

WERYFIKACJA EKSPERYMENTALNA ODPORNOŚCI NA ROZWARSTWIENIE KOMPOZYTU Z OSŁONĄ ANTYPIORUNOWĄ

RADOSŁAW GUZIKOWSKI

Centrum Technologii Kompozytowych, Instytut Lotnictwa, Al. Krakowska 110/114, 02-256 Warszawa,
radoslaw.guzikowski@ilot.edu.pl

Streszczenie

Ryzyko związane z zastosowaniem siatki LSP wiąże się z rozwarstwieniem na granicy siatka/kompozyt. W pracy sprawdzono wpływ obciążeń zmęczeniowych na połączenie struktury kompozytowej z siatką LSP, służącą do ochrony struktur lotniczych przed skutkami uderzeń pioruna. Aby zrealizować to zadanie w próbie statycznej wyznaczono maksymalną strzałkę ugięcia zaproponowanych próbek, a następnie przeprowadzono próby cykliczne. Podczas badania przeprowadzonego w takiej kolejności przetestowano dwie konfiguracje próbek różniących się układem warstw podkładów kompozytowych (próbki wykonane z prepregu węglowego różniące się układem warstw) oraz grubością siatki (o gramaturze 107 g/m² oraz 195 g/m², najczęściej stosowane w konstrukcjach lotniczych). W wyniku badań nie wykryto rozwarstwień na granicy kompozyt/siatka LSP oraz uszkodzeń w strukturze kompozytowej jak i siatce LSP.

Słowa kluczowe: siatka LSP; ochrona przeciwpiorunowa; badania eksperymentalne.

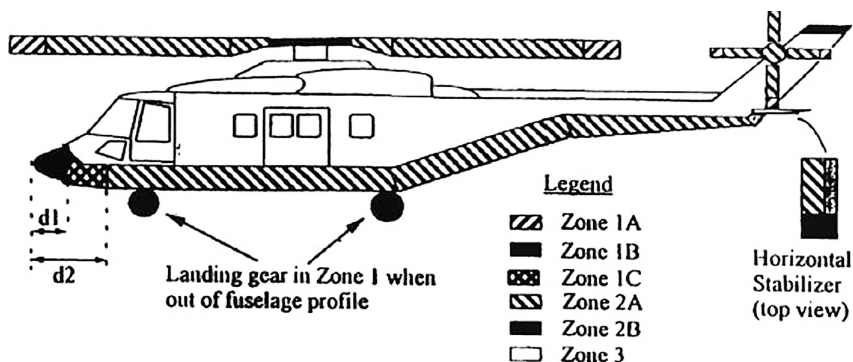
1. WSTĘP

Piorun jest wyładowaniem elektrycznym wewnątrz chmury burzowej, między chmurami bądź między chmurą a powierzchnią ziemi. Najczęściej występują wyładowania liniowe o charakterze rozgałęzionej iskry o długości od kilku do kilkudziesięciu kilometrów. Wyładowania atmosferyczne generują impulsowe pola elektromagnetyczne, które są źródłem zakłóceń pracy urządzeń radiokomunikacyjnych i wielu urządzeń elektronicznych. Istotnym parametrem w przypadku zjawisk związanych z uderzeniem pioruna jest wartość szczytowa prądu wyładowań, która osiąga bardzo duże wartości (50% osiąga 30 kA, a największe > 100 kA) [4].

Typowy samolot komercyjny średnio raz w roku w czasie swojej eksploatacji zostaje trafiony piorunem, który może nagrzać lokalnie strukturę do temperatury sięgającej nawet 25 000°C [4]. Zjawisko to może być szczególnie niebezpieczne w przypadku struktur kompozytowych wzmocnianych włóknem węglowym.

2. SYSTEMY OCHRONY PRZECIWPIORUNOWEJ STRUKTUR ŚMIGŁOWCÓW

Według firmy ASTROSEAL PRODUCTS MANUFACTURING CORPORATION [2], specjalizującej się w systemach ochrony przeciwpiorunowej od 1983 roku na śmigłowcu występują strefy o zróżnicowanym prawdopodobieństwie uderzenia przez piorun. Na rysunku 1 przedstawione są strefy śmigłowca narażone na uderzenie pioruna z podziałem na prawdopodobieństwo wystąpienia tego zjawiska, przy założeniu, że Strefa 1A jest szczególnie narażona na uderzenie piorunem, natomiast prawdopodobieństwo uderzenia w Strefie 3 jest znikome.



Rys. 1. Strefy śmigłowca narażone na uderzenie piorunem [1]

Łopaty wirnika nośnego oraz łopaty śmigła ogonowego są szczególnie narażone na uderzenie pioruna. Przepisy jednak nie precyzują sposobu realizacji ochrony przed skutkami wyładowań atmosferycznych. Jest ona jednak niezbędna w przypadku stosowania śmigłowca w strefie podniesionego ryzyka występowania wyładowań atmosferycznych (przykładowo operowanie śmigłowca nad otwartym morzem lub w strefie nadbrzeżnej).

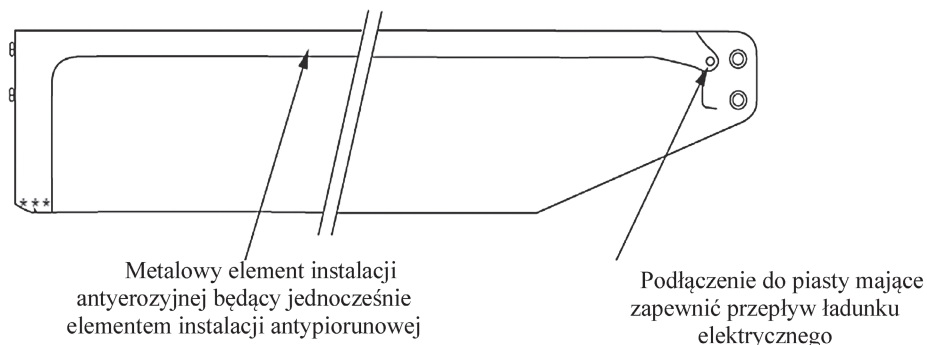
Zadania instalacji przeciwpiorunowej (Lighting Strike Protection – LSP) sprowadzają się do minimalizacji skutków uderzenia pioruna w strukturę, gdyż niemożliwe jest wyeliminowanie zagrożenia jakim jest wyładowanie działające na strukturę wiroplata. Jako główne zadanie takiej instalacji stawia się odprowadzenie ładunku do elementu, który nie jest podatny na działanie ładunku elektrycznego (piasta wirnika nośnego lub śmigła ogonowego)

