

Andrzej Belzowski¹, Jan Stasiński²

Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Wydziałowy Zakład Wytrzymałości Materiałów, ul. Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław

Bogumił Ziółkowski³, Anna Kamińska⁴

Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, ul. Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław

NIEKTÓRE KRYTERIA AKCEPTACJI DEFECTÓW W KOMPOZYTACH NA PRZYKŁADZIE LAMINATU CIĘTEGO STRUMIENIEM WODY

Podczas wytwarzania elementów konstrukcyjnych z kompozytów polimerowych mogą powstawać różne defekty technologiczne. We wprowadzeniu przedstawiono zbiorcze zestawienie takich defektów oraz dwie koncepcje określenia jakości wytworzonego elementu: w oparciu o pomiary stopnia porowatości materiału (rys. rys. 1 i 2) i na podstawie wizualnej oceny rodzaju, wielkości oraz nasilenia występowania wad widocznych okiem nieuzbrojonym. Z wcześniejszych obserwacji wynikało, że ze względu na porowatość badany materiał cechuje dobra jakość. Niektóre technologie wytwarzania elementów z kompozytów polimerowych wymagają stosowania obróbki mechanicznej. W ostatnich latach pojawiły się sterowane numerycznie urządzenia do przecinania różnych materiałów strumieniem wody pod bardzo wysokim ciśnieniem. Metodę tę zastosowano do wstępnego kształtowania próbek do prób wytrzymałości wycinanych z płyt epoksydowo-szkłanych. Rysunki 3 i 4 przedstawiają typowe mikrostruktury powierzchni wytworzonych przez cięcie wodą, wskazują na utworzenie nierówności spowodowanych przez wylamywanie i wrywanie pojedynczych włókien oraz debonding. Wielkość nierówności powierzchni przypomina powierzchnie po zwykłym cięciu mechanicznym. W wykonanych elementach występowały liczne rozwarstwienia brzegowe (rys. 5) i wewnętrzne (rys. rys. 6-8), które posłużyły przedstawieniu metody oceny jakości na podstawie wizualnych obserwacji defektów. Przedyskutowano również problem dostosowywania kryteriów akceptacji defektów widocznych gołym okiem do warunków użytkowania i wymagań pod względem trwałości i bezpieczeństwa.

Słowa kluczowe: kompozyty polimerowe, cięcie kompozytów polimerowych, defekty w kompozytach

SOME CRITERIA FOR ACCEPTING DEFECTS IN COMPOSITES AS APPLIED TO LAMINATE CUT WITH A WATER-JET

Structural components made of polymer composites may have built-in defects that have arisen during manufacturing operations. A list of such defects is presented along with two methodologies used in evaluating quality of a product. The first of them involves measurements of porosity (Figs. 1, 2) while the second one enables an inspector to assess type, size and severity of defects with a naked eye. An example is presented where porosity measurements failed to identify actual condition of a material. It was visual inspection that proved to be reliable in this case. Some manufacturing methods for composite components involve machining operations. Nowadays they are usually performed using hydrodynamic machining. The method was evaluated by the present author in preparing strength test specimens cut out from glass-epoxy plates. Figures 3 and 4 show typical images of resulting surfaces. The irregularities can be identified as single broken or pulled out fibres and debonding spots. The surface roughness height is comparable to that left by conventional cutting. Typical defects produced by a water jet can be seen in Figure 5 as the side ones and in Figures 6-8 as those arising in the bulk material. The defects of the two types served as a basis for putting forward a method of visual inspection for composite quality assessment. The method is flexible enough to take account of particular service conditions and durability/safety requirements set for a component to be fabricated.

Key words: polymer-matrix composites, cutting of polymer composites, defects in composites

WPROWADZENIE

Obecnie w przemyśle stosuje się kilkanaście technologii wytwarzania elementów z kompozytów polimerowych (KP). Do najważniejszych zalicza się laminowanie ręczne i natryskowe, nawijanie na rdzeń stały lub ruchomy, odlewanie odśrodkowe, RTM, SMC, BMC, formowanie próżniowe i próżniowo-ciśnieniowe, przeciąganie, przeciąganie z nawijaniem itd. [1, 2]. Żadna technologia nie umożliwia wytwarzania wyrobów o strukturze idealnej, tj. pozbawionej nieprawidłowości.

W pracy [3] podano szczegółową klasyfikację defektów technologicznych występujących w KP. Obejmuje ona:

- niekompletną impregnację włókien przez preparację powierzchniową,
- niedostateczne lub nierównomierne utwardzenie żywicy,
- niepełne zwilżanie włókien przez żywicę, co powoduje słabą adhezję włókien i żywicy,
- pęcherze (powietrza i różnych substancji lotnych),
- pustki, tj. obszary pomiędzy włóknami, których żywica nie wypełniła,

- rozwarstwienia - płaskie nieciągłości pomiędzy warstwami równoległe do powierzchni warstw, które mogą powstawać w procesie wytwarzania lub (co jest najczęstsze) pod wpływem obciążeń,
- luźne, wystające końce włókien,
- uszkodzone lub nawet zerwane włókna,
- pofałdowanie pasm rowingu,
- pęknięcia osnowy,
- lokalny brak wzmocnienia w osnowie.

