

Mateusz Kozioł*, Józef Śleżiona

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

** Corresponding author. E-mail: mateusz.koziol@polsl.pl*

Otrzymano (Received) 11.02.2008

KOMPOZYTY POLIMEROWO-WŁÓKNISTE O TRÓJWYMIAROWYM ZBROJENIU

Zaprezentowano aktualny stan wiedzy na temat wytwarzania i stosowania laminatów trójwymiarowych. Omówiono metody wytwarzania trójwymiarowych preform zbrojących z użyciem podstawowych technik włókienniczych, takich jak: tkanie, zszywanie, wyplatanie i dzianie. Omówiono też podstawowe metody wytwarzania kompozytów na bazie tychże preform, tj. RTM oraz RFI. Stwierdzono, że metoda RFI jest lepsza do wytwarzania elementów dużych o skomplikowanym kształcie, zaś RTM do wyrobów, które łatwo nasycić w dwuczęściowej formie. Przedstawiono właściwości mechaniczne laminatów wytworzonych na bazie trójwymiarowych preform. Stwierdzono, że laminaty trójwymiarowe cechują się znakomitymi właściwościami wytrzymałościowymi. W przypadku zbrojenia tkaniną grafitową 3D wytrzymałość na zginanie wynosi ok. 800 MPa. Przy zbrojeniu plecionką dochodzi nawet do 885 MPa. W obu przypadkach są to wartości znacznie wyższe w porównaniu z podobnymi (ekwiwalentnymi) laminatami 2D. Świadczy to o korzystnym wpływie dobrego uporządkowania struktury i o ograniczeniu zjawiska delaminacji, które w klasycznych laminatach negatywnie wpływa na wytrzymałość, szczególnie podczas zginania. Działy grafitowe 3D wykazują wytrzymałość na ściskanie dochodzącą do 700 MPa - jest to wartość nieosiągalna dla podobnych laminatów klasycznych. Omówiono też wybrane przykłady wyrobów kompozytowych 3D, takich jak: panele skrzydła oraz poszycia kadłuba samolotu, turbina gazowa do sprężarki, komora spalania silnika rakietowego, wał sprzęgłowy, podwozie samochodu oraz kask rowerowy i hełm. Każdy z tych wyrobów został wykonany inną, optymalną dla siebie technologią. Laminaty trójwymiarowe są znakomitymi materiałami konstrukcyjnymi. W najbliższym czasie można się spodziewać dalszego zwiększania zainteresowania nimi, szczególnie na elementy odpowiedzialne.

Słowa kluczowe: odporność delaminacyjna, laminaty 3D, laminat zszywany, parametry zszywania

POLYMER-FIBRE COMPOSITES WITH THREE-DIMENSIONAL REINFORCEMENT

The paper presents recent knowledge about manufacturing and application of the 3D laminates. Methods of producing of 3D reinforcing preforms by weaving, stitching, braiding and knitting are discussed. Main methods of manufacturing of the laminates from 3D preforms - RTM and RFI - are also discussed. It has been concluded, that RFI method is better for manufacturing big products of complicated shape. RTM is suitable for all products which are able to be impregnated in 2-part mould. There have been presented mechanical properties of 3D laminates manufactured from 3D preforms: stitched, woven, braided and knitted. It was concluded that 3D laminates have excellent mechanical properties. For reinforcement with 3D graphite woven fabric flexural strength amounts about 800 MPa. For reinforcement with 3D graphite braided fabric it reaches even 885 MPa. In both cases the strength is significantly higher than for equivalent 2D laminates. It testifies advantageous influence of well structure order and of limiting the delamination processes, which deteriorates strength (especially flexural) in classic laminates. 3D graphite knitted fabrics show compression strength up to 700 MPa - such amount is unobtainable for equivalent 2D laminates. Exemplary 3D composite products have been discussed: aircraft wing and skin panels, gas turbine for a compressor, rocket thrustcell, coupling shaft, car chassis, bike-helmet and protective-helmet. Each of these products was manufactured by optimal technology. 3D laminates are excellent construction materials. In near future we may expect their further development, especially for responsible elements.

Keywords: delamination toughness, 3D laminates, stitched laminate, stitching parameters

WPROWADZENIE

Polimerowo-włókniste kompozyty warstwowe (laminaty) są jedną z podstawowych grup materiałów konstrukcyjnych. Cechuje je wysoka wytrzymałość oraz sprężystość przy relatywnie niskiej masie właściwej. Wadą laminatów jest bardzo niska wytrzymałość i moduł w kierunku translaminarnym, spowodowane brakiem wzmocnienia zbrojeniem w tym kierunku. Wła-

ściwości mechaniczne w tym kierunku są determinowane praktycznie tylko przez osnowę kompozytu. Wiąże się to m.in. z łatwą inicjacją i możliwością rozpręstrzenia się pęknięć tejże osnowy w obszarach między warstwami zbrojenia. Jeden ze sposobów polepszenia właściwości mechanicznych laminatów w kierunku translaminarnym polega na wprowadzeniu zbrojenia

