

POSTĘPY

nauki i techniki

Advances in Science and Technology

8/2011

Zespół Redakcyjny / *Editorial Committee:*

Gabriel Borowski – *redaktor naczelny / Editor-in-Chief*

Monika Wrona – *sekretarz redakcji / Secretary*

Renata Lis – *redaktor / Editor*

Sylwester Korga – *redaktor / Editor*

Czasopismo recenzowane / *Reviewed Journal*

Rada Programowa / *Programing Board:*

- Prof. dr hab. inż. Klaudiusz Lenik – *przewodniczący / Chairman* – Politechnika Lubelska
- Prof. dr hab. inż. Franciszek Kluza – Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie
- Prof. dr hab. inż. Mirosław W. Kindraczuk – National Aviation University, Kiev
- Prof. dr hab. inż. Mykhaylo Pashechko – Politechnika Lubelska
- Prof. dr hab. inż. Tadeusz Pełczyński – Politechnika Lubelska
- Prof. dr hab. inż. Jan Senatorski – Instytut Mechaniki Precyzyjnej w Warszawie
- Dr hab. inż. Marek Jakubowski, prof. PL – Politechnika Lubelska
- Dr hab. inż. Franciszek Lis, prof. PL – Politechnika Lubelska
- Dr hab. inż. Wojciech Olgowicz, prof. PŚl – Politechnika Śląska w Gliwicach
- Dr hab. inż. Dorota Wójcicka-Migasiuk, prof. PL – Politechnika Lubelska
- Dr inż. Paweł Chojnacki – Prezes Zarządu Oddziału SIMP w Lublinie

Adres Redakcji / *Editorial Office:*

Politechnika Lubelska

Katedra Podstaw Techniki

20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38

tel. (81) 538 14 89, fax (81) 525 93 85

e-mail: pnt@pollub.pl, <http://www.pnt.pollub.pl>

© Copyright by Katedra Podstaw Techniki Politechniki Lubelskiej.

ISSN 2080-4075

Wydawca / *Publisher:*

Oddział SIMP w Lublinie

ul. Chmielna 2a

20-079 Lublin

<http://www.lublin.simp.pl>

Politechnika Lubelska

Katedra Podstaw Techniki

20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38

<http://www.kpt.pollub.pl>

SPIS TREŚCI

Paweł Kot, Edward Lisowski, Konrad Kloch BADANIE OPORÓW TARCIA WYSTĘPUJĄCYCH W SIŁOWNIKU PNEUMATYCZNYM WYKONANYM Z MATERIAŁÓW POLIMEROWYCH.....	5
Mateusz Kania ZASTOSOWANIE JĘZYKA VISUAL BASIC W PROJEKTOWANIU I ANALIZIE KINEMATYCZNEJ W SYSTEMIE CATIA V5.....	12
Tomasz Kamiński, Przemysław Filipek WODOROWE OGNIWO PALIWOWE – EKOLOGICZNE ŹRÓDŁO ZASILANIA POJAZDÓW PRĄDEM STAŁYM.....	20
Mariusz Kłonica MODYFIKACJA WARSTWY WIERZCHNIEJ TWORZYW POLIMEROWYCH (PP-H I PE 300) OZONEM	29
Jerzy Józwik, Marcin Kobylka BADANIE WPŁYWU PARAMETRÓW GEOMETRYCZNYCH KIESZENI PROSTOKĄTNEJ ORAZ WARUNKÓWREALIZACJI PROCESU SKRAWANIA NA DRGANIA PODCZAS FREZOWANIA TROCHOIDALNEGO.....	37
Aleksander Nieoczym, Leszek Gardyński BILANS ENERGETYCZNY PRACY GŁOWICY WKRĘCAJĄCEJ.....	45
Ireneusz Zagórski, Paweł Pieśko BADANIA PORÓWNAWCZE CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI WYBRANYCH STOPÓW MAGNEZU PO FREZOWANIU NARZĘDZIEM PEŁNOWĘGIKOWYM ORAZ PKD.....	53
Magdalena Pokrzywa, Rafał Niewiedzielski, Piotr Kula, Radomir Atraszkiewicz, Sebastian Lipa, Leszek Czechowski, Jacek Jankowski, Tomasz Wajman, Krzysztof Sobczak NUMERYCZNA ANALIZA PROCESU HARTOWANIA W PIECU RUROWYM Z ZIMNĄ KOMORĄ CHŁODZENIA.....	59
Emil Sasimowski ZASTOSOWANIE TERMOWIZJI W BADANIACH PROCESU WYTŁACZANIA.....	68
Monika Kulisz IDENTYFIKACJA I WERYFIKACJA MODELU OBIEKTU DYNAMICZNEGO NA PRZYKŁADZIE PROCESU FREZOWANIA.....	76
Maciej Włodarczyk ANALIZA WPŁYWU SIŁ SKRAWANIA ORAZ ZAMOCOWANIA NA POZIOM NAPRĘŻEŃ W ASPEKcie GRUBOŚCI ŚCIANEK WYBRANEJ KONSTRUKCJI KIESZENIOWEJ.....	82
Piotr Wolszczak BADANIE WPŁYWU WŁAŚCIWOŚCI GEOMETRYCZNYCH MIKROSTRUKTURY NA MODUŁ SPRĘŻYSTOŚCI POPRZECZNEJ KOMPOZYTU ROWINGOWEGO W PROCESIE PRODUKCJI ODPOWIEDZIALNYCH KONSTRUKCJI NOŚNYCH.....	93
Miroslaw Wendeker, Michał Biały, Adam Majczak OPRACOWANIE MODELU UKŁADU WYMIANY ŁADUNKU SILNIKA SUBARU EJ25 Z ZASTOSOWANIEM METODY INŻYNIERII ODWROTNEJ (REVERSE ENGINEERING).....	101