Dla łopat wykonanych z kompozytów szklano – epoksydowych, stosowanie systemów LSP nie jest konieczne ze względu na pomijalnie niskie przewodnictwo szklanego wypełniacza kompozytu. Inaczej wygląda sytuacja w przypadku kompozytów wzmacnianych włóknem węglowym (Carbon Fibre Reinforced Polymers – CFRP). Włókna węglowe są bardzo dobrym przewodnikiem elektrycznym co skutkuje zwiększonym ryzykiem uszkodzenia kompozytu wytworzonego z ich użyciem.

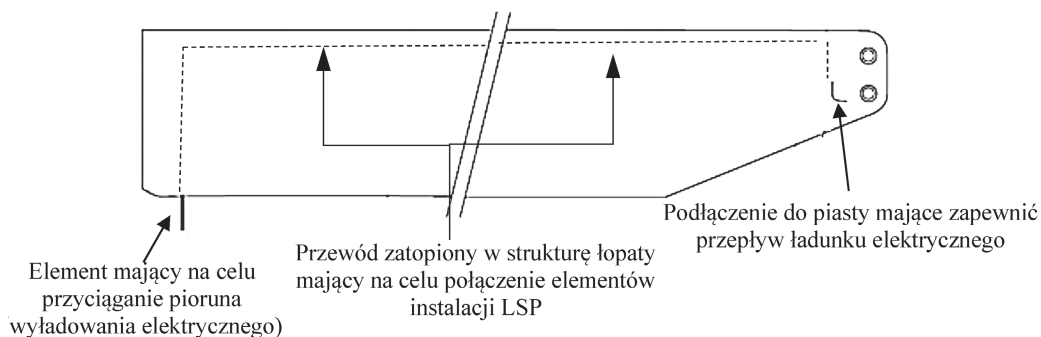
W przypadku łopat wykonanych z CFRP stosuje się kilka rodzajów środków mających na celu zredukowanie zniszczeń wywołanych przez uderzenie pioruna. Należą one do dwóch zasadniczych grup, mających na celu:

1. odprowadzenie ładunku do piasty (wirnika nośnego lub śmigła ogonowego);
2. rozproszczenie ładunku po powierzchni łopaty w celu zmniejszenia koncentracji temperatury, zatem zniszczeń wywołanych lokalnym wypaleniem kompozytu.

Do pierwszej grupy należy zaliczyć wszelkiego rodzaju listwy metalowe lub przewody biegnące wzdłuż promienia łopaty mające na celu sprowadzenie ładunku do piasty. Często spotykaną konstrukcją jest stosowanie metalowej listwy będącej jednocześnie elementem instalacji antyerozyzyjnej łopaty (rysunek 2). Inną metodą (przeważnie w konstrukcjach bez metalowych elementów instalacji antyerozyzyjnej) jest instalowanie na końcówce łopaty specjalnego rodzaju pręta mającego na celu przyciąganie wyładowań. Pręt ten jest połączony z piastą przewodem lub taśmą zatopioną w pokrycia łopaty (rysunek 3). Taka konstrukcja jest jednak najczęściej stosowane w łopatach wirników nośnych.



Rys. 2. Schemat wykorzystania instalacji antyerozyzyjnej do odprowadzania ładunku elektrycznego do piasty [opracowanie własne, 2015]



Rys. 3. Schemat instalacji LSP z ukrytą w konstrukcji łopaty szyną odprowadzającą ładunek do piasty [opracowanie własne, 2015]

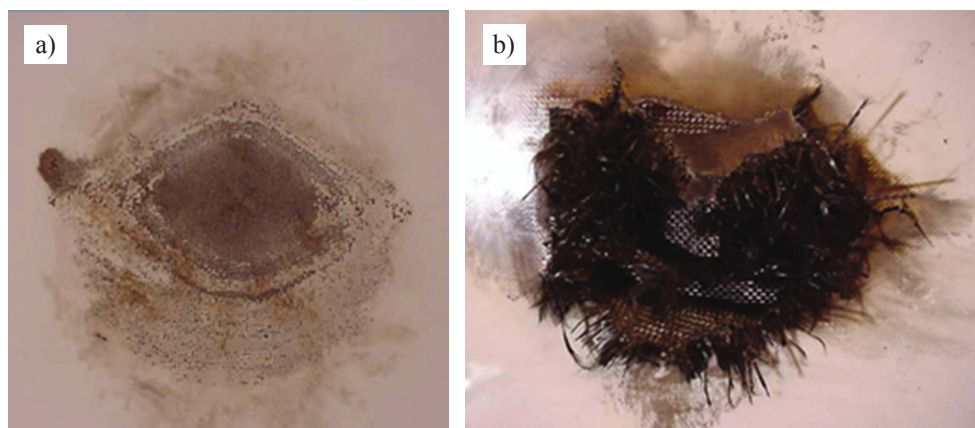
Jako inna grupa systemów ochrony przed skutkiem uderzenia pioruna w łopatę jest rozproszczenie ładunku na powierzchni łopaty. Wyładowanie może lokalnie nagrzać strukturę do wspomnianej temperatury 25 000°C, co dla kompozytu jest szczególnie niebezpieczne, ponieważ może doprowadzić do wypalenia zbrojenia oraz degradacji żywicy. Rozproszczenie ładunku zapobiega kumulacji temperatury w jednym miejscu i zmniejsza ryzyko powstania krytycznych uszkodzeń. W tej grupie systemów stosuje się kilka rodzajów ochrony:

1. pokrycie powierzchni łopaty siatką miedzianą lub aluminiową, co jest najczęściej stosowaną konstrukcją;
2. stosowanie elementów metalowych wtopionych w pokrycie łopaty.

