

Andrzej GRZĄDZIELA

Wydział Mechaniczno-Elektryczny, Akademia Marynarki Wojennej  
e-mail: a.grzadzIELA@amw.gdynia.pl

## Wykorzystanie polimerów w konstrukcjach okrętowych układów napędowych – problemy w diagnozowaniu

**Streszczenie.** Zastosowanie materiałów polimerowych w konstrukcjach okrętów wojennych rozpoczęło się powszechnie w latach 70-tych XX wieku. W okresie tym istniejąca technologia umożliwiała wykorzystanie tych materiałów najpierw do konstrukcji laminatowych kadłubów a następnie w realizacji elementów napędowych i strukturalnych. Początkowy zachwył własnościami materiałów laminatowych został wyparty wieloma wątpliwościami oraz pytaniami dotyczącymi możliwościami modelowania cech fizycznych, trwałości, odporności pożarowej i udarowej, oddziaływaniem na środowisko i użytkownika oraz możliwościami oceny degradacji stanu technicznego w trakcie eksploatacji. Referat przedstawi współczesny zakres stosowalności materiałów kompozytowych w konstrukcjach okrętowych oraz problematykę diagnozowania i realizacji napraw doraźnych.

### APPLICATION OF POLYMERS IN CONSTRUCTION OF THE MARINE PROPULSION SYSTEMS – PROBLEMS IN DIAGNOSING

**Summary.** Applications of laminate materials in the construction of warships began generally in the 70s of the twentieth century. Existing technology enabled the use of laminate materials first to the structure of fiberglass hulls and in the implementation of the drive elements and structural characteristics. The initial enthusiasm of laminates properties has been forced out by many doubts and questions about the modeling capabilities of physical characteristics. Moreover, next questions arisen regarding the durability, fire and impact resistance and finally possibilities assessment of the technical state. The paper presents contemporary scope of application of composite materials in the construction of ships and the issue of diagnosis and implementation of emergency repairs.

#### 1. WSTĘP

Zastosowanie materiałów kompozytowych w okrętownictwie wynika z ich specyficznych właściwości, którymi są: łatwość wytwarzania złożonych form w postaci jednolitych elementów, odporność na gnicie w środowisku wody morskiej oraz korozję i oddziaływania chemikaliów, dobre własności fizyczne oraz niskie koszty utrzymania elementów laminatowych. Należy jednak pamiętać, że laminaty są bardziej narażone na oddziaływania udarowe takie jak wejście na mieliznę czy kolizja z nabrzeżem lub inną jednostką. Kolejnym problemem jest ich odporność na oddziaływania zmęczeniowe szczególnie charakterystyczne dla pracy kadłuba lub elementów okrętowego układu napędowego na fali morskiej. Anizotropowość materiałów, przybliżone teorie odporności na złożony stan naprężeń utrudniają uzyskanie jednoznacznych wyników dla konstruktora [1]. Złożony charakter własności fizycznych materiałów laminatowych powoduje, że przy wyższych obciążeniach impulsowych należy problemy energetyczne rozpatrywać, jako silnie nieliniowe, uwzględniające odkształcenie materiału, rozwarstwienie oraz przebicie [9,10]. Zadanie to najczęściej jest rozwiązywane z wykorzystaniem praw Herza zdefiniowanych już w 1882 roku [4]. Rozwiązania takie są jednak obarczone błędami, którymi są:

1. liczne interakcje oddziaływań wewnętrznych w tym rozwarstwienia zmęczeniowe lub obciążeniowe,
2. błędy wynikające z charakterystyk materiałów w temperaturach poniżej 0°C [5],

3. charakterystyka lokalna delaminacji materiału,
4. problemów w modelowaniu obciążeń ścinających charakterystycznych dla przebijalności.

Z tego powodu w projektowaniu potrzebne są również duże marginesy bezpieczeństwa [1, 2]. Badania realizowane w różnych ośrodkach wskazują na następujące główne problemy w zakresie modelowania numerycznego wewnętrznej delaminacji, powierzchniowych wyboczeń oraz degradacji struktury [8,11,12]:

1. modelowania udarów o niewielkiej energii, których efektem są wgniecenie lub małe pęknięcia,
2. modelowania efektów lokalnej delaminacji spowodowanej udarami o niewielkiej energii,
3. modelowania efektów perforacji laminatu w wyniku oddziaływań wysokoenergetycznych w różnych kierunkach.

