

Roman ŚWITKIEWICZ, Wojciech FRĄCZEK, Jędrzej MARJANOWSKI

Politechnika Warszawska

Technika wytwarzania bezadhezyjnych połączeń metal-kompozyt (BPMK) w strukturach z preimpregnatów VBO

Streszczenie. W artykule opisano technikę wykonywania bezadhezyjnych połączeń metal-kompozyt w strukturach nośnych z preimpregnatów utwardzanych poza autoklawem. Omówiono problem formowania tych struktur z prepregów, odnosząc się przy tym do techniki kontaktowej – na mokro. Przedstawiono założenia i wymagania dla procesu wykonania połączenia z uwzględnieniem specyficznych właściwości preimpregnatów. Opisano proces technologiczny, jaki został opracowany i pomyślnie zastosowany do wykonania elementów badawczych, zwracając uwagę na decydujący wpływ czynnika ludzkiego na prawidłowe wykonanie połączenia.

MANUFACTURING METHOD OF NON ADHESIVE METAL-COMPOSITE JOINT FOR VBO PREIMPREGNATES STRUCTURES

Summary. Manufacturing method of non adhesive metal-composite joint for primary structures made of VBO preimpregnates were described and discussed. The problem of forming such structures was presented regarding to composites fabricated by wet lay-up method. Taking into account specific features of preimpregnates, assumptions and requirements for manufacturing process of non adhesive metal-composite joint were defined. Manufacturing process, which has been designed and used for fabricate test elements, was described. Human factor was recognized as primary factor determining the correctness of joint.

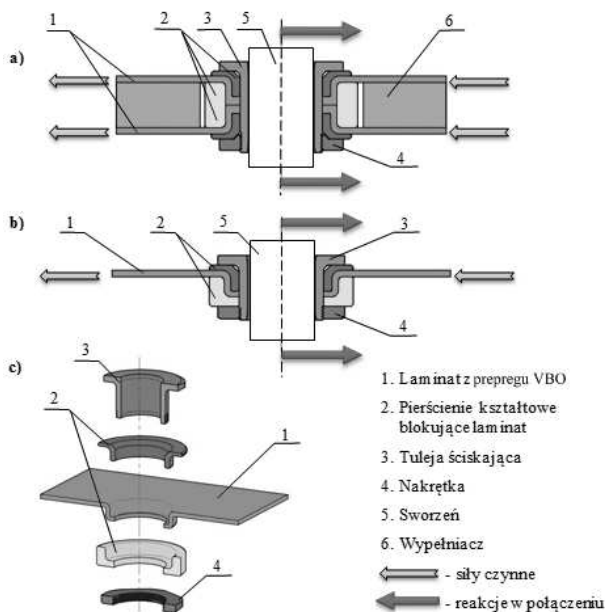
1. WSTĘP

Niskotemperaturowe i niskociśnieniowe preimpregnaty węglowe VBO (Vacuum Bag Only) są atrakcyjnym półfabrykatem dla wielu firm lotniczych, ponieważ oferują możliwość wykonania wysokiej jakości produktów bez konieczności stosowania kosztownego wyposażenia. Wykorzystywanie prepregów VBO do wytwarzania pierwszorzędowych struktur lotniczych niesie jednak za sobą

potrzebę opracowania szeregu rozwiązań konstrukcyjnych, w tym połączeń, pod kątem zastosowania nowego materiału. Jednym z takich rozwiązań jest bezadhezyjne połączenie metal-kompozyt (BPMK) służące do wprowadzania obciążeń skupionych. Podobne rozwiązanie jest z powodzeniem stosowane do struktur kompozytowych wykonywanych techniką przesycania kontaktowego [1]. Zastosowanie tego rodzaju połączeń w strukturach z prepregów VBO niesie za sobą ryzyko spotkania się z nieznanymi wcześniej problemami technologicznymi.

Bezadhezyjne połączenia metal-kompozyt dotyczą węzłów-okuć w rozłącznych połączeniach zespołów głównych statków powietrznych, zapewniając statykę tych zespołów, jak np. skrzydła-kadłub, usterzenie-kadłub, itp. (budowę typowych BPMK przedstawia Rys.1). Niniejsze opracowanie dotyczy połączenia przedstawionego na rysunku 1(b).