Stosowanie systemów LSP w postaci siatek jest powszechne w konstrukcji samolotów. W konstrukcji śmigłowców jest coraz częściej stosowane, ale nadal unikane ze względu na możliwość odklejenia siatki LSP od kompozytu. Zatapianie elementów metalowych w pokrycia jest natomiast rzadko stosowane ze względu na niedogodności technologiczne i pracochłonność procesu.

Siatki LSP oprócz występowania w dwóch wariantach materiałowych (siatki miedziane lub aluminiowe), mogą mieć różną gramaturę oraz występować w postaci samej siatki, siatki zatopionej w żywicy lub być zaaplikowane na podkład kompozytowy.

Rysunek 4 przedstawia dwa kompozytowe panele po symulacji uderzenia pioruna bez systemu LSP oraz z wykorzystaniem siatki LSP.



Rys. 4. Skutki uderzenia pioruna w strukturę kompozytową a) wyposażoną w siatkę LSP oraz b) niewyposażoną w siatkę LSP [4]

Skutki uderzenia pioruna w panel wyposażony w siatkę LSP (rysunek 4a) są znacznie mniejsze w stosunku do panelu bez siatki LSP (rysunek 4b). Siatka nie eliminuje uszkodzenia, ale zmniejsza jego rozmiary, co umożliwia wylądowanie śmigłowcem. Jak wynika z tego porównania rozpraszanie ładunku po powierzchni struktury ma swoje uzasadnienie z tego względu stosowanie siatek LSP jako ochrony łopat zarówno śmigieł ogonowych jak i wirników nośnych śmigłowców jest zasadne i może mieć duży wpływ na bezpieczeństwo wiroplątów w przypadku uderzenia przez piorun.

3. PRZEBIEG BADAŃ

Jako najczęściej stosowaną ochronę przeciwko skutkom uderzenia pioruna w konstrukcje lotnicze wykonane z kompozytu wzmocnionego włóknem węglowym stosuje się siatkę LSP. Siatka taka jest jednak rzadko stosowana do łopat wirnika nośnego lub śmigła ogonowego śmigłowców z powodu obaw o rozklejenie struktury na granicy siatka/kompozyt, ponieważ łopata, w odróżnieniu od skrzydła samolotu (gdzie siatka LSP jest stosowana bardzo często), podczas swojej pracy poddana zostaje złożonemu stanowi odkształceń, których amplituda oraz częstotliwość zmian jest znaczna.

Podczas prac nad ochroną antypiorunową łopat śmigłowca sprawdzono zachowanie się połączenia siatki miedzianej ze strukturą kompozytową. W tym celu przeprowadzono próbę

mającą sprawdzić wpływ obciążeń cyklicznych na taką konstrukcję, gdyż zachowanie kompozytu oraz siatek miedzianych poddanych obciążeniom cyklicznym jest różne i różnice te mogą mieć negatywny wpływ na połączenie kompozyt/siatka LSP.

Badanie podzielono na dwa etapy. Pierwszy etap stanowiła próba statyczna, której zadaniem było wyznaczenie dopuszczalnych odkształceń w badanych próbkach. Kolejnym etapem była próba mająca na celu sprawdzenie wpływu cyklicznych obciążeń na stan połączenia siatki miedzianej i struktury kompozytowej.

3.1. Badane próbki

Obiektem badań były próbki o wymiarach 50x127 mm (2x5 cali) o dwóch różnych układach warstw wyposażone w siatki (schematyczny rysunek siatki przedstawiono na rysunku 5) o różnej gramaturze (rozumianej jako masa $1 \text{ m}^2 - \text{g/m}^2$) (tabela 1). Grubość próbek definiuje układ warstw (tabela 2).

Tab. 1. Grubości zastosowanych siatek
[opracowanie własne,2015]

	Gramatura siatki	
	107 g/m ²	195 g/m ²
Grubość siatki, mm	0.051	0.076
Objętość oczek, %¹⁾	75	65

¹⁾ Objętość oczek jako stosunek powierzchni oczek siatki do powierzchni całkowitej wyrażony w %

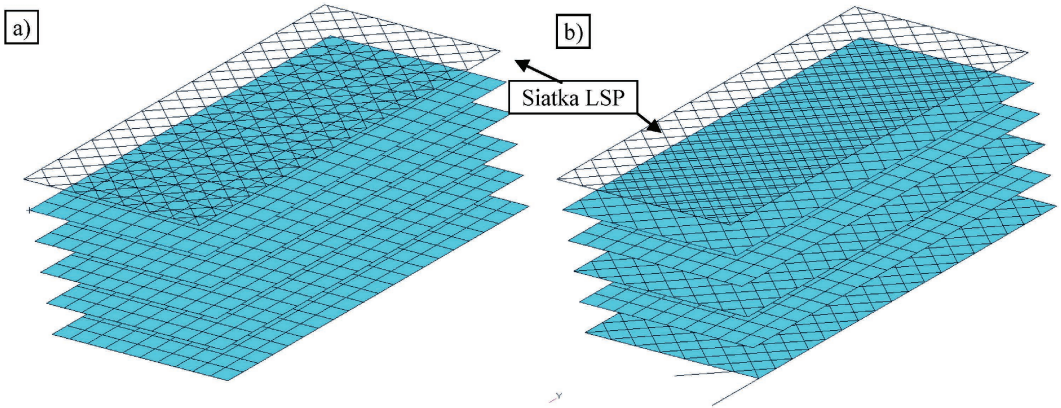


Rys. 5. Szkic siatki miedzianej użytej do badań [4]

