

Radosław BIELAWSKI^{a)*}, Paweł PISKUR^{b)}

^{a)}Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa, Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej, Zakład Podstaw Konstrukcji, ul. Nowowiejska 24, 00-665 Warszawa

*Centrum Badań Molekularnych i Makromolekularnych PAN, ul. Sienkiewicza 112, 90-363 Łódź

e-mail: bielawski@meil.pw.edu.pl

^{b)}Akademia Marynarki Wojennej, Wydział Mechaniczno-Elektryczny, Instytut Elektrotechniki i Automatyki Okrętowej, ul. Śmidowicza 69, 81-127 Gdynia

Degradacje mechaniczne kompozytów polimerowych wzmocnionych włóknem ciągłym w aspekcie ich połączeń nitonakrętkowych

Streszczenie: W pierwszej części artykułu przedstawiano wiedzę teoretyczną związaną z degradacjami mechanicznymi kompozytów polimerowych wzmocnionych włóknem ciągłym oraz ich połączeń mechanicznych. Przedstawiono charakterystykę degradacji mechanicznych w kompozytach włóknistych oraz opisano typowe degradacje mechaniczne występujące w tego typu materiałach, do których należą: imperfekcje spoiwa, delaminacje, zniszczenie włókien. Opisano również modele zniszczeń połączeń mechanicznych kompozytów. W ramach tych treści przedstawiono przyczyny uszkodzeń oraz mechanizmy ich powstania. W drugiej części publikacji, w oparciu o badania własne, przedstawiono wyniki w postaci uszkodzeń kompozytów w połączeniu nitonakrętkowym, w oparciu o dwa typy połączeń – pojedyncza i podwójna zakładka. Porównane zostały postacie zniszczeń oraz wykazano różnice pomiędzy nimi.

Słowa kluczowe: połączenie nitonakrętkowe, degradacja mechaniczna, kompozyty polimerowe.

DEGRADATION OF FIBER REINFORCED POLYMERS (FRP) IN THE ASPECT OF MECHANICAL CONNECTIONS

Abstract: The first part of the paper presents the theoretical knowledge related to the mechanical degradation of Fiber Reinforced Polymers (FRP) composites and their mechanical connections. The characteristics of mechanical degradation in fibrous composites are described and typical mechanical degradations occurring in these materials, including: matrix imperfections, delamination and fibres destruction. It also describes modes of damage mechanical joints of composites. This section presents the causes of the damage and the mechanisms of destructions. In the second part of the publication shows composite damage results in a rivet nut connections, based on two connection types – single and double tab. Failure modes were compared and showed differences between them.

Keywords: rivet nut connection, mechanical degradations, polymer composites.

1. WSTĘP

Kompozyty polimerowe wzmocnione włóknami ciągłymi, określane w literaturze anglojęzycznej jako – FRP (ang. *Fiber Reinforced Polymer*) podatne są na procesy degradacji, które na ogół powodują niekorzystne zmiany właściwości mechanicznych oraz innych charakterystyk tych materiałów. Taki proces może skutkować zniszczeniem struktury laminatu. Szczególnie ważne wydaje się to być dla przemysłu lotni-

czego, gdzie od niezawodności konstrukcji lotniczej zależy życie wielu osób.

Zgodnie z przyjętą w literaturze przedmiotu definicją degradacją kompozytów nazywa się częściowy rozkład polimeru na fragmenty o dużych, ale mniejszych od wyjściowego polimeru masach cząsteczkowych [1]. Jest on zatem procesem zmian strukturalnych będącym wynikiem przemian fizycznych lub chemicznych zachodzących w polimerowych materiałach kompozytowych pod wpływem działania czyn-

ników zewnętrznych wywołujących pogorszenie pierwotnych własności tych materiałów [2].

Celem publikacji jest przedstawienie aspektów teoretycznych związanych z degradacjami mechanicznymi kompozytów polimerowych wzmocnionych włóknem ciągłym oraz ich połączeń mechanicznych. Na podstawie badań własnych, realizowanych próbą rozciągania statycznego połączeń mechanicznych (nitonakrętkowych) kompozytów FPR wzmocnionych włóknem szklanym dokonano także identyfikacji występujących typowych degradacji mechanicznych w tego typu złączach mogących znaleźć zastosowanie w konstrukcjach lotniczych.

Publikacja ta koresponduje i jest kontynuacją innych publikacji autora (oraz współautorów) [3, 4] dotyczących badań kompozytów polimerowych wzmocnianych włóknami szklanymi – GFRP (ang. *Glass Fibre Reinforced Plastic*) oraz metod ich łączenia, a także analiz skutków degradacji mechanicznych tego typu połączeń laminatów. W aspekcie zniszczeń ma ona charakter wstępnego rozpoznania problemu.