Przemysław Filipek, Tomasz Kamiński URZĄDZENIA O SPRAWNOŚCI PONAD 100 %	107
Mateusz Kania, Mirosław Ferdynus ANALIZA KINEMATYCZNA MECHANIZMU UKŁADU STEROWANIA POCHYLENIEM I PRZECHYLENIEM ŚMIGŁOWCA W SYSTEMIE CATIA V5	113
Agnieszka Skoczylas ANALIZA PORÓWNAWCZA PROCESU CIĘCIA WIĄZKĄ LASEROWĄ I STRUMIENIEM WODNO-ŚCIERNYM	121
Piotr Pękała MODELOWANIE POWIERZCHNIOWE W SYSTEMIE CATIA V5	129
Anna Rudawska, Monika Czarnota WPLYW OPERACJI ODŁUSZCZANIA NA WŁAŚCIWOŚCI ADHEZYJNE WARSTWY WIERZCHNIEJ ORAZ WYTRZYMAŁOŚĆ POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH BLACH MIEDZIANYCH	137
Jakub Szabelski WSTĘP DO KOMPUTEROWEGO MODELOWANIA CHARAKTERYSTYK UKŁADU DYNAMICZNEGO OBRÓBKU UBYTKOWEJ WAŁÓW O MAŁEJ SZTYWNOŚCI	148
Marian Gielmuda ZASTOSOWANIE METODY RAPID PROTOTYPING W BUDOWIE SILNIKA KJ – 66SM	156
Janusz Kisiel, Józef Jonak, Jakub Gajewski, Łukasz Jedliński ANALIZA WYBRANYCH DYSKRYMINANT STOSOWANYCH DO OCENY STANU TECHNICZNEGO PRZEKŁADNI	165
Aneta Mager, Grzegorz Moryson, Andrzej Cellary, Lidia Marciniak ZASTOSOWANIE TECHNIK RAPID PROTOTYPING DO WYTWARZANIA WYROBÓW METALOWYCH	174
Jerzy Józwik MODELOWANIE UGIĘĆ SPRĘŻYSTYCH PRZEDMIOTÓW OBRABIANYCH W PROCESIE SKRAWANIA TOCZENIEM	183
Tomasz Klepka, Przemysław Zgierski CHARAKTERYSTYKA METOD WTRYSKIWANIA DO ZASTOSOWAŃ MEDYCZYNYCH	192
Tomasz Jachowicz, Volodymyr Krasynskyi ETYKIETOWANIE - METODA WYTWARZANIA ELEMENTÓW Z TWORZYW O SPECJALNYCH CECHACH POWIERZCHNI	201
Przemysław Filipek ROBOT INSPEKCYJNO-CZYSZCZĄCY INSPEKTOR 1	211
Marcin Korulczyk FUNKCJONOWANIE CZŁOWIEKA W ŚRODOWISKU PRACY WYBRANE ASPEKTY	218
Rafał Rumin OPRACOWANIE MATEMATYCZNYCH I FIZYCZNYCH ZALEŻNOŚCI DO BUDOWY MODELU MATEMATYCZNEGO UKŁADU WYWAŻANIA WIRNIKÓW	226