Technikę wytwarzania połączeń BPMK w strukturach VBO opracowano przyjmując założenia i wymagania odnośnie połączenia opisane w punkcie 3. Weryfikację tych wymagań, jak i samego procesu wytwarzania przeprowadzono wykonując 3 elementy badawcze.



Rys. 1. Bezadhezyjne połączenie metal-kompozyt. Przykładowy wariant dla: a) struktur przekładkowych, b) struktur warstwowych, c) połączenie w stanie zdemontowanym

2. WŁAŚCIWOŚCI NIEUTWARDZONYCH PREIMPREGNATÓW VBO W KONTEKŚCIE WYKONYWANIA POŁĄCZEŃ BPMK

W procesie produkcyjnym preimpregnatów VBO, podczas przesycania tkanin, syciwo dociera do elementarnych włókien w pasmach tkaniny. Dzięki zjawisku zwilżania osadza się na ich powierzchni i po odparowaniu substancji zmniejszających lepkość syciwa łączy włókna i pasma włókien. Charakterystycznym parametrem w procesie przesycania jest udział masowy syciwa w strukturze preimpregnatu. Stosunkowo niska zawar-

tość syciwa w preimpregnaty VBO, wynosząca ok. 35-42% [2], w porównaniu do ok. 50% dla kompozytów wykonywanych techniką kontaktową sprawia, że po procesie przesycania w warstwach zbrojenia powstają strefy bez syciwa.

Formowanie wyrobu, tj. układanie poszczególnych warstw preimpregnatu, w szczególności na powierzchniach nierozwijalnych jest znacznie trudniejsze niż w przypadku formowania w technice przesycania kontaktowego. Połączenie włókien elementarnych i pasm tkaniny przez lepkie syciwo, po procesie przesycania powoduje, że wzajemne przemieszczanie się względem siebie włókien i pasm jest praktycznie niemożliwe, bez rozzerwania tych połączeń w warstwach prepregu. Konfiguracja włókien elementarnych i pasm tkaniny preimpregnatu, uzyskana w procesie przesycania jest zachowana w dalszych procesach, tzn. przy formowaniu i utwardzaniu struktur kompozytowych. Jest to ograniczenie w formowaniu struktury z prepregów VBO, w przeciwieństwie do formowania struktur z kompozytów techniką kontaktową, gdzie takie ograniczenia nie występują. Stanowi ono podstawowe utrudnienie w zastosowaniu preimpregnatów do wykonywania połączeń BPMK ze względu na geometrię samego węzła, gdzie występują powierzchnie nierozwijalne.

Kolejnym problemem jest konieczność odpowietrzenia preimpregnatu. Dla wykonywanych połączeń BPMK proces odpowietrzenia preimpregnatu następuje równocześnie z procesem formowania struktury, w trakcie realizacji mechanicznego docisku preimpregnatu przez elementy metalowe połączenia. Ze względu na geometrię samego węzła istnieją duże trudności w wykonywaniu odsysania powietrza w czasie układania kolejnych warstw prepregu, co przekłada się na porowatość utwardzonego laminatu (Rys. 2).

3. ZAŁOŻENIA I WYMAGANIA

3.1. Założenia ogólne

- Preimpregnat VBO: Cytec MTM46/CF0300 – 199 g/m² – 42% RW, tkanina symetryczna krzyżowa, splot 2/2, włókno węglowe 3K
- Struktura laminatu (rys.1, pozycja 1): łącznie 11 warstw prepregu VBO o kierunkach pasm w tkaninie $\pm 45^\circ$ oraz 0-90°, ułożonych naprzemiennie w następu-

jącej sekwencji: $[(\pm 45) / (0,90) / (\pm 45) / (0,90) / (\pm 45) / (0,90) / (\pm 45) / (0,90) / (\pm 45) / (0,90) / (\pm 45)]$

- Cykle cieplne: utwardzanie w temp. 80°C/5h, dotwardzanie w temp. 135°C/1,5h
- Elementy metalowe BPMK kontaktujące się bezpośrednio z kompozytem (Rys.1, poz.2) – stal nierdzewna H17N2A, pozostałe elementy (Rys. 1, poz. 3 i 4) – stal konstrukcyjna węglowa lub stopowa
- Wykonywanie połączenia BPMK: wszystkie operacje wykonywane ręcznie, jak dla konstrukcji prototypowych
- Dla praktycznej weryfikacji opracowanej techniki wytwarzania przewidziano wykonanie minimum trzech elementów badawczych BPMK, które poddano badaniom nośności statycznej w temperaturze RT oraz badaniom integralności struktury kompozytu w obszarze BPMK