2. WYBRANE DEGRADACJE MECHANICZNE W LAMINATACH ZBROJONYCH WŁÓKNAMI CIĄGLYMI

2.1. CHARAKTERYSTYKA DEGRADACJI MECHANICZNYCH W KOMPOZYTACH

Degradacja mechaniczna jest jedną z trzech degradacji (oprócz fizycznej i chemicznej [5]), mających wpływ na obniżenie właściwości laminatów konstrukcyjnych. Zachodzi ona najczęściej pod wpływem zmiennych w czasie obciążeń: stałych, zmęczeniowych oraz udarnościowych i wiąże się ona ze zmianami struktury materiału o zasięgu lokalnym bądź dotyczy całego elementu konstrukcji. Zazwyczaj tego typu uszkodzenia w kompozytach wzmocnianych włóknami są trudne do wykrycia z uwagi na ich powstawanie na powierzchni poddanej obciążeniu, na stronie przeciwnej (zazwyczaj niewidocznej) do powierzchni obciążanej lub wewnątrz struktury laminatu [6].

W większości pozycji literatury odnoszącej się do laminatów FRP i ich niszczenia wyróżniamy charakterystyczne dla nich, najczęściej występujące po sobie etapy: pęknięcie osnowy, delaminacje związane z pękaniem adhezyjnym oraz pęknięcie włókien, które mogą prowadzić do całkowitego zniszczenia laminatu. Takie postaci uszkodzeń wywołują stopniową degradację właściwości mechanicznych kompozytów, co przejawia się w obniżeniu ich własności wytrzymałościowych oraz wartości współczynników tłumienia, zmianach gęstości materiału oraz innych charakterystyk [7].

2.2. IMPERFEKCJE SPOIWA

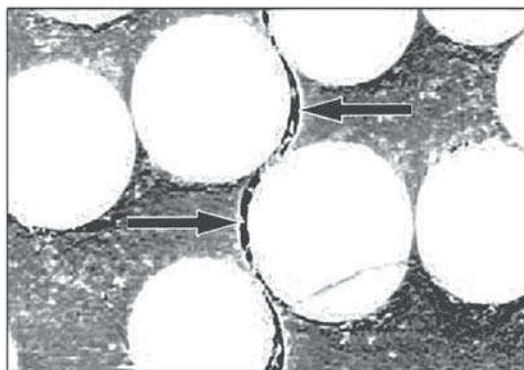
Imperfekcje spoiwa inicjowane są na granicy wzmocnienie-osnowa i dotyczą zjawisk występujących zarówno wewnątrz, jak i w strefie granicznej między warstwami. Tego typu uszkodzenia w postaci pęknięć zapoczątkowywane są zazwyczaj kumulacją rozproszonych mikropęknięć, które w literaturze anglojęzycznej określane są mianem *debonding* [8] (Rys. 1).

Pierwszy etap w procesie rozwoju uszkodzeń w laminatach polega na pękaniu osnowy wzdłuż kierunku ułożenia włókien w warstwach nieosiowych, w wyniku czego powstają tzw. szczeliny pierwotne. W następnej fazie zniszczenia następuje inicjacja pęknięć o kierunku poprzecznym do pęknięć pierwotnych leżących w warstwach (laminach) przylegających do warstwy uszkodzonej, które określa się szczelinami wtórnymi (ang. *secondary cracks*). Są one inicjatorem powstawania szczelin międzywarstwowych występujących początkowo na małym obszarze, które łącząc się ze sobą, powodują utratę spójności laminatu, a w konsekwencji jego rozwarstwienie.

W laminatach FRP szczeliny wewnątrzwarstwowe [9] spowodowane są poprzecznym pękaniem spoiwa. Tego typu defekty powstają na skutek rozciągania struktury kompozytu podczas obciążeń zmiennych w czasie, udarowych oraz zmian temperatury. Kierunek powstałych w ten sposób szczelin wewnątrz-

warstwowych jest prostopadły do kierunku ułożenia zbrojenia, które zazwyczaj powoduje zatrzymanie ich dalszej propagacji. Z reguły pęknięcia poprzeczne spoiwa laminatów nie wpływają znacząco na wytrzymałość struktury materiału, pod warunkiem że nie powodują uszkodzeń włókien.

zbrojenia. Przez rozdział warstw uważany jest zanik zdolności przenoszenia między nimi normalnych naprężeń rozciągających oraz międzywarstwowych naprężeń ścinających. Cechą charakterystyczną dla delaminacji (odróżniającą ją od innych rodzajów pęknięć) jest to, że w skali makroskopowej propaguje ona



Rys. 1. Pęknięcia warstwy granicznej w laminacie GFRP o średnicy włókien około $10\ \mu\text{m}$ [2]

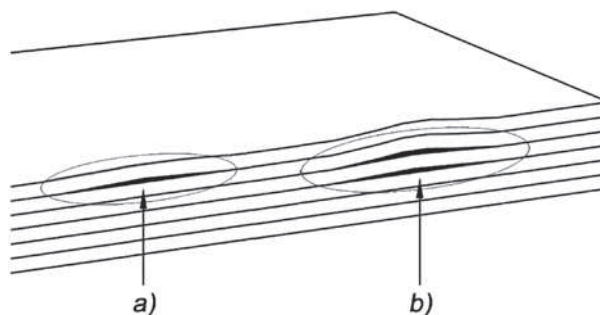
Fig. 1. Debonding in an GFRP laminate with a fiber diameter of approximately $10\ \mu\text{m}$ [2]

2. 3. DELAMINACJE KOMPOZYTÓW

Delaminacja, inaczej rozwarstwienie lub pęknięcie, w odniesieniu do kompozytów polimerowych o budowie warstwowej oznacza uszkodzenie, które w skali makroskopowej przejawia się rozdziałem sąsiadujących warstw

zazwyczaj między tymi warstwami, pomiędzy którymi została ona zapoczątkowana [10].