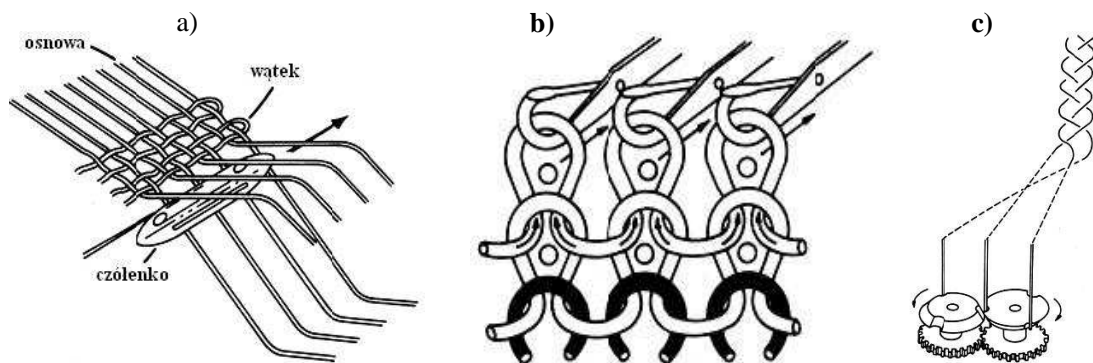
w tym kierunku i otrzymywaniu tzw. kompozytów trójwymiarowych (3D). Prace nad zastosowaniem kompozytów 3D w przemyśle lotniczym prowadzi się już od lat 60 [1]. Obecnie przemysł lotniczy i nie tylko stosuje już masowo tego typu materiały. Zasadniczym punktem produkcji kompozytów 3D jest wytworzenie trójwymiarowej preformy zbrojącej. Następnym etapem jest nasycenie preformy, czyli wytworzenie kompozytu. Niniejszy artykuł ma charakter poglądowy i ma za zadanie przybliżyć sposoby wytwarzania preform trójwymiarowych oraz pokazać metody wytwarzania i przykłady zastosowania zaawansowanych struktur materiałowych, jakimi są laminaty trójwymiarowe.

METODY WYTWARZANIA TRÓJWYMIAROWYCH PREFORM ZBROJĄCYCH

Preformy zbrojenia przygotowuje się (zazwyczaj) przed procesem nasycania osnową, czyli „na sucho”. Do metod wytwarzania preform trójwymiarowych zalicza się tradycyjne techniki włókiennicze. Są to: *zszywanie*,

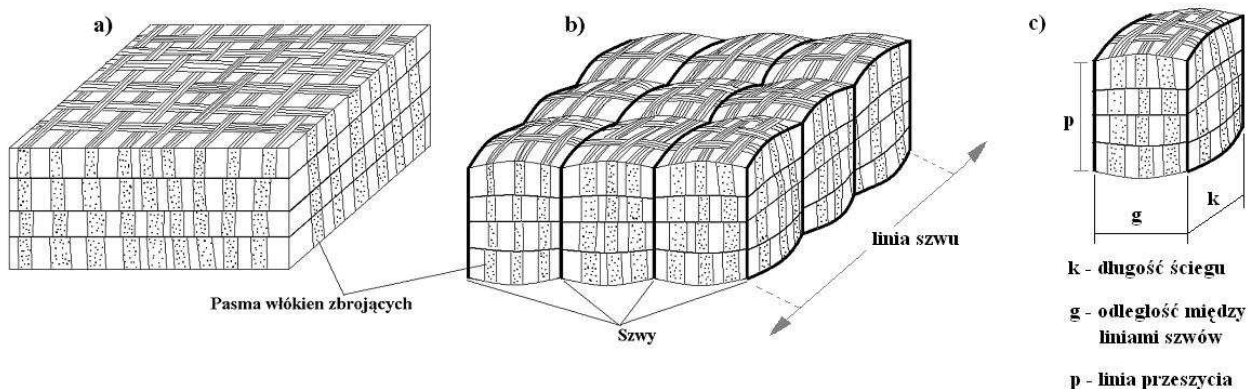
nie, tkanie, oplatanie oraz *dzianie*. Sposoby realizacji poszczególnych technik przedstawiono na rysunku 1.

Zszywanie polega na łączeniu warstw zbrojenia w postaci tkanin lub mat (czyli gotowych struktur dwuwymiarowych) nicią o odpowiednio dużej wytrzymałości i module za pomocą maszyny do szycia. Wprowadzona nić, spajająca warstwy w kierunku translaminarnym, pełni rolę wzmocnienia. Powstały ścieg (rys. 2) może charakteryzować się różnym kształtem oraz różnymi wymiarami - długością, odległością między liniami szwów, a także różną siłą naciągu nici. Wadą zszywania jest zdefektowanie struktury zbrojenia laminatu przez penetrującą igłę oraz przez obecność naciągniętej nici. Podstawową zaletą jest możliwość uzyskiwania preform z dowolnego typu włókien, praktycznie o dowolnej grubości i kształcie. Przeszywarki wieloigłowe umożliwiają szybkie zszywanie preform o dużych powierzchniach. Oprzyrządowanie do zszywania (maszyny do szycia, roboty szwalnicze) jest mniej skomplikowane niż oprzyrządowanie do innych technik włókienniczych. Przykładową preformę oraz wytworzony na jej bazie laminat zszywany przedstawiono na rysunku 3.