Przytoczona lista defektów nie jest kompletna i powinna być uzupełniona o:

- nieciągłości w zewnętrznych warstwach ochronnych oraz ich niedostateczną grubość (dotyczy tzw. kompozytów chemoodpornych),
- skurcze związane z naprężeniami własnymi,
- nierównomierne napięcie włókien,
- nierównomierne zabarwienie powierzchni zewnętrznej elementów o wymaganej dużej estetyce.

Defekty mogą wywierać wpływ na właściwości materiału już od momentu ich powstania [4, 5]. Niekiedy oddziaływanie defektów wywołuje zauważalne skutki dopiero po upływie pewnego okresu.

Dotychczas najczęściej uwagi poświęcano relacjom pomiędzy zawartością pustek (stopniem porowatości) V_p w materiale a jego właściwościami i związaną z tym jakością. Pustki obniżają wytrzymałość materiału [4, 5]. Wzrost V_p o 1% obniża wskaźniki wytrzymałości kompozytu o kilka procent. W kompozytach polimerowych stopień porowatości nie powinien przekraczać 5% [5]. Wśród przyczyn ujemnego wpływu porowatości na wskaźniki wytrzymałości wymienia się zjawisko efektu wielkości Weibulla [6]. Większa porowatość zwiększa prawdopodobieństwo wystąpienia dużych defektów. W rurociągach i zbiornikach porowatość ułatwia wnikanie substancji chemicznych z instalacji do strefy warstw nośnych konstrukcji.

Purslow [7] zaproponował podany w tabeli 1 system oceny jakości kompozytów polimerowych oparty na wartości stopnia porowatości materiału. Choć klasyfikacja Purslowa odnosi się do kompozytów jednokierunkowych, od dawna służy ona jako wzór dla inżynierskich kryteriów oceny polimerowych kompozytów konstrukcyjnych o złożonej strukturze.

TABELA 1. Klasyfikacja jakości kompozytów polimerowych na podstawie stopnia porowatości [7]

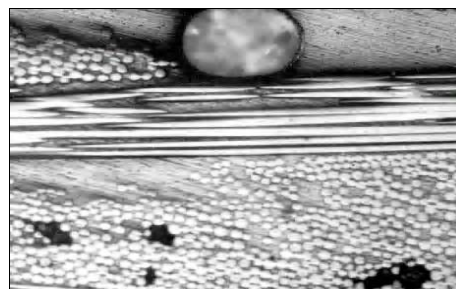
TABLE 1. Quality classification of polymer composites as based on the porosity level [7]

Stopień porowatości V_p , %	Klasa jakości
$V_p < 0,2\%$	Znakomita
$0,2\% \leq V_p < 0,5\%$	Bardzo dobra
$0,5\% \leq V_p < 1\%$	Dobra
$1\% \leq V_p < 2\%$	Średnia
$2\% \leq V_p < 5\%$	Przeciętna
$5\% \leq V_p$	Niska

Metody określania stopnia porowatości można podzielić na:

- nieniszczące - np. ultradźwiękowa, radiograficzna,
- niszczące - pomiary gęstości, absorpcji wody [5], mikroskopia ilościowa [8].

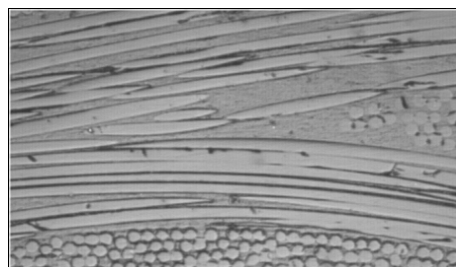
Dla potrzeb badań materiałowych najlepsza jest metoda mikroskopowa (PN-EN ISO 7822-C [9]), polegająca na określeniu pod mikroskopem udziału powierzchniowego pustek traktowanych jak odrębna faza w materiale. W przemyśle porowatość określa się przeważnie na podstawie pomiarów gęstości (PN-EN ISO 7822-A i B, ASTM D 2584), które zapewniają najkorzystniejszą relację pomiędzy kosztem oraz dokładnością i szybkością realizacji pomiaru [5]. Na rysunku 1 przedstawiono mikrostrukturę kompozytu winyloestrowo-szklanego (wzmocnionego tkaniną) o dużej porowatości ($V_p \approx 7\%$), utworzonej przez pęcherze gazowe uwięzione w żywicy i niewypełnione obszary między włóknami.



