

Hubert DĘBSKI, Karol SZKLAREK, Michał GOLUCH

NUMERYCZNA ANALIZA ŁOPATY TURBOZESPOŁU WIATROWEGO

Streszczenie

Elektrownie wiatrowe stanowią alternatywne i nowoczesne źródło energii odnawialnej, której znaczenie we współczesnej gospodarce stale wzrasta. Ze względu na niekiedy bardzo duże gabaryty tego typu urządzeń, proces ich projektowania i wytwarzania jest zadaniem skomplikowanym, wymagającym wykorzystania nowoczesnych materiałów i technologii. W pracy przedstawiono problematykę dotyczącą zagadnień projektowania i analizy podstawowych elementów elektrowni wiatrowych – łopat turbiny. Przeprowadzona została numeryczna symulacja modelu kompozytowej łopaty z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Ocenę stopnia wyężenia struktury kompozytu przeprowadzono z wykorzystaniem tensorowego kryterium zniszczenia Tsai-Wu. Przeprowadzone obliczenia numeryczne dają możliwości dokładnej analizy projektowanych konstrukcji kompozytowych, stanowiących coraz częściej we współczesnych konstrukcjach elementy o charakterze nośnym.

WSTĘP

W efekcie realizacji Pakietu klimatycznego UE, w perspektywie 2020 wszystkie technologie energetyki odnawialnej znacząco poprawią swoją konkurencyjność wobec energetyki konwencjonalnej i jądrowej. Zakłada się, że w 2020 roku elektrownie wiatrowe będą najtańszym odnawialnym źródłem energii elektrycznej, której koszty będą porównywalne z kosztami produkcji energii w funkcjonujących elektrowniach jądrowych. Będą one jednak niższe od wszystkich innych technologii wytwarzania energii elektrycznej, jak m.in. ze spalania węgla, gazu i ropy naftowej [1]. Scenariusz zaopatrzenia kraju w nośniki energii, uzyskany w wyniku symulacji i uwzględnienia Pakietu klimatycznego UE oraz trendów i optymalizacji kosztowej, przewiduje wyprodukowanie łącznie ze źródeł odnawialnych energii (elektrycznej, ciepła i paliw transportowych) odpowiadającej ok. 21% finalnego zużycia energii w Polsce w 2020 r.

Podstawowym warunkiem wydajności oraz opłacalności budowy elektrowni wiatrowej jest jej lokalizacja. W związku z tym, iż pomiary wietrzności dla przydomowych elektrowni wiatrowych są czasochłonne i niezwykle kosztowe, dlatego doboru lokalizacji należy dokonać w oparciu o tzw. mapę wietrzności. Na wydajność elektrowni wiatrowych znaczny wpływ ma ukształtowanie terenu (podłużne wzgórza, pojedyncze wzgórza i góry, skarpy, zagłębienia, przełęcze) oraz przeszkody (budynki, drzewa). Przykładem terenu o jednolitej szorstkości jest płaski, równinny obszar porośnięty trawą. Bariery terenowe, które znajdują się na drodze przepływających mas powietrza powodują gwałtowne zmniejszenie prędkości wiatru oraz wzrost turbulencji w jej pobliżu. Zaburzenia te mają bardzo negatywny wpływ na trwałość oraz żywotność konstrukcji elektrowni. Aby energię wiatru można było wykorzystać do produkcji prądu, należy wybrać odpowiednią lokalizację i oszacować opłacalność inwestycji. Elektrownie wiatrowe pracują zazwyczaj przy wietrze wiejącym z prędkością od 5 do 25 m/s, jednak za najlepszą prędkość uznawana jest od 15 do 20 m/s. Za małe prędkości uniemożliwiają wytwarzanie energii elektrycznej, która będzie miała wystarczającą moc, natomiast zbyt duże (powyżej 30m/s) mogą uszkodzić wiatrak.