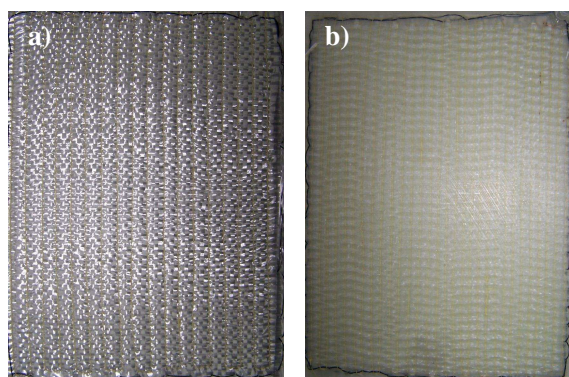
Rys. 1. Sposoby realizacji wytwarzania struktur włóknistych do zbrojenia kompozytów: a) tkanie; b) dzianie; c) plecienie [2]

Fig. 1. Fabrication of the composite-reinforcing fibrous structures: a) weaving; b) knitting; c) braiding [2]



Rys. 2. Schemat laminatu zszywanego: a) struktura zbrojąca laminatu niezszywanego - ułożenie pasm włókien zbrojących w kierunkach 0/90°; b) struktura zbrojąca laminatu zszywanego; c) pojedyncza „komórka” wydzielona przez ściągnięte szwy; zaznaczono na niej najważniejsze parametry geometryczne szycia

Fig. 2. Schema of a stitched laminate: a) reinforcing structure of unstitched laminate - 0/90° reinforcing fibres strips sequence; b) stitched laminate reinforcing structure; c) individual „cell” separated by strained stitches; the principal geometric parameters of stitching are pointed out



Rys. 3. Zszywana 10-warstwowa preforma tkaniny szklanej (a) oraz kompozyt wytworzony na jej bazie (b)

Fig. 3. Stitched 10-layer glass fiber preform (a) and a composite manufactured from it (b)

W ramach badań własnych [4-6] stwierdzono, że zszywanie istotnie podnosi odporność delaminacyjną oraz wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe laminatów żywica poliestrowa-włókno szklane. Jednakże, degradacja struktury laminatu spowodowana zszywaniem wywołuje istotne obniżenie właściwości mechanicznych materiału w kierunkach roboczych (w płaszczyźnie warstw). Stwierdzono również znaczący wpływ gęstości przeszyc na właściwości mechaniczne - ze wzrostem gęstości przeszyc wzrasta wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe oraz spada moduł i wytrzymałość na zginanie (tab. 1).

TABELA 1. Wyniki prób zginania (R_g , E_g) oraz ścinania międzywarstwowego (τ) laminatów 10-warstwowych: niezszywanego oraz zszywanych z różną długością ściegu i różną odległością między liniami szwów [4]

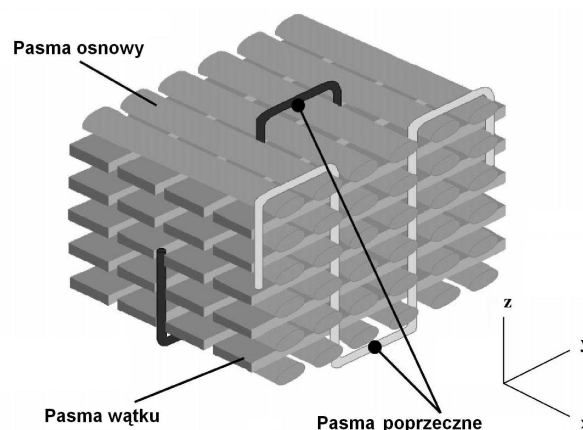
TABLE 1. The results of the bending (R_g , E_g) and the interlaminar shear (τ) tests of 10-layer laminates: unstitched and stitched with various stitch length and stitch spacing [4]

Laminat	Maksymalne naprężenie R_g MPa	Moduł sprężystości E_g MPa	Maksymalne naprężenie τ MPa
N	566 ±46	21358 ±1276	11,15 ±0,99
11/20W	436 ±13	19696 ±1582	13,33 ±0,62
11/20P	452 ±8	20220 ±786	14,38 ±2,57
7/5W	405 ±7	19646 ±1330	15,87 ±0,9
7/5P	387 ±8	18428 ±868	14,33 ±0,37
4/5W	405 ±25	18688 ±1248	16,95 ±0,78
4/5P	371 ±7	18240 ±664	16,01 ±1,19
2,7/5W	399 ±12	18942 ±480	20,88 ±1,02
2,7/5P	374 ±12	18650 ±864	18,32 ±0,33

We wszystkich laminatach zszywanych oznaczenia (marks): długość ściegu/odległość między liniami szwów - stitch length/stitch spacing (mm/mm); N - laminat niezszywany (unstitched), W - laminat zszywany zginany w kierunku równoległym do ułożenia linii szwów (stitched parallel to the bending direction), P - laminat zszywany zginany w kierunku prostopadłym do ułożenia linii szwów (stitched transverse to the bending direction).

