

dr inż. Piotr DANIELCZYK, email: pdanielczyk@ath.bielsko.pl

dr inż. Ireneusz WRÓBEL, email: iwrobel@ath.bielsko.pl

AKADEMIA TECHNICZNO-HUMANISTYCZNA W BIELSKU - BIAŁEJ

ZASTOSOWANIE INŻYNIERII ODWROTNEJ DO OCENY BEZPIECZEŃSTWA EKSPLOATACJI KÓŁ BIJAKOWYCH

Streszczenie: Przedmiotem analiz opisanych w prezentowanej pracy jest zespół koła bijakowego i wału napędowego stosowany w młynach do mielenia węgla. Przedstawiono zbudowane do celów analizy dyskretne modele obliczeniowe koła bijakowego o wymiarach nominalnych oraz o kształcie pozyskanym ze skanera 3D. Wykonano analizę modalną zespołu w celu wyznaczenia prędkości krytycznych oraz analizę strukturalną dla określenia naprężeń w elementach koła bijakowego podczas pracy. Sformułowano wnioski.

Słowa kluczowe: Inżynieria odwrotna, MES, koło bijakowe,

APPLICATION OF REVERSE ENGINEERING FOR SAFETY ASSESSMENT OF BEATER WHEELS OPERATION

Abstract: The object of the analyses described in the following paper is a beater wheel and drive shaft unit used in mills for grinding coal. Discrete calculation models of the beater wheel with nominal dimensions and the shape obtained from a 3D scanner, built for the purpose of the analysis, have been presented. Modal analysis of the unit for determining critical velocities and structural analysis for determining stresses in the parts of the beater wheel during operation have been performed. Conclusions have been formulated.

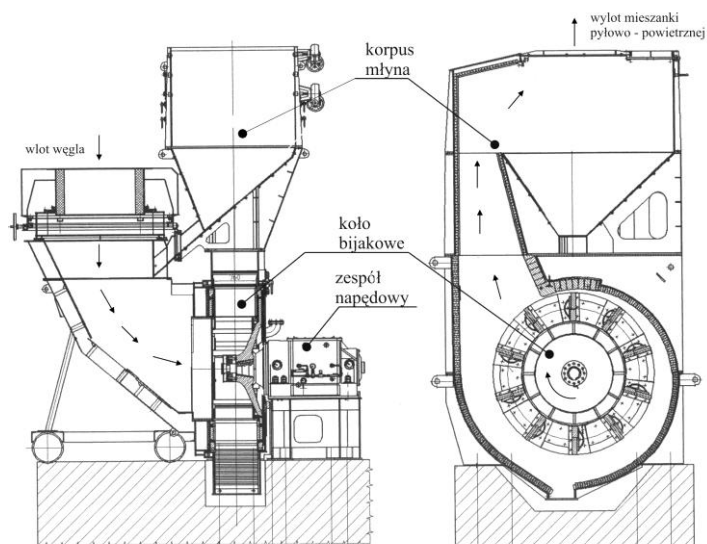
Keywords: reverse engineering, FEM, beater wheels

1. WPROWADZENIE

Uzyskanie wysokiej sprawności procesu spalania wymaga bardzo dokładnego, równomiernego i drobnego zmielenia gruboziarnistego węgla do postaci pyłu węglowego. Jednym z powszechnie stosowanych typów młynów do mielenia węgla jest młyn wentylatorowy (rys.1). Głównymi jego elementami są: koło bijakowe, korpusu i zespół napędowy. Elementem mielącym jest koło bijakowe obracające się w spiralnie ukształtowanym korpusie z prędkością obrotową 600 obr/min. Mielenie węgla następuje przez uderzanie cząstek węgla o bijaki osadzone na wirniku młyna oraz w pewnym stopniu dzięki uderzeniom jednych cząstek o drugie (ścieranie). Procesowi mielenia w młynach węglowych towarzyszy zwykle jego osuszanie. W tym celu do młyna dostarczane jest gorące powietrze lub spaliny z dodatkiem gazów obojętnych pod względem wybuchowym np. azotem czy dwutlenkiem węgla, co zabezpiecza układ przed eksplozją. Wytworzona w korpusie mieszanina pyłowa wydmuchiwana jest do odsiewacza, a grubsze frakcje wracają specjalnym zsypem do korpusu młyna, gdzie zostają ponownie zmielone.