Paweł Kot, Edward Lisowski ¹⁾, Konrad Kloch ²⁾

BADANIE OPORÓW TARCIA WYSTĘPUJĄCYCH W SIŁOWNIKU PNEUMATYCZNYM WYKONANYM Z MATERIAŁÓW POLIMEROWYCH

Streszczenie: Silikony są materiałami powszechnie stosowanymi w dziedzinie uszczelniania elementów ruchomych. Ich główną funkcją jest zapobieganie powstawania przecieków zarówno środków smarujących, jak i cieczy właściwej. Niektóre silikony w swej budowie zawierają olej, który ma na celu zmniejszenie współczynnika tarcia, dzięki czemu pozwala na uzyskanie większej siły kompresji przy tej samej reakcji uszczelnianego układu. Jedne z pierwszych teorii tarcia zostały sformułowane już w latach 40^{tych}, jednakże dotyczą one jedynie kontaktu pomiędzy powierzchniami metalicznymi.

W artykule przedstawiona została metodologia przeprowadzania badań oporów tarcia pomiędzy tworzywami polimerowymi a elastomerami. Przeprowadzone na stanowisku badawczym testy zostały zaimplementowane w nowoczesnych systemach wspomagania projektowania, dzięki czemu możliwe będzie oszacowanie współczynnika tarcia pomiędzy korpusem a tłoczyskiem siłownika pneumatycznego już na etapie projektowania. W celu weryfikacji wykonany został także cykl analiz numerycznych, mających na celu skonfrontowanie wyników i poprawne zamodelowanie oporów tarcia w systemie Abaqus.

Słowa kluczowe: tarcie, MES, materiały polimerowe, tworzywa silikonowe.

WSTĘP

Silikony są materiałami powszechnie stosowanymi w dziedzinie uszczelniania elementów ruchomych. Ich główną funkcją jest zapobieganie powstawania przecieków zarówno środków smarujących, jak i cieczy właściwej. Niektóre silikony w swej budowie zawierają olej, który ma na celu zmniejszenie współczynnika tarcia, dzięki czemu pozwala na uzyskanie większej siły kompresji przy tej samej reakcji uszczelnianego układu. W przeciągu wielu lat opracowane zostały teorie tarcia, które można podzielić na [1]:

a) mechaniczne:

- mechaniczna teoria Leonarda da Vinci (XVI w.),
- teoria Amontonsa (1669 r.),
- model Coulomba (1785 r.),

b) adhezyjne:

- teoria Tomlinsona (1929 r.),
- teoria Bowdena i Tabora (1950 r.),

¹⁾ Politechnika Krakowska, Instytut Informatyki Stosowanej.

²⁾ Delphi Poland SA.

- teoria Deriagina (1952 r.),
- c) adhezyjno-mechaniczne:
 - teoria Kragielskiego (1940 – 1965 r.)

MODELE TARCIA W SYSTEMACH WSPOMAGANIA PROJEKTOWANIA

Solwery współczesnych systemów wspomagania projektowania są programami, które na podstawie danych wejściowych wprowadzonych przez użytkownika wykonują obliczenia matematyczne. Zatem algorytmy, jakimi posługują się systemy CAE muszą uwzględniać założenia tarcia opracowane dotychczas. W obszarze kontaktu pomiędzy komponentami przenoszone są zarówno siły statyczne jak i normalne. Między tymi składnikami występuje zjawisko zwane tarciem, które może być wyrażone w uzależnieniu od nacisków na powierzchnię styku.

Jednym z wiodących systemów CAE, w którym wykonane zostały obliczenia przedstawione w niniejszym artykule, jest pakiet Abaqus. Do tego celu wykonane zostały obliczenia wykorzystujące model Coulomba. Podstawową zasadą tarcia, opisaną w modelu Coulumbowskim, jest powiązanie maksymalnej dopuszczalnej siły tarcia z naciskiem jednego ciała na drugie. Ogólnie rzecz biorąc dwie stykające się powierzchnie mogą przenieść poprzeczne naprężenia do pewnej wartości, po przekroczeniu której zaczynają przesuwać się względem siebie. W podstawowym modelu Coulomba w programie Abaqus współczynnik tarcia jest definiowany bezpośrednio jako [1, 4]:

$$\mu = \mu(\dot{\gamma}_{eq}, p, \bar{\theta}, \bar{f}^{\alpha}) \quad (1)$$

gdzie:

$\dot{\gamma}_{eq}$ - prędkość poślizgu,

p - wartość nacisku styku,

$\bar{\theta} = \frac{1}{2}(\theta_A + \theta_B)$ - średnia temperatura w miejscu kontaktu,