Taka interakcja wpływu zszywania na właściwości laminatu wymaga optymalizacji geometrii szycia laminatu dla każdego zastosowania. Stwierdzono również znaczny spadek wytrzymałości na zginanie oraz udarowości laminatu wraz ze wzrostem siły naciągu nici [7]. Jednocześnie stwierdzono wzrost wytrzymałości laminatu na ścinanie międzywarstwowe wraz ze wzrostem siły naciągu. Siła naciągu nici także wymaga każdorazowej optymalizacji.

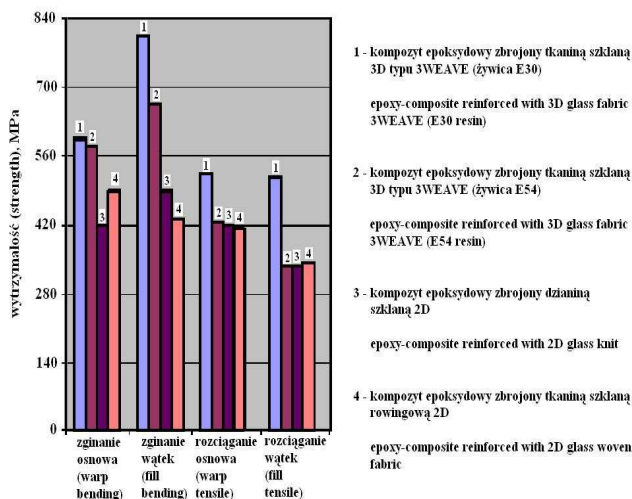
Tkanie jest podstawową zautomatyzowaną techniką włókienniczą, służącą do wytwarzania wszelkiego rodzaju tkanin. Polega na przeplataniu dwóch wzajemnie prostopadłych układów nitki: podłużnego (osnowa) i poprzecznego (wątek), przy użyciu maszyny zwanej krosnem. Istnieje cały szereg splotów tkackich, czyli możliwych kombinacji kolejności przeplatania poszczególnych nitki obu układów. Tkanie trójwymiarowe jest możliwe na specjalnie zmodyfikowanych krosnach w układzie Jacquarda. Wprowadzone poprzeczne przeploty mają zazwyczaj dość prosty charakter i są stosunkowo rzadko rozmieszczone (rys. 4).



Rys. 4. Schemat tkaniny trójwymiarowej (3D) o rzadkim przeplocie w kierunku z [3]

Fig. 4. Schema of 3D fabric with rare interleave into z direction [3]

Trójwymiarowe tkaniny, w przeciwieństwie do preform zszywanych, nie posiadają wad strukturalnych powstałych przy procesie wytwarzania. Na rysunku 5 przedstawiono porównanie wytrzymałości na zginanie i na rozciąganie przykładowych kompozytów na bazie tkanin 3D oraz ekwiwalentnych laminatów na bazie struktur 2D. Tkaniny 3D stają się najbardziej doskonałą strukturalnie oraz najpopularniejszą odmianą materiałów zbrojących kompozyty. Niektóre specjalistyczne firmy, jak np. amerykańska 3 TEX INC, oferują tego typu tkaniny z dowolnym udziałem włókien w kierunkach x, y, z, z dowolną grubością do 25,4 mm oraz wykonane z włókien węglowych, aramidowych, szklanych, nylonowych, polipropylenowych, stalowych lub dowolnej ich kombinacji [8, 9].



Rys. 5. Porównanie wytrzymałości na zginanie i rozciąganie laminatów na bazie tkanych preform 3D oraz laminatów 2D [8]

Fig. 5. Comparison of flexural and tensile strength of the laminates manufactured from woven 3D preforms and the 2D laminates [8]

Wyplatanie to technika wytwarzania plecionek. Polega na wzajemnym oplataniu kilku nici bądź pasm włókien. Oplatanie przedstawiono schematycznie na rysunku 1.

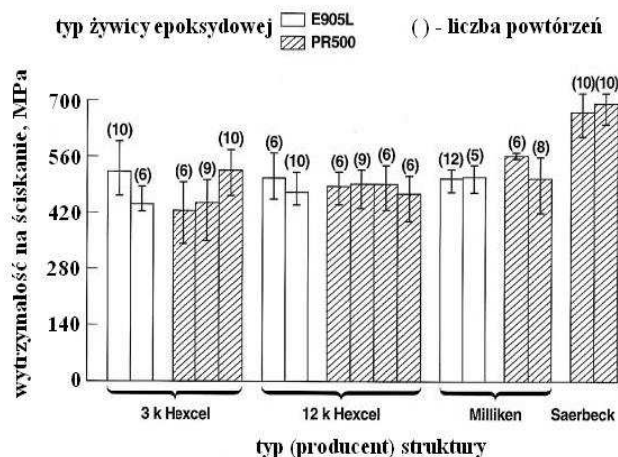
Nowoczesne maszyny do wyplatania, tzw. oplatarki, dają możliwość wytwarzania preform trójwymiarowych o zaokrąglonych kształtach, również z małym promieniem krzywizny. Jest to poważna zaleta tej techniki. Nadaje się ona świetnie do wyplatania takich kształtów, jak np. preformy rur o dużej wytrzymałości (wały, kadłuby raket itp.) lub preform o dużej ilości załamań, które powodowałyby znaczne zaburzenia struktury w przypadku tkaniny. Wyplatanie umożliwia dobrą kontrolę nad lokalnym zagęszczeniem pasm, co praktycznie eliminuje niebezpieczeństwo deformacji. Kompozyty na bazie plecionych preform cechują się bardzo dobrymi właściwościami mechanicznymi (tab. 2).

