

Dr inż. Wojciech MIĄSKOWSKI

DOI: 10.17814/mechanik.2015.7.270

Dr inż. Krzysztof NALEPA

Dr inż. Paweł PIETKIEWICZ

Dr inż. MARZENA WILAMOWSKA-KORSAK

Kamil BOGUSZ

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

## PROJEKT PRZYRZĄDU DO KSZTAŁTOWANIA ELEMENTÓW STRUKTURALNEJ WARSTWY NOŚNEJ ŁOŻYSK FOLIOWYCH

*Streszczenie: W artykule omówiono proces projektowania przyrządu do kształtowania folii falistej będącej elementem strukturalnej warstwy nośnej łożyska foliowego. Przyrząd pozwala na uzyskanie wymaganego kształtu folii falistej w procesie kształtowania wykorzystującym jednoczesne zginanie i tłoczenie odpowiednio przygotowanego paska cienkiej blaszki. Zaproponowane rozwiązanie zmniejsza ryzyko uszkodzenia folii metalowej podczas jej kształtowania.*

## DESIGN OF FORMING TOOL FOR THE FOIL BEARING STRUCTURAL CARRYING LAYER ELEMENTS

*Abstract: The article discusses designing process of the tool forming the bump foil which is a part of the structural foil bearing carrying layer. The tool allows obtaining the required shape of the bump foil in the forming process using simultaneous bending and stamping of properly prepared strip of thin metal sheet. The proposed solution reduces risk of metal foil damage during its forming.*

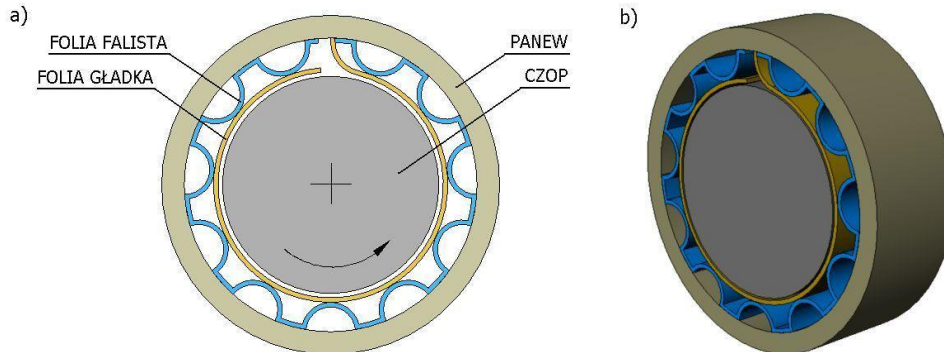
*Słowa kluczowe: łożysko foliowe, folia falista, kształtowanie*  
*Keywords: foil bearing, bump foil, forming*

### 1. WPROWADZENIE

Istotą łożyska foliowego jest możliwość podpierania wałów uzyskujących prędkość obrotową rzędu setek obr/min. Przy tak wysokich wartościach prędkości obrotowej występuje wiele czynników niekorzystnych. Należą do nich między innymi drgania powstałe z niewyważenia wału oraz wysoka temperatura wynikająca z tarcia. Łożyska foliowe wykazują bardzo dobre właściwości tłumienia drgań. Takie właściwości uzyskano dzięki zastosowaniu w konstrukcji łożyska folii gładkiej, stanowiącej odkształcalną, podatną panew, oraz falistej, stanowiącej podporę o możliwej do kształtowania charakterystyce sprężystości i tłumienia (Kiciński, Żywica, 2008). Elementy te umieszczone są pomiędzy pierścieniem wewnętrznym tulei a czopem wału. Wokół czopa owinięta jest folia gładka. Jest ona również zamocowana jednym końcem w pierścieniu zewnętrznym. Pomiędzy folią gładką a zewnętrznym pierścieniem łożyska rozpostarta jest folia falista (Agrawal, 1997).

Szereg zalet sprawia, że łożyska foliowe znalazły zastosowanie w wielu dziedzinach mechaniki, między innymi w łożyskowaniu części obrotowych turboekspanderów,

wysokoobrotowych sprężarek czy mikroturbin (Heshmat, Hermel, 1993; Xiong i inni 1997; Lee i inni, 2012; <http://www.rddynamics.com/products/foil.html>). Łożyska foliowe proponowane są również do niekonwencjonalnych zastosowań, jak chociażby do łożyskowania wałów okrętowych przy smarowaniu wodą (Hryniewicz i inni, 2009).