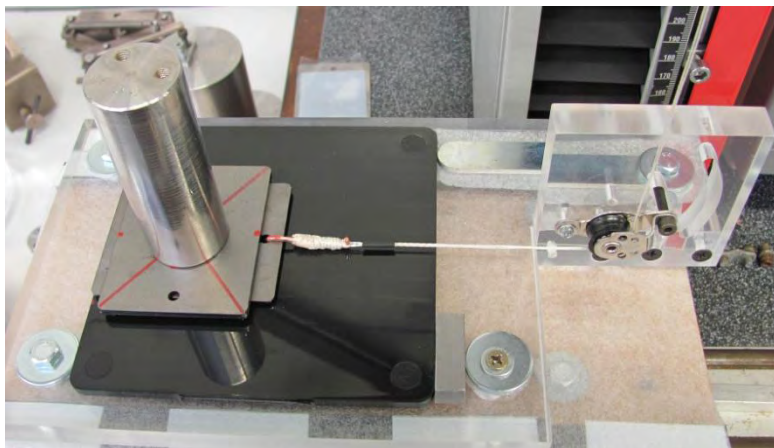
$\bar{f}^{\alpha} = \frac{1}{2}(\bar{f}_A^{\alpha} + \bar{f}_B^{\alpha})$ - średnia zdefiniowanej przez nas wartości α na powierzchni styku.

Analizując powyższe równanie odczytujemy, że współczynnik tarcia może być zależny od nacisku, temperatury oraz szybkości poślizgu.

CHARAKTERYSTYKA STANOWISKA POMIAROWEGO

W celu zbadania oporów tarcia występującego pomiędzy silikonowym uszczelnieniem tłocznym wykonanym z elastomeru SILOPREN LSR 3386/30 TP 3616, a korpusem wykonanym z tworzywa polimerowego wykonano testy umożliwiające przemieszczanie się silikonowej próbki po torze z tworzywa Grivory

GV50 (PA66+PA6I/6T GF50). Stanowisko badawcze zostało przygotowane zgodnie z normą opisującą metodę określania oporów tarcia dla elastomerów (ISO 15113 2005) oraz plastomerów (ISO 8295 1995). Na rys. 1 przedstawiono nakładkę odpowiedzialną za zamianę siły pionowej generowanej przez maszynę wytrzymałościową na siłę poziomą, która za pomocą nierozciągliwego sznurka połączona jest zarówno z układem pomiarowym, jak i z badanymi próbkami.



Rys. 1. Stanowisko pomiarowe

Eksperyment dający możliwość obliczenia współczynnika tarcia polegał na przyklejeniu próbek silikonowych o wymiarach 50mm \times 50mm do sztywnej metalowej płytki, które w następnej kolejności umieszczane zostały w układzie pomiarowym. Kolejnym etapem było wygenerowanie nacisku na próbkę, odbyło się to poprzez dołożenia do układu pomiarowego obciążników. Przygotowane w ten sposób złożenie testowano dla kilku wartości obciążeń oraz dla różnych prędkości poślizgu.

Przykładowy wynik zależności współczynnika tarcia od przebytej drogi został przedstawiony na rys. 2. Na podstawie normy opisującej badanie współczynnika tarcia dla elastomerów [2, 3], wyznaczono dla każdego z pomiarów wartość maksymalną, minimalną oraz pośrednią. Ponadto w celu uzyskania wyników jak najbardziej zbliżonych do rzeczywistości analizowane dane pozyskiwane były z tej części wykresu, gdzie jego kształt był jak najbardziej liniowy, gdyż zwłaszcza w początkowej fazie dość duży wpływ na współczynnik tarcia spowodowany był siłami statycznymi [6].

ANALIZA WYNIKÓW

Przedstawione na rys. 2 współczynniki tarcia obliczone zostały z zależności:

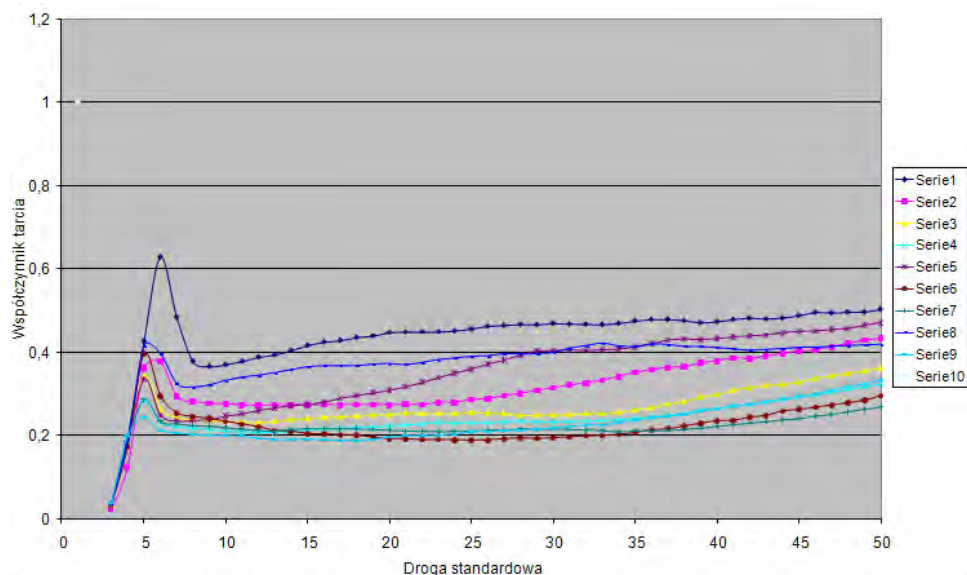
$$\mu = \frac{T_i}{N} \quad (2)$$

gdzie:

T – jest to siła przeciwdziałająca ruchowi próbki [N],

N – obciążenie dociskające próbkę [N],

i – indeks wskazujący rodzaj współczynnika tarcia.



Rys. 2. Zależność współczynnika tarcia w funkcji przemieszczenia próbki

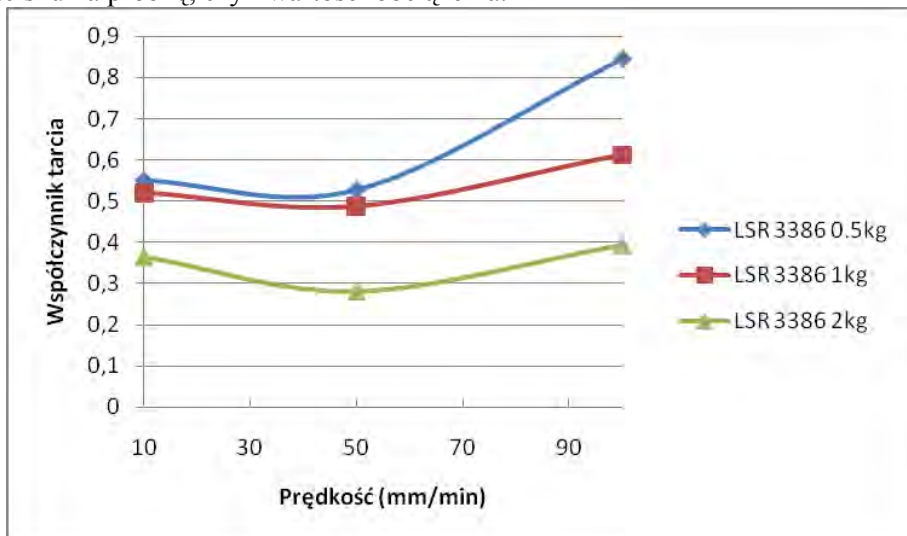
Uśrednione wartości współczynników tarcia, a także odchylenie standardowe i przedziały ufności dla współczynnika alfa równego 95% zostały przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1. Badany silikon, SILOPREN LSR 3386/30 TP 3616

Prędkość	v1 = 10 mm/min.			v2 = 50 mm/min.			v3 = 100 mm/min.		
Obciążenie	0,5kg 4,9 N	1kg 9,81 N	2kg 19,62 N	0,5kg 4,9 N	1kg 9,81 N	2kg 19,62 N	0,5kg 4,9 N	1kg 9,81 N	2kg 19,62 N
Średni współczynnik tarcia	0,551	0,520	0,366	0,528	0,487	0,282	0,844	0,612	0,395
Odchylenie standardowe	0,087	0,159	0,076	0,072	0,101	0,154	0,098	0,111	0,131

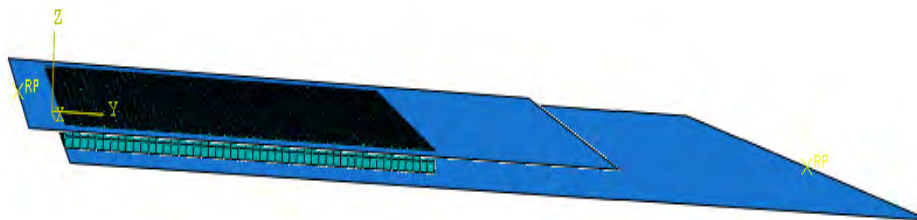
Otrzymane wyniki analizowano pod względem zmiany obciążenia oraz zmiany prędkości przesuwu. Wynika z nich, iż istnieje dość duża zależność pomiędzy współczynnikiem tarcia a prędkością przesuwu. Z wykresu przedstawionego na

rys. 3 wynika także, że współczynnik tarcia jest również uzależniony od wielkości nacisku na próbkę, czyli wartości obciążenia.