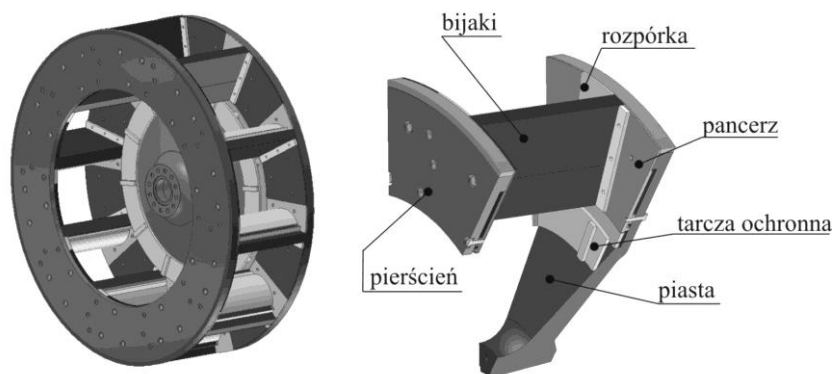
Koło bijakowe spełnia dwie zasadnicze funkcje:

- zasysanie czynnika suszącego i transport mieszaniny pyłowo-gazowej do przewodów pyłowych (funkcja wentylatora),
- rozdrabnianie dostarczonego do młyna węgla o odpowiedniej granulacji na pył węglowy (funkcja elementu mielącego).



Rys.1 Budowa młyna wentylatorowego

Konstrukcję koła bijakowego przedstawia rys.2.



Rys. 2 Konstrukcja koła bijakowego

Pomiędzy piastą a pierścieniem przykręcona jest rozpórka do której przylegają bijaki, wspierając się na krawędziach piasty i pierścienia. Konstrukcja taka umożliwia sprawną wymianę zużytych bijaków. Koło osadzone jest na stożkowo zakończonym wale łożyskowym w dwóch łożyskach baryłkowych. Piasta i pierścień są chronione od wewnątrz przez zużyciem tarczą ochronną i pancierzami.

2. CEL ANALIZY

Podczas pracy młyna następuje ścieranie bijaków, w wyniku czego zmniejsza się ich masa i grubość, a przez to zmieniają się parametry masowe i wytrzymałościowe koła bijakowego. Istotna dla bezpiecznej eksploatacji młyna wentylatorowego jest informacja, czy wskutek zużycia bijaków nie pojawia się zagrożenie zaistnienia rezonansu, bądź pęknięcia bijaka. Ważne ponadto jest oszacowanie, kiedy należy wyłączyć młyn i dokonać wymiany bijaków na nowe. Należy przy tym pamiętać, że zbyt wczesna wymiana bijaków jest nieuzasadniona ekonomicznie. W prezentowanej pracy przedstawione zostaną dwa modele obliczeniowe koła bijakowego: model o wymiarach nominalnych oraz model koła ze zużytymi bijakami o kształcie pozyskanym ze skanera 3D. Przewiduje się wykonanie analizy modalnej zespołu koła bijakowego i wału oraz wyznaczenie prędkości krytycznych, a także analizy strukturalnej dla określenia naprężeń panujących w elementach koła bijakowego podczas pracy dla obu modeli obliczeniowych.