Rys. 1. Mikrostruktura kompozytu winyloestrowo-szklanego wzmocnionego tkaniną. Materiał o dużej porowatości ($V_p \approx 7\%$)

Fig. 1. Structure of a vinyl ester glass-fabric reinforced composite. The high porosity material $V_p \approx 7\%$

Rysunek 2 przedstawia mikrostrukturę laminatu epoksydowo-szklanego TSE-2 o wzmocnieniu z tkaniny. Materiał ten cechuje nieduża porowatość ($V_p < 1\%$). Według kryteriów Purslowa (tab. 1), laminat TSE-2 jest materiałem o dobrej jakości.



Rys. 2. Typowy obraz mikrostruktury badanego laminatu TSE-2. Stopień porowatości jest niewielki ($V_p < 1\%$)

Fig. 2. Typical structure of the tested TSE-2 laminate. Low porosity, $V_p < 1\%$

Stopień porowatości jest jednym z częściej stosowanych wskaźników jakości wyrobów z kompozytów polimerowych. Inna koncepcja oceny jakości elementu

bazuje na obserwacjach defektów widocznych w materiale bez użycia przyrządów optycznych. Podstawą oceny materiału wytworzonego przy zastosowanej technologii jest rodzaj, rozmiary i nasilenie defektów. Takie podejście jest opisane między innymi w amerykańskich normach ASTM D 2562-94 [10] i ASTM D 2563-94 [11].

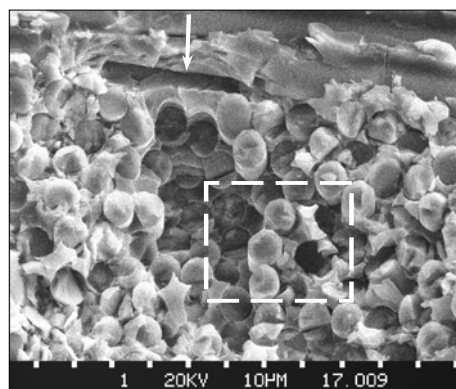
Zakładając, że nie jest możliwe wytworzenie materiału pozbawionego defektów, należy ustalić kryteria akceptacji wad technologicznych w wykonanych elementach konstrukcyjnych. Oceniając materiał na podstawie obserwacji dokonanych okiem nieuzbrojonym, wyróżnia się z reguły co najmniej kilkanaście różnych typów wad, z których każda jest zdefiniowana i opisana pod względem dopuszczalnych rozmiarów oraz nasilenia występowania. Zagadnienie to zostało przedstawione na przykładzie oceny jakości próbek do próby rozciągania wykonanych z płyty epoksydowo-szklanej z laminatu o oznaczeniu handlowym TSE-2 (wzmocnionej tkaniną). Zastosowano technologię kształtowania próbek przez wycinanie za pomocą strumienia wody pod dużym ciśnieniem ($p \geq 400$ MPa). Od kilku lat pojawiają się w kraju profesjonalne, sterowane numerycznie urządzenia do cięcia wodnego. Umożliwiają one wycinanie nawet skomplikowanych krzywoliniowych kształtów w płytach o grubości wynoszącej od kilku do kilkudziesięciu milimetrów wykonanych m.in. z metali i materiałów ceramicznych. Przypuszczano, że cięcie wodne umożliwi stosunkowo proste wykonanie próbek wosłkowych do próby rozciągania. Przeprowadzając próbę rozciągania próbek prostopadłościennych z przyklejonymi nakładkami do mocowania w uchwytach maszyny wytrzymałościowej, trudno jest uniknąć zniszczenia znacznej części badanej populacji próbek w pobliżu zamocowań. Według niektórych danych, nawet 50% próbek może ulec zniszczeniu w taki sposób, w zasadzie dyskwalifikujący przydatność uzyskanych wyników do oceny właściwości materiału. Przyczyną niepożądanych lokalizacji miejsc dekohezji są trudne do uniknięcia koncentracje naprężeń przy przejściu bazy pomiarowej w część uchwytową (o zwiększonej grubości). Nadanie próbkom kształtu wosłkowego powinno zmniejszyć wspomniane koncentracje, powodując obniżenie liczby próbek ulegających zniszczeniu w bezpośrednim sąsiedztwie części służącej do mocowania.

Celem opisanych badań było dokonanie oceny wytworzonych elementów (próbek) na podstawie rozmiaru i nasilenia powstałych uszkodzeń. Uzyskane rezultaty wykorzystano do szerszego przedstawienia problemu oceny jakości wytworzonego materiału na

podstawie wizualnej oceny defektów według koncepcji opisanej w normie ASTM D 2563-94.