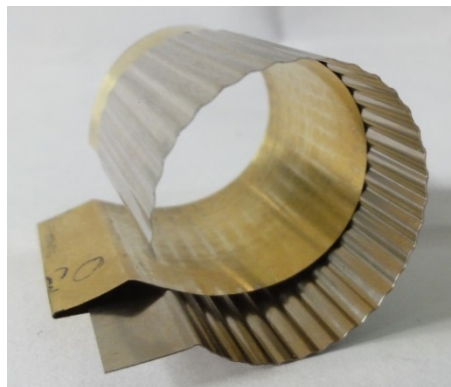


Rys. 1. Budowa łożyska foliowego (Nalepa i inni 2009)

Niestety łożyska foliowe mają również swoje wady. Najpoważniejsze z nich to: niska nośność, mała dokładność osiowania, wysokie koszty wdrożenia łożyskowania foliowego, duże opory łożyska przy niskich prędkościach obrotowych.

Wysokie koszty produkcji łożyska foliowego wynikają z konieczności opracowywania nowych modeli obliczeniowych oraz technologii produkcji dla każdego łożyska (Kiciński, Żywica, 2010). Do projektowania indywidualnego łożyska należy uwzględnić warunki, w jakich będzie pracować. Te trudności sprawiają, że nawet firmy zajmujące się produkcją łożysk foliowych nie mają dla nich gotowej oferty, z której można by wybierać gotowe produkty ([http://www.mechsol.com/html/rotarecip/foil\\_bearings.html](http://www.mechsol.com/html/rotarecip/foil_bearings.html)).

Folia falista jest zasadniczą częścią łożyska foliowego, decydującą o właściwościach łożyska (Żywica, 2013, Miąskowski i inni 2009). Kształt folii falistej różni się pomiędzy łożyskami foliowymi. Wynika on zawsze z obliczeń dokonywanych dla indywidualnego łożyska. Zazwyczaj profil ma kształt fali.

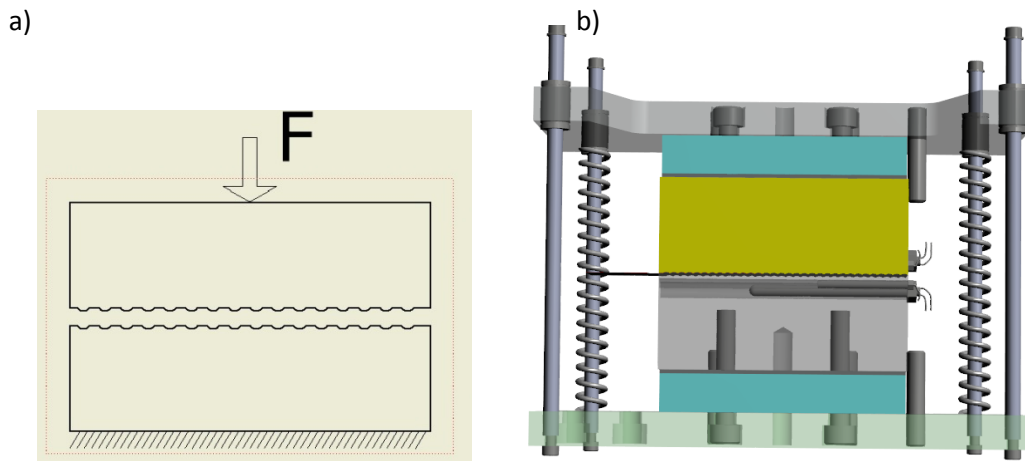


Rys. 2. Profil folii falistej. Źródło: opracowanie własne

Podsumowując, folia falista określa cechy i właściwości łożyska foliowego. Nadaje mu wyjątkowe cechy tłumienia drgań i sprawia, że łożyska tego typu znajdują swoje zastosowanie w przemyśle. Zatem kluczowym etapem produkcji łożyska foliowego jest dobre opracowanie, obliczenie i wytworzenie folii falistej.

## 2. KSZTAŁTOWANIE FOLII FALISTEJ METODĄ TŁOCZENIA

Najczęściej stosowana metoda kształtowania blaszki materiału do postaci folii falistej polega na jej tłoczeniu z wykorzystaniem stempła i matrycy. Możliwe jest tłoczenie na matrycy z nieodkształcalnym stemplem kształtowym lub zastąpienie stempla sztywnym materiałem podatnym, np. gumą o odpowiedniej twardości. Półprodukt, w postaci paska folii o żądanej grubości, rozkładano pomiędzy stemplem a matrycą o specjalnie ukształtowanych zębach. Następnie dociskano stempel z dużą siłą (około 98 kN). Żłobienia stempla oraz matrycy wykonane na podstawie prostokąta odtwarzały kształt w folii metalowej. Idee wykorzystania tej metody pokazano na rysunku 3.

