

Prof. dr hab. inż. Edward Chlebus, Politechnika Wrocławska  
Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Hufenbach, Technische Universität Dresden  
Dr inż. Piotr Górski, Politechnika Wrocławska  
Dr inż. Kamil Krot, Politechnika Wrocławska  
Mgr inż. Andrzej Czulak, Technische Universität Dresden

## **Analiza wytrzymałościowa oraz badania niszczące wirujących dysków**

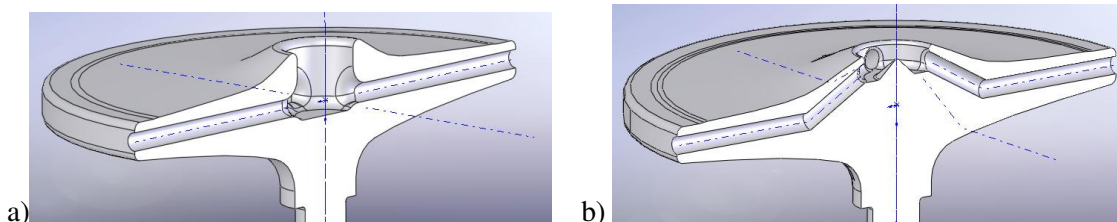
W artykule przedstawiono wybrane analizy numeryczne dysków wirujących z dużymi prędkościami. Obliczenia wykonano za pomocą metody elementów skończonych. Celem analiz było poznanie mechanizmu zniszczenia dysków oraz wyznaczenie prędkości przy której dyski ulegną zniszczeniu. Szczególnie istotne z punktu widzenia badawczego było porównanie otrzymanych wyników dla dysków z kanałami prostymi oraz zakrzywionymi. Po wykonaniu analiz numerycznych wykonane zostały badania niszczące dysków, na specjalnej maszynie wytrzymałościowej, umożliwiającej zniszczenie badanych części poprzez obracanie ich z wysokimi prędkościami.

### **1. Wstęp**

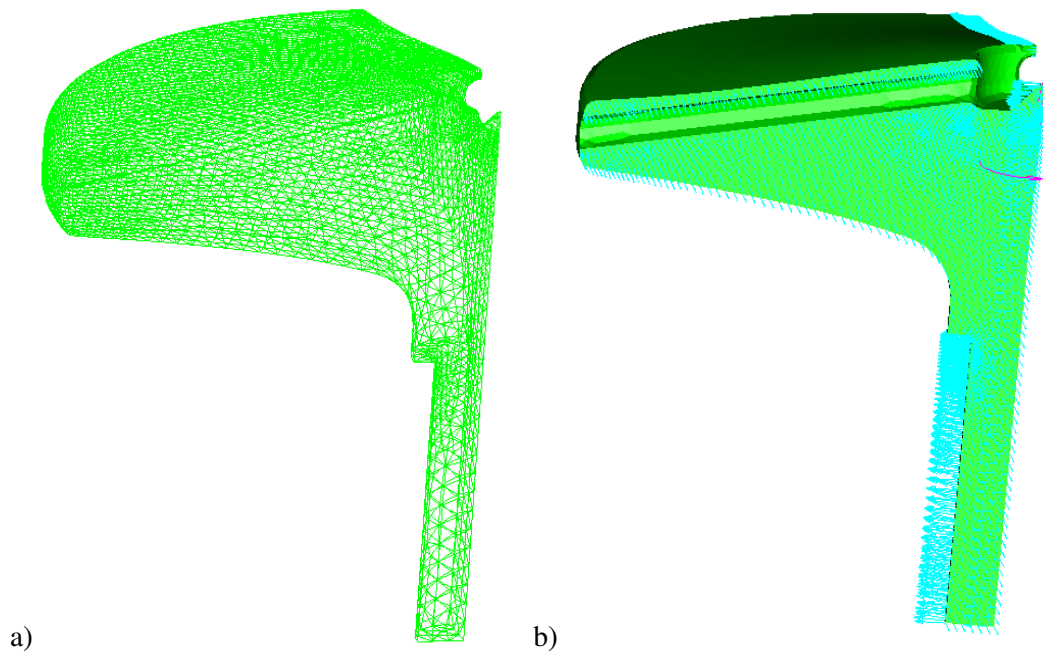
Dyski znajdują często zastosowanie jako różnego rodzaju wirujące elementy maszyn [4]. Analizy wytrzymałościowe tego typu elementów powodują szereg problemów. W artykule przedstawiono analizę dwóch dysków z kanałami prostymi i zakrzywionymi. Mechanizm pęknięcia dysku, jest ściśle związany z geometrią wykonanych kanałów [2]. W artykule zaprezentowano obliczenia numeryczne, które miały na celu wskazanie miejsc od których rozpoczyna się proces zniszczenia dysku, jak również obliczenie prędkości obrotowej, przy której następuje zniszczenie dysków. W drugiej części artykułu dokonano weryfikacji obliczeń numerycznych na drodze badań niszczących na maszynie wytrzymałościowej.