OCENA MIKROSTRUKTURY MATERIAŁU W STREFIE CIĘCIA

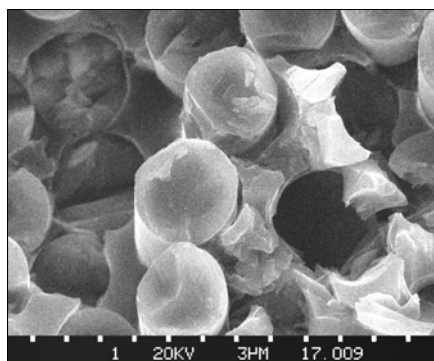
W przeglądowej pracy poświęconej przecinaniu kompozytów polimerowych [12] metoda cięcia strumieniem wody pod bardzo wysokim ciśnieniem została całkowicie pominięta. W monografii [2] tej metodzie poświęcono zaledwie kilka wierszy. Reyne podaje, że cięcie strumieniem wody cechuje dobra jakość powstałej powierzchni kompozytu i nienajlepsza dokładność wymiarowa wytworzonego elementu. Jest to zrozumiałe, zważywszy na naturę „narzędzia tnącego”. Ze względu na spodziewany szeroki przedział tolerancji wymiarowych elementu wyciętego strumieniem wody zakładano konieczność obróbki wykańczającej, przynajmniej w obszarze bazy pomiarowej próbek. Strumień wody po wejściu w materiał ulega stopniowemu poszerzeniu, w wyniku czego przekrój poprzeczny próbek przypominał trapez. Różnica szerokości pasów wycinanych z płyty mierzona na powierzchni wierzchniej i spodniej wynosiła około $0,5 \div 0,8$ mm przy grubościach 4, 8 i 13,5 mm. Dlatego przyjęto, że dalsza obróbka mechaniczna części pomiarowej jest nieunikniona. Na rysunku 3 przedstawiono mikroskopową powierzchnię przeciętą w obszarze pozbawionym uszkodzeń makroskopowych. Charakterystyczne przelomy wielu włókien wskazują, że uległy one zniszczeniu wskutek zginania. Widoczne są głębokie otwory po wyrwanych włóknach oraz głęboka szczelina (oznaczona strzałką). Kontur przerywany wskazuje fragment przedstawiony w powiększeniu na rysunku 4, gdzie widać między innymi odspojenie niektórych włókien oraz ślady wskazujące na złamanie poszczególnych włókien.



Rys. 3. Obraz skaningowy powierzchni po cięciu wodnym
Fig. 3. Scanning micrograph of the water-jet cut surface

Nasilenie debondingu (trudnego do uniknięcia przy przecinaniu kompozytów poprzecznie do włókien)

było umiarkowane. Należy podkreślić, że w zasadzie nie ma doniesień na temat ewentualnego stosowania kryteriów oceny stanu materiału opartych o badanie nasilenia występowania debondingu. W wielu opracowaniach debonding jest zaliczany do pustek określanых wspólnym mianem porowatości [5]. Jest to defekt o rząd wielkości mniejszy od pęknięć poprzecznych uwzględnianych w definicjach stanu niebezpiecznego FPF (*First Ply Failure*) stosowanych w projektowaniu [13]. Pęknięcia FPF naruszają ciągłość poszczególnych warstw, których typowa grubość wynosi $0,1 \div 0,5$ mm.



Rys. 4. Powiększony fragment z rysunku 3
Fig. 4. Enlarged fragment of micrograph 3

OCENA JAKOŚCI KOMPOZYTU NA PODSTAWIE BADAŃ MAKROSKOPOWYCH

Ważnym sposobem oceny jakości wyrobu z materiału kompozytowego są pomiary wielkości charakteryzujących jego geometrię (wymiary liniowe i kątowe). Zasady ich wykonywania są znane, a przedziały tolerancji wymiarowych można określić np. analizując uwarunkowania techniczne lub korzystając z dokumentacji istniejących podobnych wyrobów (aprobatay techniczne, normy, wymagania homologacyjne, katalogi producentów itd.). Znacznie bardziej interesujący problem stanowi ocena jakościowa i ilościowa defektów materiału widocznych gołym okiem (bez stosowania urządzeń optycznych) oraz kryteria ich akceptacji. Liczba publikacji dotyczących tego zagadnienia jest niewielka, dlatego cenny wzór postępowania może stanowić procedura opisana w normie ASTM D 2563-94 [11]. Lista opisanych tam defektów podlegających ocenie wizualnej (okiem nieuzbrojonym) obejmuje 25 przypadków. Dla każdego typu defektu przewidziano cztery poziomy akceptowalności - trzy zdefiniowane w normie w sposób niewątpliwie uwzględniający wpływ defektu na zniszczenie elementu oraz czwarty - do indywidualnego określenia w zależności od specyfiki urządzenia itp. Zostaną omówione tylko niektóre z opisanych defektów, w szczególności występujące

w badanym materiale po wykonaniu cięcia strumieniem wody pod wysokim ciśnieniem.