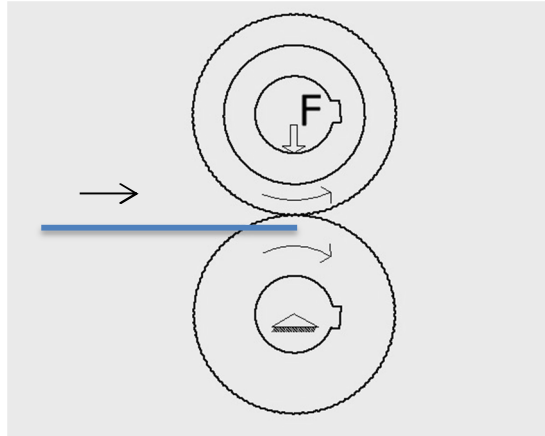


Rys. 3. Uproszczony, poglądowy: a) rysunek stempla i matrycy; b) przyrząd do kształtowania folii falistej. Źródło: opracowanie własne

Sposób ten ma jedną zasadniczą wadę, która sprawia, że metoda produkcji jest niepewna. Folia podczas tłoczenia była ściskana na całej swojej długości jednocześnie. Kształtowanie fal powodowało równomierne rozciąganie się elementu, co czasami prowadziło do rozerwania cienkiej folii.

## 3. KSZTAŁTOWANIE FOLII FALISTEJ METODĄ ODTACZANIA

Przedstawiony poniżej proces kształtowania folii falistej wykorzystuje rodzaj tłoczenia blaszki z jednoczesnym zginaniem. W proponowanym rozwiązaniu zastąpiono stempel i matryce o kształcie prostokąta na ukształtowane koła. Specjalnie wymodelowane zęby stempla oraz matrycy są równo ułożone w szyku na okręgu. Przyrząd nadal wykorzystuje prasę w celu dociskania stempla do matrycy, jednak w tym przypadku folia falista kształtowana jest poprzez przemieszczanie jej pomiędzy dociskanymi do siebie wałcami kształtowymi.



Rys. 4. Uproszczony, poglądowy rysunek stempla i matrycy o kształcie koła. Źródło: opracowanie własne

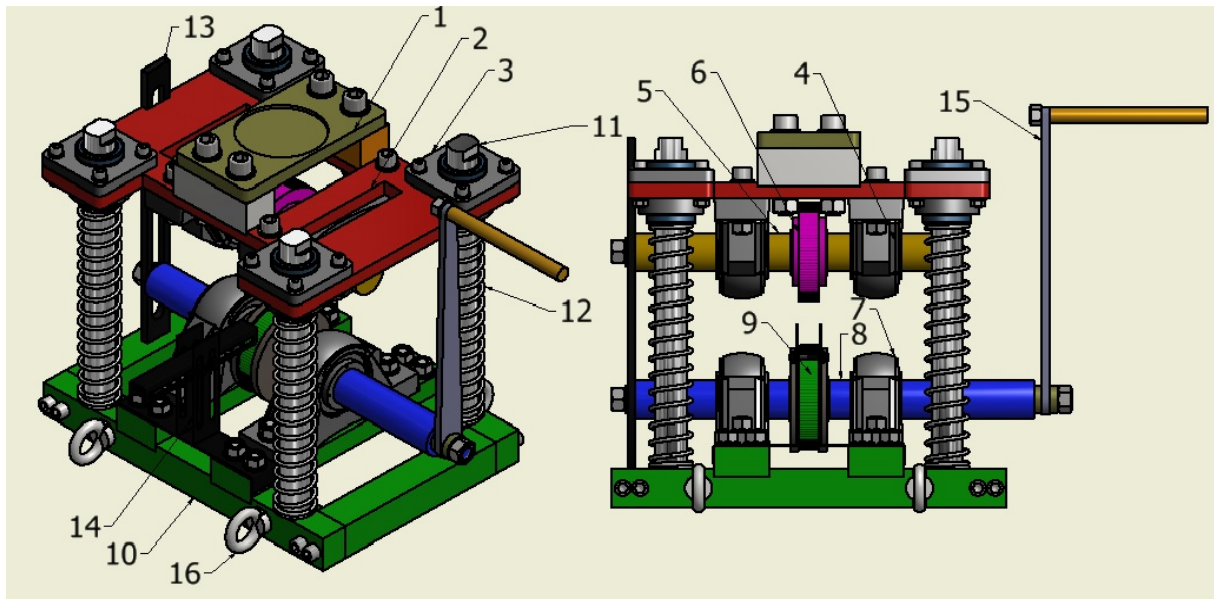
Kształtowe koła stempla i matrycy są osadzone na osobnych wałach. Te dwa zasadnicze elementy urządzenia mają względem siebie jeden stopień swobody, umożliwiając ruch zespołowi dociskającemu jedynie względem osi pionowej. W wyniku tego nacisk wywołany prasą na zespół dociskający powoduje przyciśnięcie do siebie koła stempla do matrycy. Następnie poprzez ruch obrotowy wału dociśnięte koła obracają się wokół swoich osi. Między oba elementy wprowadza się taśmę metalową i rozpoczyna się proces kształtowania.

