

Stanisław HORN, Kszysztof MAGNUCKI,

Wacław SZYC

Politechnika Poznańska

OKREŚLENIE STANU NAPRĘŻEŃ W KOŁACH WIRNIKOWYCH

WENTYLATORÓW PROMIENIOWYCH

Z WYKORZYSTANIEM METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

Streszczenie. W pracy przedstawiono analizę stanu naprężeń w kołach wirnikowych wentylatorów promieniowych.

Część teoretyczna analizy została przeprowadzona w oparciu o metodę elementów skończonych, realizowaną za pomocą systemu komputerowego SESAM-69. Omówiono podział konstrukcji na elementy skończone, sposób wyznaczania obciążeń, przygotowania danych, realizację obliczeń i opracowanie wyników.

W dalszej części pracy zamieszczono skrótowy opis weryfikacji eksperymentalnej, przeprowadzonej dla modelowych kół wirnikowych.

Na zakończenie dokonano porównania wyników oraz oceny przydatności prostych metod obliczeniowych stosowanych zwykle przy określaniu wytrzymałości kół wirnikowych.

1. Wstęp

Dokładne wyznaczenie stanu naprężeń w kołach wirnikowych wentylatorów jest trudnym zagadnieniem teoretycznym. Jednak przy nowoczesnym projektowaniu, zmierzającym do powstania konstrukcji możliwie optymalnej, znajomość tego stanu jest niezbędna. Trudności wynikają głównie z dość złożonego kształtu i wzajemnej współpracy poszczególnych części wirnika ze sobą. Zmusza to na ogół do stosowania pewnych uproszczeń. Otrzymane wyniki nie zawsze odpowiadają stanowi rzeczywistości.

Biorąc powyższe pod uwagę, wydaje się niezbędne wprowadzenie do praktyki projektowej metody obliczeń nie opierającej się na zbyt dużych uproszczeniach, a przy tym niezbyt pracochłonnej i zapewniającej dokładne rozwiązanie.

W praktyce obliczeniowej postulat ten spełnić może jedynie metoda elementów skończonych (MES).

W metodzie układ sprężysty ulega dyskretyzacji, to znaczy jest traktowany jako zbiór skończonej ilości elementów. Pojedyncze elementy, dla których obowiązują proste pod względem matematycznym związki, wynikające z teorii sprężystości, składają się na odwzorowanie całego układu, przy czym wymagane są jedynie warunki ciągłości, spełnione w charakterystycznych

punktach-węzłach elementów [1]. Takie potraktowanie zagadnienia prowadzi do konieczności rozwiązywania dużych układów liniowych równań algebraicznych. Dokładne rozwiązanie takich równań są w stanie zapewnić odpowiednie metody numeryczne i technika komputerowa.

2. System SESAM-69

Przeprowadzenie obliczeń metodą MES wymaga przede wszystkim opracowania odpowiedniego algorytmu i programu na maszynie cyfrową. Należy jednak zauważyć, że obecnie istnieje szereg specjalnie opracowanych systemów komputerowych, służących do analizowania zagadnień wytrzymałościowych konstrukcji różnych typów.

Naszym zdaniem, najwygodniejszym w użyciu, jest system SESAM-69, bazujący na komputerach typu ICL-4/70.

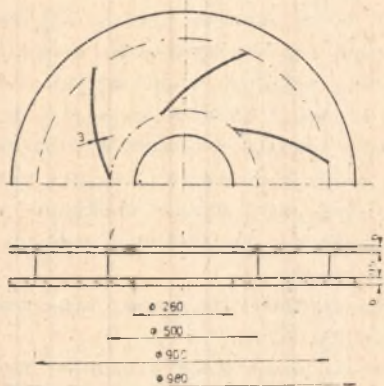
W skład tego systemu [2] wchodzi szereg programów, służących do analizy naprężeń i odkształceń konstrukcji. Ponieważ rozpatrywane koła wirnikowe wentylatorów są w większości przypadków typowymi konstrukcjami cienkościennymi, wykorzystano do ich analizy program oznaczony symbolem NV331J. Program bazuje na elementach płytowych czworokątnych, ewentualnie trójkątnych, posiadających w każdym z węzłów po sześć stopni swobody. Ponadto, system SEAM-69 obejmuje również programy bazujące na elementach typu tarczowego, belkowego i trójwymiarowych. Programy te mogą być wykorzystywane, niezależnie lub jednocześnie, dzięki technice superelementów. Wybór odpowiedniej grupy programów zależy od typu konstrukcji [3].