### **2. Opis modelu numerycznego.**

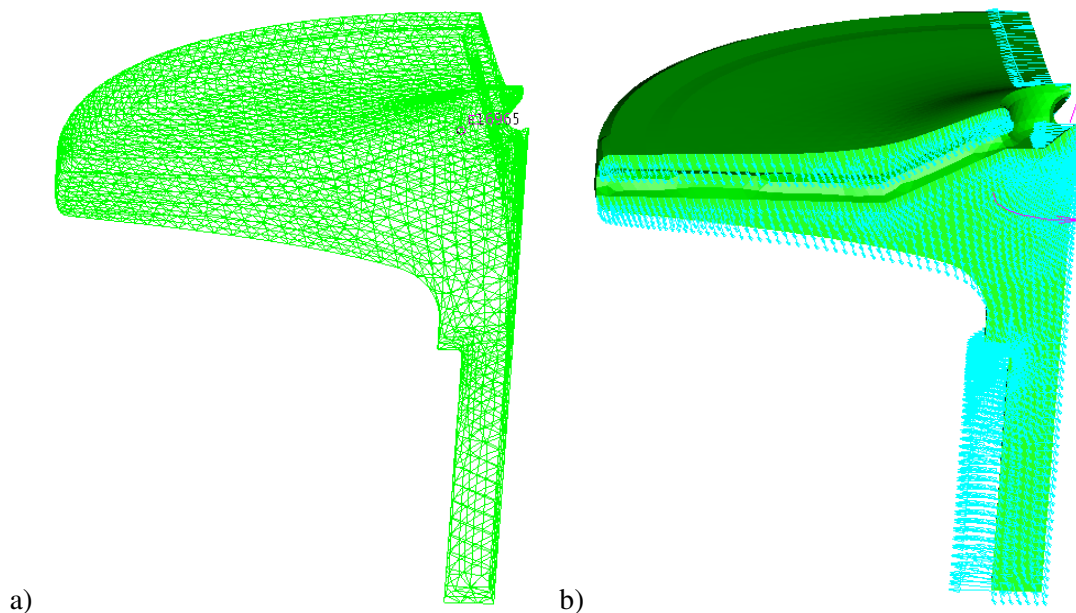
W osobnym artykule przedstawiono proces projektowo – konstrukcyjny, którego efektem było opracowanie konstrukcji dwóch dysków z radialnymi kanałami prostymi, oraz zakrzywionymi (rys. 1 „a” oraz rys. 1 „b”). Na podstawie opracowanej wcześniej geometrii zbudowano model do analiz wytrzymałościowych metodą elementów skończonych – MES [1]. Modele do analiz MES zostały dyskretyzowane przez zastosowanie czterowęzłowych elementów przestrzennych z dodatkowymi węzłami (tzw. superelementy) [3]. Z racji istniejącej symetrii układu, model numeryczny uproszczono do jednej czwartej części całości. Do obliczeń przygotowano 2 modele: dysk z kanałami prostymi (rys. 2) oraz z kanałami zakrzywionymi (rys. 3). Na rys. 2 „a” oraz rys. 3 „a” przedstawiono widok siatki elementów skończonych. Rysunek 2 „b” oraz rys. 3 „b” ilustruje widok siatki z zaznaczonymi odebranymi stopniami swobody (mocowanie, oraz odebrane stopnie swobody wynikające z symetrii układu). Jako wymuszenie zadano prędkość obrotową.