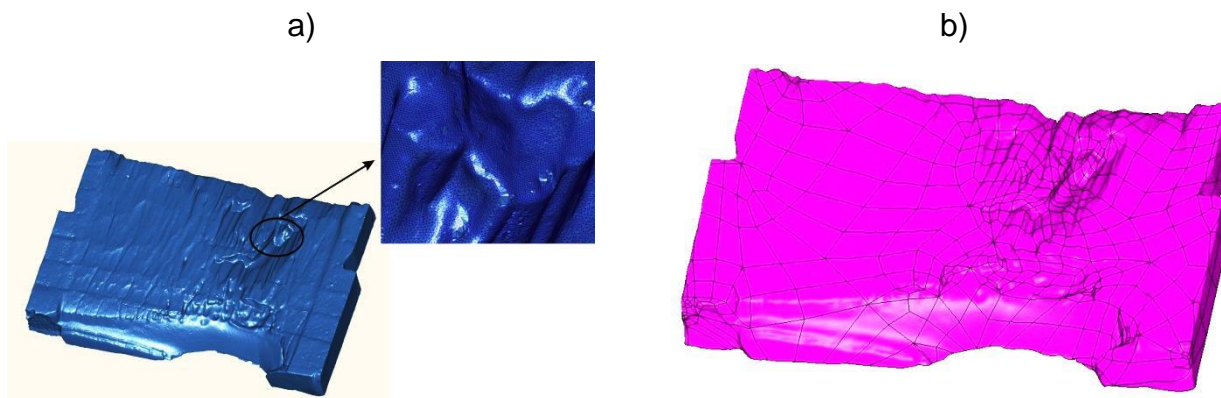
3. MODELE GEOMETRYCZNE KÓŁ BIJAOWYCH

Model koła bijakowego o nominalnym kształcie i wymiarach pozyskanych z dokumentacji konstrukcyjnej (rys.3) wykonano, wykorzystując pakiet Autodesk Inventor 2013, na podstawie dokumentacji technicznej.



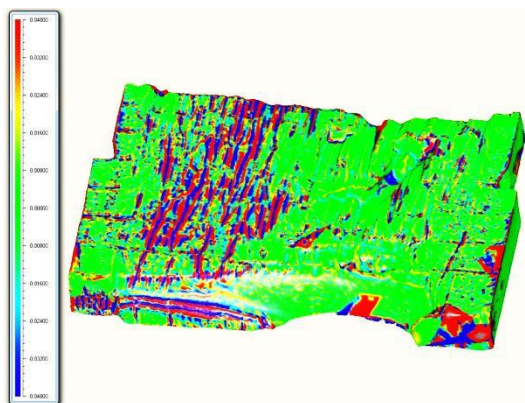
Rys. 3 Model koła bijakowego o nominalnym kształcie

Do opracowania modelu koła bijakowego z zużytymi bijakami wykorzystano trójwymiarowy skaner optyczny i technikę inżynierii rekonstrukcyjnej. Pozyskany z remontowanego młyna zużyty bijak został zmierzony skanerem optycznym Evixscan 3D. Wynikiem skanowania był jego model fasetkowy (rys.4a). Wykorzystując oprogramowanie Leios wykonano model powierzchniowy bijaka. Do tego celu zastosowano narzędzia do automatycznego dopasowania płatów powierzchni NURBS do modelu fasetkowego. W ten sposób powstało odwzorowanie kształtu zewnętrznego bijaka (rys.4b).



Rys. 4 Model bijaka o rzeczywistym kształcie
a) model fasetkowy, b) model powierzchniowy

Dla sprawdzenia dokładności dopasowania płatów NURBS do modelu fasetkowego wykonano analizę porównania tych modeli. Wynikiem tego porównania są warstwy obrazujące różnice dopasowania modelu powierzchniowego do modelu fasetkowego. Dla analizowanego bijaka maksymalny błąd dopasowania nie przekracza 0.04 mm (rys. 5).



Rys. 5 Porównanie modelu powierzchniowego i modelu fasetkowego

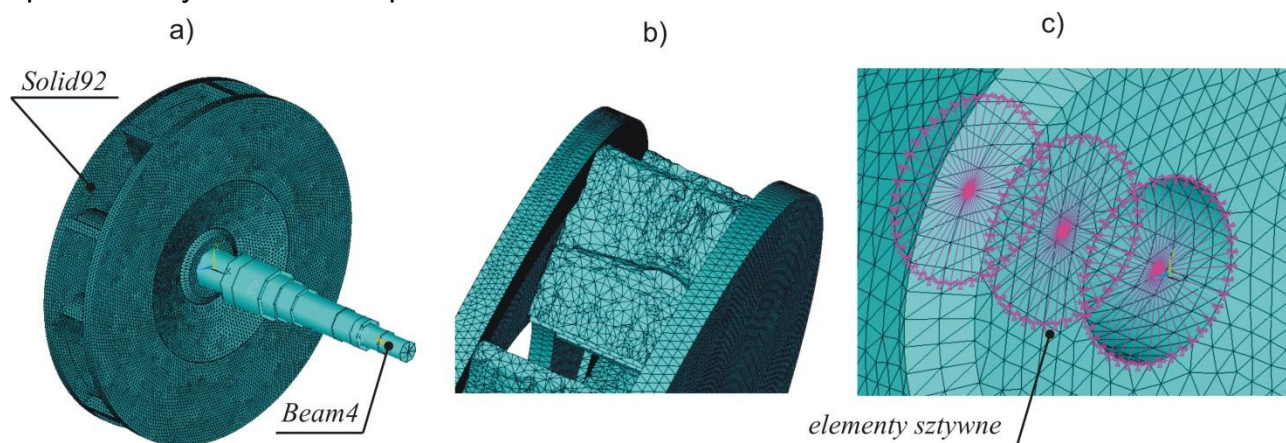
Dysponując modelem powierzchniowym - za pomocą oprogramowania Autodesk Inventor wykonano model bryłowy bijaka o rzeczywistym kształcie. Został wykorzystany do budowy modelu koła bijakowego ze zużytymi bijakami (rys.6)