Siła powstała w wyniku nacisku prasy rozprowadzana jest na dużo mniejszą powierzchnię (około  $85,723 \text{ mm}^2$ ) w stosunku do metody tradycyjnej. Siła nacisku o wartości 1 kN wywołuje na materiał naprężenia rzędu 114 MPa, co jest wystarczającą wartością do kształtowania. Użycie mniejszej siły do tłoczenia powoduje mniejsze zużycie elementów przyrządu oraz niższe zużycie energii.

#### 4. BUDOWA PRZYRZĄDU DO KSZTAŁTOWANIA METODĄ ODTACZANIA

Przyrząd do kształtowania metodą odtaczania składa się z 48 elementów, nie wliczając w to nakrętek, śrub i podkładek. Wszystkie elementy łączą się w dwa zasadnicze podzespoły. W skład pierwszego wchodzi rama główna wraz z prowadnicami, łożyskami i wałem matrycy oraz samą matrycą. Drugim podzespołem jest zestaw dociskający, wraz z łożyskami liniowymi, wałem i łożyskami stempla oraz stemplem. Cały zestaw dociskający jest osadzony na prowadnicach ramy głównej. Dzięki zastosowaniu łożysk liniowych może bez przeszkód poruszać się wzdłuż jednej osi pionowej względem drugiego podzespołu.

Poszczególne części obu głównych podzespołów przyrządu również zostały zaprojektowane tak, aby minimalizować odchyłki montażowe. Rysunek 5 przedstawia wygląd przyrządu.