W kompozytach warstwowych delaminacja powstaje zazwyczaj między dwiema sąsiednimi (delaminacja na jednym poziomie) lub pomiędzy wieloma warstwami (delaminacja na wielu poziomach) laminatu (Rys. 2).



Rys. 2. Schemat występowania delaminacji w kompozycie warstwowym: a) na jednym poziomie b) na wielu poziomach

Fig. 2 Diagram of the occurrence of delamination in a layered composite: a) on one level b) on many levels

Poza taką klasyfikacją w literaturze dostępna jest inna, określająca lokalizację delaminacji. Zgodnie z nią możemy wyróżnić delaminacje: na brzegu swobodnym oraz wewnątrz struktury laminatu konstrukcyjnego [11].

Z punktu widzenia eksploatacji delaminacje warstwowych kompozytów włóknistych są wynikiem dwóch rodzajów czynników. Pierwszy z nich stanowi degradacja zmęczeniowa, która jest efektem oddziaływania na kompozyty obciążeń cyklicznie zmiennych. Drugim czynnikiem wywołującym to zjawisko jest degradacja mechaniczna będąca wynikiem efektów makroskopowych zachodzących w laminatach pod wpływem działania na ich strukturę naprężeń [12].

Zjawiskiem charakterystycznym związanym z propagacją delaminacji w kompozytach warstwowych jest tzw. mostkowanie, określane w literaturze anglojęzycznej jako – ang. *bridging* [13]. Polega ono na niepełnym rozdzieleniu powierzchni pęknięcia w niewielkim obszarze za czołem delaminacji, w którym przeciwległe powierzchnie pęknięcia połączone są krzyżującymi się włóknami oddzielnymi częściowo od spoiwa.

2. 4. ZNISZCZENIA WŁÓKIEN

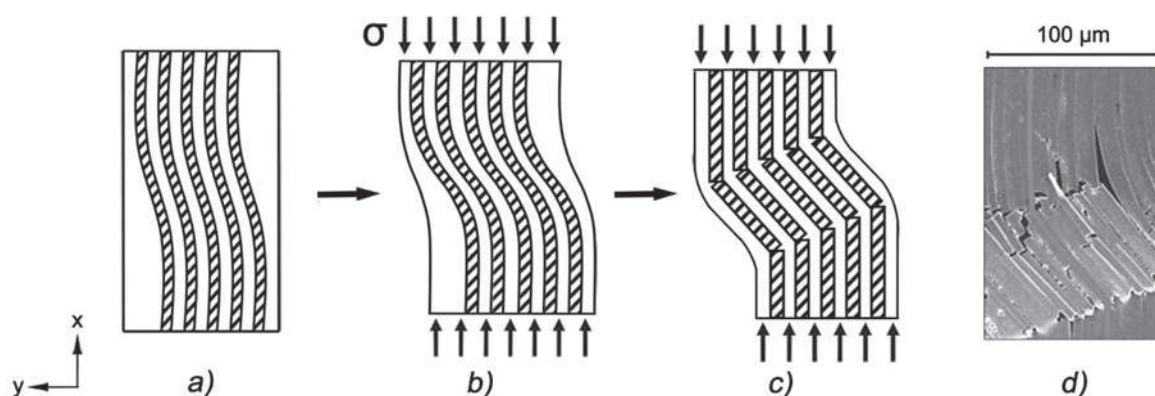
Polimerowe materiały kompozytowe zbrojone włóknami ciągłymi charakteryzują się zmia-

ną parametrów mechanicznych w zależności od orientacji włókien [14]. Dla przykładowego kompozytu polimerowego wzmocnionego włóknami węglowymi – CFRP (ang. *Carbon Fibre Reinforced Plastic*) wytrzymałość na rozciąganie przy kącie 0° wynosi 350 MPa, natomiast dla kąta ułożenia włókien wynoszącego 90° wartość wytrzymałości wynosi około 10 MPa.

W zależności od skrajnych orientacji włókien możemy wyróżnić dwa typy zniszczenia kompozytów FRP. W przypadku, gdy siła rozciągająca zorientowana jest prostopadle do kierunku ułożenia włókien, następuje rozdzielenie osnowy w płaszczyźnie prostopadłej do wektora obciążenia. W przypadku ściskania laminatu, rozdzielenie następuje na skutek pęknięcia osnowy w płaszczyźnie nachylonej pod kątem w stosunku do obciążenia.

W przypadku, gdy wzmocnienie zorientowane jest równoległe do kierunku obciążenia rozciągającego, jego rozdzielenie poprzedzone jest pękaniem i zerwaniem włókien w płaszczyźnie prostopadłej do ich osi głównej, które w literaturze nosi nazwę tzw. pękania rozdzielczego [15].