Tab. 2. Grubości poszczególnych próbek
[opracowanie własne,2015]

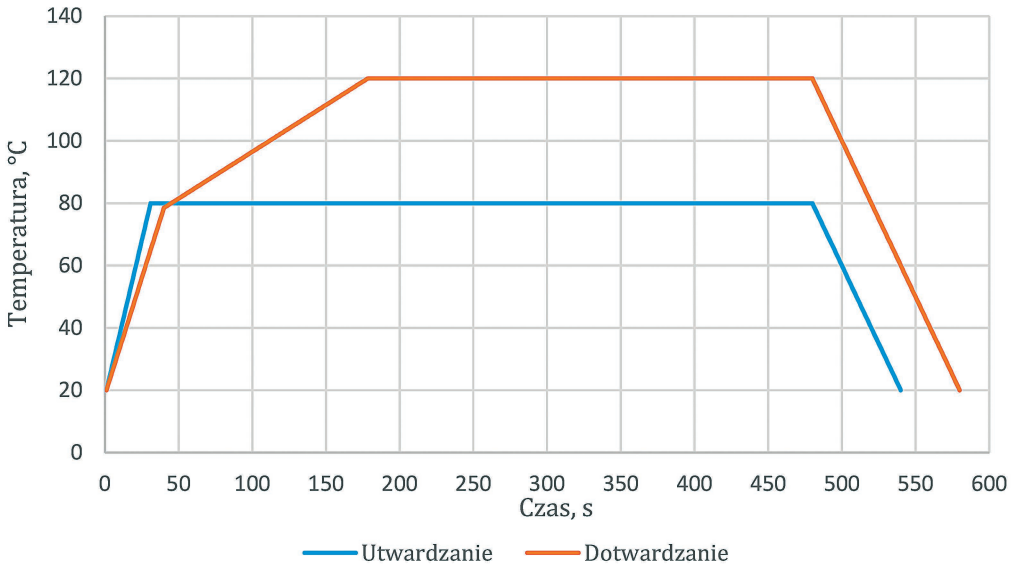
Oznaczenie próbki	Grubość próbki, mm
LSP_002-1	1.161
LSP_002-2	1.178
LSP_002-3	1.168
LSP_002-4	1.166
LSP_004-1	1.204
LSP_004-2	1.254
LSP_004-3	1.201
LSP_004-4	1.181

Próbki o oznaczeniu LSP_004 wykonane są z materiału MTM-46 PW TWILL 2x2 (prepreg węglowy) o układzie warstw $[0_5]$ (układ warstw $[0_5]$ oznacza 5 warstw prepregu o jednakowym kierunku osnowy) z siatką o gramaturze 195 g/m^2 (schemat próbki przedstawiono na rysunku 6a). Natomiast druga konfiguracja o oznaczeniu LSP_002 wykonana jest także z materiału MTM-46 PW TWILL 2x2, ale o układzie warstw $[45/0/45/0/45]$ siatką miedzianą o gramaturze 107 g/m^2 (schemat próbki przedstawiono na rysunku 6b).



Rys. 6. Schematy układu warstw w próbkach: a) LSP_004; b) LSP_002 [opracowanie własne, 2016]

Próbki wykonano w technologii kompozytów bezaotoklawowych (Out Of Autoclave – OOA). Proces utwardzania przebiegał przy podciśnieniu 1 bara przy przebiegu temperatur zgodnie z rysunkiem 7. Najpierw próbkę utwardzano wstępnie w temperaturze 80°C a następnie dotwardzano w temperaturze 120°C.



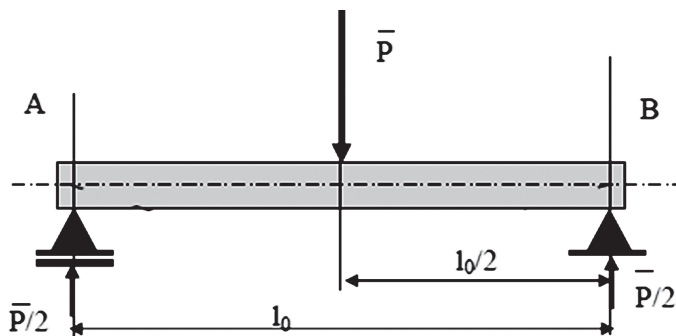
Rys. 7. Cykl utwardzania próbek [opracowanie własne, 2016]

Dodatkowo próbki różnią się sposobem wycinania. Próbki LSP_004 mają siatkę ułożoną dłuższą przekątną oczka zgodnie z długością próbki natomiast dla próbek LSP_002 siatka ułożona jest dłuższą przekątną oczka równoległą do krótszego boku próbki. Stworzenie różnego rodzaju próbek miało na celu sprawdzenie różnych konfiguracji struktur kompozytowych, które mogą zostać zastosowane w konstrukcji wiroplata. Zastosowano siatki o najczęściej stosowanych w lotnictwie gramaturach, w celu sprawdzenia wpływu tego parametru na trwałość próbek.

Wybierając siatki kierowano się kartami technicznymi wyrobu oraz zaleceniami producenta. Do badań użyto siatek wypłaszczonych (siatka poddana procesowi walcowania). Żywica do impregnacji siatki nie była dostarczona z zewnątrz, ale pochodziła z preimpregnatów zastosowanych do budowy podkładów kompozytowych.

3.2. Przebieg badania

Próbki były poddane badaniu w warunkach trójpunktowego zginania (rysunek 8) na maszynie wytrzymałościowej Instron Electropuls E3000 z głowicą siły 5 kN w próbach statycznych oraz zmęczeniowych. Próbki były zamocowane w uchwycie do trójpunktowego zginania siatką do dołu (siatka rozciągana) a dla próbek LSP_002 dodatkowo z siatką zwróconą do góry (siatka ściskana). Próby były prowadzone w warunkach RTA. Dla próbek LSP_004 dodatkowo sprawdzono próbki poddane sezonowaniu w warunkach podwyższonej temperatury ($95\pm 2^{\circ}\text{C}$) i wilgotności ($85\pm 5\%$).