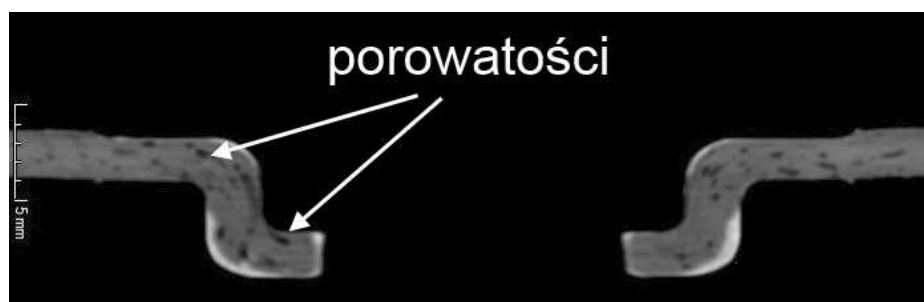
3.2. Wymagania ogólne

Kwalifikacje pracowników oraz warunki klimatyczne w pomieszczeniach, w odniesieniu do temperatury, wilgotności i czystości powinny spełniać standardy jak dla wykonywania konstrukcji lotniczych z kompozytów polimerowych chemoutwardzalnych, wg technologii przesycania kontaktowego.

Transport i przechowywanie preimpregnatów muszą spełniać wymagania producenta, wymagana jest pełna dokumentacja czasu i temperatury przechowywania preimpregnatów w chłodziarkach i poza chłodziarkami.

3.3. Wymagania dla procesu wykonywania połączeń

Formowanie struktury kompozytowej połączenia w strefie elementów metalowych – tzw. węzła należy wykonywać w jednej operacji z pozostałą strukturą elementu badawczego. Ze względu na specyficzne cechy preimpregnatu dopuszcza się przecinanie pasm preimpregnatu w obszarze węzła połączenia w celu uformowania struktury na powierzchniach nierozwijalnych elementów metalowych połączenia. Puste przestrzenie w obszarze węzła, spowodowane przecinaniem włókien w procesie formowania należy przed dalszymi operacjami wypełnić klejem Hysol EA 9394 i utwardzić. Wszystkie elementy metalowe połączenia, kontaktujące się bezpośrednio z kompozytem, należy pokryć warstwą antyadhezyjną (na



Rys. 2. Porowatości w strukturze kompozytowej połączenia BPMK

bazie polimerów lub wosków), aby zapewnić bezadhezyjny kontakt elementów metalowych połączenia z kompozytem i klejem Hysol EA 9394.

W celu ograniczenia niekorzystnego wpływu odkształceń cieplnych części metalowych połączenia na nieodtworzoną strukturę spoiwa, co mogłoby doprowadzić do powstania defektów w strukturze polimeru, proces dotwardzania w temperaturze 135°C należy prowadzić bez elementów metalowych połączenia.

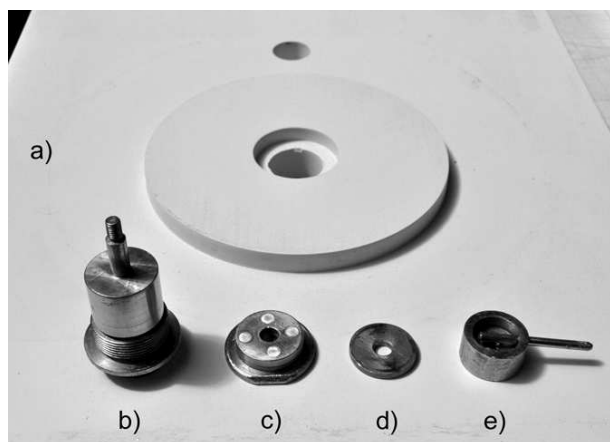
Podczas wykonywania połączenia wymagana jest automatyczna realizacja i rejestracja cykli cieplnych, tj. utwardzania i dotwardzania. Końcowy montaż elementów metalowych połączenia BPMK należy wykonać w temperaturze RT.