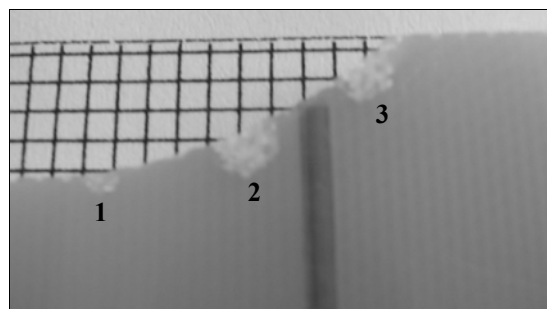
Pierwszym defektem opisanym w normie ASTM D 2563 jest *chip*, określony jako niewielki odprysk przy brzegu lub na powierzchni. Na poziomie akceptacji oznaczonym jako I (*level I*) wyklucza się możliwość wystąpienia odprysków. Poziom II dopuszcza defekty *chip* o wymiarze do 3 mm, a poziom III - do 6,5 mm. W ocenianych próbkach występowały nieliczne odpryski o rozmiarach spełniających kryteria poziomu II.

Pęknięcia *crack* przebiegające na wskroś (przez całą grubość ścianki) są niedopuszczalne na wszystkich trzech poziomach. W badanym materiale takie defekty nie występowały.

Pęknięcia powierzchniowe (*crack surface*) wyklucza się na poziomie I. Na poziomie II są dopuszczalne, ale o długości nieprzekraczającej 3 mm, a na poziomie III o długości do 6,5 mm. W badanym materiale takie defekty powierzchniowe nie występowały.

Cienkie pęknięcia *crazing* (*fine cracks*) występujące na powierzchni lub pod powierzchnią nie są dopuszczalne na poziomie I. Na poziomie II ich długość nie może przekraczać 13 mm, a na poziomie III - 25 mm. W badanym laminacie nie było takich defektów.

Rozwarstwienia brzegowe (*delamination, edge*), określane jako widoczna separacja warstw przy brzegu elementu, są niedopuszczalne na poziomie I. Na poziomie II ich największy rozmiar nie może przekraczać 3 mm, a na poziomie III - 6,5 mm. W badanym laminacie występowały rozwarstwienia brzegowe o różnych rozmiarach (rys. 5). Ponieważ krok siatki pomiarowej widocznej na fotografii wynosi 2 mm, jest oczywiste, że rozwarstwienie oznaczone numerem 1 spełnia wymagania poziomu II, a rozwarstwienia 2 i 3 - wymagania poziomu III.



Rys. 5. Rozwarstwienia przy brzegu elementu o grubości 4 mm. Odległość linii siatki wynosi 2 mm
Fig. 5. Delamination seen at the side of a 4 mm thick sample. The grid lines are spaced by 2 mm

Rozwarstwienie wewnętrzne (*delamination, internal*) jest niedopuszczalne na wszystkich opisanych poziomach akceptacji. W badanym materiale takie rozwarstwienia nie występowały.

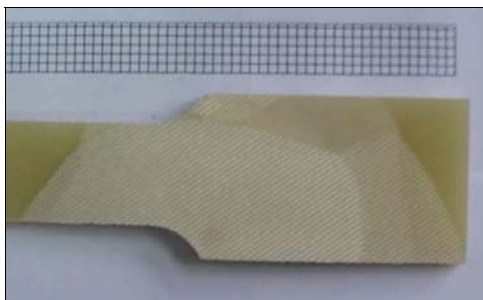
Obce wtrącenia metaliczne (*foreign inclusion (metallic)*) są niedopuszczalne na poziomie I, a w zastosowaniach elektrotechnicznych również na poziomie II i III. W pozostałych zastosowaniach na poziomie II ogranicza się rozmiar do 0,8 mm oraz gęstość występowania do $1/0,09 \text{ m}^2$. Na poziomie III rozmiar wtrąceń nie może przekraczać 1,5 mm przy zagęszczaniu identycznym jak na poziomie II. Kryteria akceptacji wtrąceń niemetalicznych są podobne jak metalicznych. W badanym materiale nie występowały żadne wtrącenia obce.

Widoczne pojedyncze pęcherze gazowe (*air bubble, void*) są niedopuszczalne na poziomie I. Na poziomie II ogranicza się ich średnicę do 1,5 mm przy zagęszczeniu do $2/\text{in}^2$, a na poziomie III - średnicę do 3 mm przy zagęszczeniu do $4/\text{in}^2$. W badanym materiale nie występowały.