Rys. 8. Schemat obciążania próbki [opracowanie własne, 2015]

Pierwszym etapem badań była próba statyczna mająca na celu wyznaczenie maksymalnej strzałki ugięcia dla danej konfiguracji próbki.

Następnym etapem badań była próba cyklicznego odkształcania. Próbki poddawano cyklicznym obciążeniom z częstotliwością zmian obciążeń 10 Hz o asymetrii cyklu $R=0,1$ i amplitudzie z zakresu $(30\div 80)\%$ odkształceń niszczących wyznaczonych w próbie statycznej. Częstotliwość zmian obciążeń wynikała z ograniczeń dla przeprowadzania prób cyklicznych na próbkach kompozytowych. Każda z próbek była poddawana ocenie wizualnej co 36 000 cykli. Ocena wizualna została uznana za najlepszą dla tego rodzaju próby, ponieważ uszkodzenia o rozmiarze niewykrywalnym nieuzbrojonym okiem nie zagrażają konstrukcji. Przebieg badań cyklicznych dla poszczególnych próbek został zamieszczony w tabeli 3. Dla próbki LSP_004-4 (po sezonowaniu) przyjęto dodatkowe ograniczenia dla prób cyklicznych związane z nasyceniem próbki (zawartość żywicy w próbce), sprawdzanym poprzez ważenie próbki po każdej godzinie badania. Przyjmując jako 100% masę po sezonowaniu, badania prowadzono jeżeli masa po ważeniu była wyższa niż 60% masy po sezonowaniu.

Do celów badania zdecydowano się na wprowadzenie znacznych odkształceń w celu skrócenia próby oraz zasymulowania możliwie niekorzystnych warunków dla połączenia kompozyt/siatka LSP.

Tab. 3. Przebieg badań cyklicznych dla poszczególnych próbek
[opracowanie własne, 2015]

Nr próbki	Amplituda odkształceń, % ²⁾	Liczba cykli
LSP_002-2	70	144 000
	80	144 000
	70	1 440 000
LSP_002-4	70	144 000
	80	144 000
LSP_004-2	30	144 000
	45	144 000
	60	288 000
	70	72 000
	80	72 000
LSP_004-4	60	144 000
	70	144 000

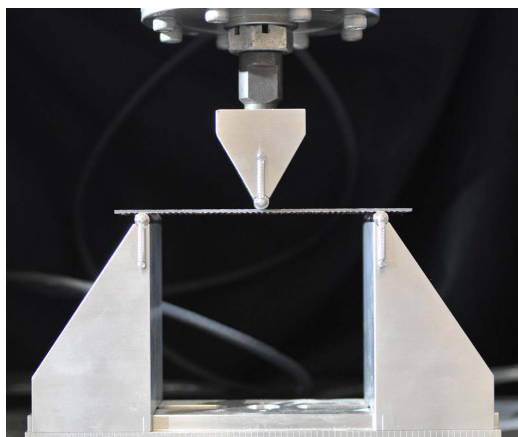
²⁾ Amplituda odkształceń jako procent wartości odkształceń niszczących (maksymalnych) w próbie statycznej.

4. WYNIKI BADAŃ

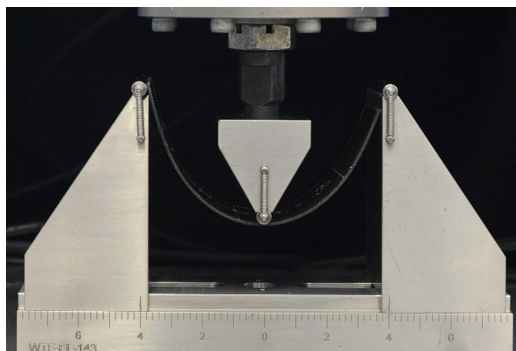
4.1. Wyniki dla próbki w konfiguracji LSP_004

W próbie statycznej wyznaczono odkształcenia niszczące dla próbki LSP_004-1 (bez sezonowania). Dla takiej próbki, maksymalna do osiągnięcia na maszynie wytrzymałościowej strzałka ugięcia okazała się być za mała, aby doprowadzić do zniszczenia próbki (rysunek 10). Zniszczenie osiągnięto dopiero przy powtórzeniu próby na tej samej próbce. Osiągnięte wartości odkształceń nie uznano

za niszczące, ponieważ podczas pierwszej próby osłabiono próbkę.

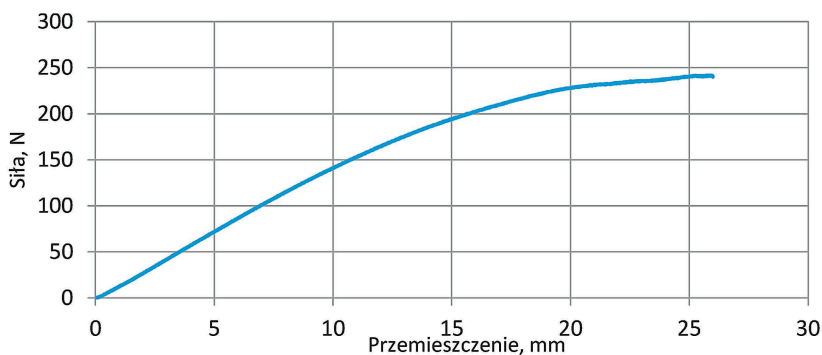


Rys. 9. Próbka zamontowana w uchwycie maszyny wytrzymałościowej przed przeprowadzeniem próby [7]