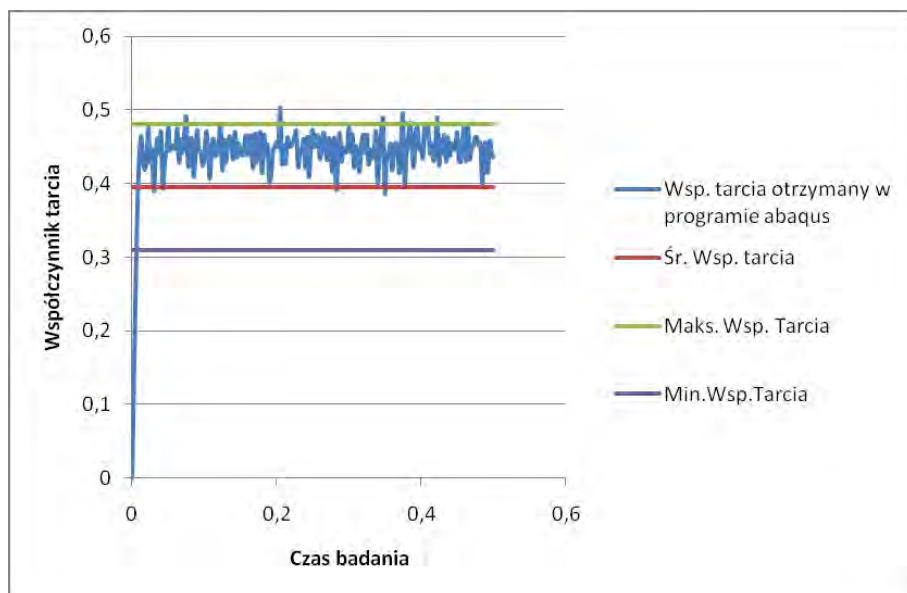
Rys. 3. Zależność współczynnika tarcia od prędkości przesuwu próbki

Weryfikacja otrzymanych współczynników tarcia otrzymanych na stanowisku badawczym została przeprowadzona w systemie Abaqus [5, 7]. W systemie tym zbudowano wirtualny model stanowiska badawczego (rys. 4), w którym zdefiniowano wszystkie warunki brzegowe, jak i otrzymane współczynniki tarcia.



Rys. 4. Wirtualny model układu pomiarowego

Z przedstawionej na rys. 5. analizy porównawczej wynika, że współczynnik tarcia otrzymany podczas symulacji mieści się w obliczonych przedziałach ufności. Na tej podstawie założono, iż otrzymane dane dotyczące współczynnika tarcia pomiędzy silikonem SILOPREN LSR 3386/30 TP 3616, a tworzywem Grivory GV50 (PA66+PA6I/6T GF50) są poprawne i mogą być w pełni wykorzystane podczas symulacji wytrzymałościowych połączenia korpusu siłownika pneumatycznego z tłoczyskiem.



Rys. 5. Porównanie otrzymanych wyników, prędkość 100 mm/min, obciążenie 19,62 N

WNIOSKI

Z przeprowadzonych prób badania współczynnika tarcia pomiędzy badanym tworzywem polimerowym Grivory GV50 a silikonem SILOPREN LSR 3386/30 TP 3616 stwierdzono, że wraz ze wzrostem obciążenia tarcie pomiędzy badanymi powierzchniami maleje. Dodatkową informację stanowi fakt, iż współczynnik tarcia nie maleje wprost proporcjonalnie do przyłożonego obciążenia. Kolejną zaobserwowaną zależnością jest wzrost współczynnika tarcia w funkcji prędkości przesuwu.

Analiza badania oporów tarcia zaimplementowana została w systemie Abaqus, dzięki czemu możliwe będzie dokładne symulowanie układów z których jeden element wykonany jest z materiału polimerowego, a drugi jest elastomerem.

PIŚMIENNICTWO

1. Hebda A.: Procesy tarcia, smarowania i zużywania maszyn. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Warszawa, 2007.
2. ISO 15113:2005 - Rubber - Determination of frictional properties.
3. ISO 8295:1995 - Plastics - Film and sheeting - Determination of the coefficients of friction.
4. Persson B. N. J., Volotkin A. I.: Rubber friction on smooth surfaces. The European Physical Journal E 21, 2006.

