

# Analiza oddziaływań dynamicznych profili z kompozytów węglowych na różne rodzaje wymuszenia

## Analysis of dynamic reactions in carbon fiber profiles on various types of excitation

PIOTR DEUSZKIEWICZ \*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.12.556

W artykule przedstawiono analizę oddziaływań dynamicznych (np. występowania stanów krytycznych) w konstrukcji z kompozytu węglowo-epoksydowego na przykładzie wału maszynowego przy różnych rodzajach wymuszenia. Przeprowadzony eksperyment miał dać odpowiedź na pytanie, czy da się przewidzieć zachowania dynamiczne występujące w trakcie normalnej eksploatacji (wymuszenie kinematyczne) na podstawie doświadczeń wykonanych na stanowisku laboratoryjnym przy wymuszeniu realizowanym siłą harmoniczną lub impulsową.

**SŁOWA KLUCZOWE:** dynamika, kompozyt węglowo-epoksydowy

*The article presents an analysis of dynamic interactions (e.g. occurrence of critical states) with the construction of carbon fiber composite (for example the drive shaft) for different types of excitation. Experiment was conducted to answer the question whether it is possible to predict the dynamic behaviour occurring during normal operation (force kinematic) based on the experiment made at the laboratory when the excitation was implemented as a harmonic or impulse force.*

**KEYWORDS:** dynamic, carbon fiber composite

Profile kompozytowe w chwili obecnej znajdują coraz częściej zastosowanie we wszelakiego rodzaju konstrukcjach. Dotychczas stosowano je przede wszystkim w konstrukcjach obciążonych głównie statycznie, jako elementy poszyc i konstrukcji uźebrowanych (w samolotach, szybowcach, czy jachtach), czasami też w układach wirujących (np. łopatkach turbin). Wykorzystanie kompozytów stopniowo urozmaicane jest konstrukcjami obciążonymi w sposób dynamiczny. Ponieważ konstrukcje z kompozytów węglowych cechują się dużą wytrzymałością przy niewielkiej masie, naturalnym zastosowaniem wydaje się ich przeznaczenie na elementy układów napędowych gdzie niska bezwładność ma duży wpływ na sprawność. Jako przykład takiej konstrukcji możemy podać kompozytowe wały służące do transmisji napędu, powszechnie stosowane w bolidach Formuły 1 i luksusowych samochodach sportowych. Obecnie zaczynają one stopniowo pojawiać się w zastosowaniach dostępnych dla zwykłych „zjadaczy chleba”. Jednocześnie rozwiązania konstrukcyjne takiego sposobu przeniesienia napędu utrzymywane są w ścisłej tajemnicy przez poszczególnych producentów. Brak jest tym samym publikacji opisujących sposoby nawet wstępnych obliczeń dynamicznych konstrukcji kompozytowych czy chociażby wyników przeprowadzonych badań, nie mówiąc

już o badaniach złożonych efektów dynamicznych, które w takich konstrukcjach występują w sposób naturalny. Lukę tę częściowo wypełniają prace [1–4].

Celem przeprowadzonego eksperymentu była analiza oddziaływań dynamicznych (np. występowania stanów krytycznych) w konstrukcji z kompozytu węglowego na przykładzie wału maszynowego przy różnych rodzajach wymuszenia. Wykonane analizy miały dać odpowiedź na pytanie, czy da się przewidzieć zakres występowania stanów krytycznych i czy jesteśmy w stanie zbudować funkcjonalny z inżynierskiego punktu widzenia model matematyczny na podstawie pomiarów realizowanych na stanowisku laboratoryjnym przy wymuszeniu innym niż kinematyczne, wywołane bezwładnością obracającego się wału.

### Geneza i główne założenia eksperymentu

Jak wiadomo, wytwory z kompozytów węglowych cechują się dużą elastycznością oraz są silnie nieliniowe i anizotropowe [5]. Cechy te powodują, że tradycyjne metody obliczeniowe, stosowane np. przy projektowaniu konstrukcji stalowych, nie zdają tutaj egzaminu. „Klasyczne” podejście do projektowania może spowodować, że w jego efekcie zaprojektowane wytwory najczęściej będą wielokrotnie przewymiarowane (co jest nie bez znaczenia, zważywszy na cenę materiału). Jednocześnie występuje ryzyko, że tak wykonana konstrukcja nie spełnia podstawowych założeń wytrzymałościowych [1, 6, 7].