Brak możliwości modelowania uszkodzeń metodami analitycznymi czy numerycznymi w zasadzie sprowadza diagnostykę techniczną jedynie do określenia zbioru potencjalnych przyczyn uszkodzeń a nie to sprecyzowania genezy awarii.

#### 2. ELEMENTY UKŁADÓW NAPĘDOWYCH WYKONANE Z LAMINATÓW

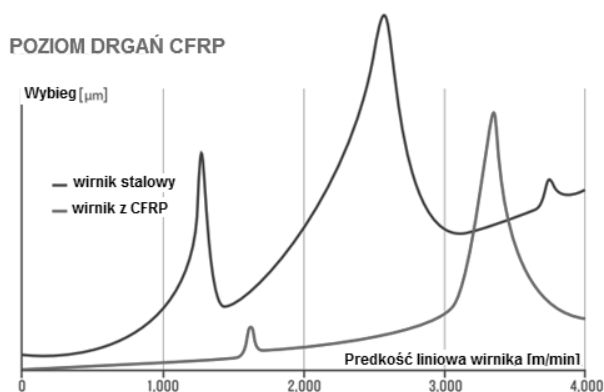
Okrętowe układy napędowe wymagają specyficznych rozwiązań technicznych, których cechy wynikają nie tylko z praktyki inżynierskiej, ale głównie z wymagań towarzystw klasyfikacyjnych. Jest to jednym z powodów determinujących powolną akceptację nowych materiałów i technologii w okrętownictwie.

Pierwszymi elementami układów napędowych wykonanymi z laminatów były wały pośrednie, które transmitowały jedynie moment napędowy nie przenosząc sił poosiowych. Obecnie wały i wirniki wykonane w technologii CFRP znalazły szerokie zastosowanie w napędach pomocniczych, tj. pomp, wirówek, wentylatorów, pędników pomocniczych [14]. Podstawową zaletą takiego rozwiązania jest znacznie niższa emisja drgań, co jest szczególnie istotne dla okrętów wojennych ze względu na potrzebę redukcji pola hydroakustycznego emitowanego do środowiska morskiego – rys. 1. Dodatkowo istnieje obecnie możliwość projektowego modelowania prędkości krytycznych i odporności na czynniki chemiczne. Niezwykle istotną zaletą jest także łatwość przechowywania w warunkach zasolenia mgłą powietrzną bez obawy o korozję i jej wpływ na własności mechaniczne.

Znacznie większe uznanie znalazły laminaty w łożyskowaniu i uszczelnieniu wałów śrubowych. Podstawowymi zaletami łożysk, tulei i uszczelnień wykonanych z laminatów są:

- możliwość pracy na sucho lub w środowisku wody morskiej,
- brak występowania wybrzuszeń pod wpływem obciążenia w wodzie,
- bardzo niski współczynnik rozszerzalności termicznej we wszystkich osiach zarówno w wodzie tropikalnej jak i arktycznej,
- odporność na ścinanie oraz odchyłki tolerancji współosiowości,
- możliwość zaprojektowania i wykonania łożysk pozakatalogowych rozmiarów,
- materiały laminatowe nie są źródłem korozji.

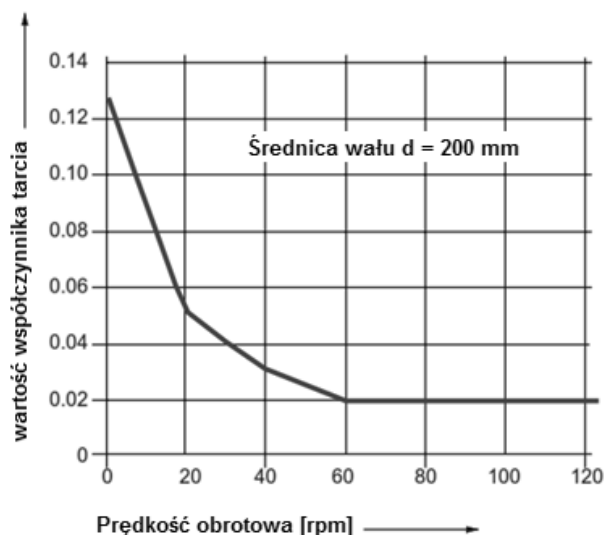
Laminaty znalazły głównie zastosowanie w uszczelnieniu i łożyskowaniu trzonów sterowych, ale również takich elementów jak łożyska dźwigów pokładowych, podkładki pod przesuwą pokrywą łuku, w systemach cumowniczych oraz w urządzeniach hydraulicznych dla ciśnień roboczych w zakresie od 25 do 100 MPa, pracując nawet 1,5 miliona cykli bez wymuszonego smarowania [7]. Powszechnie wykorzystywane algorytmy obliczeń są