Podczas ściskania kompozytów o równoległej (quasi-równoległej), w stosunku do obciążenia, orientacji włókien (Rys. 3a) występują często ich mikro-wyboczenia o charakterze sprężystym (Rys. 3b), które pod wpływem działania



Rys. 3. Mechanizm powstawania mikrowyboczeń w kompozycie FML: a) kompozyt o równoległym ułożeniu włókien b) mikro-wyboczenie sprężyste, c) mikro-wyboczenie plastyczne wraz ze złamaniem włókien [16], d) zdjęcie mikro-wyboczenia plastycznego [17]

Fig. 3 Mechanism of microbuckling in the FML composite: a) composite with a parallel orientation of the fibers, b) elastic microbuckling, c) plastic microbuckling together with fiber breakage [16], d) photo of plastic microbuckling [17]

naprężeń powodują powstawanie krytycznych dla kompozytów włóknistych mikro-wyboczeń plastycznych związanych z łamaniem włókien (Rys. 3cd) [18]. Powstawanie tego typu uszkodzeń najczęściej związane jest ze zmianą kierunku propagacji pęknięcia na granicy włókno-spoivo, w której szczelina zmienia kierunek, rozprzestrzeniając się w głąb spoiva.

Pęknięcie głównego nośnika obciążenia struktury kompozytowej – włókien – uznawane jest za końcowy stan w procesie jej uszkodzenia. Prowadzi ono do uformowania tzw. ścieżki zniszczenia przebiegającej przez lokalne, wcześniej uszkodzone, strefy w konsekwencji powodując utratę zdolności struktury do przenoszenia obciążeń poprzez jej fizyczne zniszczenie [19].

2. 5. ZNISZCZENIA POŁĄCZEŃ MECHANICZNYCH KOMPOZYTÓW

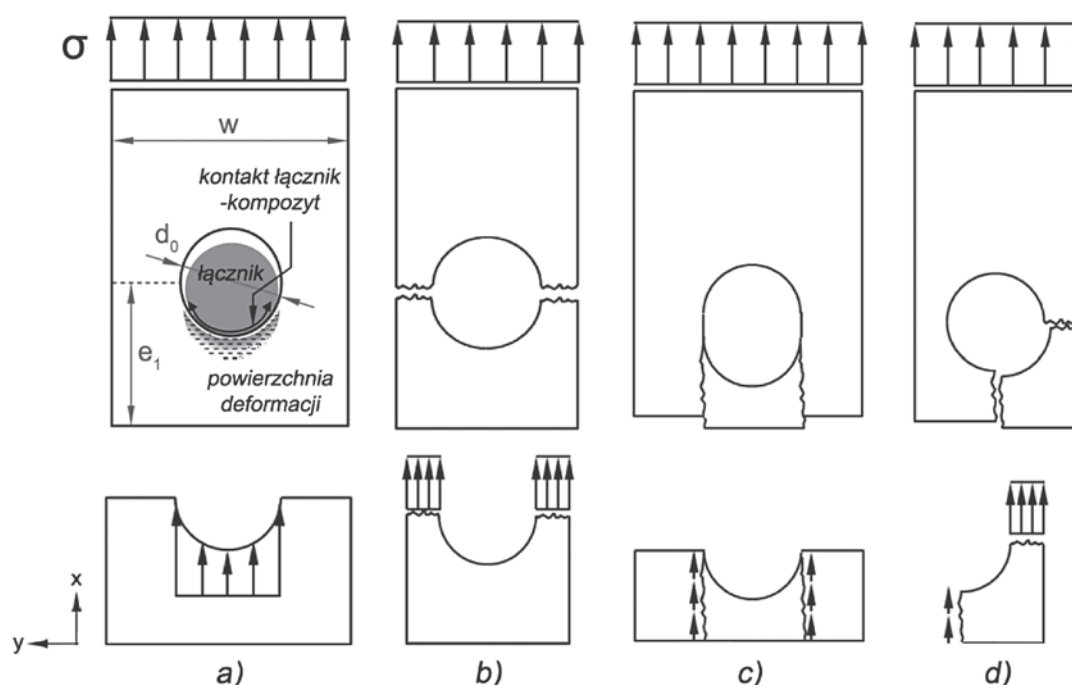
W literaturze przedmiotu zdefiniowane są cztery globalne sposoby (mechanizmy) niszczenia laminatu w połączeniu mechanicznym

(w tym także nitowym) [20-23], które w części pozycji literaturowych uzupełniane są o piąty mechanizm – wyłamanie łącznika [24, 25]. Polega on na oddzieleniu się łącznika od łączonych laminatów, w ten sposób że następuje zniszczenie łączonych laminatów bez uszkodzenia samego łącznika.

Wśród podstawowych typów niszczenia laminatów w połączeniu mechanicznym wyróżniamy:

- naciski (ang. *bearing* – B) – charakterystyczne w obrębie kontaktu łącznik-kompozyt i powstające zazwyczaj dla laminatów, w których stosunek w/d_0 jest duży. Polegają one na „zgniataniu” materiału warstwy w wyniku nacisku łącznika i narastającej owalizacji otworu. Taki rodzaj uszkodzenia opóźnia proces delaminacji, w konsekwencji powodując wyboczenia włókien oraz pęknięcie osnowy (Rys. 4a).