Rys.1. Modele geometryczne dysku: a) z kanałami prostymi; b) z kanałami zakrzywionymi



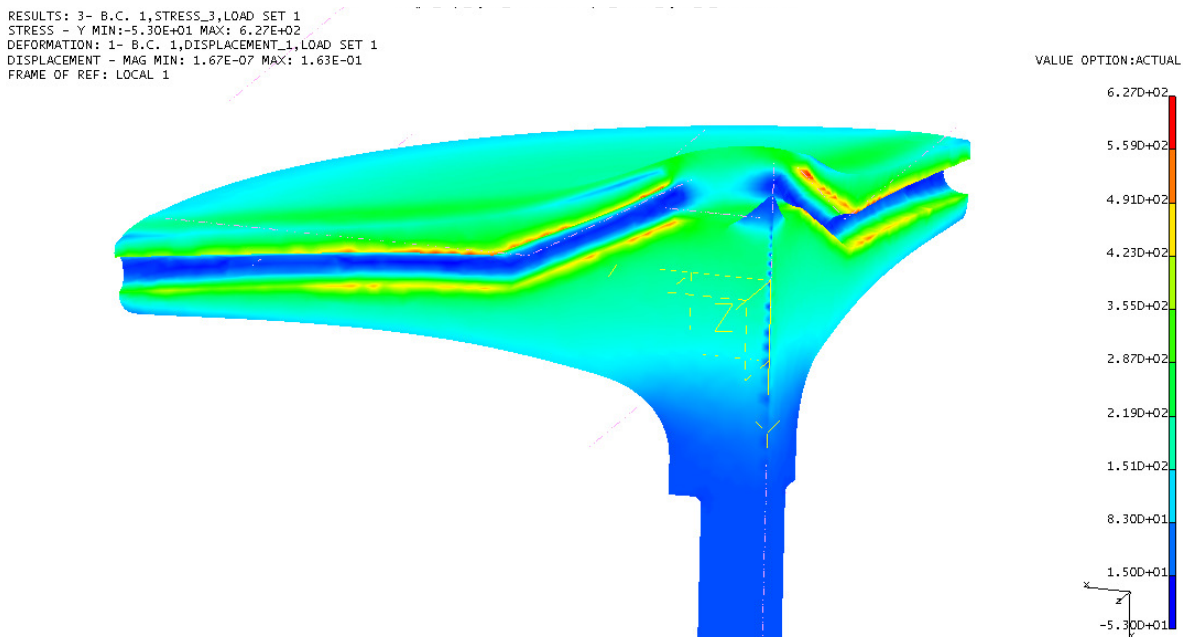
Rys. 2. Model numeryczny dysku z kanałami prostymi: a – widok siatki; b) widok siatki wraz z odebranymi stopniami swobody oraz zaznaczonym wymuszeniem - prędkość obrotowa