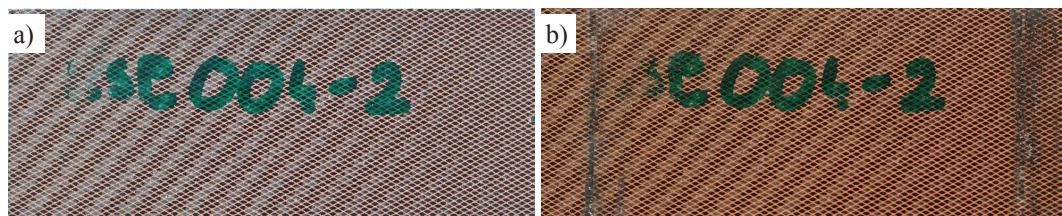
Rys. 10. „Wciąganie” próbki pomiędzy podpory w statycznej próbie trójpunktowego zginania [7]

Do dalszych badań cyklicznych jako strzałkę ugięcia odniesienia przyjęto maksymalną strzałkę ugięcia uzyskaną w próbie statycznej. Przebieg zależności siły od przemieszczenia zarejestrowanej przez maszynę wytrzymałościową przedstawia rysunek 11.



Rys. 11. Zależność siły od przemieszczenia w próbie statycznej dla próbki LSP_004-1 [7]

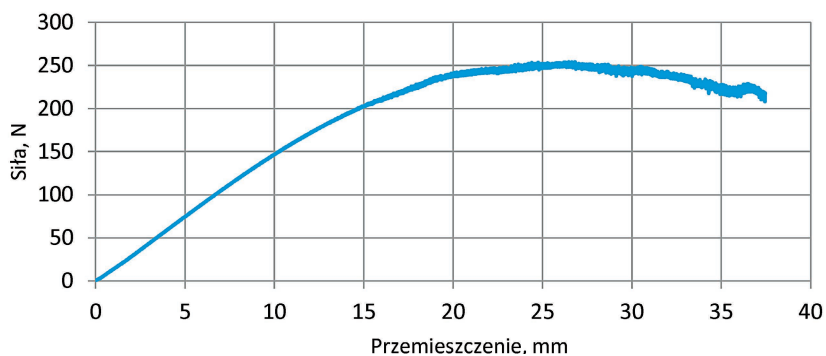
Dla tak wyznaczonej maksymalnej strzałki ugięcia przeprowadzono badania cykliczne (zgodnie z przebiegiem pokazanym w tabeli 3 dla próbki LSP-004-2) mające na celu zweryfikowanie stanu połączenia kompozyt/siatka LSP. Po każdym 36 000 cyklach przeprowadzano ocenę wizualną próbki. Po przeprowadzeniu 720 000 cykli nie stwierdzono żadnych uszkodzeń struktury – w obszarze laminatu węglowego, siatki LSP oraz ich połączenia. Jedyne uszkodzenia wynikały z ruchu względnego próbki i podpór maszyny wytrzymałościowej (wycieranie się próbki). Szerokość przetarć była mniejsza niż 5 mm.



Rys. 12. Próbka LSP-004-2: a) przed próbą; b) po próbie cyklicznego obciążania [7]

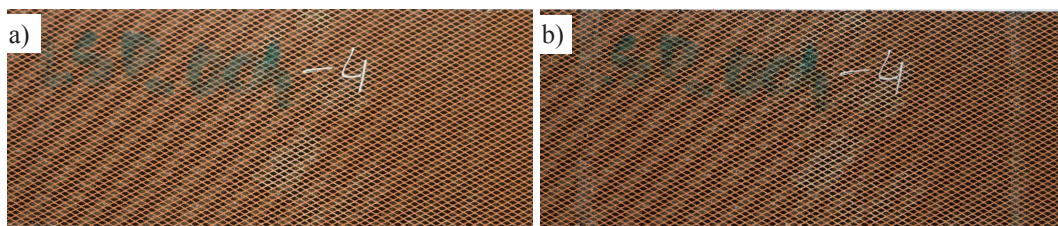
Następnie wykonano zgodnie z taką samą kolejnością badania próbki LSP_004 poddanej sezonowaniu. Podobnie jak w przypadku próbki LSP_004-1 także dla próbki po sezonowaniu (LSP_004-3) w próbie statycznej nie zniszczono próbki z powodu zbyt małego maksymalnego przemieszczenia głowicy maszyny wytrzymałościowej. W celu wyznaczenia odkształcenia odniesienia wykorzystano metodykę jak dla próbki bez sezonowania (LSP_004-1). Przebieg siły w zależności od przemieszczenia głowicy maszyny pokazano na rysunku 12.

Obciążenia cykliczne przeprowadzono zgodnie z przebiegiem pokazanym w tabeli 3 dla próbki LSP_004-4. Po każdym 36 000 cyklach przeprowadzano ocenę wizualną próbki. Po przeprowadzeniu próby cyklicznej, również dla próbki poddanej sezonowaniu nie wykryto żadnych uszkodzeń. Jedyne uszkodzenia wynikały z wycierania próbki o uchwyt maszyny. W tym przypadku szerokość przetarć także była mniejsza niż 5 mm.



Rys. 13. Zależność siły od przemieszczenia w próbie statycznej dla próbki LSP_004-3 [7]

Wahania siły w końcowej fazie próby (rysunek 13) wynikają z „wciągania” próbki pomiędzy podpory maszyny. Dla próbki LSP_004-1 nie jest widoczny taki efekt, ponieważ próbę zatrzymano przed wystąpieniem tego efektu.