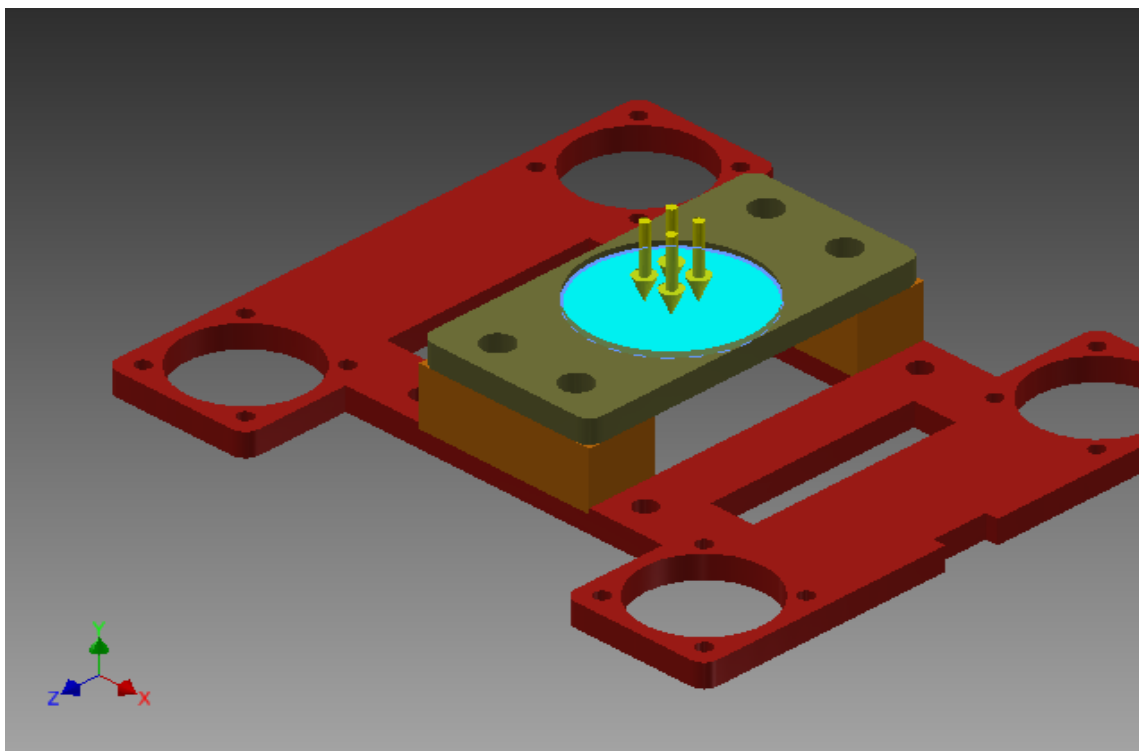


Rys. 5. Ogólny widok przyrządu. 1. Element przyłożenia siły nacisku prasy; 2. Główny element zespołu dociskającego; 3. Łożysko liniowe; 4. Łożysko wału stempla; 5. Wał matrycy; 6. Stempel; 7. Łożysko wału matrycy; 8. Wał stempla; 9. Matryca; 10. Rama główna; 11. Prowadnica; 12. Sprężyna naciskowa; 13. Blacha ustalająca pozycje wałów matrycy oraz stempla; 14. Prowadnica kształtowanego materiału; 15. Dźwignia do obrotu wału matrycy; 16. Śruba z uchwytem do transportu przyrządu. Źródło: opracowanie własne

Zespół dociskający jest bardzo ważnym elementem przyrządu. Siła nacisku będzie przyłożona do środkowej części płyty górnej prasy. Zadaniem całego zespołu jest nie tylko przeniesienie dużej siły potrzebnej do procesu kształtowania folii. Przy użyciu prowadnic ramy podstawowej zespół dociskający musi przenieść tę siłę dokładnie wzdłuż osi pionowej. Stempel może mieć tendencję do obtaczania się wokół matrycy, co byłoby efektem bardzo niepożądanym. Aby temu zapobiec, zespół dociskający został wyposażony w cztery liniowe zespoły łożyskujące, po jednym na każdą prowadnicę. Dzięki nim zespół dociskający ma dużą swobodę ruchu wzdłuż osi pionowej oraz nie ma możliwości ruchu w dwóch pozostałych osiach poziomych.

## 5. ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA WYBRANYCH ELEMENTÓW PRZYRZĄDU

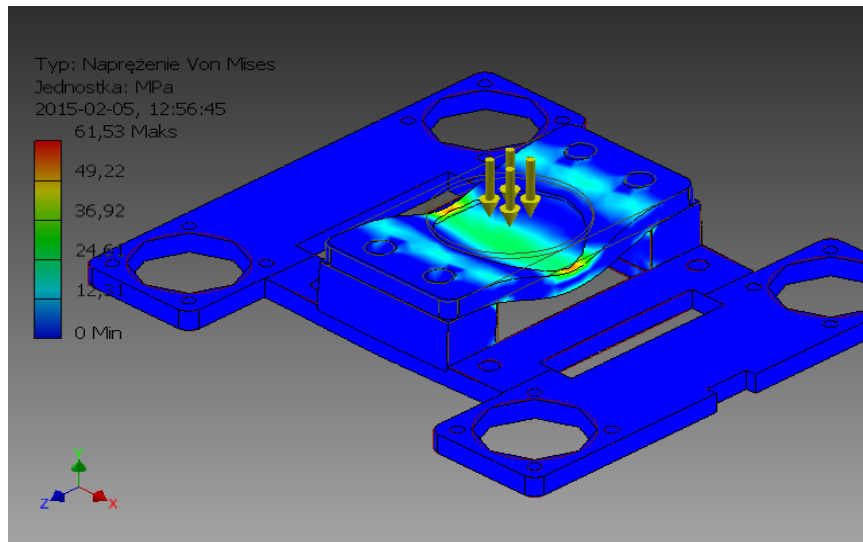
Najistotniejszą częścią projektowania zespołu dociskającego jest analiza wytrzymałościowa elementów, które bezpośrednio przenoszą nacisk. W tym celu wykonane zostały obliczenia za pomocą metody elementów skończonych (MES). Wyniki analiz symulacyjnych przeprowadzonych za pomocą Autodesk Inventor 20014 przedstawiono na rysunkach 6-9 oraz zestawiono w tabeli 1.