System ten posiada również szereg udogodnień a w tym np. częściową automatyzację przygotowania danych, automatyczną kontrolę poprawności i dokładności, możliwość uzyskania wyników w formie graficznej. Mimo swej uniwersalności system nie jest w pełni przystosowany do analizy konstrukcji typu koło wirnikowe, ze względu na występujące tu niejednorodne pole obciążeń masowych.

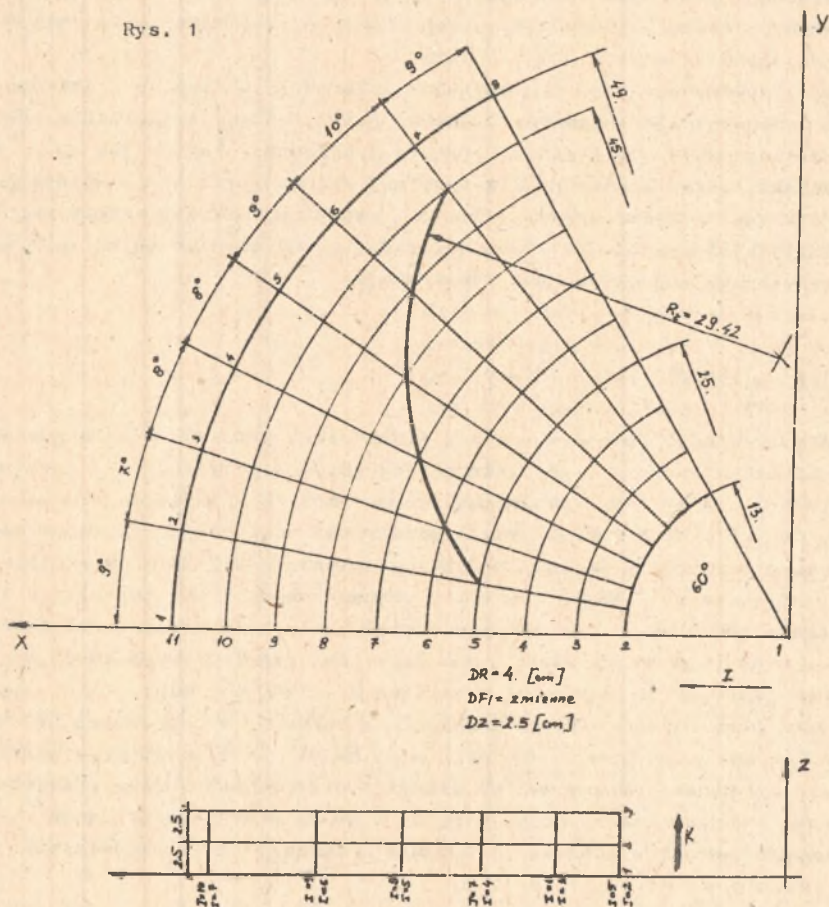
3. Wyznaczanie stanu naprężeń w kole wirnikowym

Omówmy przykładowe obliczenia wykonane dla koła wirnikowego, składającego się z dwóch płaskich tarcz połączonych sześcioma łopatkami zakrzywionymi (rys. 1). Koło należy zorientować w układzie globalnym xyz oraz dokonać jego podziału na elementy płaskie czworokątne. Węzły i elementy generowane są automatycznie w oparciu o wprowadzoną siatkę ortogonalnych linii I, J, K zgodnych z kierunkami walcowego układu współrzędnych R, FI, Z. Węzły siatki tworzone są przez poszczególne przecięcia linii siatki, elementy natomiast powstają jako oczka siatki w poszczególnych płaszczyznach.

Ze względu na kształt łopatek linie siatki I, J należy tak poprowadzić, aby węzły w poszczególnych płaszczyznach K znajdowały się na łopatkach. Dokonując wycięć, poprzez zadeklarowanie odpowiednich obrotów siatki, usuwa się zgodnie elementy generowanej przestrzeni, tworząc kształt modelu obliczeniowego, odpowiadający kształtowi obiektu rzeczywistego. Powtarzalny wycinek koła z podziałem na elementy pokazano na rys. 2. W ramach przedstawionego wycinka występują 73 elementy - warto zauważyć, że jest to jedynie $\frac{1}{12}$ całej konstrukcji.