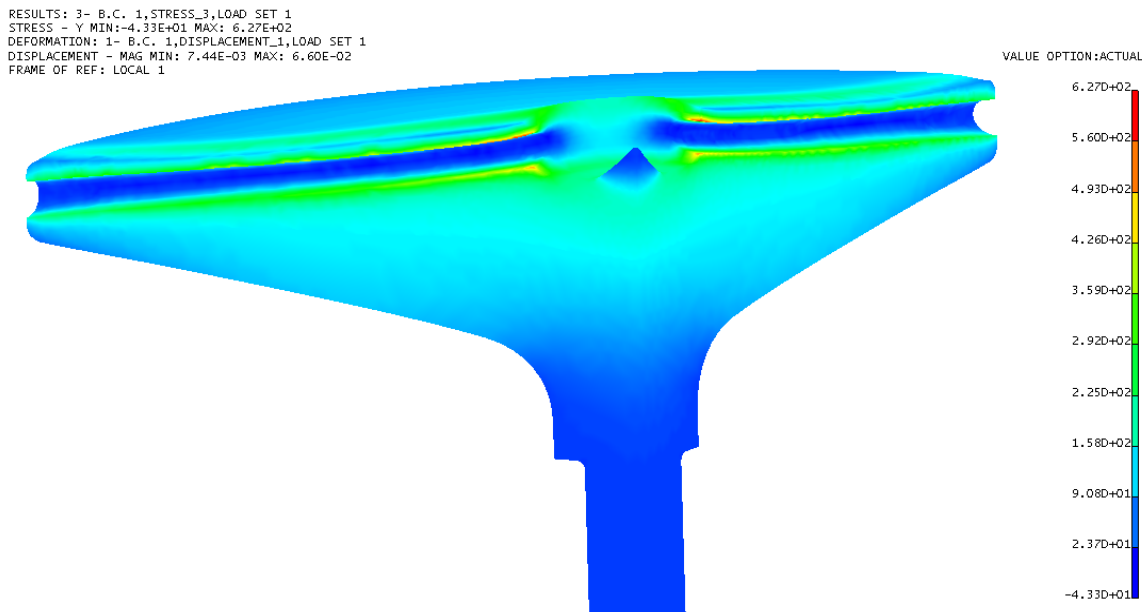
Rys. 3. Model numeryczny dysku z kanałami zakrzywionymi: a – widok siatki; b) siatka z odebranymi stopniami swobody oraz zaznaczonym wymuszeniem - prędkość obrotowa

Przeprowadzone obliczenia miały na celu wyznaczenie krytycznej wartości prędkości obrotowej, przy której dojdzie do zniszczenia elementu. Do obliczeń wykorzystano dane materiałowe,

dostarczone przez producenta materiału z którego wykonano dyski - EN AW 7022 [AlZn5Mg3Cu] - *CERTAL* - stop aluminium o podwyższonych własnościach wytrzymałościowych, wykorzystywany głównie w przemyśle lotniczym. Dane materiałowe gwarantowane certyfikatem, uwzględniały podstawowe parametry takie jak: gęstość, moduł Younga. Na rys. 4 oraz rys. 5 przedstawiono warstwicę maksymalnych naprężeń promieniowych, które uzyskano przy obliczeniach z prędkością 60 tys. obr/min – dla dysku z kanałami zakrzywionymi oraz 50 tys. obr/min dla dysku z kanałami prostymi. Na rysunkach wyraźnie widać koncentracje naprężeń w pobliżu kanałów, co w konsekwencji doprowadza do powstania ogniska pęknięcia i zniszczenia dysku. Wyniki obrazują, iż konstrukcja dysku z kanałami zakrzywionymi ulegnie zniszczeniu przy wyższej prędkości, wynika to z rozkładu naprężeń w analizowanej konstrukcji.



Rys. 4. Maksymalne naprężenia promieniowe dla dysku z kanałami zakrzywionymi, prędkość 60 tys. obr/min