Rys. 7 Model CAD koła bijakowego ze zużytymi bijakami

4. MODELE MES KOŁA BIJAKOWEGO

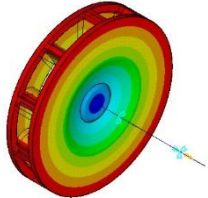
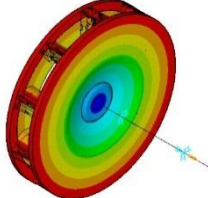
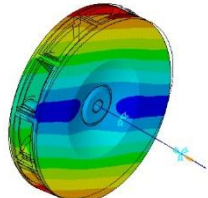
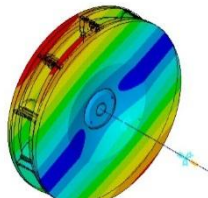
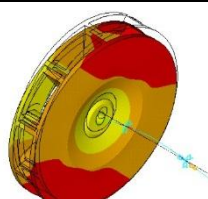
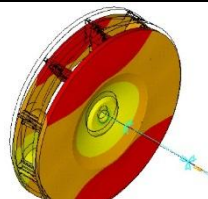
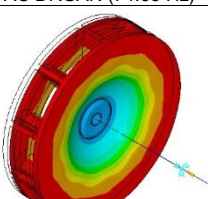
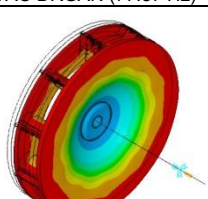
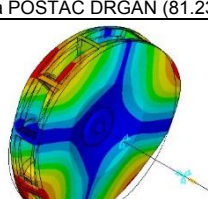
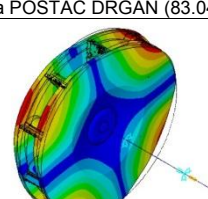
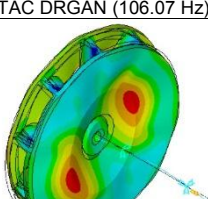
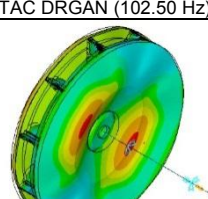
Przedstawione modele geometryczne kół bijakowych wykorzystano do wykonania modeli obliczeniowego dla analiz metodą elementów skończonych. Modele MES (rys.7) zbudowano wykorzystując 10-cio węzłowy element bryłowy *Solid92*. Element ten jest elementem czworościennym, posiadającym w każdym węźle trzy stopnie swobody. Wał napędowy modelowano elementami belkowymi *Beam4*. Do połączenia wały i piasty koła wykorzystano elementy sztywne (rys. 7c). Warunki podparcia wału wynikają wprost ze sposobu łożyskowania zespołu.



Rys. 7 Modele dyskretnie kół bijakowych: a) model, o wymiarach nominalnych, b) model ze zużytymi bijakami (fragment) c) sposób połączenia wału z piastą koła bijakowego