Zgodnie z dostępną wiedzą wał kompozytowy w postaci profilu walcowego („rury”) cechuje duża sztywność skrętna i znaczna wytrzymałość przy niewielkim ciężarze jednostkowym. Mała masa jest szczególnie istotna dla długich wałów pracujących pod pewnym kątem do poziomu, ponieważ małe są wówczas ugięcia statyczne pod ciężarem własnym. Pozwala to na wyeliminowanie dodatkowych węzłów łożyskowych, co znacznie upraszcza konstrukcję i obniża koszty eksploatacji w wyniku eliminacji potencjalnych źródeł awarii układu. Dodatkowym atutem takiej konstrukcji jest mały moment bezwładności, co ułatwia rozruch mechaniczny układu.

Ze względu na brak metodyki obliczeń dynamicznych konieczne wydaje się przeprowadzenie zarówno badań eksperymentalnych dynamiki wałów z materiałów kompozytowych w normalnych warunkach pracy, jak i badań porównawczych w warunkach laboratoryjnych.

Wydawać by się mogło, że temat obliczeń wałów maszynowych został wyczerpany lata temu i nie ma w tej materii wiele nowego do dodania. Jednak w przypadku zmiany materiału z „klasycznego” na kompozyt węglowy bądź węglowo-aramidowy całe dotychczasowe podejście do konstruowania „bierze w łeb”. Kompozyt taki po pierwsze jest strukturą anizotropową, niespełniającą przy odkształcaniu

\* Dr inż. Piotr Deuskiewicz (uszyi@simr.pw.edu.pl) – Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Podstaw Budowy Maszyn

w którymkolwiek kierunku prawa Hooke'a, a po drugie nie jest materiałem w naszym dotychczasowym rozumieniu, nabiera bowiem cech materiałowych dopiero po ukształtowaniu (!). Nie da się zatem wyników badań dokonanych na próbce idealnej (przeważnie w postaci płaskiej belki) przenieść na wał maszynowy pracujący w trudnych (złożonych) warunkach obciążenia. Badając dynamikę układów obrotowych z elementami kompozytowymi, napotykamy cały czas szereg nowych zjawisk, wymagających dosyć złożonych badań [1–4, 6, 7].

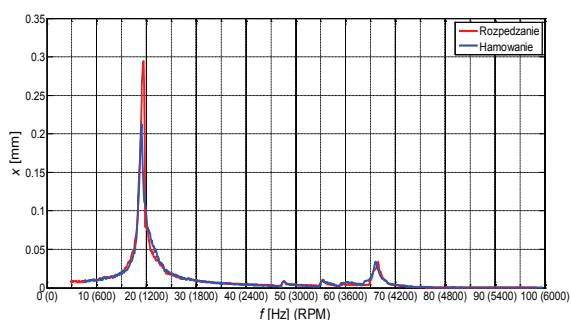
W ramach zaplanowanego eksperymentu przewidziano do zrealizowania następujące zadania:

- w ramach etapu pierwszego wykonano eksperyment w warunkach normalnej pracy, gdzie pobudzenie wału do drgań następowało w wyniku oddziaływania sił bezwładności,
- wykonanie wieloparametrowego eksperymentu czynnego na stanowisku laboratoryjnym – wprowadzono dwa rodzaje wymuszenia: harmoniczne przy pomocy wzbudnika elektrodynamicznego oraz impulsowe młotkiem uderowym (impuls siły).

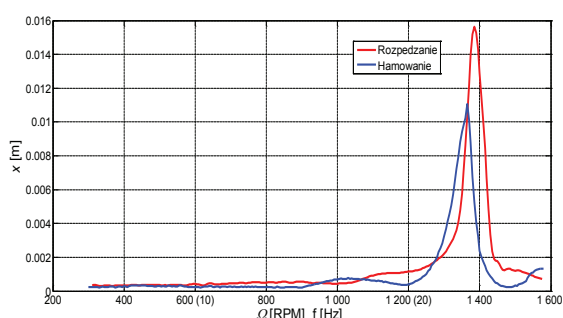
Na pierwszym etapie rejestracji podlegały przemieszczenia środka wału, mierzone laserowymi czujnikami przemieszczeń w dwóch płaszczyznach. Na drugim etapie dodatkowo zarejestrowano sygnały przyspieszeń drgań (czujniki piezoelektryczne) w różnych punktach wzdłuż długości wału.