TABELA 2. Właściwości wytrzymałościowe kompozytu na bazie trójwymiarowej plecionki w porównaniu z kompozytem na bazie tkaniny satynowej [8]

TABLE 2. Strength properties of 3D braided composite, in comparison with satine 2D composite [8]

Zbrojenie Reinforcement	Udział obj. zbrojenia Fiber volume fraction %	Wytrzymałość na zginanie Flexural strength MPa	Moduł przy zginaniu, Flexural modulus GPa	Średnie odchylenie włókien Average fibers aberration
trójwymiarowa plecionka grafitowa AS-4 (przeplot 1x1) AS-4 3D graphite braid (pattern 1x1)	68	885 ±60	85 ±6	±19
tkanina grafitowa satynowa 8 rzędowa T300 T300 2D graphite satin 8 harness fabric	65	690 ±20	66 ±4	0

Dzianie to technika otrzymywania struktur włókienniczych zwanych dzianiną ze specjalnych nitki zwanych dzianiem. Nitka w dzianinie tworzy oczka określonego kształtu i rozmiaru (rys. 1). Układ oczek uszeregowanych jedno nad drugim jest nazywany kolumnienką. Natomiast układ oczek uszeregowanych obok siebie nazywa się rzadkiem. Podobnie jak w przypadku plecienia, dzianiny trójwymiarowe mogą być bez problemu wytwarzane jako preformy zaokrąglone o małym promieniu krzywizny. Bardzo dobrze nadają się na preformy rur lub hełmów. Wytrzymałość na ściskanie przykładowych kompozytów epoksydowych wytworzonych na bazie dzianin przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Porównanie wytrzymałości na ściskanie kompozytów epoksydowych wytworzonych na bazie trójwymiarowych preform dzianin z włókna węglowego [1]

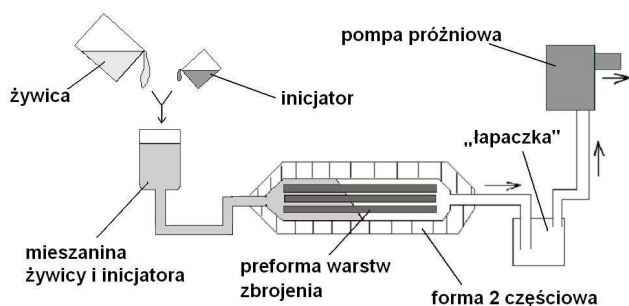
Fig. 6. Comparison of compression strength of epoxy-composites manufactured on the base of 3D knitted carbon fiber preforms [1]

METODY WYTWARZANIA KOMPOZYTÓW NA BAZIE PREFORM 3D

Kompozyty o osnowie polimerowej na bazie trójwymiarowych preform zbrojących są obecnie często wykorzystywane w różnego rodzaju odpowiedzialnych konstrukcjach. Do wytwarzania wyrobów (nasycania preform) stosuje się techniki zautomatyzowane typu RTM (ang. Resin Transfer Moulding - Formowanie Przepływem Żywicy) lub RFI (ang. Resin Film Infusion - Wprowadzanie Filmu Żywicznego).

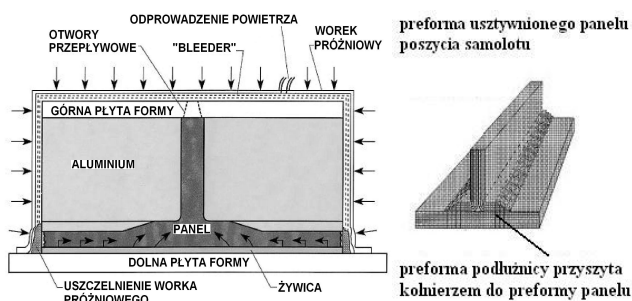
Technika RTM (rys. 7) polega na ciśnieniowo-próżniowym napełnieniu żywicą preformy zamkniętej w sztywnej formie. Wadą tej metody jest konieczność wykonania formy, co w przypadku dużych bądź skomplikowanych elementów jest bardzo kosztowne. Główną zaletą jest z kolei wysoka jakość oraz powtarzalność uzyskiwanych wyrobów. Zamknięcie odpowiednio zaprojektowanej preformy w sztywnej formie gwarantuje uzyskanie wysokiego udziału objętościowego włókien w wytworzonym materiale. Obecnie jest to podstawowa zautomatyzowana metoda wytwarzania laminatów.