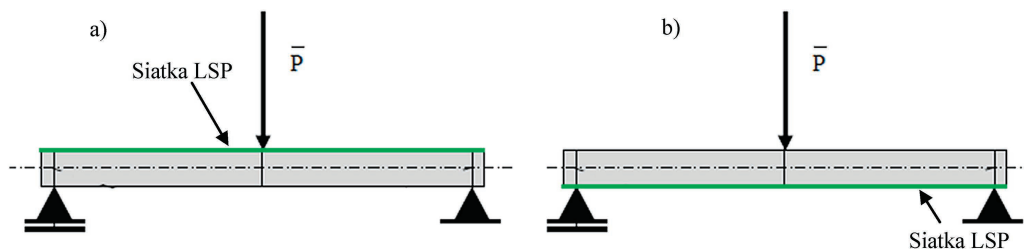
Rys. 14. Próbką LSP-004-4: a) przed próbą; b) po próbie cyklicznego obciążania [7]

Dla próbek LSP_004 nie ma uszkodzeń widocznych nieuzbrojonym okiem w obszarze połączenia kompozyt/siatka LSP. Sezonowanie nie wpłynęło znacznie na stan powierzchni od strony siatki. Jedynie nieznaczne ubytki zauważono w żywicy przesycającej siatkę, głównie w oczkach siatki. Ubytki te jednak były pomijalnie małe, gdyż w żadnym obszarze siatka nie została odsłonięta. Ubytki nie wpłynęły także na stan próbki po próbie cyklicznej oraz nie wpłynęły na połączenie kompozyt/siatka LSP.

W czasie prób cyklicznych wystąpiły zmiany wartości siły maksymalnej. Spowodowane było to znacznym przemieszczaniem się próbek podczas testu oraz ruchem rolek stanowiących podpory próbki podczas badań.

4.2. Wyniki dla próbki w konfiguracji LSP_002

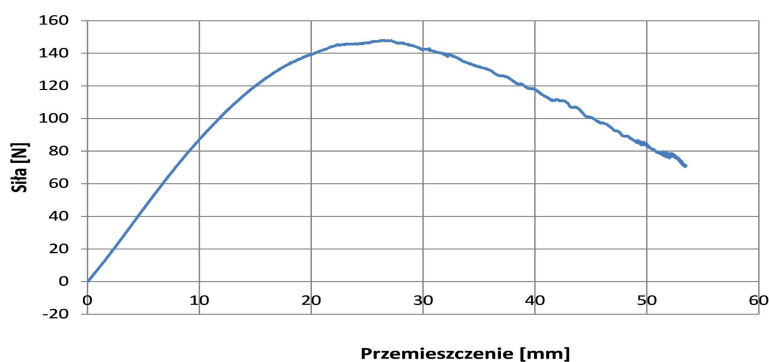
Dla próbek LSP_002 wykonano próbę w sposób analogiczny jak dla próbek LSP_004. Dla tej konfiguracji przetestowano dwa rodzaje pracy siatki LSP – rozciąganie (siatką zwróconą w uchwycie do trójpunktowego zginania do dołu) LSP_002-1 oraz ściskanie (siatka od strony głowicy maszyny wytrzymałościowej) LSP_002-3.



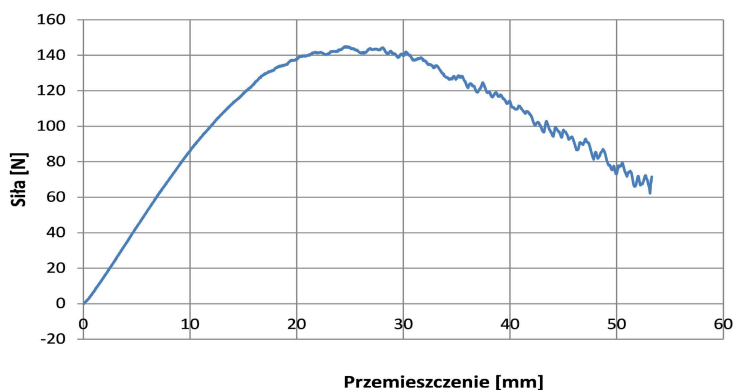
Rys. 15. Schemat położenia próbki z siatką LSP w uchwycie do trójpunktowego ściskania dla siatki ściskanej (a) LSP_002-3) oraz rozciąganej (b) LSP_002-1) [opracowanie własne, 2015]

Najpierw wykonano próbę statyczną. Dla badanych próbek (LSP_002-1 oraz LSP_002-3) w próbie statycznej nie osiągnięto zniszczenia próbek. Odształcenia niszczące dla próbek było większe niż maksymalne przemieszczenie głowicy maszyny wytrzymałościowej. Jako amplitudę odniesienia dla prób cyklicznych przyjęto, podobnie jak dla próbek LSP_004, maksymalne odształcenie osiągnięte w próbie statycznej. Nie powtarzano prób stycznych, ponieważ wynik z tej próby byłby niemiarodajny – próbka podczas pierwszej próby zostaje osłabiona.

Przebieg siły w funkcji przemieszczenia głowicy dla próby z siatką LSP ściskaną i rozciąganą przedstawiają rysunki 16 oraz 17.



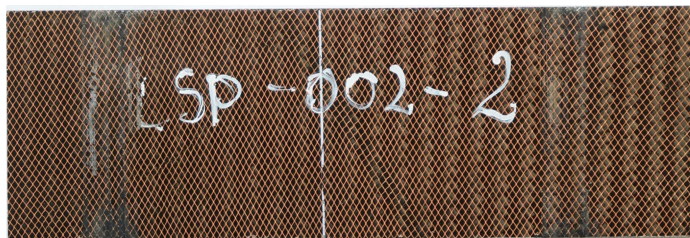
Rys. 16. Przebieg wartości siły w funkcji przemieszczenia głowicy maszyny wytrzymałościowej dla próbki LSP_002-1 (siatka LSP rozciągana) [6]