3.4. Kontrola techniczna w procesie wykonywania połączeń

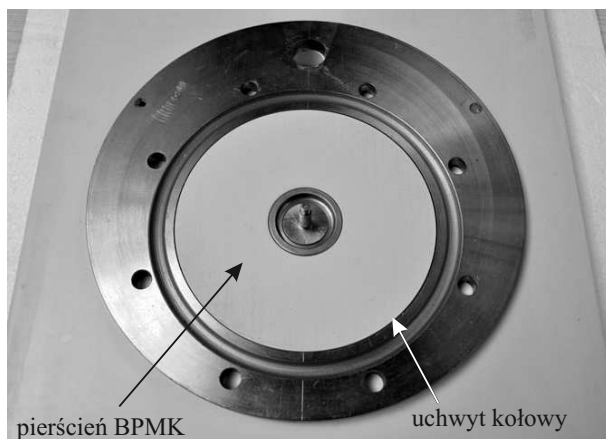
- Wizualna ocena powierzchni kompozytu w obszarze wężła po procesie utwardzania
- Pomiar geometrii struktury kompozytu w obszarze wężła po procesie utwardzania – pomiędzy elementami metalowymi i kompozytem nie powinno być luzu
- Wizualna ocena struktury kompozytu w obszarze wężła po uzupełnieniu ubytków klejem Hysol EA 9394

4. OPRZYRZĄDOWANIE ROBOCZE DO WYKONYWANIA ELEMENTÓW BADAWCZYCH BPMK

Dla wykonywania elementów badawczych BPMK zaprojektowano i wykonano specjalny foremnik (Rys. 3) bazujący podczas wykonywania elementu badawczego elementy metalowe połączenia (Rys. 1, poz. 2) oraz kołowe elementy uchwytowe do mocowania elementu badawczego w maszynie wytrzymałościowej. Oprzyrządowanie zapewnia zachowanie geometrii wężła podczas wykonywania połączenia.



Rys. 3. Elementy oprzyrządowania do wykonywania elementów badawczych: a) płyta foremnika, b) sworzeń prowadzący, c) talerzyk centrujący, d) podkładka dystansowa, e) nakrętka

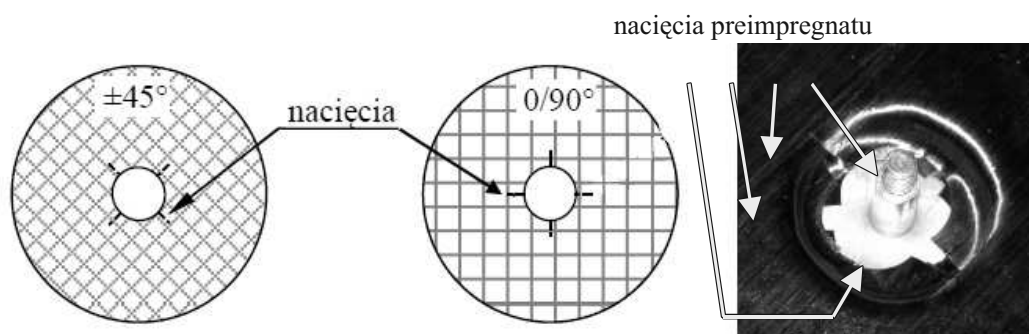


Rys. 4. Foremnik z okładziną uchwytu kołowego i pierścieniem BPMK gotowy do wykonywania struktury kompozytowej elementu badawczego

Ze względu na niskie temperatury utwardzania preimpregnatu, przyjęte na poziomie 80°C, foremnik wykonany jest z płyty poliuretanowej AXSON LAB1001 posiadającej Tg na poziomie 100°C. Elementy ustawcze i prowadzące foremnika wykonane są ze stali nierdzewnej. Na rysunku 4 pokazano elementy metalowe BPMK oraz okładzinę uchwytu kołowego zamocowane w foremniku i gotowe do wykonywania struktury kompozytowej BPMK.