Rys. 1



Rys. 2

Obciążeniem rozważanego koła wirnikowego są siły masowe wynikające z ruchu obrotowego ze stałą prędkością kątową względem osi z. Wielkość tych sił wyznaczono dla poszczególnych pierścieni tarcz odpowiadających liniom I (obciążenie ciągie). Z kolei siły te skupiono w poszczególnych węzłach należących do danej linii I i rozłożono na dwie składowe w kierunkach XiY. Natomiast siły masowe łopatki obliczono dla środka ciężkości każdego z jej elementów, a następnie rozdzielono je na węzły sumując w każdym z węzłów siły pochodzące od wszystkich elementów, do których on należy. Ponadto warto zaznaczyć, że program przewiduje również możliwość zadania obciążeń w formie określonego pola temperatury, co w niektórych przypadkach może mieć istotny wpływ na wytrzymałość wirników wentylatorów.

Następnie przygotowano dane zgodnie ze szczegółowymi wymogami programu NV331J. Obliczenia zrealizowano na komputerze ICL-4/70.

W wyniku obliczeń otrzymano wartości naprężeń w środkach ciężkości każdego elementu, przy czym obejmują one pięć składowych stanu zgięciowego i trzy składowe stanu błonowego oraz naprężenia zredukowane według hipotezy Hubera-Misesa.

Ponadto, otrzymuje się również pełną informację o sześciu składowych stanu przemieszczenia w każdym z węzłów. Należy dodać, że istnieje również możliwość wyprowadzenia wyników w formie graficznej, takich jak np.: rysunek odkształconej konstrukcji w dowolnej aksonometrii i z dowolnym współczynnikiem skali przemieszczeń, izolinii naprężeń, wykresy zmiany naprężeń w wybranych kierunkach. Tak więc, jak widać można uzyskać pełną informację wytrzymałościową o analizowanej konstrukcji.

4. Wyniki obliczeń

Poza przypadkiem opisanym powyżej przeliczono również, w celu porównania, dwa koła wirnikowe o skrajnie usytuowanych łopatkach, tzn. promieniowo i obwodowo, przy czym zasadniczo wymiary kół są identyczne. Porównując ogólnie wyniki w tych trzech przypadkach można stwierdzić, że naprężenia zredukowane w tarczach zmieniają się w granicach od 17 MN/m^2 w okolicy otworu środkowego do 8 MN/m^2 w okolicy zewnętrznego brzegu tarczy dla koła z łopatkami obwodowymi. Analogiczne wartości dla koła z łopatkami skośnymi wynoszą od $16,8$ do $5,6 \text{ MN/m}^2$, a z łopatkami promieniowymi od $15,3$ do $5,5 \text{ MN/m}^2$ (dotyczy to prędkości obrotowej $n = 1000 \text{ obr/min}$). Stan naprężeń w łopatkach zmienia się od maksymalnej wartości zredukowanej $31,4 \text{ MN/m}^2$ dla łopatek obwodowych i skośnych do 3 MN/m^2 dla łopatek promieniowych.

Na rys. 3 przedstawiono zmiany naprężeń otrzymanych według przedstawionej metody, wzdłuż zakrzywionej łopatki w dwóch przekrojach. Jeden przekrój przeprowadzony w pobliżu połączenia z tarczą, drugi natomiast w pobliżu płaszczyzny symetrii (rys. 3).

5. Weryfikacja eksperymentu

W celu częściowego zweryfikowania, otrzymanych opisaną powyżej drogą, rezultatów obliczeń, przeprowadzono badania eksperymentalne stanu naprężeń w kołach wirnikowych trzech rodzajów. Badania wykonano na specjalnym stanowisku, mierząc stan odkształcenia na powierzchni tarcz i łopatek metodami tensometrii elektrooporowej. Sygnał pomiarowy przekazywano z ruchomego koła na nieruchomy mostek za pośrednictwem zbieracza szczotkowego. Pomiar odbywał się w układzie pełnego mostka przy zastosowaniu dla każdego punktu pomiarowego czterech tensometrów - dwóch czynnych i dwóch kompensacyjnych.