Technika RFI (rys. 8) to zmodyfikowana odmiana metody nasycania kompozytów z użyciem worka próżniowego. Polega na umieszczeniu preformy w odpowiednio przygotowanym układzie płyt oraz wyprofilowanych „boksów” kształtujących, ściśniętych w całość za pomocą worka próżniowego. Odpowiednia ilość żywicy zostaje wprowadzona do dolnej części takiej „formy” przed umieszczeniem tam preformy, a następnie jest „wciągana” przez próżnię do wnętrza struktury zbrojenia. Podstawowa różnica w stosunku do metody RTM polega na tym, że główny kierunek przepływu żywicy odpowiada kierunkowi translaminarnemu preformy (przeważnie). W RTM-ie żywica przemieszcza się wzdłuż warstw zbrojenia. Metoda RFI specjalnie dobrze sprawdza się w przypadku nasycania dużych oraz skomplikowanych pod względem kształtu wyrobów, trudnych do wytworzenia metodą RTM.



Rys. 7. Schemat układu do ciśnieniowo-próżniowego nasycania laminatów metodą RTM

Fig. 7. Schema of the RTM laminate impregnation system



Rys. 8. Schemat metody RFI na przykładzie nasycania usztywnionego panelu poszycia samolotu [1]

Fig. 8. Schema of the RFI method on the example of manufacturing of the stiffened aircraft skin pannel [1]

PRZYKŁADY ZASTOSOWANIA LAMINATÓW 3D

Laminaty trójwymiarowe, zarówno tkane, jak i plecione czy dziane cechują się znakomitymi właściwościami wytrzymałościowymi. W przypadku zbrojenia tkaniną grafitową 3D wytrzymałość na zginanie wynosi ok. 800 MPa (rys. 5). Przy zbrojeniu plecionką dochodzi nawet do 885 MPa (tab. 2). W obu wypadkach są to wartości znacznie wyższe w porównaniu z podobnymi (ekwiwalentnymi) laminatami 2D. Tak dobra wytrzymałość wynika z uporządkowania struktury i ograniczenia zjawiska delaminacji, które występuje dla lami-

natów 2D i negatywnie wpływa na ich wytrzymałość, szczególnie przy zginaniu [10, 11]. Również laminaty z dzianinami 3D cechują bardzo dobre właściwości mechaniczne, co widać na przykładzie wytrzymałości na ściskanie laminatów epoksydowo-grafitowych, która dochodzi do 700 MPa (rys. 6). Jest to wartość nieosiągalna dla podobnych kompozytów 2D.

Przykładami różnorodnych wyrobów kompozytowych wykonanych na bazie preform trójwymiarowych są: *panele skrzydła* oraz *poszycia kadłuba* samolotu McDonnell Douglas (Boeing) MD-90-40X, *turbina gazowa* do sprężarki, *komora spalania silnika rakietowego*, *wał sprzęgłowy*, *podwozie samochodu* oraz *kask rowerowy* i *hełm*. Każdy z elementów ze względu na swoją specyfikę został wykonany inną technologią.

Elementy skrzydła oraz kadłuba samolotu (rys. 9), wyprodukowane na zlecenie firmy Boeing, zostały po przetestowaniu wprowadzone do seryjnego zastosowania w samolotach nowych oraz jako części zamienne w samolotach znajdujących się w użyciu. Preformy do elementów wykonano techniką zszywania na bazie węglowych tkanin typu NCF (ang. Non Crimp Fabric - Tkanina Bez Pofalowań). Elementy te są zaokrąglone, ale mają duży promień krzywizny. Dodatkowo posiadają dużą powierzchnię. Zszywanie jest tu więc optymalną metodą wytwarzania preform. Nasycanie prowadzono metodą RFI.



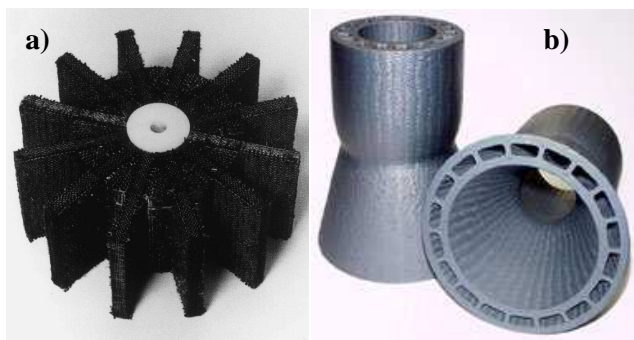
Rys. 9. Panel skrzydła (a) oraz panel poszycia kadłuba (b) wykonane na bazie zszywanych preform z włókna węglowego [1]

Fig. 9. The pannel of a wing (a) and the pannel of an aircraft skin (b) manufactured from stitched carbon fiber preforms [1]

Turbina do sprężarki (rys. 10a) jest wytwarzana na bazie preformy tkanej firmy Techniweave. Elementy składowe preformy o kształtach graniastostupów trójkątnych i prostopadłościów są tkane trójwymiarowo, a następnie zszywane ze sobą.