1. BUDOWA ELEKTROWNI WIATROWEJ

Podstawowym oraz najczęściej budowanym rodzajem współczesnych elektrowni wiatrowych są elektrownie o poziomej osi

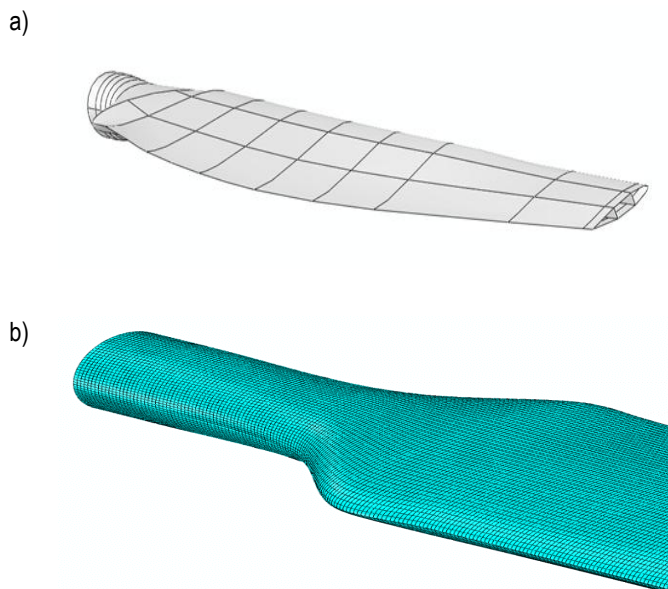
obrotu. Typowa elektrownia wiatrowa o poziomej osi obrotu składa się z następujących podzespołów: wieży nośnej z fundamentem, turbiny wiatrowej (wirnik turbiny, łopaty i układ sterowania ich położeniem), głowicy zawierającej generator, przekładni (niektóre typy), łożysk, przekształcalnika energoelektrycznego, układu smarowania, chłodzenia i hamowania, transformatora blokowego oraz układu sterowania położeniem turbiny względem wiatru, układów sterowania elektrownią wiatrową oraz układów pomiarowych i systemów telekomunikacyjnych. Głównym podzespołem elektrowni wiatrowej jest turbina wiatrowa, której wirnik osadzony na wale głównym przekazuje napęd do przekładni mechanicznej, która napędza generator. Cały zwarty zespół wału głównego, przekładnia oraz generator umieszczone są w głowicy, osadzonej najczęściej na łożysku wieńcowym, umożliwiającym obrót wokół wieży przy pomocy serwo mechanizmów elektronicznych. Najczęściej spotykanym modelem turbiny jest turbina złożona z trzech aerodynamicznych łopat, które w zależności od typu wirnika mogą mieć stałą, lub regulowaną kąt nastawienia względem wiatru. Ze względu na duże gabaryty turbin elektrowni wiatrowych (rys.1), do wytwarzania łopat turbiny konieczne jest wykorzystanie nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych, umożliwiających uzyskanie minimalnej masy konstrukcji, przy jednoczesnym zapewnieniu wymaganej sztywności oraz wytrzymałości całego zespołu. Większość nowoczesnych łopat wykonana jest z włókna szklanego wzmocnionego poliestrem lub żywicą epoksydową. Jako wzmocnienie używa się też włókien węglowych lub kevlaru, ale takie rozwiązanie jest bardzo kosztowne, szczególnie przy większych łopatach.



Rys. 1. Transport pojedynczej łopaty elektrowni wiatrowej

2. PRZEDMIOT I ZAKRES BADAŃ

Przedmiotem badań była łopata elektrowni wiatrowej, wykonana z kompozytu szklano/epoksydowego, o całkowitej długości wynoszącej 4 m. Model geometryczny łopaty wykonano z wykorzystaniem oprogramowania CAD: Catia V5. Konstrukcja nośna łopaty składała się z kompozytowego poszycia wykonanego z ośmiu warstw o zróżnicowanym układzie włókien oraz dwóch kompozytowych dźwigarów, których zadaniem było usztywnienie konstrukcji na kierunku wzdłużnym łopaty – rys.2.