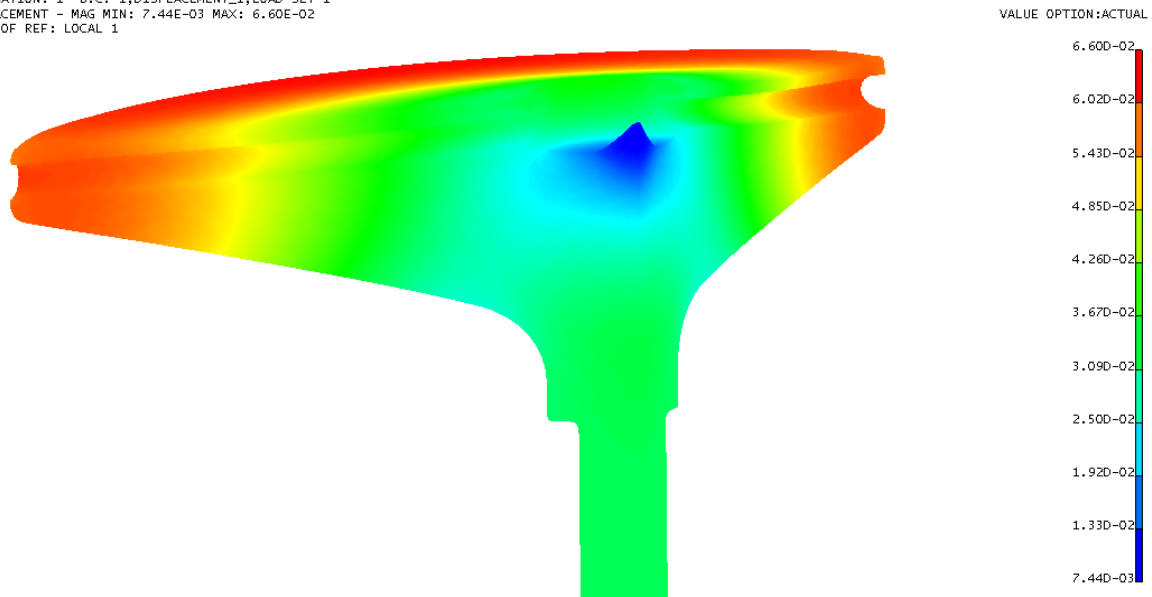
Rys. 5. Maksymalne naprężenia promieniowe dla dysku z kanałami zakrzywionymi, prędkość 50 tys. obr/min

Rysunki 6 oraz 7 przedstawiają rozkład przemieszczeń w analizowanych elementach. Maksymalne przemieszczenia występują na obwodzie obu badanych dysków. Dla dysku z kanałami zakrzywionymi i prędkości obrotowej 60 tys obr/min - 0,16mm (rys. 6) oraz dla dysku z kanałami prostymi i prędkości obrotowej 50 tys obr/min - 0,07mm (rys. 7).



Rys. 6. Maksymalne przemieszczenia dla dysku z kanałami zakrzywionymi, prędkość 60 tys. obr/min

RESULTS: 1- B.C. 1,DISPLACEMENT\_1,LOAD SET 1  
DISPLACEMENT - MAG MIN: 7.44E-03 MAX: 6.60E-02  
DEFORMATION: 1- B.C. 1,DISPLACEMENT\_1,LOAD SET 1  
DISPLACEMENT - MAG MIN: 7.44E-03 MAX: 6.60E-02  
FRAME OF REF: LOCAL 1



Rys. 7. maksymalne przemieszczenia dla dysku z kanałami prostymi, prędkość 50 tys. obr/min

Wykonane obliczenia za pomocą metody elementów skończonych, pozwoliły na wskazanie istotnych miejsc analizowanej konstrukcji, z punktu widzenia wytrzymałościowego. Wyniki wskazały miejsca występowania maksymalnych naprężeń oraz przemieszczeń w analizowanych dyskach. Badania na obiektach fizycznych zweryfikowały obliczenia, ukazując że to właśnie od tych miejsc (maksymalne naprężenia) zaczyna się proces pęknięcia dysku, po przekroczeniu krytycznej prędkości.