Komora spalania silnika rakietowego (rys. 11c), produkowana przez firmę ARC, jest elementem o skomplikowanym kształcie - posiada krzywizny o małym promieniu. Ponadto jest to wyrób narażony na ogromne obciążenia mechaniczne i termiczne przy jednoczesnym działaniu czynników chemicznych. Komory wytwarza się z kompozytów węgiel-węgiel na bazie plecionych trójwymiarowych preform z włókna węglowego. Wykorzystuje się tu możliwości uzyskania, poprzez plecenie, struktury o skomplikowanym kształcie, pozbawionej deformacji i wewnętrznych naprężeń. Inną metodą wytwarzania komór spalania silników

rakietowych jest zastosowanie kompozytu o osnowie SiC (napylenie metodą CVD) na bazie trójwymiarowej tkanej preformy z włókien SiC (rys. 10b). Zastosowanie takiej samej substancji jako osnowy i zbrojenia gwarantuje dobre połączenie na granicy faz. Poza tym SiC jest ceramiką o znakomitych właściwościach mechanicznych, również w bardzo wysokich temperaturach. Jest materiałem optymalnym na silniki rakietowe. Komory silników rakietowych z kompozytu SiC-SiC przeszły pomyślnie testy w laboratoriach NASA [12].



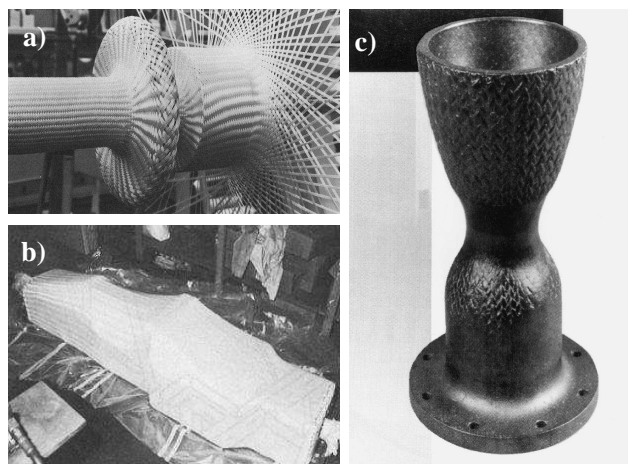
Rys. 10. Kompozyty trójwymiarowe: a) tkana preforma wirnika turbiny gazowej z włókna węglowego [3]; b) komora spalania silnika rakietowego na bazie tkanej preformy 3D z włókna SiC, na osnowie SiC [12]

Fig. 10. Three-dimensional composites: a) woven preform of gas-turbine of carbon fiber [2]; b) rocket thrustcell on the base of woven SiC fiber 3D preform, on SiC matrix [12]

Wał sprzęgłowy stosowany w napędzie statku (rys. 11a) jest elementem wytworzonym na bazie plecionej preformy włókna szklanego. Wyrób ten odznacza się występującymi na długości zmianami przekroju (uskokami), co wiąże się z koncentracją naprężeń oraz koniecznością laminowania zaokrągleń o małym promieniu. Oplatanie trójwymiarowe daje w takiej sytuacji dobry efekt („luźne” przemieszczanie poszczególnych oplatanych pasm włókien względem siebie) i gwarantuje równomierne ułożenie zbrojenia bez zaburzeń.

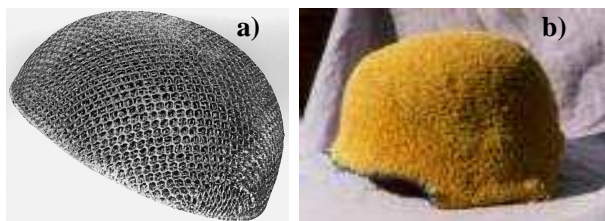
Podwozie samochodu sportowego (rys. 11b) również wytworzono metodą oplatania. Spora ilość uskoków i krawędzi o małym promieniu krzywizny powoduje, że zastosowanie tkanin z pewnością wiązałoby się z zaburzeniami struktury zbrojącej.

Kask rowerowy oraz hełm (rys. 12), jako elementy zaokrąglone o stosunkowo niewielkim promieniu krzywizny, wytworzono na bazie preform trójwymiarowych uzyskanych techniką dziania. Preformę kasku rowerowego wykonano z włókna węglowego w celu minimalizowania masy. Hełm wykonano na bazie dzianiny poliaramidowej, która zapewnia optymalne właściwości antybalistyczne. Oprócz preform włóknistych w obu wypadkach zastosowano odpowiednie warstwy pianki. Kask rowerowy jest wyrobem prototypowym wyprodukowanym na Uniwersytecie w Leuven. Hełm jest również prototypem wykonanym w firmie AUTEX [14].