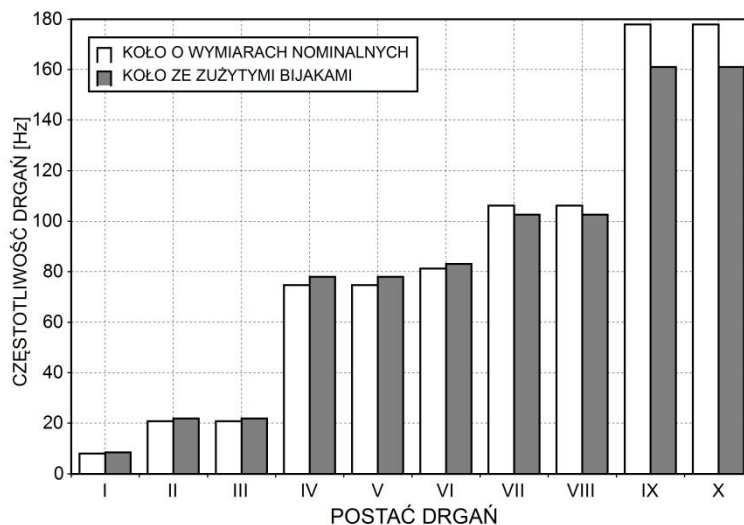
5. ANALIZA MODALNA

Dysponując opisanymi modelami obliczeniowymi uzupełnionymi o odpowiednie stałe materiałowe dla wału i części wchodzących w skład koła bijakowego, przeprowadzono analizę modalną konstrukcji w celu wyznaczenia częstości drgań własnych i odpowiadającym im postaci drgań. Analizę numeryczną wykonano wykorzystując zaimplementowaną w pakiecie Ansys procedurę opartą na metodzie Lanczosa. Na rysunku 8 przedstawiono zestawienie 10-ciu kolejnych postaci i częstotliwości drgań własnych uzyskane z analizy obu modeli obliczeniowych.

KOŁO O NOMINALNYM KSZTAŁCIE	KOŁO ZE ZUŻYTYMI BIJAKAMI
 1-sza POSTAĆ DRGAŃ (7.99 Hz)	 1-sza POSTAĆ DRGAŃ (8.50 Hz)
 2-ga i 3-cia POSTAĆ DRGAŃ (20.79 Hz) –SYMETRYCZNA	 2-ga i 3-cia POSTAĆ DRGAŃ (21.88 Hz) –SYMETRYCZNA
 4-ta i 5-ta POSTAĆ DRGAŃ (74.65 Hz) –SYMETRYCZNA	 4-ta i 5-ta POSTAĆ DRGAŃ (77.87 Hz) –SYMETRYCZNA
 6-ta POSTAĆ DRGAŃ (81.23 Hz)	 6-ta POSTAĆ DRGAŃ (83.04 Hz)
 7-ma i 8-ma POSTAĆ DRGAŃ (106.07 Hz) - SYMETRYCZNA	 7-ma i 8-ma POSTAĆ DRGAŃ (102.50 Hz) - SYMETRYCZNA
 9-ta i 10-ta POSTAĆ DRGAŃ (177.85 Hz) - SYMETRYCZNA	 9-ta i 10-ta POSTAĆ DRGAŃ (161.07 Hz) - SYMETRYCZNA

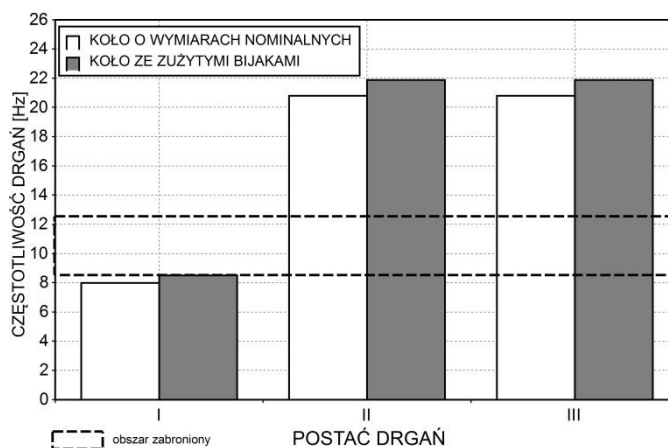
Rys.8 Zestawienie wyznaczonych postaci drgań własnych

Na rysunku 9 zestawiono częstotliwości drgań własnych dla analizowanych modeli dyskretnych. Można dostrzec, że częstotliwości te, wyznaczone dla koła o wymiarach nominalnych i koła ze użytymi bijakami nie różnią się znacząco.



Rys.9 Porównanie częstotliwości drgań własnych

Analizując powyższy wykres należy zauważyć, że częstotliwości, odpowiadające trzem pierwszym postaciom drgań, leżą w pobliżu częstotliwości odpowiadającej roboczej prędkości pracy koła bijakowego ($600 \text{ [obr/min]} = 10 \text{ [Hz]}$). Można stwierdzić (rys.10), że nie zachodzi niebezpieczeństwo zaistnienia rezonansu. Częstości rezonansowe leżą poza niebezpiecznym zakresem, który ze względu na możliwe błędy modelu oraz metody obliczeniowej przyjmuje się w technice na poziomie $0.85 \div 1.25$ prędkości roboczej.