## 2. Badania niszczące

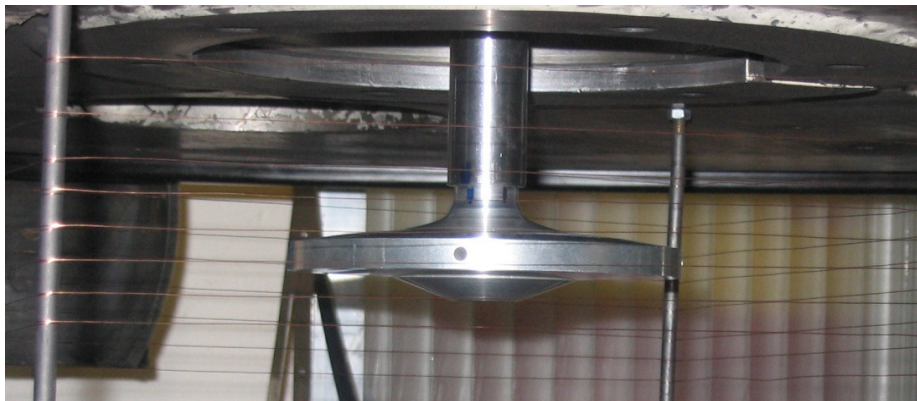
Kolejnym etapem analiz, było przeprowadzenie badań niszczących dysków w celu weryfikacji obliczeń wykonanych metodą elementów skończonych. Badania wykonano na specjalistycznej maszynie wytrzymałościowej marki Schenck BI4U, znajdującej się na wyposażeniu Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, Technische Universität Dresden. Stanowisko do badań składa się z silnika prądu stałego, połączonego za pomocą przekładni planetarnej z osią główną urządzenia, do której, za pomocą adaptera, zostały zamocowane badane dyski. Całość umieszczana była, za pomocą siłowników hydraulicznych, wewnątrz stalowych rur zabezpieczających, pochłaniających energię podczas uszkodzenia badanego wirnika. Stanowisko pozwala przeprowadzić badania elementów rotacyjnych o długości do 1 metra oraz masie nie przekraczającej 800 kg (rys. 8). Urządzenie posiada hydrauliczne tłumienie drgań pozwalające na testy do prędkości obrotowej  $250\,000\text{ min}^{-1}$ . Badania można przeprowadzać w próżni (1 mbar) jak również w osłonie gazu obojętnego i w temperaturze do  $800^{\circ}\text{C}$ . Ze stanowiskiem sprzężona jest szybkostrzelna kamera, wykonująca do 190 000 zdjęć na sekundę i rejestrująca moment zniszczenia badanego elementu. Zapis i kasowanie zdjęć, do i z pamięci podręcznej, realizowane jest w sposób ciągły, natomiast rejestracja na dysku twardym rozpoczyna w momencie zerwania miedzianego drutu umieszczonego wokół badanego dysku (rys. 9) wraz z dwusekundowym materiałem wideo poprzedzającym moment zerwania drutu.





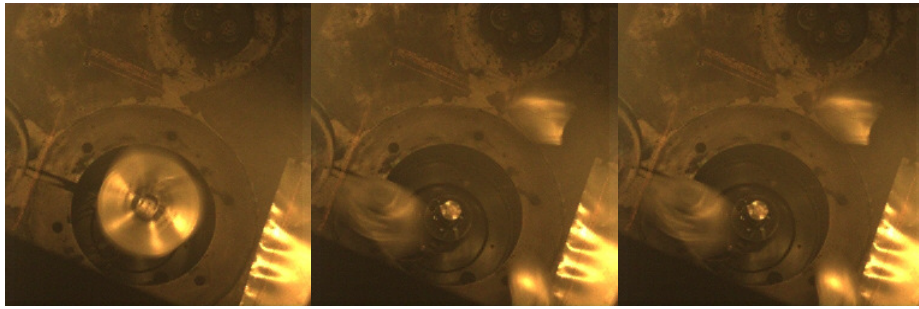
Rys. 8. Widok maszyny wytrzymałościowej oraz zastosowanej kamery szybkostrzelnej

Wykonane dyski aluminiowe zostały wstępnie wyważone, co zapewniło poprawne przeprowadzenie badań wytrzymałościowych, oraz zmniejszenie wpływu drgań na wyniki eksperymentu. Przyrost prędkości obrotowej podczas badania obu dysków ustalono na poziomie 6000 obr/min. Na rys. 9 zamieszczono widok stanowiska badawczego (maszyny do badań niszczących) wraz z zamocowanym dyskiem oraz siatką z drutu miedzianego zapewniającej uruchomienie kamery.