- zerwanie (ang. *net-tension* – NT) – charakteryzuje się nagłym pęknięciem o kierunku poprzecznym do kierunku działającej siły i powstaje zazwyczaj w laminatach o stosunkowo małej powierzchni przekroju poprzecz-



Rys. 4. Podstawowe mechanizmy niszczenia mechanicznego połączenia kompozytów: a) naciski, b) zerwanie, c) wycięcie, d) rozłam

Fig. 4. Basic mechanisms of destruction of the mechanical connection of composites: a) pressure, b) breaking, c) cut, d) split

nego. Polega ono na pęknięciu warstwy przy rozciąganiu w przekroju osłabionym otworem kołowym. Pęknięcie ma kierunek prostopadły do obciążającej siły i wywołane jest koncentracją naprężeń na brzegu otworu. Uszkodzenia tego typu są także charakterystyczne dla laminatów jednokierunkowych, których orientacja włókien jest prostopadła do kierunku działania siły. Występują one także często w połączeniach wielołącznikowych (Rys. 4b).

- wycięcie (ang. *shear-out* – S) – pojawia się, gdy stosunek e_1/d_0 jest mały (<4). Jest ono wywołane naprężeniami normalnymi, poprzecznymi do kierunku rozciągania. Występuje ono także w połączeniach zbudowanych z pojedynczych łączników (Rys. 4c).

- rozłam (ang. *cleavage* – C) jest to uszkodzenie polegające na występowaniu kilku mechanizmów jednocześnie – NT i S, jak również może być spowodowane pęknięciem łącznika (Rys. 4d).



3. BADANIA WŁASNE

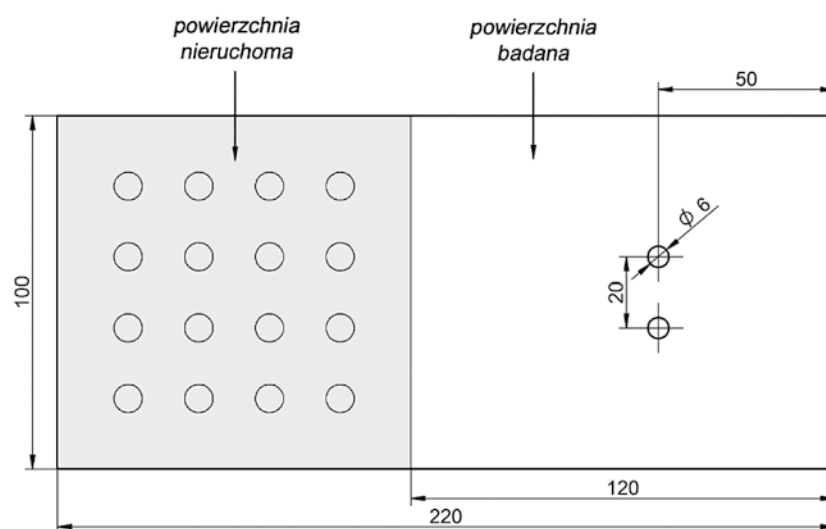
Przygotowanie próbek kompozytowych oraz przebieg eksperymentu

W celu przeprowadzenia badań wstępnych w pierwszej kolejności przygotowano szereg próbek (5 próbek w każdej serii badań) wykonanych z kompozytu GFRP. Do ich budowy wykorzystano symetryczną tkaninę certyfikowaną lotniczo – Interglas 92140 (o splocie – twill 2x2). Jako osnowy użyto mieszaniny żywicy epok-

Tab. 1. Serie próbek użyte w badaniach połączeń nitowych

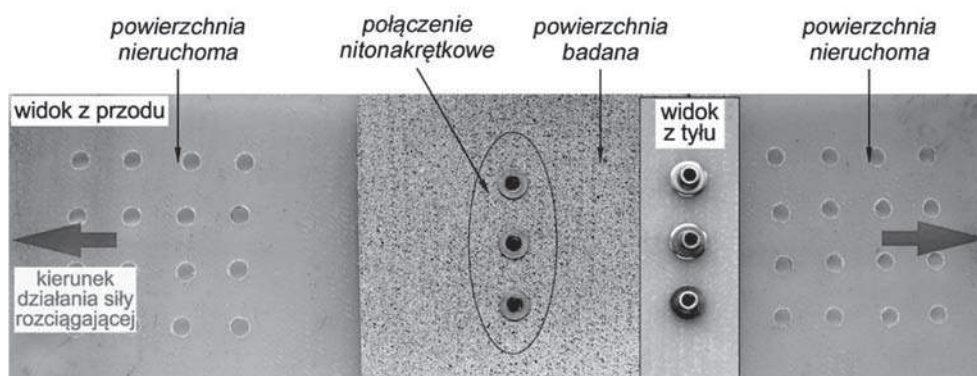
Fig. 1. Series of samples used in the study of riveted connections

Nazwa tkaniny	Seria badań	Oznaczenie orientacji włókien	
		Oznaczenie graficzne	Oznaczenie kodowe
Interglas 92140	I		$[-45_2/45]_s$
	II		$[0_2/90]_s$



Rys. 5. Model próbki kompozytowej wraz z jej geometrią

Fig. 5. The model of the composite sample with its geometry



Rys. 6. Połączenie nitonakrętkowe próbek przeznaczonych do badań

Fig. 6. Samples of rivet nut connection for researche

sydowej – Epidian 53 oraz utwardzacz Z-1 (produkcji CIECH Sarzyna S.A.), zmieszanych ze sobą w stosunku masowym 10:1. Metodą próżniowego laminowania kontaktowego z zastosowaniem elastycznego worka zbudowano poprzeczne (proste – I i skośne – II) próbki kompozytowe (Tab. 1).