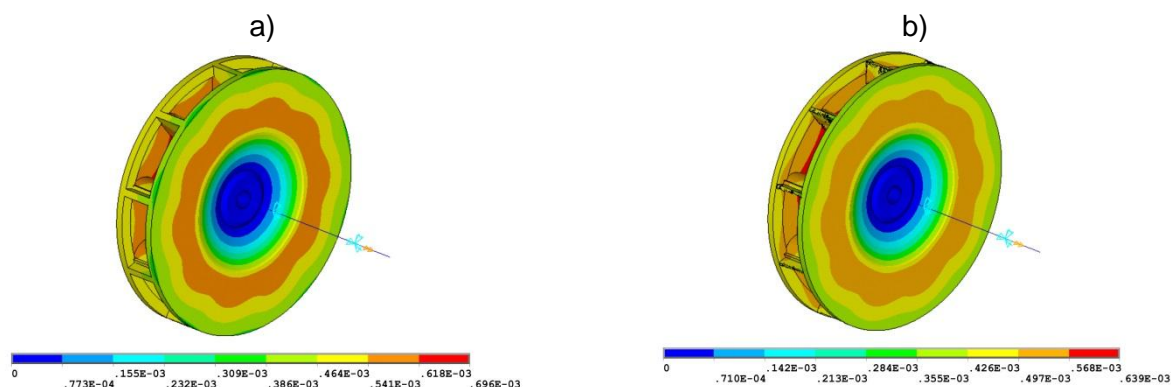
Rys.10 Zestawienie trzech pierwszych częstości drgań własnych

6. ANALIZA STRUKTURALNA

Podczas mielenia pojawiają się siły pochodzące oporu, które są wynikiem oddziaływania cząstek mielonego węgla na części koła bijakowego. Nie są znane autorom opracowania, w których opisano zagadnienie wyznaczania tych sił. Z doświadczeń konstruktorów kół bijakowych wynika, że w porównaniu z obciążeniami pochodzącymi od sił bezwładności wynikających z ruchu roboczego, wartości sił oporu surowca są pomijalnie małe i takie założenie przyjęto do dalszych analiz. Do analizy strukturalnej wykorzystano opisane poprzednio modele zespołu wału z kołem bijakowym i rozwiązano zadanie

kinetostatyczne, przyjmując, że na koło bijakowe działają siły bezwładności wywołane ruchem ze stałą prędkością kątową $\omega = 62.8 [\text{rad/s}]$ ($n = 600 [\text{obr/min}]$).

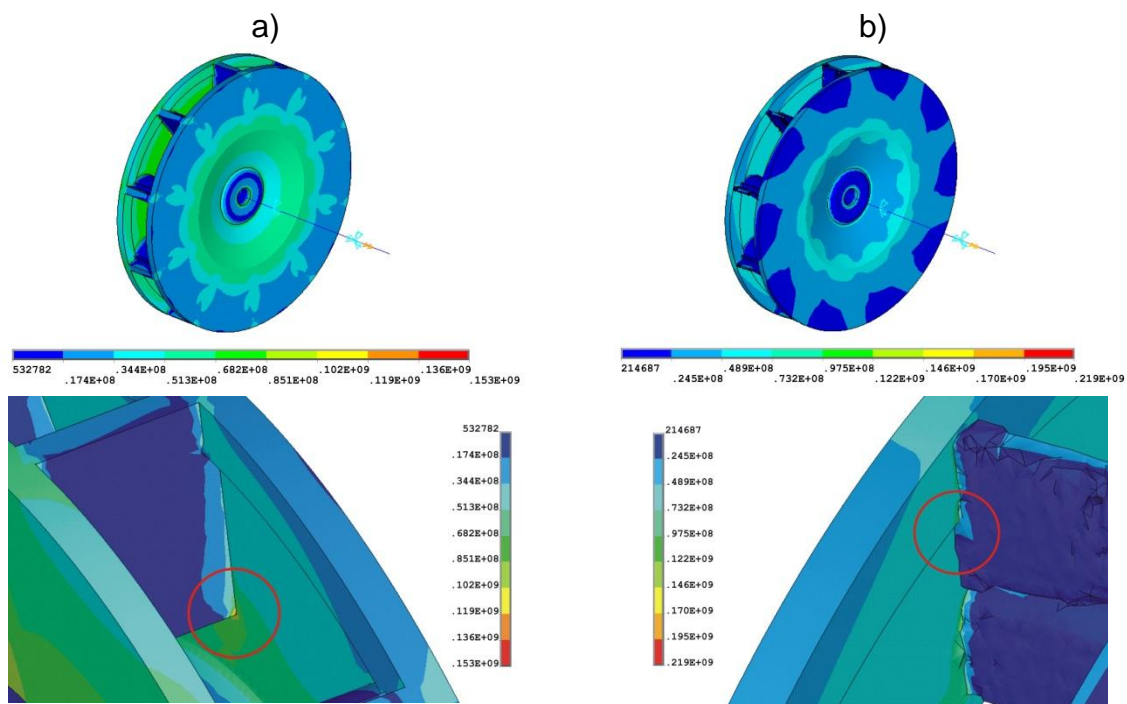
Na rysunku 11 przedstawiono warstwy odkształceń sumarycznych będące rezultatem analizy strukturalnej modelu nominalnego i modelu o wymiarach rzeczywistych.