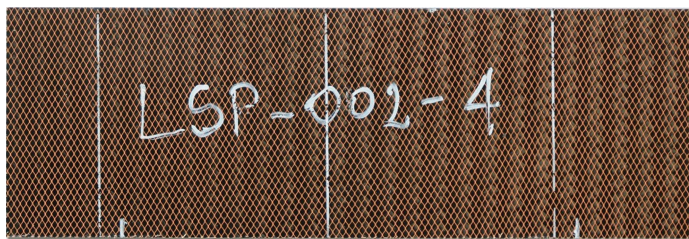
Rys. 17. Przebieg wartości siły w funkcji przemieszczenia głowicy maszyny wytrzymałościowej dla próbki LSP_002-3 (siatka LSP ściskana) [6]

Dla tak przeprowadzonych prób statycznych siła płynnie wzrasta aż do osiągnięcia maksimum przy około 25 mm przesunięcia głowicy maszyny wytrzymałościowej. Z dalszym wzrostem przemieszczenia siła spada, a jej przebieg jest zaburzony co spowodowane jest „wciąganiem” próbki między podpory uchwytu. Do dalszych prób cyklicznych jako odkształcenie maksymalne (wzorcowe) przyjęto przemieszczenia odpowiadające maksymalnej sile.

Próby cykliczne były przeprowadzane zgodnie z przebiegami prezentowanymi w tabeli 3. Dla próbki LSP_002-2 badania cykliczne były przeprowadzane z siatką rozciąganą. Co 36 000 cykli przeprowadzano ocenę wizualną. Po przeprowadzeniu łącznie 1 728 000 cykli dla próbki LSP_002-2 oraz 288 000 cykli dla próbki LSP_002-4 nie stwierdzono uszkodzeń struktury w obszarze kompozytu węglowego, siatki miedzianej oraz połączenia kompozyt/siatka LSP wynikających ze zginania próbki. Jedynymi zauważalnymi uszkodzeniami próbki były wytarcia na powierzchni siatki miedzianej o szerokości około 5 mm, które były wynikiem przesuwania się próbki na podporach uchwytu do trójpunktowego zginania, zarejestrowane dla próbki LSP-002-2.



Rys. 18. Próbką LSP-002-2 po próbie cyklicznego obciążania [6]



Rys. 19. Próbką LSP-002-4 po próbie cyklicznego obciążania [6]

W przypadku próbki LSP_002-2 dla ostatniej serii obciążeń cyklicznych zredukowano poziom obciążeń ze względu na znaczne przemieszczenia próbki względem uchwytu.

5. WNIOSKI

1. Po przeprowadzeniu badań nie stwierdzono uszkodzeń w strefie połączenia siatka LSP/kompozyt.
2. Sezonowanie próbki w podwyższonej temperaturze ($95\pm 2^\circ\text{C}$) i wilgotności ($85\pm 5\%$) nie wpłynęło negatywnie na stan połączenia siatka LSP/kompozyt. W danej konfiguracji próbka bez sezonowania jak i po sezonowaniu po 288 000 cyklach różniły się w strefie połączenia siatka LSP/kompozyt.
3. Nie stwierdzono również wpływu na trwałość połączenia siatka LSP/kompozyt sposobu pracy siatki (ściskanie oraz rozciąganie siatki). Próbka, w której siatka była rozciągana po 288 000 cyklach wykazywała taki sam stan połączenia siatka LSP/kompozyt jak próbka, w której siatka była ściskana.

4. Jedynymi uszkodzeniami próbek jakie zarejestrowano podczas badań były przetarcia wynikające z przesuwania się próbki na podporach w uchwycie do trójpunktowego zginania. W żadnym z przypadków nie przekroczyły one szerokości 5 mm.
5. Próbkę poddano dużym odkształceniom, które w rzeczywistych konstrukcjach występują bardzo rzadko (lub wcale). Przy tak niekorzystnych warunkach pracy nie zarejestrowano uszkodzeń w połączeniu siatka LSP/kompozyt, co pozwala wnioskować, że zastosowanie siatki LSP nie wiąże się z ryzykiem rozklejania pomiędzy siatką a kompozytem.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Federal Aviation Administration, Aviation Rulemaking Advisory Committee, 1998, AC/AMJ 20-TBD, AIRCRAFT LIGHTNING ZONING.
- [2] www.astrosealproducts.com.
- [3] www.compositesworld.com.
- [4] www.dexmet.com.
- [5] Kawakami, H., Feraboli, P., 2011, *Lightning strike damage resistance and tolerance of scarf-repaired mesh-protected carbon fiber composite*, Elsevier.
- [6] Bajurko, P., 2015, Raport z badań: Badania statyczne i zmęczeniowe próbek z siatką miedzianą LSP_002 w próbie zginania trójpunktowego, Instytut Lotnictwa, CKTL, Warszawa – niepublikowane.
- [7] Wilk, J., 2015, Raport z badań: Badania statyczne i zmęczeniowe próbek z siatką miedzianą LSP_004 w próbie zginania trójpunktowego, Instytut Lotnictwa, CKTL, Warszawa – niepublikowane.
- [8] Gardiner, G., 2006, "Lightning Strike Protection For Composite Structures", High-Performance Composites.
- [9] Black, S., 2013, "Lightning strike protection strategies for composite aircraft", High-Performance Composites.
- [10] Gagné, M., Therriault, D., 2014, "Lightning strike protection of composites", Progress In Aerospace Sciences 1-16.

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF RESISTANCE TO DELAMINATION OF THE COMPOSITE / LSP MESH

Abstract

The risk connected with the use of mesh LSP is associated with delamination on the mesh / composite interface. The study tested the impact of fatigue loads on the combination of the composite structure with a LSP mesh used to protect aircraft structures from the effects of lightning strikes. In order to accomplish this task in a static test determined the maximum deflection of the proposed samples and then make fatigue tests. During the test carried out in this order tested two configurations of samples differing layer stack primer composite (samples made from the prepreg carbon different arrangement of layers), and the thickness of the mesh (basis weight 107 g/m² and 195 g/m² commonly used in aircraft construction). As a result, studies have not detected damage at the composite structure and LSP mesh or LSP mesh/composite interface.

Keywords: LSP MESH; Lightning Strike Protection; experimental studies.