Jedna z wersji pojedynczej próbki GFRP, przeznaczona do badań posiadała wymiary 220x100 mm oraz grubość około 1 mm (Rys. 5). Zbudowana została z 3 lamin (warstw tkaniny szklanej).

Całość podzielona została na część nieruchomą (przeznaczoną do umieszczenia jej w maszynie wytrzymałościowej) oraz badaną. Na części badanej wykonano otwory – $\varnothing 6$, służące do wykonania połączenia nitonakrętkowego i połączenia próbek (Rys. 6).

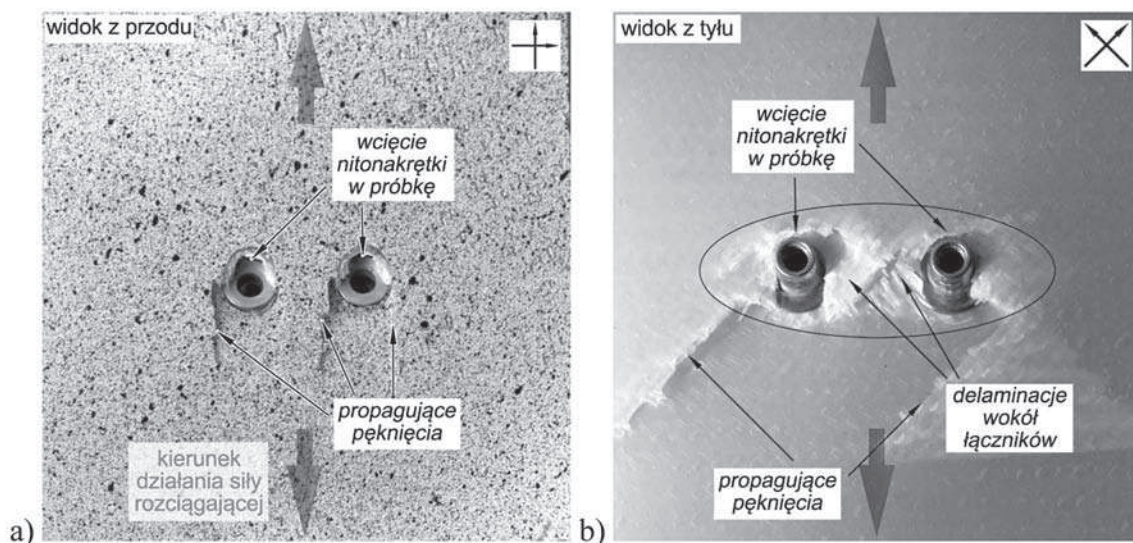
W zależności od połączenia próbek zastosowano modele połączeń – pojedyncza i podwójna zakładka o parametrach: długość zakładki $L=120$ mm, grubość warstwy $g=1$ mm. Skorzystano ze szwu jednorzędowego-równoległego, w którym zastosowano 2 i 3 nitonakrętki: ze stali ocynkowanej, otwarte, gładkie (nieradłkowane), z cylindrycznym kołnierzem oraz tuleją – M4/ $\varnothing 6$. Badania eksperymentalne przeprowadzone zostały na maszynie wytrzymałościowej INSTRON 8516 w konfiguracji: przemieszczenie trawersy – 20 mm, prędkość – 0,05 mm/s.

3.2. WYNIKI BADAŃ – ANALIZA ZNISZCZEŃ

Wynikami badań eksperymentalnych są postacie zniszczeń badanych kompozytów szklanych, połączeń: pojedyncza (Rys. 7÷8) i podwójna zakładka (Rys. 9) w zależności od ilości stosowanych łączników – nitonakrętek (2 i 3 łączniki).