Rys. 9 Widok stanowiska badawczego

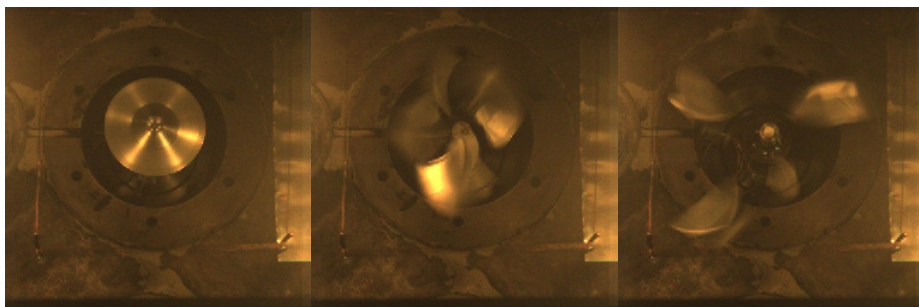
W trakcie badań otrzymano następujące wyniki, zniszczenie dysku z kanałami prostymi nastąpiło przy prędkości 83.486 obr/min. Dla dysku z kanałami zakrzywionymi zniszczenie nastąpiło przy prędkości 89.347 obr/min. Na rysunkach 10 i 12 przedstawiono zdjęcia z kamery szybkostrzelnej, która rejestrowała moment zniszczenia dysku. Na rysunkach 11 oraz 13 zamieszczono fragmenty dysku z kanałami prostymi i zakrzywionymi po badaniu niszczącym



Rys 10 Zdjęcia z kamery szybkostrzelnej pokazujące moment rozpadu dysku z kanałami prostymi



Rys 11 Fragmenty dysku z kanałami prostymi po badaniu niszczącym



Rys 12 Zdjęcia z kamery szybkostrzelnej pokazujące moment rozpadu dysku z kanałami zakrzywionymi



Rys 13 Fragmenty dysku z kanałami zakrzywionymi po badaniu niszcącym

### 3. Podsumowanie

Obliczenia wytrzymałościowe przeprowadzone z wykorzystaniem metody elementów skończonych pozwoliły na wyznaczenie maksymalnej prędkości z jaką dysk może się obracać. Analiza wyników pozwoliła na wyznaczenie miejsc w dyskach, od których zaczyna się proces zniszczenia, po przekroczeniu prędkości krytycznej. Rozbieżności pomiędzy wynikami uzyskanymi z obliczeń metodą elementów skończonych, a badaniami na obiekcie rzeczywistym wynikają z różnic pomiędzy danymi materiałowymi, które zagwarantował producent z tymi, które faktycznie posiadał materiał.

#### Literatura

- [1] Chlebus E.: „Techniki komputerowe CAx w inżynierii produkcji”, WNT Warszawa, 2000.
- [2] Gryboś, Ryszard.: „Dynamika maszyn wirnikowych”, Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, 1994.
- [3] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, J. Z. Zhu.: „The finite element method : its basis and fundamentals”, Amsterdam [etc.] : Elsevier Butterworth-Heinemann, 2006
- [4] A. Jakubowicz, Z. Orłoś.: “Wytrzymałość materiałów”, WNT, Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, 1984

### Analiza wytrzymałościowa oraz badania niszczące wirujących dysków

W artykule przedstawiono wybrane analizy numeryczne dysków wirujących z dużymi prędkościami. Obliczenia wykonano za pomocą metody elementów skończonych. Celem analiz było poznanie mechanizmu zniszczenia dysków oraz wyznaczenie prędkości przy której dyski ulegną zniszczeniu. Szczególnie istotne z punktu widzenia badawczego było porównanie otrzymanych wyników dla dysków z kanałami prostymi oraz zakrzywionymi. Po wykonaniu analiz numerycznych wykonane zostały badania niszczące dysków, na specjalnej maszynie wytrzymałościowej, umożliwiającej zniszczenie badanych części poprzez obracanie ich z wysokimi prędkościami.

#### Strength Analysis and destructive tests of rotating discs

The article presents selected numerical analysis of high speed rotating discs. Computations has been made using finite elements method. The goal of the analysis was to understand the disc-destruction mechanism and to determine the destructive speed. Especially important was to compare results obtained for two different kinds of discs: discs with straight internal holes and discs with bent internal holes. Destructive tests has been made on a special machine by rotating discs at a high speed.