5. CZYNNOŚCI PROCESU WYKONYWANIA BPMK

- Przygotowanie foremnika: powierzchnię foremnika pokryć warstwą rozdzielczą o odporności cieplnej do 100°C, np. woskiem ABEL INDUSTRIE 54D
- Przygotowanie elementów metalowych BPMK: elementy BPMK wykonano ze stali konstrukcyjnej wysokiej jakości H17N2A poddanej obróbce cieplnej, pierścienie kształtowe na powierzchniach kontaktu z kompozytem pokryć warstwą rozdzielczą ABEL INDUSTRIE 54D
- Przygotowanie formatek preimpregnatu: cięcie ręczne nożyczkami lub specjalnym ploterem, nacinanie pasm preimpregnatu każdej formatki na kierunkach wzdłuż włókien w obszarze wężła połączenia (Rys.5.)
- Formowanie struktury kompozytowej: dopuszczalne odchyłki kątów przebiegu włókien zbrojenia na powierzchniach rozwijalnych $\pm 2^\circ$
- Odgazowanie – odpowietrzenie preimpregnatu: wymagane stosowanie pakietu podciśnieniowego (przepony) i utrzymywanie podciśnienia w zakresie 0,095-0,098 MPa
- Utwardzanie struktury: w temperaturze 80°C przez 5h
- Demontaż elementów metalowych połączenia, uzupełnienie ubytków kompozytu w obszarze wężła klejem strukturalnym Hysol EA 9394
- Utwardzanie kleju: w temperaturze RT przez dobę



Rys. 5. Nacięcia w warstwach preimpregnatu

- Dotwardzanie struktury poza foremnikiem: w temperaturze 135°C przez 1,5 h
- Montaż końcowy: wycięcie nadadków kompozytu z otworu w pierścieniach, montaż tulei ściskającej i nakrętki (Rys. 1 poz. 3 i 4) – moment dokręcenia 65 Nm, montaż uchwytów kołowych (dotyczy wykonania elementów badawczych, Rys. 6)



Rys. 6. Połączenie gotowe do badań

6. WYNIKI

Zgodnie z przyjętymi założeniami wykonano 3 elementy badawcze BPMK. Po przeprowadzonej kontroli wykonanych elementów badawczych stwierdzono, że geometria węzła i stan integralności struktury kompozytowej w strefie węzła po uzupełnieniu klejem Hysol EA 9394 były zgodne z wymaganiami. Oznacza to, że podstawowy warunek stałej objętości kompozytu w strefie węzła połączenia BPMK jest spełniony.

Zbadana nośność statyczna połączenia w temperaturze RT dała wyniki nieco niższe (o 3,5–10%) niż dla

porównywalnej struktury kompozytowej wykonanej z kompozytu chemoutwardzalnego techniką kontaktową. Obecnie trwają prace nad modyfikacją geometrii węzła w celu zmniejszenia zjawiska „leniuchowania” w kolejnych warstwach kompozytu w obszarze połączenia, czyli zwiększenia równomierności rozkładu odkształceń w poszczególnych warstwach podczas pracy połączenia.

7. WNIOSKI – CZYNNIK LUDZKI

Technologia wykonywania elementów z prepregów VBO, przy ręcznym formowaniu struktur, wymaga od pracowników wysokich kwalifikacji odpowiednich dla spełnienia dezyderatu integralności kompozytu, istotne znaczenie mają także motywacje pracowników. Zakładane właściwości struktur kompozytowych osiąga się po zrealizowaniu cykli cieplnych utwardzania i dotwardzania przy podciśnieniowych naciskach. Sprawność komór cieplnych, foremników grzanych i instalacji podciśnieniowej ma tutaj decydujące znaczenie. Stąd wynikają wymagane kwalifikacje i wysoka odpowiedzialność obsługujących pracowników.

Ograniczenie negatywnego wpływu czynnika ludzkiego można osiągnąć przez modernizację i automatyzację w zakresie technik wytwarzania. W budowie samolotów, w pierwszej fazie budowane są prototypy przeznaczone do badań i prób. W tej fazie zastosowanie pełnej mechanizacji i automatyzacji, z punktu widzenia kosztów nie jest celowe.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Frączek W.: Sprawozdanie z Projektu Badawczego Nr 5T12C04525, 2006
- [2] Cytec Industries Inc, PDS1191 – MTM46, 2013, issue 7a

„Praca finansowana przez NCBIR, nr umowy PBS1/B6/1/2012”.