5. Robert Horgan Smith R. H.: *Analyzing Friction in the Design of Rubber Products and Their Paired Surfaces*, Mukilteo, Washington, 2008.
6. Dieriagin B.W.: *Co to jest tarcie*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe – PWN, Warszawa, 1956.
7. ABAQUS version 6.7 documentation – wersja elektroniczna dostępna pod adresem <http://abaqus.civil.uwa.edu.au:2080/v6.7/>

STUDY OF FRICTIONAL RESISTANCE IN PNEUMATIC SERVO UNITS MANUFACTURED FROM POLYMER MATERIALS

Summary

Silicon materials are commonly used to seal any movable elements. Their primary role is related with preventing leaks for lubricants and working liquids. Some silicon materials are based on oil, aiming at decreasing the friction resistance, allowing in turns to achieve higher compression force at the same feedback from the sealed unit. One of the first friction theory was formulated back on the 40ties of the 20th century, though they are limited to contact between metallic surfaces.

In this article, we present the methodology of a study focused on examination of frictional resistance for plastic and silicon materials. The study was conducted in a dedicated test site, implemented using modern computer aided design systems. In this way, it was possible to estimate the frictional resistance coefficient between the body and the piston rod of a pneumatic servo already at the design stage. In order to verify the obtained results, a series of analytical analyses was conducted, aiming at verifying the obtained results in comparison with the frictional resistance modeled using the Abaqus system.

Keywords: friction, FEM, polymer materials, silicone.

Mateusz Kania ¹⁾

ZASTOSOWANIE JĘZYKA VISUAL BASIC W PROJEKTOWANIU I ANALIZIE KINEMATYCZNEJ W SYSTEMIE CATIA V5

Streszczenie: Przedmiotem niniejszej publikacji jest zastosowanie języka VB do sterowania modelem kinematyki mechanizmu w systemie CatiaV5. Proces ten realizowany jest poprzez zewnętrzny, specjalnie utworzony do tego celu formularz graficzny. Tworzenie programów sterujących jest istotnym czynnikiem tworzenia wirtualnego modelu kinematyki mechanizmów o znacznej złożoności, przy uwzględnieniu praw i własności ruchu w postaci równań kinetycznych. Możliwość szybkiego podglądu istotnych parametrów ruchu oraz ich zmiany, jest ich największym atutem.

Słowa kluczowe: Visual Basic for Application, VBA, programowanie, Catia V5, DMU Kinematics, kinematyka, helikopter, śmigłowiec, układ sterowania.

WSTĘP

Visual Basic ten jest jednym z bardziej znanych i rozpowszechnionych języków programowania na świecie. Jego składnia jest stosunkowo prosta, a możliwość użycia go do wsparcia istniejących aplikacji jako Visual Basic for Application jest bardzo doceniane przez użytkowników tych programów. Język ten jest językiem używany najczęściej w produktach Microsoft[®] jako VBA, jednakże znalazł również zastosowanie w innych programach takich jak między innymi CatiaV5. VB przez użytkowników używany jest do pisania „makr” ułatwiających i przyspieszających pracę, jak również ze względu na swoją kompatybilność może służyć do tworzenia programów sterujących pracą innych aplikacji.

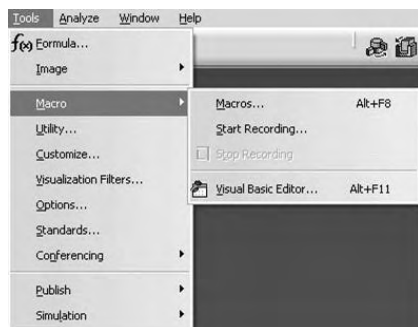
W publikacji przedstawiono możliwości zastosowania języka Visual Basic w systemie CAD/CAM/CAE jakim jest CatiaV5 oraz wykorzystania go do sterowania analizą wirtualnego modelu sterownia śmigłowca jednowirnikowego w układzie klasycznym.

VISUAL BASIC FOR APPLICATION W SYSTEMIE CATIA V5

Język Visual Basic for Application w systemie CatiaV5 może być wykorzystywany w wielu zastosowaniach podczas projektowania części maszyn i urządzeń [2]. Język ten pozwala na tworzenie spersonalizowanych programów sterujących funkcjami systemu dzięki możliwości nagrywania często używanych ko-

¹ Instytut Lotnictwa w Warszawie, Engineering Design Center.