Rys. 11. Kompozyty trójwymiarowe: a) pleciona trójwymiarowo preforma wału sprzęgłowego z włókna szklanego [2]; b) pleciona trójwymiarowo preforma podwozia samochodu sportowego [2]; c) komora spalania silnika rakietowego na bazie plecionki 3D z włókna węglowego [3]

Fig. 11. Three-dimensional composites: a) three-dimensionally knitted glass-fiber preform of a coupling shaft [2]; b) three-dimensionally knitted glass-fiber preform of a car chassis [2]; c) rocket thrustcell on the base of knitted 3D carbon fiber preform [3]



Rys. 12. Kompozyty trójwymiarowe: a) dziana trójwymiarowo preforma kasku rowerowego z włókien węglowych [13]; b) dziana preforma hełmu z włókien aramidowych [14]

Fig. 12. Three-dimensional composites: a) three-dimensionally knitted carbon-fiber preform of a bike-helmet [13]; b) three-dimensionally knitted aramide-fiber preform of a helmet [14]

PODSUMOWANIE

Kompozyty polimerowo-włókniste o trójwymiarowym zbrojeniu (3D) są aktualnie szeroko stosowane do wytwarzania różnego rodzaju zaawansowanych elementów. Wytwarza się z nich szeroką gamę wyrobów - od kasków rowerowych po komory silników rakietowych. Technikę wytwarzania preform można dostosować do wymaganej geometrii wyrobu. Obniżenie cen komponentów do produkcji kompozytów, a także upowszechnienie zautomatyzowanych metod wytwarzania, jak RTM oraz RFI, doprowadziło do rozwoju laminatów, w tym laminatów trójwymiarowych. Konstruktorzy wykazują większe zaufanie do kompozytów trójwymiarowych niż do klasycznych ze względu na wyeliminowanie niebezpieczeństwa związanego z delaminacją. Uwagę zwracają znakomite właściwości wytrzymałościowe laminatów trójwymiarowych zbrojonych włóknem grafitowym, zarówno tkanych, jak i plecionych czy

dzianych. Zarówno w przypadku zbrojenia tkaniną 3D, jak i przy zbrojeniu plecionką 3D czy dzianiną 3D właściwości wytrzymałościowe (wytrzymałość na zginanie, rozciąganie, ściskanie) są na znacznie wyższym poziomie w porównaniu z podobnymi laminatami 2D. Świadczy to o korzystnym wpływie dobrego uporządkowania struktury i o ograniczeniu zjawiska delaminacji, które negatywnie wpływa na wytrzymałość laminatów 2D. W najbliższym czasie można się spodziewać dalszego zwiększania zainteresowania kompozytami 3D, szczególnie w elementach odpowiedzialnych.

LITERATURA

- [1] Dow M.B., Dexter H.B., Development of stitched, braided and woven composite structures in the ACT program and at Langley Research Center (1985 to 1997), Raport NASA TP-97-206234, Langley, 1997.
- [2] Hansmann H., Compendium Composites, Handbook/Extraction - Braiding, Hochschule Wismar, FB MVU, Wismar 2003.
- [3] Mouritz A.P., Bannister M.K., Falzon P.J., Leong K.H., Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites, *Composites Part A* 1999, 30, 1445-1461.
- [4] Kozioł M., Odporność na delaminację zszywanych laminatów polimer - włókno szklane, Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Katowice 2007.
- [5] Kozioł M., Śleziona J., Właściwości mechaniczne zszywanych laminatów żywica poliestrowa - włókno szklane, *Kompozyty (Composites)* 2006, 6, 2, 14-20.
- [6] Kozioł M., Kulawik A., Śleziona J., Kształt delaminacji w laminacie zszywanym po próbie udarowej z użyciem spadającego ciężarka, *Kompozyty (Composites)* 2007, 7, 1, 25-31.
- [7] Kozioł M., Śleziona J., Wpływ deformacji struktury zbrojenia na właściwości mechaniczne zszywanych laminatów żywica poliestrowa - włókno szklane, *Inżynieria Materiałowa* 2006, XXVII, maj-czerwiec, 616-620.
- [8] Stobbe D., Mohamed M., 3D woven composites: cost and performance viability in commercial applications, Proc. 48th International SAMPE Symposium, 2003.
- [9] www.3tex.com (na dzień 10.02.2008)
- [10] Huang Z.M., Ramakrishna S., Micromechanical modeling approaches for the stiffness and strength of knitted fabric composites: a review and comparative study, *Composites Part A* 2000, 31, 479-501.
- [11] Wan Y.Z., Lian J.J., Huang Y., He F., Wang Y.L., Jiang H.J., Xin J.Y., Preparation and characterization of three-dimensional braided carbon/Kevlar/epoxy hybrid composites, *Journal of Materials Science* 2007, 42, 1343-1350.
- [12] www.grc.nasa.com (na dzień 10.02.2008)
- [13] Verpoest I., Gommers B., Huymans G., Ivens I., Luo Y., Pandita S., Philips D., The potential of knitted fabrics as a reinforcements for composites, Proc. 11th International Conference on Composite Materials, 1997, 1108-1133.
- [14] www.autexrj.com (na dzień 10.02.2008).