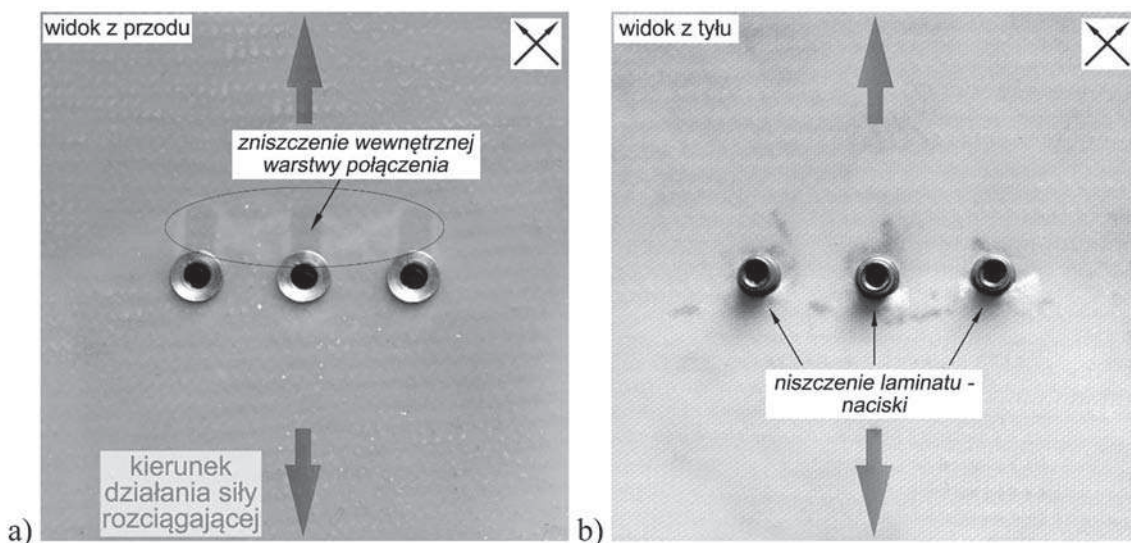
Na poniższych rysunkach (Rys. 7÷8), dla modelu połączenia pojedyncza zakładka, widoczne są wcięte w laminat nitonakrętki z odkształconym kołnierzem, które uległy deformacji na skutek działania na nie siły (Rys. 7a). Z tyłu połączenia widoczne są silniejsze zniszczenia powiązane z delaminacjami obserwowanymi wokół łączników (Rys. 7b). Poniżej tulei nitonakrętek obserwowane są silnie propagujące pęknięcia, które widoczne są także między łącznikami. Kierunek pęknięć jest zgodny z orientacją zastosowanego w próbkach zbrojenia.

Poniższe zdjęcia przedstawiają postacie zniszczeń połączenia nitonakrętkowego kompozytów dla modelu połączenia – podwójna zakładka (Rys. 8). Na widoku z przodu widoczne są zniszczenia środkowej (wewnętrznej) warstwy laminatowej polegające na wycięciu laminatu przez łączniki (Rys. 8a). Nitonakrętki nie posiadają widocznych zniszczeń oraz zmian swojej geometrii. Na widoku z tyłu pod łącz-



Rys. 7. Zniszczenia połączenia nitonakrętkowego typu pojedyncza zakładka dla 2 nitonakrętek: a) widok z przodu b) widok z tyłu

Fig. 7. Destruction to rivet nut connection of single overlap type for 2 rivet nuts: a) front view, b) rear view



Rys. 8. Zniszczenia połączenia nitonakrętkowego typu podwójna zakładka dla 3 nitonakrętek a) widok z przodu b) widok z tyłu

Fig. 8. Destruction to rivet nut connection of double overlap type for 3 rivet nuts: a) front view, b) rear view

nikami, w ich obrębie, widoczne są charakterystyczne zniszczenia typu – naciski (Rys. 8b). Wywołane są one naciskami łącznika powodującego owalizację otworów wykonanych w próbce oraz silne oddziaływanie na kom-

pozyt. W wyniku takiego działania osnowa ulega deformacjom oraz wewnętrznym pęknięciom. Delaminacje oraz propagacje pęknięć w warstwach zewnętrznych połączenia nie są widoczne.

4. WNIOSKI

Na podstawie przedstawionych w artykule treści oraz wyników badań eksperymentalnych odnoszących się do zniszczeń laminatów w połączeniach mechanicznych można stwierdzić, że:

1. Analizując zniszczenia połączeń nitonakrętkowych laminatów szklanych modeli – pojedyncza i podwójna zakładka można zaobserwować i wykazać różnice w ich postaciach zniszczeń. W modelu pojedyncza zakładka obserwuje się silne delaminacje i propagujące pęknięcia. W modelu podwójna zakładka widoczne jest zniszczenie – wycięcie – środkowej (wewnętrznej) warstwy laminatowej oraz naciski.
2. Różnice w postaciach zniszczeń mogą być spowodowane deformacją powierzchni (silniejszą dla modelu pojedyncza zakładka). Zjawisko to, pomimo zapewnienia osiowości w czasie prowadzonych prób, powstało na skutek działającej siły skupionej w miejscu połączenia. Dodatkowo deformowanie powierzchni laminatów w czasie działania na nie siły rozciągającej ułatwia propagację oraz zwiększa rozmiary pęknięć.
3. Kierunek pęknięć jest zgodny z orientacją wzmocnienia (ułożenia pasm włókien) w kompozycie.
4. Łączniki – nitonakrętki nie posiadają widocznych zniszczeń oraz zmian swojej geometrii. Deformacjom plastycznym ulegają jedynie ich kołnierze.
5. Ilość łączników nie ma decydującego wpływu na postacie i modele zniszczeń w kompozytach, jedynie na ich rozmiary.
6. W odniesieniu do zniszczeń sugeruje się badania z użyciem współczesnych metod, takich jak: tomografia rezystancyjna, defektoskopia rentgenowska, termografia, metoda mory interferencyjnej, metoda prądów wirowych oraz inne. W odróżnieniu do metody wzrokowej, która była stosowana w przed-

miotowych badaniach, pozwolą na diagnostykę we wczesnym stadium degradacji, co dla tego typu elementów jest bardzo istotne.