Rys. 1. Porównanie emisji drgań wirników stalowych i wykonanych z CFRP. Skala prędkości liniowej odniesiona do promienia łożyska wirnika [14]

proste i dotyczą najczęściej dwóch podstawowych wymiarów bazowych, jakimi są średnica wału śrubowego oraz wartość tolerancji wykonania uszczelnień. Zasada działania łożyska oparta na wytworzeniu siły hydrodynamicznej, co w praktyce sprowadza się do wytworzenia konstrukcji spiralnej łożyska, którego stosunek długości do średnicy łożyska (w zależności od średnicy wału, prędkości obrotowej i obciążenia) zmienia się w zakresie od 4:1 do 2:1 [7]. Jeżeli łożysko podlega procesom ściernym, jak ma to miejsce np. na uszczelnieniu trzonu sterowego, to stosuje się twardsze tuleje wału lub powłoki z węgla.

Konstrukcja łożyska pozwala na wytworzenie filmu hydrodynamicznego dla małych prędkości wału, nawet w sytuacji zmniejszenia tarcia. Akceptowalne siły hydrodynamiczne uzyskuje się nawet przy prędkościach liniowych wału wynoszących  $v = 0,41$  m/s. Ograniczeniem jest jedynie maksymalna średnica wału wynosząca  $D = 0,3$  m. W obliczeniach smarowania łożysk wału śrubowego lub wirników pomp wody zaburtowej przyjmuje się, że przepływ wody nie może być mniejszy niż  $0,18$  dm<sup>3</sup> wody na minutę na każdy milimetr średnicy wału [7].



Rys. 2. Przykładowa zmiana współczynnika tarcia w funkcji prędkości obrotowej wału o  $d = 0,2$  m [7]

Takie smarowanie zapewnia przewidywalne konstrukcyjnie obliczenia współczynników tarcia – rysunek 2.

Wały śrubowe wysoko obciążone wymagają bardziej efektywnego smarowania wodą morską ze względu na obciążenia wzdłużne, skrętne i giętne. Rozwiązaniem technologicznym są łożyska wielorowkowe typu spiralnego (Multi Groove Bearing) – rysunek 3.

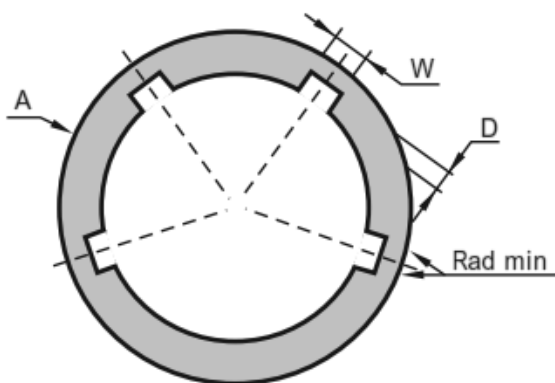
W zależności od średnicy wału zmienia się liczba rowków, ich rozmiar oraz tolerancje – rysunek 4.

Wadami łożysk laminatowych stosowanych w uszczelnieniach wałów urządzeń morskich jest konieczność wysoce precyzyjnego wykonania stalowej obudowy łożyska ze względu na fakt, że podczas pracy łożyska lami-



Rys. 3. Przykładowy widok wału śrubowego podpartego łożyskiem wielorolkowym

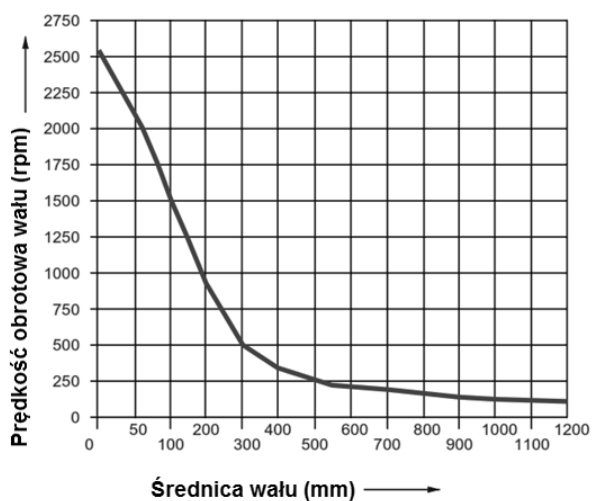
nat dopasowuje się kształtem do obudowy a nie do wału lub trzonu. Skutkuje to ryzykiem błędów technologicznych montażu a w efekcie zbyt szybkim rozszczelnieniem. Kolejnym problemem jest materiał i sposób obróbki wału, wirnika lub trzonu sterowego. Łożyska smarowane wodą muszą współpracować z materiałami odpornymi na korozję (w celu zapewnienia niskiego zużycia) takimi jak stal nierdzewna, brąz fosforowy czy brąz.