Rys. 2. Model geometryczny (a) oraz dyskretny (b) łopaty elektrowni wiatrowej [opracowanie własne]

Zakres badań obejmował numeryczną symulację wytrzymałości modelu łopaty z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Budowę modelu numerycznego przeprowadzono na podstawie modelu geometrycznego łopaty, wykorzystując w procesie dyskretyzacji elementy powłokowe typu *Shell* [2]. Opracowany model dyskretny złożony był z 77474 elementów skończonych oraz 229992 węzłów, co prowadziło do zadania obliczeniowego wynoszącego 1379829 równań geometrycznie nieliniowych. Sformułowany problem numeryczny stanowi zatem zagadnienie geometrycznie nieliniowe, do rozwiązania którego zastosowano przyrostowo-iteracyjną metodę Newtona-Raphsona [3,4].

Do odwzorowania struktury kompozytu w obszarze elementu skończonego wykorzystano technikę modelowania *Layup-Ply* [2], umożliwiającą definicję właściwości poszczególnych warstw laminatu po grubości elementu skończonego. Strukturę kompozytowego poszycia łopaty w konfiguracji warstw $[0/-45/+45/0/0/+45/-45/0]_T$ przedstawiono na rys. 3.

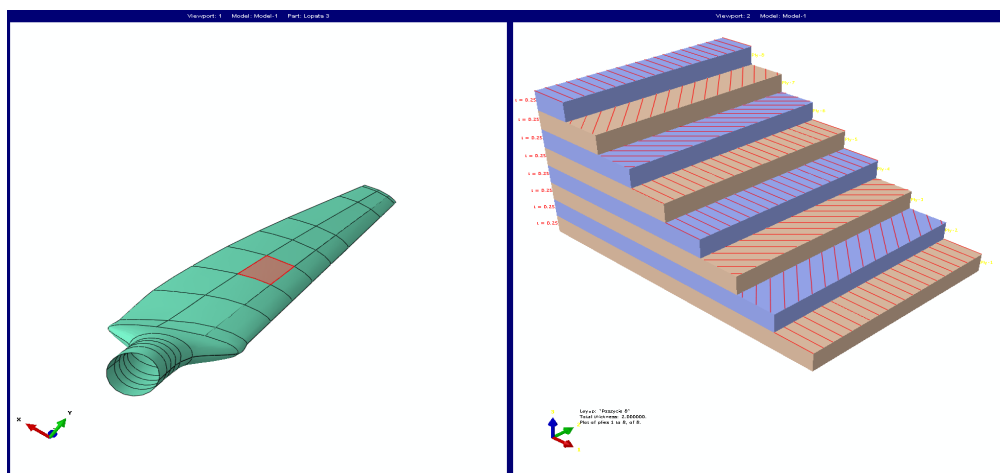
Do zdefiniowania właściwości kompozytu zdefiniowano model materiału ortotropowego w płaskim stanie naprężenia. Na podstawie danych literaturowych [5] przyjęto następujące właściwości mechaniczne kompozytu szklano/epoksydowego TVR-180: moduły Younga $E_1=46430\text{MPa}$, $E_2=14920\text{MPa}$, liczbę Poisson'a w płaszczyźnie warstwy $\nu_{12}=0,27$ oraz moduły Kirchhoffa $G_{12}=G_{13}=G_{23}=5200\text{MPa}$, gdzie kierunek 1 oznacza kierunek ułożenia włókien, natomiast 2 – oznacza kierunek prostopadły do włókien. Do oceny wyężenia materiału kompozytowego wykorzystano interakcyjne kryterium zniszczenia Tsai-Wu [6], bazujące na wyznaczonych eksperymentalnie parametrach granicznych kompozytu [5]: wytrzymałość kompozytu na rozciąganie – w kierunku włókien $F_{TU1}=1534\text{MPa}$ i w kierunku prostopadłym do włókien $F_{TU2}=74,5\text{MPa}$, wytrzymałość kompozytu na ściskanie – w kierunku włókien $F_{CU1}=1046\text{MPa}$ i w kierunku prostopadłym do włókien $F_{CU2}=214\text{MPa}$ oraz wytrzymałość na ścinanie w płaszczyźnie warstwy $F_{SU1}=58\text{MPa}$.

