w kierunku poprzecznym i o ok. 6% wzdłuż linii szwów). W próbach ścinania międzywarstwowego laminatów niezszywanych najwyższą wytrzymałością cechowały się laminaty epoksydowy i winyloestrowy (tab. 4). Laminat poliestrowy wykazał o ok. 22% mniejszą wartość. Wszystkie zszywane laminaty miały o ok. 17% wyższą wytrzymałość τ , w porównaniu z odpowiednimi niezszywanymi. Kierunek ułożenia linii szwów względem kierunku ścinania nie miał tu istotnego wpływu. W próbach Charpy'ego najwyższą wartość udarności wykazał niezszywany laminat epoksydowy (tab. 5). Udarność laminatów winyloestrowego i poliestrowego jest odpowiednio o 13 i 21% niższa. Również epoksydowy laminat zszywany charakteryzował się wyższym poziomem udarności, w porównaniu z winylo- i poliestrowym - różnica wynosi do ok. 19%. Laminaty epoksydowy i poliestrowy mają podobną udarność przy ułożeniu linii szwów prostopadłym i równoległym do kierunku obciążania (do ok. 7%), natomiast laminat winyloestrowy cechuje się tu różnicą ok. 14%.

Analizując otrzymane wyniki, można stwierdzić, iż najlepszymi właściwościami mechanicznymi (wytrzymałość na zginanie i udarność) spośród badanych laminatów cechują się kompozyty na osnowie żywicy epoksydowej. Żywica ta cechuje się w szczególności najwyższym spośród badanych osnow o odkształceniem przy zerwaniu ε_z wyznaczonym w próbie rozciągania. Dominującym mechanizmem zniszczenia w laminatach przy zginaniu powinno być wyciągnięcie i zerwanie włókien w rozciąganej części próbki, występujące przed inicjacją zniszczenia osnowy (zainicjowane pęknięcie o odpowiednio dużym rozmiarze szybko rozprzestrzenia się na cały przekrój próbki kompozytowej). Duża odkształcalność osnowy (do pewnego stopnia) powinna więc mieć korzystny wpływ na właściwości wytrzymałościowe kompozytu.

Wraz ze wzrostem odkształcalności osnowy zmniejsza się podatność na jej pęknięcie międzywarstwowe oraz wzrasta efektywna praca włókien zbrojących - ich wyciągnięcie przed zniszczeniem osnowy [9, 10]. We wcześniejszych badaniach zaobserwowano jednak, że zniszczenie laminatu podczas zginania rozpoczyna się na drodze delaminacji w górnej (ściskanej) części próbki [11].

Na potrzeby dalszej części analizy założono, że takie cechy żywic, jak: właściwości wytrzymałościowe oraz przyczepność do włókien, są dla badanych materiałów bardzo podobne. W teorii umocnienia kompozytów włóknistych przyjmuje się, że głównym czynnikiem wzmocnienia są włókna, osnowa ma tu nieporównywalnie mniejsze znaczenie [9, 10, 12]. Właściwością wyraźnie odróżniającą od siebie badane osnowy jest odkształcalność, której miarą jest odkształcenie w próbie rozciągania (ε_z). Bazując na takim założeniu, podję-

to próbę przedstawienia wpływu odkształcalności żywicy na właściwości mechaniczne kompozytów w postaci wykresów zależności: R_g , τ oraz u kompozytów od odkształcenia przy zerwaniu nienapełnionych żywic (rys. 2). Wykresy obejmują zbiorczo trzy typy osnow i nie uwzględniają innych, poza odkształcalnością, różnic między nimi.



Rys. 2. Wykresy zależności: wytrzymałości na zginanie R_g (a), wytrzymałości na ścinanie międzywarstwowe τ (b) oraz udarności u (c) kompozytów od odkształcenia przy zerwaniu ε_z nienapełnionych żywic. Laminat: N - niezszywany, P - zszywany, obciążanie poprzecznie do linii szwów, W - zszywany, obciążanie wzdłuż linii szwów. Odkształcenie 2,0% odpowiada żywicy poliestrowej, 2,1% winyloestrowej, a 3,8% epoksydowej

Fig. 2. Diagrams of: flexural strength R_g (a), interlaminar shear strength τ (b), Charpy impact resistance u (c) of the composites versus a break strain ε_z of the cured matrix resins. Laminate: N - unstitched, P - stitched, loaded transverse to the stitch lines, W - stitched, loaded parallel to the stitch lines. Strain: 2.0% corresponds with polyester resin, 2.1% with vinyl ester and 3.8% with epoxy

Wpływ odkształcalności osnowy na wytrzymałość kompozytu na zginanie R_g jest wyraźny (rys. 2a). Szczególnie widoczny jest on dla laminatu zszywanego obciążanego wzdłuż szwów (W). W laminatach zszywanych największy wzrost R_g (o ok. 20%) zaobserwowano pomiędzy 2,0 a 2,1% odkształcalności osnowy. Może to się wiązać z osiągnięciem przez materiał podczas zginania na tyle dużego ugięcia, że następuje istot-

ne wyężenie szwów, co nie ma miejsca przy osnowie o mniejszych możliwościach odkształcenia (mimo że różnica odkształcenia jest tu niewielka). Wyężenie szwów badano już wcześniej i zaobserwowano intensywne ich wyężenie w okolicach punktu inicjacji zniszczenia, w laminacie napełnionym żywicą o odkształceniu ε_z 2,0% [3]. Nawet niewielkie zwiększenie możliwości odkształcenia osnowy może pozwolić znacznie zwiększyć efektywność wyężenia szwów.