Rys. 6. Wybrana powierzchnia nacisku. Źródło: opracowanie własne

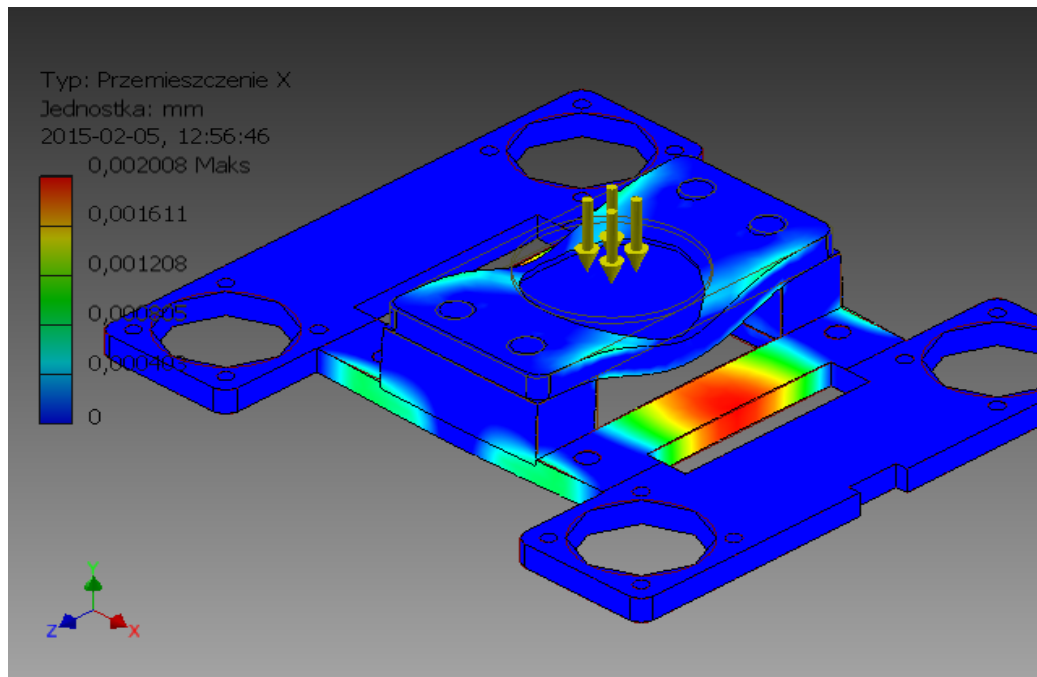
Tabela 1. Podsumowanie oraz wyniki analizy naprężeń

Wartość	Minimalna	Maksymalna
Objętość	2886680 mm <sup>3</sup>	
Masa	22,6605 kg	
Naprężenie Von Misesa	0,00402467 MPa	61,5266 MPa
Przemieszczenie	0,0000114515 mm	0,0414525 mm
Współczynnik bezpieczeństwa	3,3644 ul	15 ul
Przemieszczenie X	-0,00201333 mm	0,00200765 mm
Przemieszczenie Y	-0,0414525 mm	0,00185503 mm
Przemieszczenie Z	-0,00734564 mm	0,00734912 mm



Rys. 7. Rozkład naprężeń. Źródło: opracowanie własne

Jak wynika z raportu analizy naprężeń (MES), zredukowane, maksymalne naprężenia w badanym zespole są dużo mniejsze od granicy plastyczności materiału. Świadczy to o tym, że nie ma zagrożenia zniszczenia elementów podczas pracy pod obciążeniem.