Rys.11 Wyniki analizy strukturalnej (deformacje)
 a) warstwy odkształceń sumarycznych dla modelu nominalnego [m]
 b) warstwy odkształceń sumarycznych dla modelu o wymiarach rzeczywistych [m]

Analizując otrzymane wyniki można stwierdzić, że odkształcenia nie przekraczają 1 mm i w żaden sposób nie stwarzają zagrożenia dla poprawnej pracy zespołu.

Również wartość największych naprężeń zredukowanych w kole bijakowym dla obu przypadków obliczeniowych nie przekracza wartości naprężeń dopuszczalnych wynoszących dla materiału koła: $k_r = 150 \div 175 [\text{MPa}]$. Nieznaczne, lokalne przekroczenie wartości dopuszczalnych jest wynikiem błędów dyskretyzacji modelu obliczeniowego



Rys.12 Wyniki analizy strukturalnej (naprężenia)
 a) warstwy naprężeń sumarycznych dla modelu nominalnego [Pa]
 b) warstwy naprężeń zredukowanych dla modelu o wymiarach rzeczywistych [Pa]

7. WNIOSKI I SPOSTRZEŻENIA

Przeprowadzone analizy obliczeniowe pozwalają na następujące, istotne stwierdzenia:

- dla rozpatrywanej konstrukcji nie istnieje niebezpieczeństwo zaistnienia rezonansu podczas eksploatacji koła bijakowego – prędkość robocza pracy urządzenia leży poza obszarem rezonansowym. Istotną obserwacją wynikającą z analizy jest to, iż układ pracuje powyżej pierwszej częstości rezonansowej. Projektując układ napędowy należy zatem zadbać o to, aby rozpędzanie do prędkości roboczej odbywało się dość szybko i układ nie pracował zbyt długo w niebezpiecznym zakresie.
- analiza naprężeń dowiodła, że dla koła bijakowego o nominalnych wymiarach oraz ze zużytymi bijakami naprężenia zredukowane nie przekraczają naprężeń dopuszczalnych. Zatem, wskazaniem do wymiany zużytych bijaków powinien być stan, w którym może nastąpić zużycie rozpórki. Sytuacja taka jest niedopuszczalna z uwagi na wysokie koszty takiego remontu, który wiąże się z koniecznością demontażu całego koła bijakowego.

LITERATURA

1. Adams V., Askenazi A.: *Building Better Products with Finite Element Analysis*, ONWORD PRESS, 1999,
2. Ansys Help SYSTEM.
3. *Budowa i eksploatacja młynów do przemiału węgla*, Materiały II Konferencji Naukowo-Technicznej, Centrum Postępu Technicznego w Rydzynie, Rydzyna, 1988,
4. Grądzki R.: *Wprowadzenie do metody elementów skończonych*, WPŁ, Łódź, 2002
5. Pronobis M.: *Modernizacja kotłów energetycznych*, WNT, Warszawa, 2002,
6. Rusiński E., Czmochocki J., Smolnicki T.: *Zaawansowana metoda elementów skończonych w konstrukcjach nośnych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2000,