Obciążenie modelu numerycznego stanowiło ciśnienie rozłożone równomiernie na wewnętrznej powierzchni łopaty, odpowiadające prędkości wiatru wynoszącej $V_w=20\text{m/s}$. Warunki brzegowe modelu odwzorowywały zamocowanie końca łopaty, poprzez zablokowanie węzłom znajdującym się na krawędzi mocowania wszystkich translacyjnych i rotacyjnych stopni swobody (w tym przekroju łopaty jest przykręcona do piasty).

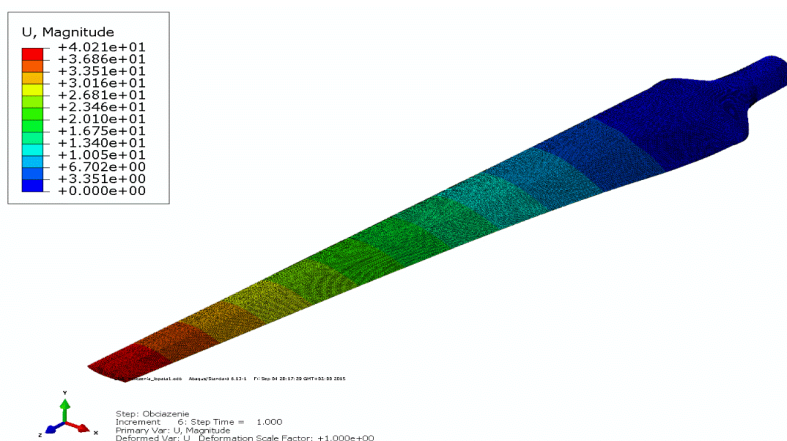
3. WYNIKI ANALIZY NUMERYCZNEJ

Przeprowadzona analiza numeryczna umożliwiła dokonanie oceny stopnia deformacji oraz wyężenia badanej konstrukcji. Na rys. 4 przedstawiono rozkłady przemieszczeń węzłowych łopaty, których maksymalne wartości kształtują się na poziomie 40mm i dotyczą odchylenia końcówki łopaty w kierunku działającej siły nośnej.

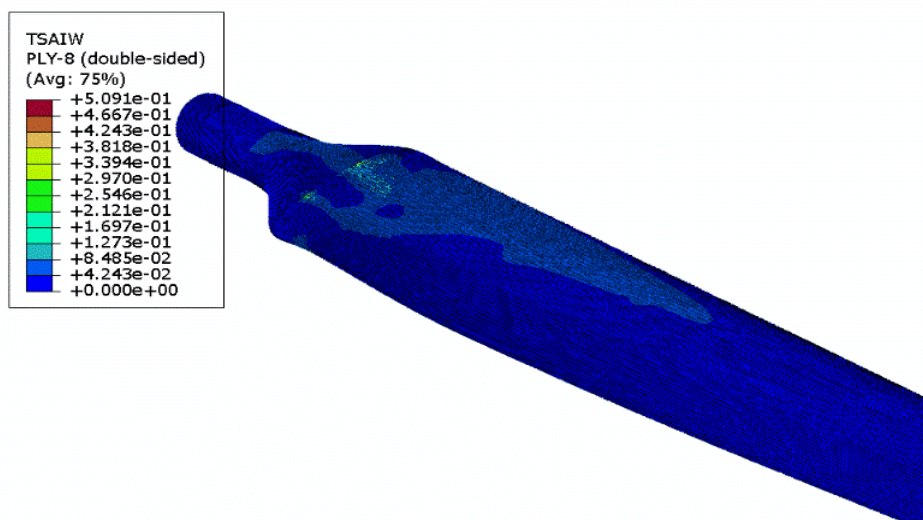
Analizę wytrzymałości konstrukcji łopaty przeprowadzono na podstawie wyznaczonych numerycznie map wyężenia materiału kompozytowego, określonych z wykorzystaniem interakcyjnego kryterium zniszczenia Tsai-Wu [6]. Zastosowane kryterium jest kryterium 0-1, gdzie wartość 1 oznacza parametr krytyczny, dla którego osiągnięto zniszczenie materiału kompozytowego [5]. Mapę parametru krytycznego dla modelu łopaty wg kryterium Tsai-Wu przedstawiono na rys. 5.