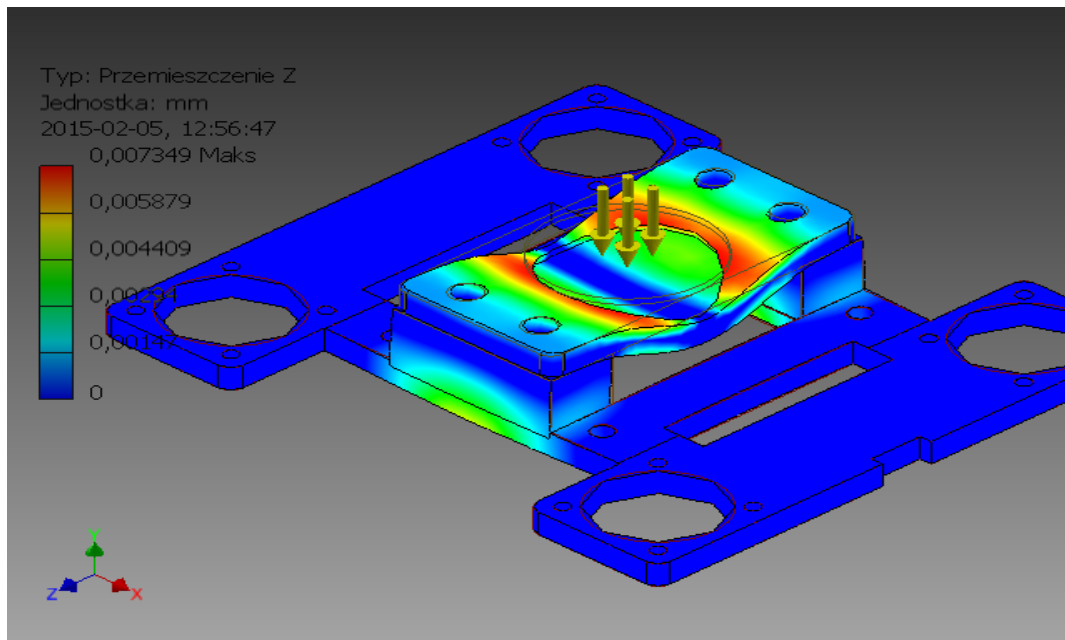


Rys. 8. Rozkład przemieszczeń wzdłuż osi X. Źródło: opracowanie własne

Analiza MES wykazała również wartości przemieszczeń zespołu wzdłuż osi X oraz Z. Jak wynika z obliczeń, wynoszą one odpowiednio 0,002 mm i 0,007 mm. W stosunku do określonych za maksymalną wartość przemieszczenia uzyskano satysfakcjonujący wynik.

Do obliczeń przyjęto nacisk równy 1,735 MPa na powierzchni 11309,734 mm<sup>2</sup>, co daje siłę nacisku nieznacznie przekraczającą 2 kN. Jest to bowiem maksymalne obciążenie, względem którego zaprojektowany został przyrząd.

Na konstrukcji ramy głównej bazuje sztywność i wytrzymałość przyrządu. Podstawę ramy stanowią cztery stalowe pręty kwadratowe o boku 50mm oraz dwa pręty prostokątne o bokach 70 mm i 40 mm. Części ramy głównej połączone są za pomocą połączeń śrubowych, a wyfrezowane gniazda, oprócz zniwelowania odchyłek montażowych, pomagają również uzyskać dużą sztywność całego zespołu.



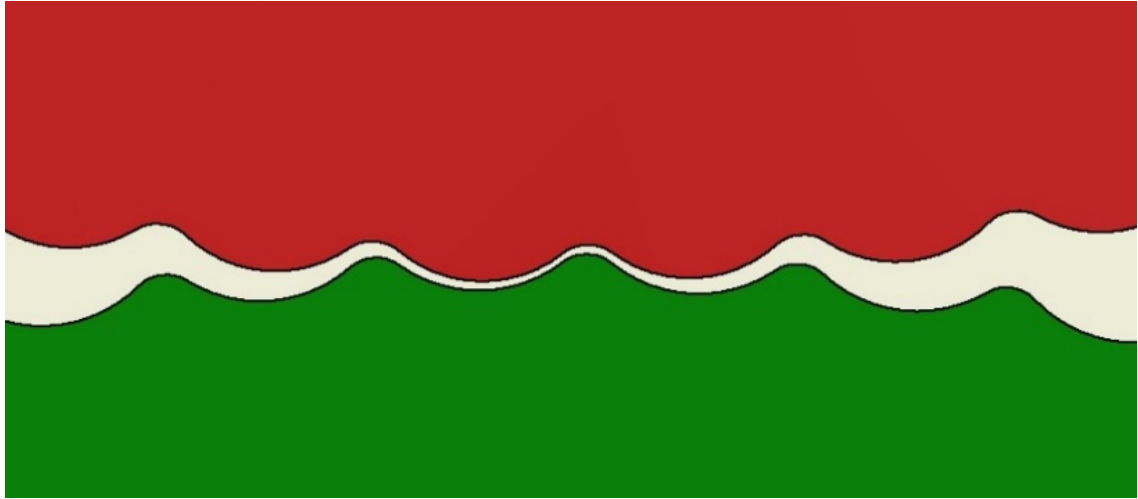
Rys. 9. Rozkład przemieszczeń wzdłuż osi Z Źródło: opracowanie własne

Kolejnymi ważnymi częściami ramy głównej są wspomniane wcześniej prowadnice. Cztery wałki o średnicy 40 mm oraz długości całkowitej 450 mm osadzone są w gniazdach, w elementach podstawy. Są one przykręcone od spodu śrubami M20.

Matryca wraz ze stemplem to elementy, które bezpośrednio nadają kształt folii falistej, formując materiał wyjściowy w postaci płaskiej blaszki. Specjalnie wyprofilowane zęby matrycy oraz stempla zostały zaprojektowane tak, aby ściskana pomiędzy nimi blaszka została trwale odkształcona, uzyskując formę folii falistej.