Defekt *blister* (przypominający pęcherz naskórny) stanowi owalne wyniesienie z wyraźnym brzegiem na powierzchni elementu. Na poziomie I niedopuszczalny, dla poziomu II dopuszczalna średnica tego defektu wynosi 3 mm, a na poziomie III - 6,5 mm. Nie dopuszcza się przekroczenia pola tolerancji wymiarowej grubości w miejscu defektu. W badanym materiale nie było takich defektów. Defekty *blister* są typowe dla elementów kompozytowych używanych w środowisku wodnym (jednostki pływające), ale wtedy powstają podczas eksploatacji i w związku z tym są uszkodzeniami, a nie defektami technologicznymi.

Przytoczona lista nie obejmuje nawet połowy typów defektów opisanych w omawianej normie. Na poziomie akceptacji I nie dopuszcza się występowania żadnego z opisanych 25 defektów.

Niewątpliwie defektem dominującym były rozwarstwienia brzegowe o rozmiarach osiagających nawet $50 \div 100 \text{ mm}$, tj. znacznie przekraczające graniczną wielkość dla poziomu III (rys. rys. 6 i 7).



Rys. 6. Duże rozwarstwienia elementu o grubości 4 mm. Skok linii siatki wynosi 2 mm

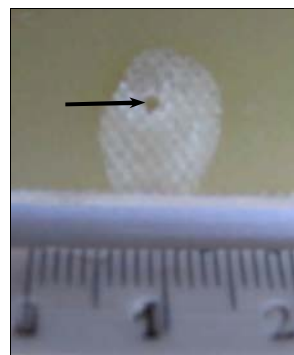
Fig. 6. Severe delamination seen in a 4 mm thick sample. The grid spacing is 2 mm



Rys. 7. Duże rozwarstwienia elementu o grubości 4 mm

Fig. 7. Severe delamination seen in a 4 mm thick sample

Typowym miejscem inicjacji rozwarstwień były punkty, w których strumień przebijał płytę (rys. 8). Strzałka na rysunku 8 wskazuje miejsce działania strumienia, który jednakże w tym przypadku nie spowodował pełnej perforacji płyty o grubości 4 mm. Liczby na widocznej linijce oznaczają centymetry.



Rys. 8. Rozwarstwienie utworzone podczas przebijania płyty przez strumień wody

Fig. 8. The water-jet caused a delamination around the point of perforation

Z punktu widzenia praktyki inżynierskiej szczególnie interesujące jest ustalenie kryteriów umożliwiających dostosowanie przyjętego poziomu akceptacji defektu do specyfiki danego zastosowania. Dane na ten temat publikuje się niestety bardzo rzadko. W opracowaniu [14] zamieszczono dokumenty ilustrujące praktykę stosowania normy ASTM D 2563 (w jej wersji wcześniejszej sprzed 1994 roku) w przemyśle petrochemicznym. Według przytoczonego tam dokumentu koncernu TOTAL (z grudnia 1983 r.), 100% używanych w firmie elementów kompozytowych podlega kontroli wizualnej wg wspomnianej normy. Powierzchnia wewnętrzna rur kompozytowych musi spełniać wymagania określone dla poziomu I, a powierzchnia zewnętrzna oraz inne elementy - wymagania poziomu II. W opracowaniu [14] przytoczono również podobny dokument wydany w 1980 roku przez Société Nationale Elf Aquitaine. Wynika z niego, że rury kompozytowe używane w firmie muszą spełniać wymagania kontroli wizualnej podane dla poziomu II.

W przepisach normujących zasady konstruowania, wytwarzania i kontroli stacjonarnych zbiorników ciśnieniowych z kompozytów polimerowych [15] podano, że powierzchnie mające kontakt z medium przechowy-

wanym w zbiorniku muszą spełniać wymagania ASTM D 2563 określone dla poziomu I, a pozostałe powierzchnie - kryteria poziomu II. Można wskazać inne normy zagraniczne, w których określa się zasady kwalifikacji wyrobów kompozytowych i połączeń w sposób podobny do opisanego w omawianej normie ASTM D 2563. Z punktu widzenia mechaniki kompozytów polimerowych i inżynierii niezawodności szczególnie interesujące jest ustalenie kryteriów akceptacji defektów oraz zasad ich dostosowywania do specyficznych warunków użytkowania danej konstrukcji. Z przytoczonych przykładów można odnieść wrażenie, że głównym obszarem stosowania omawianych koncepcji oceny jakości materiału na podstawie defektów widocznych okiem nieuzbrojonym są rurociągi, zbiorniki itp. elementy instalacji. Chociaż filozofia postępowania przyjęta w ustalaniu kryteriów akceptacji opisanych defektów nie jest w analizowanych normach przytoczona *explicite*, można się jej domyślać. Można przyjąć, że wymagania określone dla poziomu I odnoszą się między innymi do:

- elementów przenoszących obciążenia, których uszkodzenie może spowodować poważne uszkodzenie lub zniszczenie konstrukcji, w szczególności związane z zagrożeniem bezpieczeństwa lub dużymi stratami (konstrukcje lotnicze, niektóre elementy wyposażenia przemysłowego, przenośne zbiorniki wysokociśnieniowe),
- wyczynowego sprzętu sportowego najwyższej jakości, urządzeń specjalnych (wojskowych),
- próbek do badań laboratoryjnych (z wyjątkiem pobieranych bezpośrednio z elementów lub płyt kontrolnych, które powinny możliwie wiernie odzwierciedlać cechy i właściwości wyrobu).