Rys. 3. Struktura kompozytowego poszycia łopaty $[0/-45/+45/0/0/+45/-45/0]_T$ [opracowanie własne]



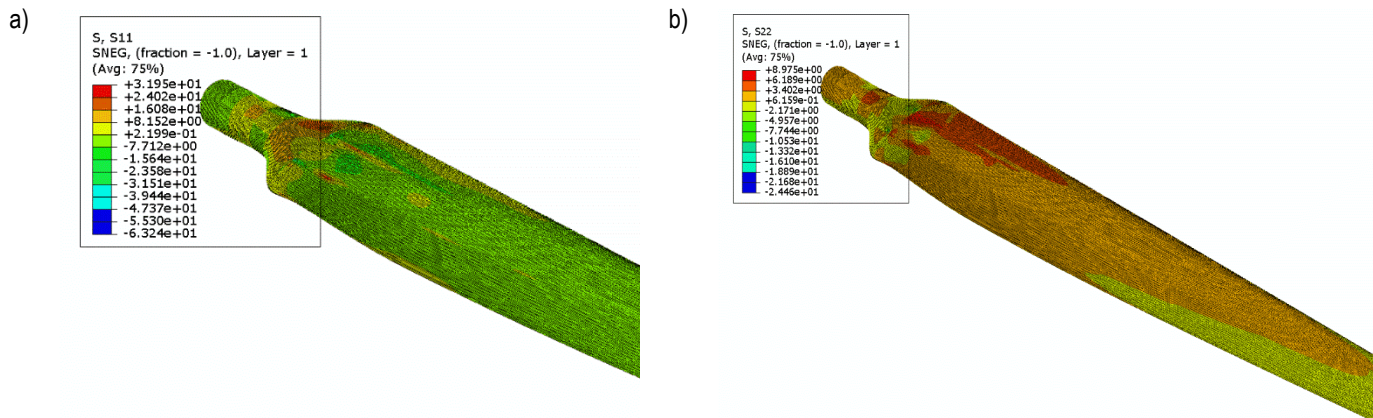
Rys. 4. Mapa przemieszczeń węzłowych łopaty [opracowanie własne]



Rys. 5. Mapa parametru krytycznego wg kryterium zniszczenia Tsai-Wu [opracowanie własne]

Prezentowane na rys.5 wyniki dotyczą ósmej warstwy kompozytu o kierunku ułożenia włókien 0° względem podłużnej osi łopaty. Przeprowadzone obliczenia wykazały największe wyężenie materiału kompozytowego właśnie w tej warstwie kompozytu. Maksymalne wartości parametru krytycznego otrzymano na poziomie 0.5 w pobliżu obszaru mocowania łopaty, co oznacza, że nie zostały przekroczone parametry graniczne materiału kompozytowego.

Przeprowadzone obliczenia umożliwiają dokładną analizę poszczególnych składowych stanu naprężenia w każdej warstwie materiału kompozytowego. Pozwala to na ocenę pracy laminatu, dostarczając informacji przydatnych w procesie projektowania tego typu konstrukcji. Na rys. 6 zaprezentowano przykładowe mapy składowych stanu naprężenia S11 – w kierunku włókien oraz S22 – w kierunku prostopadłym do włókien, otrzymane w pierwszej warstwie poszycia łopaty.