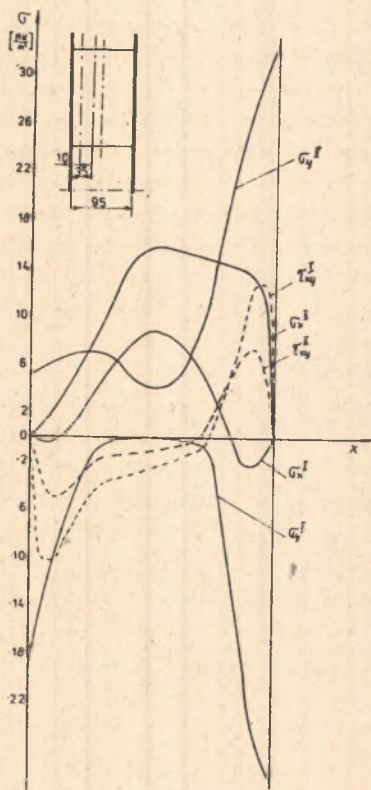
Pomiary dały w zasadzie wyniki potwierdzające poprawność otrzymanych rezultatów obliczeń. Dla ilustracji podajemy przykład takiego porównania (rys. 4). Przedstawiono tu wartości naprężeń w łopatkę obwodowej, uzyskane na podstawie pomiarów tensometrycznych, obliczeń metodą elementów skończonych (linie przerywane) i przybliżonych obliczeń według teorii płyt [4] linie ciągłe w dwóch przebiegach przez łopatkę - wzdłuż swobodnej krawędzi i pośrodku długości. Z porównania wynika, że znacznie bliższe wynikom pomiarowym są re-

zultaty obliczeń metodą elementów skończonych. Metody przybliżone dają niestety bardzo orientacyjne wartości naprężeń.