Z pewnością większość elementów kompozytowych określanych jako zaawansowane technologicznie (tzw. wyroby *high performance*, *haute technology* [2]) musi spełniać kryteria poziomu I.

Wymagania określone dla poziomu II powinny dotyczyć większości elementów przenoszących obciążenia użytkowe i zaliczanych do kategorii kompozytów powszechnego użytku. Można przypuszczać, że wymagania określone dla poziomu III przewidziano dla elementów słabo obciążonych i niemających dużego znaczenia dla niezawodności konstrukcji (np. osłony i obudowy, elementy dekoracyjne itp.). W normie ASTM D 2563 przewidziano jeszcze dodatkowy IV poziom akceptacji defektów, pozostawiając ustalenie szczegółowych warunków do uznania użytkownika.

Podobne podejście do zagadnienia oceny defektów przyjęto w normie ASTM D 2562 [10], która odnosi się do elementów wykonywanych metodą prasowania lub przy użyciu technologii, takich jak RTM i zbliżone. W normie tej opisano wprawdzie tylko 17 typów defektów (w porównaniu do 25 ujętych w ASTM D 2563), ale kryteria ich oceny pod względem wymiarów i nasilenia występowania są podobne.

PODSUMOWANIE

Defekty technologiczne powstałe w materiale podczas wytwarzania wpływają na jego właściwości doraźne i długookresowe. Przykładem tego może być zależność doraźnej wytrzymałości na ścinanie międzywarstwowe oraz ściskanie od porowatości materiału [4, 5]. Metody określania stopnia porowatości V_p kompozytów polimerowych są znormalizowane [9] i od lat wielkość ta pełni rolę miary jakości w inżynierskiej ocenie niektórych elementów konstrukcyjnych. Pomimo to ciągle daje się odczuć brak zdefiniowanych, opisanych i upowszechnionych zasad wykorzystywania wartości stopnia porowatości do oceny jakości wytwarzanych elementów (poza propozycją Purslowa z 1984 roku).

Pod tym względem lepiej przedstawia się poziom rozwoju metod oceny materiału na podstawie defektów widocznych okiem nieuzbrojonym, których rodzaje, dopuszczalne rozmiary i nasilenie występowania określone w normach ASTM D 2562 i ASTM D 2563 stanowią podstawę kwalifikowania materiałów. Podobne sposoby oceny jakości materiału opisano w niektórych normach branżowych (np. w BS 4994 [16]).

W ocenianych elementach, wykonanych metodą wycinania z płyt za pomocą strumienia wody pod wysokim ciśnieniem, z defektów opisanych w normie ASTM D 2563 występowały głównie rozwarstwienia brzegowe. Defekty takie mogą w niektórych laminatach inicjować rozwój rozwarstwień aż do zniszczenia elementu. W pracy [17] opisano badania rozwoju delaminacji w kompozycie epoksydowo-węglowym $[(\pm 30)_2, 90]_s$, cechującym się skłonnością do powstawania efektu brzegowego. Podczas rozciągania próbek ze sztucznymi szczelinami międzywarstwowymi z folii teflonowej delaminacja propagowała w zakresie wartości odkształcenia osiowego od około 0,25 do 0,7%. Do wartości odkształcenia równej 0,55% propagacja była powolna. Rozwój rozwarstwień w próbkach bez szczelin początkowych występował w zakresie odkształceń $\varepsilon \approx 0,83 \div 0,89\%$, to jest znacznie później, ale przebiegał bardziej gwałtownie. Przykład ten pokazuje jedno z możliwych niebezpieczeństw związanych z występowaniem rozwarstwień brzegowych pochodzenia technologicznego.

Omawiana problematyka stanowi temat publikowanych prac badawczych [18] związanych z doskonaleniem technologii oraz metod kontroli jakości produkcji, ale danych na ten temat jest niewiele. Jedną z przyczyn opracowania norm ASTM D 2562, ASTM D 2563 itp. przepisów jest przypuszczalnie wprowadzanie w niektórych dziedzinach (szczególnie w lotnictwie) koncepcji *damage tolerance design*, zgodnie z którą występowania defektów technologicznych i uszkodzeń spowodowanych przez obciążenia użytkowe nie da się uniknąć, ale należy umieć je kwantyfikować i przewidywać moment

osiągnięcia rozmiaru kwalifikującego element do naprawy.