Rys. 4. Przekrój poprzeczny łożyska laminatowego, wielorolkowego [7]

Ponadto, wały, wirniki lub trzony powinny być gładkie, bez obcinania krawędzi z uwagi na potencjalną możliwość ścinania powłoki łożyska. Dodatkowo istnieje ograniczenie regulujące maksymalną prędkość obrotową jako funkcję średnicy wału, co niekiedy w okrętownictwie ogranicza możliwość zastosowania łożysk laminatowych – rysunek 5. Ograniczenie to wynika z faktu szybkiego zużycia materiału łożyska.

Diagnostyka łożysk laminatowych z wykorzystaniem metod nieinwazyjnych jest bardzo trudna i opiera się na doświadczeniach wielkoseryjnych lub o metody kazuistyczne. Anizotropowość materiału oraz silna zależność jego cech od nawet niewielkich błędów technologicznych wskazuje na konieczność stosowania diagnostyki wielosymptomowej popartej wywiadem inżynierskim. Dodatkowo problem diagnostyki komplikuje fakt, że nawet niewielkie uszkodzenia konstrukcji laminatowych są źródłem zanieczyszczeń powietrza, których efektem mogą być zaburzenia oddychania lub konieczność płukania oczu lub ich izolacja. Innym problemem jest zachowanie



Rys. 5. Zależność maksymalnej prędkości obrotowej wału w łożysku laminatowych, jako funkcja średnicy [7]

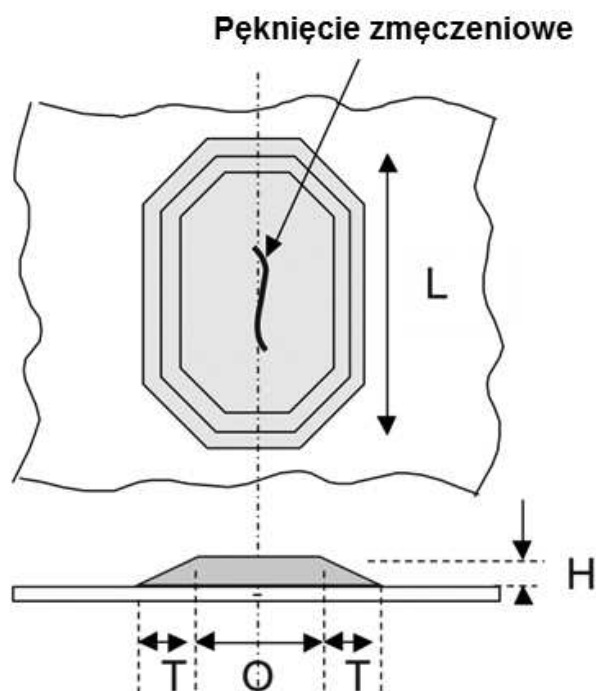
się laminatu w środowisku pożarowym, gdzie efektem kontaktu z otwartym ogniem jest tlenek węgla (czad), co wymusza na jednostce pływającej stosowania czujników czadu i przenośnych środków ochrony oddechowej (maski przeciwgazowe) [6].

### 3. KONSTRUKCJA KADŁUBA I WYPOSAŻENIA OKRĘTU – DIAGNOSTYKA I NAPRAWA

Zastosowanie materiałów laminatowych w konstrukcjach okrętowych zostało przedstawiona przez autora w pozycji [3]. Wskazano na zakres stosowalności, rozwiązania konstrukcyjne oraz na wady i zalety laminatów w konstrukcjach okrętów wojennych. Istotnym elementem eksploatacji kadłubów laminatowych oraz wyposażenia wewnątrz kadłubowego jest identyfikacja uszkodzeń oraz metody ich naprawy. Kolejnym problemem jest akceptacja przyjętej technologii przez towarzystwa klasyfikacyjne lub armatora ze względu na własne przepisy wewnętrzne oraz ograniczeń wynikających z konwencji SOLAS i MARPOL.