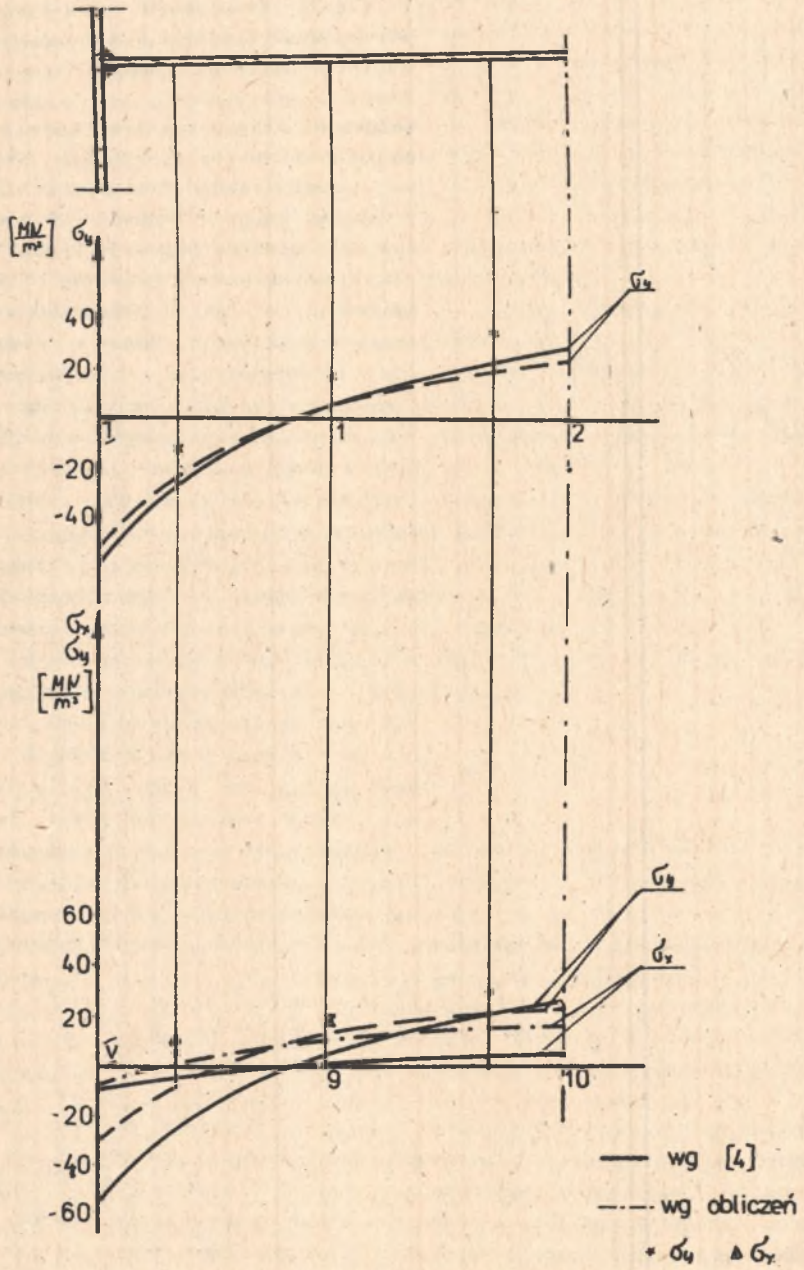
6. Wnioski

Analiza całości przeprowadzonych obliczeń i pomiarów, których jedynie fragmenty zaprezentowano w niniejszej pracy, pozwala stwierdzić, że metoda elementów skończonych realizowana w oparciu o system SESAM-69 daje możliwości uzyskania wyników, w oparciu o które można w pełni ocenić pod względem wytrzymałościowym konstrukcje "koło wirnikowe" wentylatorów promieniowych.

Metoda ta jest bardziej przydatna niż metody klasyczne oparte o równania teorii sprężystości, które wymagają wielu uproszczeń, przez co odbiega się



Rys. 3



Rys. 4

od rzeczywistych warunków pracy konstrukcji i w rezultacie uzyskuje się mniejszą dokładność. Takie metody uproszczone dają jedynie możliwość oceny stanu naprężeń w tarczach kół wirnikowych, co może być istotne na etapie wstępnego projektowania, nie dają jednak właściwej oceny stanu wyężenia.

Podsumowując należy stwierdzić, że przedstawiona w pracy metoda jest zgodna z poleceniem, szczególnie przy projektowaniu nowych konstrukcji wirników wentylatorów.

Ponadto można wskazać na zastosowanie tej metody dla określenia stanu naprężeń w połączeniach spawanych, z uwzględnieniem koncentracji. Wykonane próbne obliczenia w tym zakresie uzasadniają możliwość stosowania tej metody także w tym celu.

LITERATURA

- [1] Zienkiewicz O.C.: Metoda elementów skończonych. Arkady, Warszawa 1972.
- [2] Instrukcja użytkownika programu "System SESAM-69" Centrum Techniki Okrętowej, Gdańsk 1974.
- [3] Horn S., Magnucki K., Szyc W.: Metoda określania stanu naprężeń w kołach wirnikowych sprężarek promieniowych. Materiały IV Konferencji Naukowo-Technicznej nt.: Technologia przepływowych maszyn wirnikowych, SIMP, Rzeszów 1978.
- [4] Warwak, Gubermann, Mirosznichenko: Tablicy dla raszota priamongolnych plit, Izd. ANUSSR, Kijew 1959.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В РОТОРНЫХ КОЛЁСАХ РАДИАЛЬНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Резюме

В статье представлен анализ напряжённого состояния в роторных колёсах радиальных вентиляторов.

Теоретическая часть анализа сделана на основании метода конечных элементов, осуществляемого при помощи вычислительной системы SESAM-69.

Представлены деление конструкций на конечные элементы, способ определения нагрузок, приготовления данных, выполнения расчётов и обработки результатов.

В дальнейшей части статьи помещено сокращённое описание экспериментальной проверки на модельных роторных колёсах.

В заключение проведены сравнение результатов и оценка пригодности простейших вычислительных методов, применяемых обычно при определении прочности роторных колёс.

STRESS STATE DETERMINATION IN RADIAL FANS' ROTORS
UTILIZING THE FINITE ELEMENTS METHOD

S u m m a r y

The paper deals with stress state analysis in radial fan's rotors. The theoretical part of the analysis has been performed on the basis of the finite elements method, using the SESAM-60 computer system.

The analysed structure has been divided into finite elements, and load determination, data preparation, description of calculations and elaboration of results are discussed.

The second part of the paper contains a short description of experimental tests prepared for the model rotors. Finally, the comparison of results and the opinion on unefulness of simple calculation methods used commonly in the determination of rotor's strength is performed.