Kształt zębów stempla odpowiada kształtowi zagłębień w matrycy. Między nimi przewidziana została szczelina na grubość kształtowanej folii metalowej. Poniżej, na rysunku 10, przedstawiony jest widok zazębienia się stempla z matrycą z uwzględnioną między nimi szczeliną na grubość blaszki.





Rys. 10. Widok zazębienia stempla z matrycą. Źródło: opracowanie własne

## 6. PODSUMOWANIE

W pracy omówiono przyrząd do kształtowania cienkiej blaszki do postaci folii falistej wykorzystywanej w łożyskach foliowych. Łożyska foliowe mają szeroki wachlarz zastosowań w wielu dziedzinach techniki. Z biegiem lat oraz rozwojem technologii być może znajdzie się więcej dziedzin, w których będzie można je zastosować. Główną ich zaletą jest wysoka zdolność do tłumienia drgań. Ta cecha jest wynikiem zastosowania w nich folii falistej. Z tego wynika, że zawsze gdy potrzebne będą łożyska foliowe, niezbędne będzie kształtowanie folii. Dla każdego łożyska, a dokładniej warunków, w jakich ma pracować, projektowany jest nowy kształt folii falistej, więc urządzenie do ich kształtowania powinno być uniwersalne. W przedstawionym przyrządzie elementy, jakie należy zmieniać, aby uzyskać zmianę kształtu folii, to krążki matrycy oraz stempla.

Przyrząd spełnia wymagania, jakie były mu stawiane przed jego opracowaniem. Urządzenie miało podczas kształtowania nie niszczyć materiału oraz mieć zdolność trwałego odkształcania obrabianego materiału przy niskiej sile nacisku. Te wymagania powinien spełnić kształt matrycy oraz stempla oraz wykorzystanie metody kształtowania poprzez odtaczanie.

\*\*\*

Przedstawione prace wykonano w ramach realizacji projektu *Wykorzystanie materiałów i konstrukcji inteligentnych do opracowania koncepcji i wykonania innowacyjnego systemu łożyskowania wirników mikroturbin energetycznych*.

**LITERATURA**

- [1] Agrawal G.L.: *Foil Air/Gas Bearing Technology-An Overview*, International Gas Turbine & Aero engine Congress & Exhibition, Orlando (USA), 1997.
- [2] Heshmat H., Hermel P.: 1993, *Compliant Foil Bearings Technology and Their Application to High Speed Turbomachinery*, "Tribology Series", volume 25, p. 559-575.
- [3] Hryniewicz P., Wodtke M., Łubiński J.Ł., Olszewski A.: 2009, *Environmentally friendly propeller shaft support with the use of water lubricated foil bearings*, "Polish Journal of Environmental Studies", 4B/2009, s. 76-79.
- [4] Kiciński J., Żywica G.: 2010, *The numerical analysis of the steam microturbine rotor supported on foil bearing*, "Advances in Vibration Engineering", Vol. 11, No. 2, 113-119.
- [5] Kiciński J., Żywica G.: 2008, *Modelowanie strukturalnej warstwy nośnej łożyska foliowego*, Wyd. Instytut Maszyn Przepływowych PAN, Gdańsk, 2008.
- [6] Lee Y.B., Park D.J., Kim H.T., Sim K.: 2012, *Development and performance measurement of oil-free turbocharger supported on gas foil bearings*, "Journal of Engineering for Gas Turbines and Power", vol. 134, Issue 3, p. 54-60.
- [7] Nalepa K., Pietkiewicz P., Żywica G.: 2009, *Development of the foil bearing Technology*, "Technical Sciences", No 12, - DOI 10.2478/V10022-009-0019-2.
- [8] Xiong L.Y., Wu G., Hou Y.: 1997. *Development of aerodynamic foil journal bearings for a high Speer cryogenic turboexpander*, "Cryogenics", 37, p. 221-230.
- [9] Żywica, G.: 2013, *The Dynamic Performance Analysis of the Foil Bearing Structure*, "Acta Mechanica et Automatica", vol. 7, no. 1, 2013, p. 58-62.
- [10] Miąskowski W., Pietkiewicz P., Żywica G.: 2009, *Modeling Foil Bearings*, "Technical Sciences", 2009, nr 12, s. 241-248.
- [11] [http://www.mechsol.com/html/rotarecip/foil\\_bearings.html](http://www.mechsol.com/html/rotarecip/foil_bearings.html)
- [12] <http://www.rddynamics.com/products/foil.html>