Należy podkreślić, że podobne, stosunkowo mało wyrafinowane pod względem zaangażowanych środków technicznych sposoby stosuje się podczas okresowych inspekcji konstrukcji lotniczych, mających na celu wykrycie zaistniałych w poszyciu uszkodzeń uderzeniowych [19]. Może wydawać się dziwne, że zasadniczym środkiem detekcji uszkodzeń uderzeniowych w poszyciu samolotu ATR 72 nie jest układ do ultradźwiękowego skanowania elementów powłokowych, ale nieuzbrojone oko specjalnie dobrane i przeszkolone inspektora, postępującego ściśle według opracowanej procedury.

Oceniane elementy z wadami należały do pierwszej partii wykonanych próbek wycinanych strumieniem wody. Następne partie wprowadziła lepsza jakość, ale pierwsza partia próbek z licznymi defektami dobrze nadawała się do przedstawienia problematyki jakości materiału kompozytowego w funkcji rodzaju i nasilenia defektów technologicznych.

Można mieć nadzieję, że przedstawione sposoby oceny jakości elementów kompozytowych upowszechnią się w praktyce inżynierskiej i będą w przyszłości wyznaczać jedną z płaszczyzn dyskusji pomiędzy projektantami, wytwórcami i użytkownikami elementów wykonywanych z polimerowych kompozytów konstrukcyjnych.

LITERATURA

- [1] Boczkowska A., Kapuściński J., Puciłowski K., Wojciechowski S., Kompozyty, Oficyna Wyd. Pol. Warszawskiej, Warszawa 2000.
- [2] Reyne M., Technologie des composites, Wyd. 3, HERMES, Paryż 1998.
- [3] Ghosh S.K., Physical Defects in Composite Materials Processing, Proc. of the Int. Conf. Advanced Materials, Wyd. IIT International 1989, 171-183.
- [4] Potter R.T., Strength of composites, Concise Encyclopedia of Composite Materials, Pergamon Press 1989, 248-254.
- [5] Krawczak P., Structure des composites: porosité des composites fibres/resine, Opracowanie z Ecole des Mines de Douai we Francji, 1996, 1-50.
- [6] Belzowski A., Efekt wielkości w materiałach kompozytowych, Stan zagadnienia, Górnictwo Odkrywk. 2003, 4-5, 25-29.
- [7] Purslow D., On the optical assessment of the void content in composite materials, COMPOSITES 1984, 15, 3, 207-210.
- [8] Summerscales J. (ed.) Microstructural characterisation of fibre-reinforced composites, Woodhead 2000.
- [9] PN-EN ISO 7822: 2002. Tworzywa sztuczne wzmocnione włóknem szklanym. Oznaczanie zawartości pustych przestrzeni. Ubytek przy spalaniu, kruszenie mechaniczne i statystyczne metody badań.
- [10] ASTM D 2562 D-94, Standard Practice for Classifying Visual Defects in Parts Molded from Reinforced Thermosetting Plastics. 1994.
- [11] ASTM D 2563 D-94, Standard Practice for Classifying Visual Defects in Glass-Reinforced Plastic Laminate Parts. 1994.
- [12] Gordon S., Hillery M.T., A review of the cutting of composite materials, Proc. Instn. Mech. Eng., Part L: J. of Materials: Design and Applications 2003, 217, 35-45.
- [13] Belzowski A., O praktycznych aspektach badań nad kinetyką rozwoju pęknięć poprzecznych w kompozytach warstwowych, Mat. I Konferencji Polimery i kompozyty konstrukcyjne, Kozubnik 95, SIMP, Gliwice 1995, 95-101.
- [14] Le plastique armé, application au matériel tubulaire. Chambre Syndical de la Recherche et de la Production du Pétrole et du Gaz Naturel, Paryż 1986.
- [15] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section X, Fiber-Reinforced Plastic Pressure Vessel 1992.
- [16] BS 4994 Specification for design and construction of vessels and tanks in reinforced plastics 1987.
- [17] Klumpp P.A., Schnack E., Asymmetrical Growth of Edge Delamination in CFRP Tensile Specimens, Inelastic Deformation of Composite Materials, Proc. IUTAM Symp., Troy/New York 1990, 741-759.
- [18] Castaing P., Dessarthe A., Lemasçon A. i inni, Influence of Various Defects on the Quality and the Durability of Composite Pipes, Proceedings of ICCM-12, Paryż 1999, CD, 10 s.
- [19] Tropis A., Thomas M., Bounie J.L., Lafon P., Certification of the composite outer wing of the ATR 72, Proc. Instn. Mech. Eng., Part G: J. of Aerospace Engineering 1994, 209, 327-339.

Recenzent
Henryk Leda