LITERATURA

7. German J., *Podstawy mechaniki kompozytów włóknistych*. Kraków: Politechnika Krakowska, 2001.
8. Lewitowicz J., *Podstawy eksploatacji statków powietrznych, tom IV badania eksploatacyjne statków powietrznych*. Warszawa: Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, 2007.
9. Girão Coelho A.M., Mottram J.T., *A review of the behaviour and analysis of bolted connections and joints in pultruded fibre reinforced polymers*. Mater Des. 2015 6/5,74, 86-107.
10. Bielawski R., Kowalik M., Rządkowski W., Pyrzanowski P., *Preliminary studies of riveted joints at feed force*. Advances in Science and Technology Research Journal,9(27), 23-7.
11. Bełzowski A., *Metoda oceny stopnia uszkodzenia kompozytów polimerowych*. Kompozyty (Composites) 2(2002)4, 253-8.
12. Komorek A., Przybyłek P., *Examination of the influence of cross-impact load on bend strength properties of composite materials, used in aviation*. Maintenance and Reliability. 2012,14(4), 265-9.
13. Czarnocki P., *Methods adopted for the determination of the interlaminar toughness of polymeric laminates*. Polimery i Kompozyty Konstrukcyjne. 2010, 77-99.
14. Rojek M., *Methodology of diagnostic testing of polymeric matrix laminate composite materials*. Open Access Library. 2011,2, 5-31.
15. Bamford C.H., Tipper C.F.H., *Comprehensive chemical kinetics*. In: Degradation of Polymers. Elsevier, 1975.
16. Belli R., Geinzer E., Muschweck A., Petschelt A., Lohbauer U., *Mechanical fatigue degradation of ceramics versus resin composites for dental restorations*. Dental Materials. 2014 4,30(4), 424-32.
17. Canal L.P., Pappas G., Botsis J., *Large scale fiber bridging in mode I intralaminar fracture. an embedded cell approach*. Composites Sci Technol. 2016 4/1, 126, 52-9.
18. Biscaia H.C., Cruz D., Chastre C., *Analysis of the debonding process of CFRP-to-timber interfaces*. Constr Build Mater. 2016 6/15,113, 96-112.
19. Mansour R., Maillet E., Morscher G.N., *Monitoring interlaminar crack growth in ceramic matrix composi-*

- tes using electrical resistance. *Scr Mater.* 2015 3/15, 98, 9-12.
20. Hull D., Clyne T.W., *An introduction to composite materials*. 2nd Edition ed. Cambridge University Press, 1996.
 21. Szymczak T., Kowalewski Z.L., *Mechanical properties of selected composites and methods of their fracture assessment*. Transport Samochodowy. 2014,4, 33-54.
 22. *Inelastic deformation of composite materials*. Dvorak GJ, editor. New York: Springer, 1990.
 23. Gutkin R., Pinho S.T., Robinson P., Curtis P.T., *Physical mechanisms associated with initiation and propagation of kink-bands*. 13th European Conference on Composite Materials (ECCM13), Stockholm. 2008.
 24. German J., *Wpływ uszkodzeń na własności laminatów kompozytowych*. In: Współczesne zagadnienia mechaniki materiałów i konstrukcji kompozytowych. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2003.
 25. Jachimowicz J., Szymczyk E., Puchała K., *Symulacja badań połączenia metalowo-kompozytowego wymiarowanego naciskami*. Logistyka. 2014,6, 4606-15.
 26. Jumahat A., Soutis C., Jones F.R., Hodzic A., *Fracture mechanisms and failure analysis of carbon fibre/toughened epoxy composites subjected to compressive loading*. *Composite Structures*. 2010 1, 92(2), 295-305.
 27. Atas C., *Bearing strength of pinned joints in woven fabric composites with small weaving angles*. *Composite Structures*. 2009 3,88(1), 40-5.
 28. Thoppul S.D., Finegan J., Gibson R.F., *Mechanics of mechanically fastened joints in polymer-matrix composite structures – A review*. *Composites Sci Technol*. 2009 3,69(3-4), 301-29.
 29. Atas A., Soutis C., *Application of cohesive zone elements in damage analysis of composites: Strength prediction of a single-bolted joint in CFRP laminates*. *Int J Non-Linear Mech*. 2014 11,66, 96-104.
 30. Bielawski R., Kowalik M., Suprynowicz K., Rządkowski W., Pyrzanowski P., *Investigation of riveted joints of fiberglass composite materials*. *Mechanics of Composite Materials*, Springer. 2016,52(2), 199-210.
 31. Boczkowska A., Krzesiński G., *Politechnika Warszawska. Oficyna Wydawnicza, Kompozyty i techniki ich wytwarzania*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2016.

Data wpłynięcia artykułu do redakcji: 10-01-2018

Data akceptacji publikacji do druku: 13-02-2018