Rys. 6. Rozkłady naprężeń w kierunku włókien (a) oraz w kierunku prostopadłym do włókien (b) w pierwszej warstwie kompozytu [opracowanie własne]

WNIOSKI

W pracy przeprowadzono analizę numeryczną wytrzymałości łopaty turboszespołu wiatrowego, poddanej działaniu napływu powietrza o prędkości 20m/s. Ocenę stopnia odkształcenia oraz wytrzymałości konstrukcji przeprowadzono na podstawie wyznaczonych przemieszczeń węzłowych modelu łopaty oraz map parametru krytycznego w oparciu o interakcyjne kryterium zniszczenia Tsai-Wu. Otrzymane w obliczeniach numerycznych maksymalne ugięcie końcówki łopaty, wynoszące 40 mm, potwierdza dostateczną sztywność zaprojektowanej konstrukcji.

Przeprowadzone obliczenia pozwoliły na identyfikację niewralgicznych obszarów analizowanej struktury, które zlokalizowane były w pobliżu strefy mocowania łopaty. Przeprowadzona analiza wykazała dostateczną wytrzymałość zaprojektowanej struktury, co potwierdzone zostało brakiem spełnienia kryterium zniszczenia we wszystkich obszarach konstrukcji (maksymalna wartość parametru krytycznego w strukturze kompozytu wyniosła 0,5). Otrzymane wyniki umożliwiły również identyfikację najbardziej wyęteżonej warstwy kompozytu w pokryciu łopaty, którą okazała się warstwa nr 8, o kącie ułożenia włókien wynoszącym 0° względem osi podłużnej łopaty.

Przeprowadzona analiza numeryczna stanowi przykład modelowania oraz interpretacji wyników obliczeń numerycznych z wykorzystaniem metody elementów skończonych, dotyczących konstrukcji wykonanych z nowoczesnych materiałów kompozytowych. Przewodzenie tego typu analiz daje duże możliwości w projektowaniu oraz optymalizacji parametrów konstrukcyjnych, często bardzo złożonych struktur występujących w nowoczesnych rozwiązaniach konstrukcyjnych.

BIBLIOGRAFIA

1. Trevor M. Letcher Future Energy, Elsevier, 2008.
2. Abaqus HTML documentation.
3. Łodygowski T., Kąkol W.: Metoda elementów skończonych w wybranych zagadnieniach mechaniki konstrukcji inżynierskich. Alma Mater, Poznań 2003.
4. Rusiński E., Czmochoński J., Smolnicki T.: Zaawansowana metoda elementów skończonych w konstrukcjach nośnych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.
5. Bieniaś J., Dębski H.: Numeryczna analiza tarcz kompozytowych zbrojonych włóknami szklanymi i węglowymi w warunkach złożonego stanu obciążenia. KOMPOZYTY Nr 2/2010, 127-132.
6. Tsai SW, Wu EM. A general theory of strength for anisotropic materials, J. Compos Mater, 1971.

NUMERICAL ANALYSIS OF WIND TURBINE BLADES

Abstract

Wind turbines are an alternative and modern renewable energy source which importance in the modern economy still growing. Due to the sometimes very large dimensions of this type of equipment, the process of design and manufacture is a complex task, requiring the use of modern materials and technology. The paper presents issues concerning design issues and analysis of the basic elements of wind turbines - the blades of the

turbine. It was performed numerical simulation model of composite blades using the finite element method. Assess the level of effort of the composite structure was carried out with the use of tensor criterion of Tsai-Wu. The performed numerical calculations give the possibility of a thorough analysis of the proposed composite structures, which are increasingly in modern construction elements with carrier character.

Autorzy:

Dębski Hubert - Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Mechatroniki, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin h.debski@pollub.pl

Szklarek Karol - Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Mechatroniki, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin k.szklarek@pollub.pl

Goluch Michał - Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin. Student.