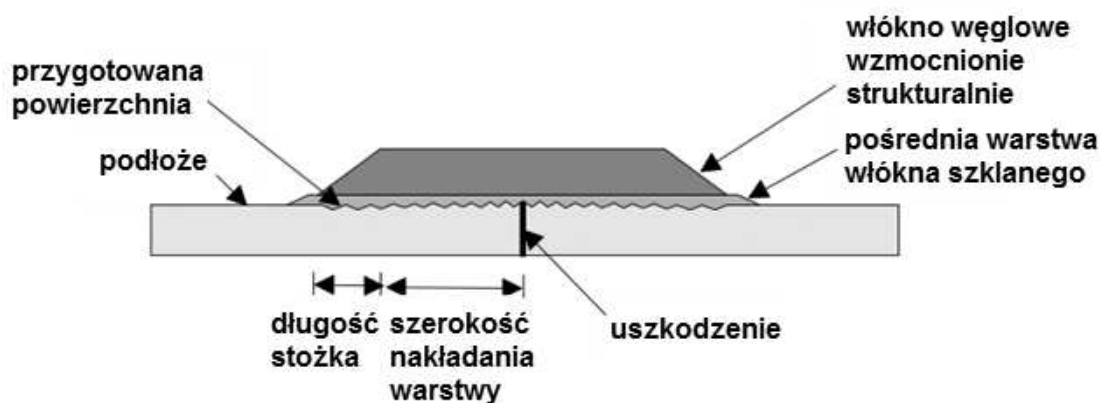
Podstawową zaletą konstrukcji laminatowych w porównaniu z konstrukcjami stalowymi lub aluminiowymi jest ich łatwość naprawy. Doświadczenia Polskiej Marynarki Wojennej z użytkowania jednostek typu 207 M wskazują, że dostarczone przez Stocznnię Marynarki Wojennej zestawy plastrów naprawczych wraz z technologią ich stosowania potwierdziły ich skuteczność i łatwość montażu. Działania te jednak były stymulowane przez wewnętrzne przepisy MW RP, gdyż żadne z towarzystw klasyfikacyjnych nie zatwierdziło technik plastrów naprawczych, jako procedur klasyfikowanych i aprobowanych pod względem bezpieczeństwa morskiego. Zastosowanie plastrów naprawczych na powierzchniach kadłuba laminatowego lub stalowego wiąże się z standaryzacją wymiarów plastra – rysunek 6.

Oprócz metod ręcznego nakładania żywicy coraz większe zastosowanie ma metoda próżniowej infuzji ży-



Rys. 6. Wymiarowanie plastra naprawczego z laminatu [14], gdzie  $L$  – długość całkowita plastra,  $H$  – grubość plastra, uwzględnieniem ewentualnego podłoża metalowego,  $O$  – strukturalna szerokość o wzmożonej sztywności,  $T$  – szerokość podkładu zależna od grubości plastra

wicy. Zaletą tej metody wynika z jej uniwersalności, zarówno w naprawach konstrukcji stalowych jak i laminatowych. Przygotowanie podłoża metalowego polega na uzyskaniu wymaganej chropowatości i czystości – rysunek 7. Osiąga się to zazwyczaj przez piaskowanie lub z użyciem ręcznych szlifierek. Na powierzchnię stykową wkłada się warstwę włókien szklanych a następnie włókna węglowe celem uniknięcia korozji. Następnie układa się pozostałe warstwy włókien przy wlewie żywicy oraz zamknięciu w tzw. komorze próżniowej, która w zależności od rodzaju żywic może być podgrzewana aż do momentu uzyskania utwardzenia.



Rys. 7. Przekrój struktury naprawczej laminatu na powierzchni metalowej [14]

Plastry laminatowe stosowane w metodzie infuzyjnej w przypadku powłok stalowych mogą zostać wykorzystane w następujących zastosowaniach:

- naprawa pęknięć zmęczeniowych,
- naprawa uszkodzeń korozyjnych,
- uszczelnienia przecieków w zbiornikach,
- wzmocnienie struktury konstrukcji wewnętrznej w efekcie detonacji lub dodatkowego obciążenia udarowego.

Zaletami napraw laminatowych powłok stalowych w odniesieniu do metod spawalniczych są:

- brak ograniczeń bezpieczeństwa w warunkach otwartego ognia – spawanie,
- zarządzanie indywidualne w zakresie doboru wielkości powłoki uszczelniającej,
- brak ograniczeń w złożonej geometrii powierzchni,
- redukcja kosztów realizacji naprawy,
- szybkość naprawy i zdolności do dalszej eksploatacji,
- niewielki ciężar, łatwość transportu i obsługi w miejscu prowadzonej pracy.