Wpływ odkształcenia ε_z osnowy na wytrzymałość kompozytu na ścinanie międzywarstwowe τ jest znaczący, ale tylko w zakresie pomiędzy 2,0 a 2,1% (rys. 2b). Charakter wpływu jest podobny dla laminatów klasycznych i zszywanych. Wytrzymałość τ kompozytu zależy w większym stopniu od właściwości wytrzymałościowych osnowy (całe obciążenie jest praktycznie przenoszone przez osnowę) niż od jej odkształcalności. Potwierdzają to uzyskane wyniki - osnowy o odkształceniu 2,1 oraz 3,8% to odpowiednio: żywice winylestrowa i epoksydowa, które wykazały znacznie większą wytrzymałość R_m oraz R_g w porównaniu z poli-estrem. Stąd lepsza wytrzymałość na ścinanie τ ich kompozytów. Zgodnie z przewidywaniami zszywanie poprawiło wytrzymałość τ kompozytów. Fakt, że zwiększenie odkształcalności osnowy z 2,1 do 3,8% nie spowodowało wzrostu wytrzymałości τ kompozytów zszywanych, świadczy o tym, że przy naprężeniu stycznym odpowiadającym takiemu odkształceniu osnowy szwy nie są jeszcze znacznie wyężone. Dotychczasowe badania wskazują, że przy średnim naciągu nici podczas zszywania nie są one w stanie istotnie wyężyć się podczas ścinania laminatu i pełnią głównie rolę ograniczników rozwoju szczelin międzywarstwowych. Istotniejszą poprawę wytrzymałości na ścinanie τ laminatu uzyskuje się przy większych gęstościach przeszyci i większych siłach naciągu szwów [3].

Wpływ odkształcenia ε_z osnowy na udarność kompozytu u jest znaczący, szczególnie w zakresie pomiędzy 2,0, a 2,1% (rys. 2c). Podobnie jak w przypadku wytrzymałości τ , także udarność bardziej zależy od wytrzymałości osnowy niż od jej odkształcalności. Znacznie mniejszy, niż w dwóch pozostałych przypadkach, wpływ odkształcalności osnowy na udarność kompozytu zszywanego obciążanego wzdłuż szwów (W) można tłumaczyć tym, że występujący w nim podczas zginania złożony stan naprężenia (dodatkowe, szczególnie intensywne przy takim kierunku obciążania, działanie nici) daje większe prawdopodobieństwo inicjacji pęknięcia w warstewkach osnowy i przez to - mniej energochłonny przebieg zniszczenia. Objawia się on właśnie mniejszą udarnością.

WNIOSKI

- Rodzaj osnowy wpływa znacząco na właściwości mechaniczne laminatów, zarówno klasycznych, jak i zszywanych.

- Spośród badanych żywic najlepsze właściwości mechaniczne (R_m oraz R_g) prezentuje żywica epoksydowa. Najlepsze właściwości mechaniczne (R_g , τ , u) wykazują również jej kompozyty.
- Żywica epoksydowa ma największą spośród badanych żywic odkształcalność (ε_z), co również bardzo korzystnie wpływa na właściwości mechaniczne jej kompozytów.
- Kompozyty z osnową winylestrową tylko nieznacznie ustępują kompozytom epoksydowym pod względem właściwości mechanicznych, pomimo znacznej różnicy w odkształcalności (różnica ε_z na poziomie ok. 45%).
- Laminaty klasyczne oraz zszywane wytworzone na bazie wszystkich trzech badanych żywic prezentują zadowalający poziom właściwości mechanicznych.

Podziękowania

Praca współfinansowana przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach projektu badawczego własnego nr N N508 440936.

LITERATURA

- [1] Kozioł M., Śleziona J., Charakterystyka płyt kompozytowych wytworzonych metodą RTM na bazie zszywanych preform włókna szklanego, *Inżynieria Materiałowa* 2008, XXIX, 2(162), marzec - kwiecień, 109-113.
- [2] Kozioł M., Myalski J., Bogdan A., Wytwarzanie kompozytów warstwowych metodą RFI, *Kompozyty (Composites)* 2009, 9, 3, 265-270.
- [3] Kozioł M., Odporność na delaminację zszywanych laminatów polimer - włókno szklane, *Rozprawa doktorska*, Politechnika Śląska, Katowice 2007.
- [4] Kozioł M., Śleziona J., Rury kompozytowe o różnych strukturach wzmocnienia wytworzone metodą RTM, *Kompozyty (Composites)* 2009, 9, 3, 244-249.
- [5] PN-EN ISO 14125: 2001/AC: 2003: Kompozyty tworzywowe wzmocnione włóknem. Oznaczanie właściwości przy zginaniu.
- [6] PN-EN ISO 179-1: 2004/A1: 2006: Tworzywa sztuczne. Oznaczanie udarności metodą Charpy'ego. Część 1: Nieinstrumentalne badanie udarności.
- [7] ASTM D5379/D5379M-05: Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method (norma amerykańska).
- [8] PN-79/C-89034: Tworzywa sztuczne. Oznaczenie cech wytrzymałościowych przy statycznym rozciąganiu.
- [9] Hyla I., Śleziona J., *Kompozyty, Elementy mechaniki i projektowania*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2004.
- [10] Leda H., *Kompozyty polimerowe z włóknami ciągłymi*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2000.
- [11] Kozioł M., Śleziona J., Przebieg zniszczenia przy statycznym zginaniu laminatów poliestrowo-szklanych o wzmocnieniu zszywanych, *Polimery* 2008, 53, 11-12, 502-508.
- [12] Śleziona J., *Podstawy technologii kompozytów*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998.