## Wyniki

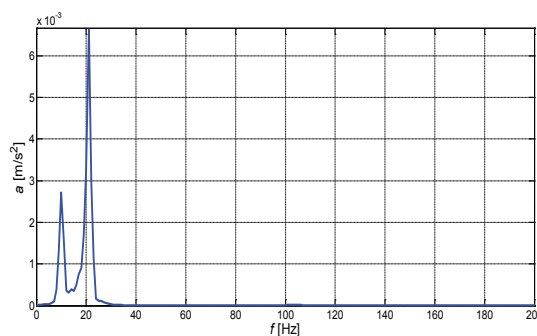
Przeanalizowana została odpowiedź dynamiczna układu w postaci profilu (wału) z kompozytu węglowego przy pobudzeniu siłą harmoniczną i impulsową z wynikami uzyskanymi przy wymuszeniu kinematycznym w trakcie normalnej pracy takiego układu. Przykładowe wyniki dla punktu umieszczonego w środku wału pokazano na rys. 1–3.



Rys. 1. Porównanie wyników rozpędzania i hamowania z prędkością 25 Hz/s przy wymuszeniu harmonicznym



Rys. 2. Porównanie wyników rozpędzania i hamowania z prędkością 25 obr/min/s przy wymuszeniu kinematycznym



Rys. 3. Częstotliwości rezonansowe uzyskane przy wymuszeniu impulsowym

Porównując wyniki obu eksperymentów, możemy zaobserwować znaczne podobieństwo uzyskanych charakterystyk przy wymuszeniu siłą harmoniczną i siłą bezwładności. Natomiast wyniki uzyskane przy wymuszeniu impulsowym znacznie odbiegają od dwóch pozostałych rodzajów wymuszenia.

## Podsumowanie i wnioski

Wykonanie wieloparametrowego eksperymentu badawczego na stanowisku laboratoryjnym i porównanie wyników eksperymentu z badaniami na normalnym stanowisku, gdzie wał maszynowy obciążony jest kinematycznie, pozwoliło na wykazanie różnic w uzyskanych charakterystykach amplitudowo-częstotliwościowych przemieszczeń i przyspieszeń drgań w różnych punktach wzdłuż długości wału dla różnych rodzajów wymuszenia.

W przypadku pobudzenia kinematycznego udało się zbudować i zidentyfikować prosty model matematyczny. Najważniejszym osiągnięciem jest możliwość porównania uzyskanych wyników z wynikami otrzymanymi w trakcie normalnej pracy wału. Uzyskane wyniki pozwalają na wnioskowanie o zakresie występowania rzeczywistych stanów krytycznych, pod warunkiem zachowania identycznych warunków podparcia i łożyskowania. Zbliżone wyniki daje pobudzenie siłą harmoniczną. Natomiast pobudzenie impulsowe wykazuje znaczne różnice w stosunku do dwóch pozostałych i nie pozwala na prawidłowe zidentyfikowanie stanów rezonansowych badanego profilu.

## LITERATURA

1. Dąbrowski Z., Deuzkiewicz P. "Designing Of High-Speed Machine Shafts Of Carbon Composites With Highly Nonlinear Characteristics, Key Engineering Materials". Vol. 490 "Fundamentals of Machine Design" (2012) pp. 76–82, DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.490.76.
2. Chiliński B. „Analiza wpływu niewyównoważenia statycznego na pomiary drgań poprzecznych wirnika”. *Przegląd Mechaniczny*. T. 7–8/15, nr 7 (2015): s. 43–46.
3. Chiliński B. „Identyfikacja parametryczna modelu układu wirującego ze sprzężeniem drgań poprzecznych i skrętnych”. *Przegląd Mechaniczny*. T. 5/15, nr 5 (2015): s. 29–34.
4. Chiliński B., Pakowski R. "Analysis of bending and torsional vibrations of rotors with using perturbation methods". *3rd Polish Congress of Mechanics and 21st International Conference on Computer Methods in Mechanics – PCM-CMM*. Short papers. Vol. 1, 2 (2015): pp. 15–17.
5. Dąbrowska A., Deuzkiewicz P., Huczko A. „Nanokompozyty SiC/żywica epoksydowa – nowy materiał konstrukcyjny w przemyśle jachtowym”. *Przegląd Mechaniczny*. T. 5 (2013).
6. Deuzkiewicz P. „Badania eksperymentalne i modelowanie stanów krytycznych kompozytowego wału maszynowego”. *Logistyka*. Nr 6 (2014): s. 3079–3092.
7. Deuzkiewicz P., Pankiewicz J., Dziurdź J., Zawisza M. "Modeling of powertrain system dynamic behavior with torsional vibration damper, advanced materials research". *Transtech Publications*. Vol. 1036 (2014): pp. 586–591. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.1036.586.