#### 4. PODSUMOWANIE

Bez wątpienia materiały polimerowe umocniły swoją pozycję w okrętownictwie, znajdując szerokie spektrum zastosowań zarówno konstrukcyjnych jak i naprawczych. Umiejętne wykorzystanie ich właściwości pozwala na wysoce efektywne i ekonomicznie uzasadnione zastosowanie zarówno w elementach kadłuba, nadbudówki, zbiorników jak i w transmisji momentu napędowego. Problemem podstawowym są trudności w akceptacji materiałów polimerowych przez towarzystwa klasyfikacyjne, których dość konserwatywne procedury wymagają przedstawienia jednoznacznych algorytmów obliczeniowych.

Podstawowymi zaletami, które przemawiają za stosowaniem materiałów polimerowych w okrętownictwie są:

- niższe wymagania operatora w zakresie prowadzenia czynności naprawczych (niż w przypadku innych metod, np. spawania),
- brak konieczności stosowania toreb próżniowych, kociów grzewczych (metoda infuzyjna),

- możliwość stosowania w obszarach dławnic rurociągów lub kabli elektrycznych bez konieczności ich demontażu,
- możliwość stosowania na powierzchniach pionowych,
- niższe koszty materiałowe,
- łatwość napraw dużych powierzchni,
- możliwość zastosowania metod nisko emisyjnych,
- niskotemperaturowa technologia.

Oprócz problemów dotyczących procedur obliczeniowych czynnikami, które ograniczają stosowalność materiałów polimerowych są:

- problemy zastosowania w miejscach zakurzonych, wilgotnych i tłustych,
- konieczność mieszania żywic na miejscu co może wpłynąć na jakość,
- trudności w składowaniu,
- problemy w diagnozowaniu spoin, konstrukcji oraz określeniu stopnia zużycia.

#### BIBLIOGRAFIA

1. Abrate S., *Impact on composite structures*. Cambridge UK: Cambridge University Press; 1998.
2. Bhajantri V.S., Bajantri S.C., Shindolkar A.M., Amarapure S.S., *Design and Analysis of Composite Drive Shaft*, International Journal of Research in Engineering and Technology, Volume: 03 Special Issue: 03, May 2014, pp. 738 – 745 (ISSN: 2321-7308)
3. Grządziela A., *Kadłuby laminatowe dla okrętów zwalczania min – problemy technologiczne*, Przetwórstwo Tworzyw, nr 1/2014, str. 21 – 27, (ISSN 1429-0472).
4. Johnson K.L., *Contact mechanics*. Cambridge, UK: Cambridge University Press; 1985
5. Marshall I.H., *Composite structures*, Vol. 47, Dec. 1999, Elsevier (ISSN: 0263-8223)
6. Mouritz A.P., Mathys Z., Gibson A.G., *Heat release of polymer composites in fire*, Composites: Part A 37 (2006), pp. 1040–1054.
7. *Orkot Marine Bearings*, Engineering Manual v 4.0.
8. Richardson MOW, Wisheart M.J., *Review of low-velocity impact properties of composite materials*. Composites Part A 1996; 27A: pp.1123 – 1131.
9. Sutherland L.S., Soares C.G., *Impact behaviour typical marine composite laminates*. Compos Part B, Composites Part B Engineering, April 2005, pp. 89 – 100.
10. Sutherland L.S., Soares C.G., *The use of quasi-static testing to obtain the low velocity impact damage resistance of marine GRP laminates*, Composites Part B Engineering April 2012, pp. 1459 – 1467.
11. Sutherland L.S., Soares C.G., *Effects of laminate thickness and reinforcement type on the impact behaviour of e-glass/polyester laminates*, Compos Sci Technol 1999;59: pp. 2243 – 2260.
12. Sutherland L.S., Soares C.G., *Impact characterisation of low fibre volume glass reinforced polyester circular laminated plates*. Int J Impact Eng 2005;31: pp.1 – 23.
13. Turton T.J., Dalzel-Job J., Livingstone F., *Oil Platforms, Destroyers And Frigates – Case Studies Of Qinetiq's Marine Composite Patch Repairs*, ACMC/SAMPE Conference on Marine Composites Plymouth, 11-12 September 2003, (ISBN 1-870918-02-9).
14. *Xperion CFRP drive shafts*, Sep. 2013.

Data przyjęcia publikacji do druku 10-02-2016.