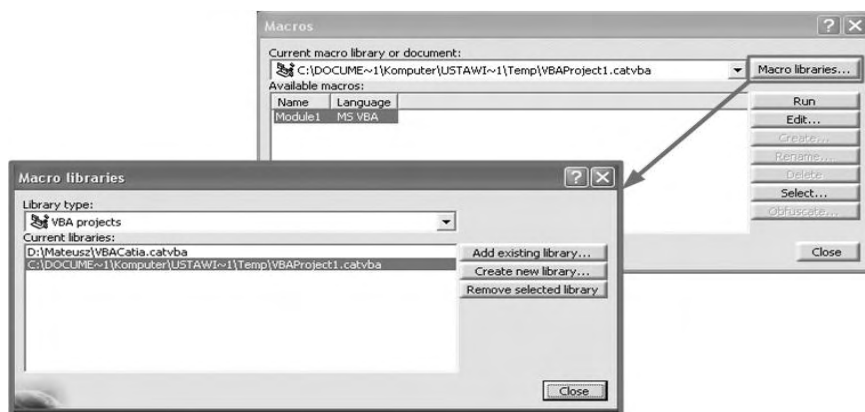
mend, bądź szeregu komend w określonej kolejności za pomocą przycisku „Start Recording...” znajdującego się w zakładce Tools i podkatalogu Macro [3].



Rys. 1. Pasek dostępu do narzędzia Visual Basic w systemie CatiaV5

Fig. 1. Access path to Visual Basic tools in Catia V5

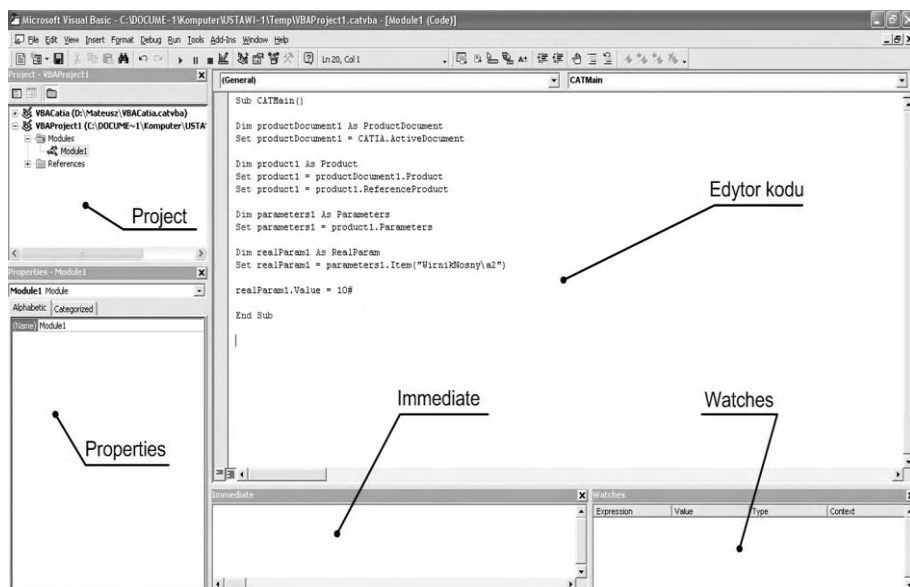
Podczas tworzenia pierwszego programu system Catia wymaga określenia nazwy biblioteki, do której chcielibyśmy dodać program, bądź konieczne jest stworzenie nowej. Taka funkcja pozwala na tworzenie bibliotek dedykowanych do określonego modelu, biblioteki standardowej z najczęściej używanymi komendami, jak również udostępnia możliwość wymiany bibliotek pomiędzy użytkownikami.



Rys. 2. Okno wyboru biblioteki w systemie Catia V5

Fig. 2. Window with user libraries in Catia V5

Przycisk „Visual Basic Editor...” uruchamia okno dialogowe oprogramowania Microsoft Visual Basic przedstawione na rysunku 3. Okno to umożliwia tworzenie formularzy, modułów i klas standardowych dla języka VBA. Język ten pozwala na programowanie modułowe, w związku z czym tworzone przez użytkownika kody sterujące programem wykonawczym mogą być bardzo złożone. Dzięki tej funkcji możliwe jest w systemie Catia V5 prowadzenie złożonych obliczeń konstrukcyjnych.



Rys. 3. Edytor kodu dla języka Visual Basic for Application
Fig. 3. Code editor for Visual Basic language

Na rysunku 3 w oknie „Project” widać wyraźny podział na tworzone projekty, co pozwala z tego poziomu na edycję wszystkich dostępnych bibliotek, dodanych lub stworzonych wcześniej w oknie przedstawionym na rys. 2. Taka elastyczność w programowaniu jest bardzo pożądana.

Tuż pod opisanym wyżej oknem znajduje się okno „Properties”. W tym oknie możemy nadać pewne własności elementom używanym podczas tworzenia programu takich jak na przykład: formularz, przycisk, textbox i wiele innych.

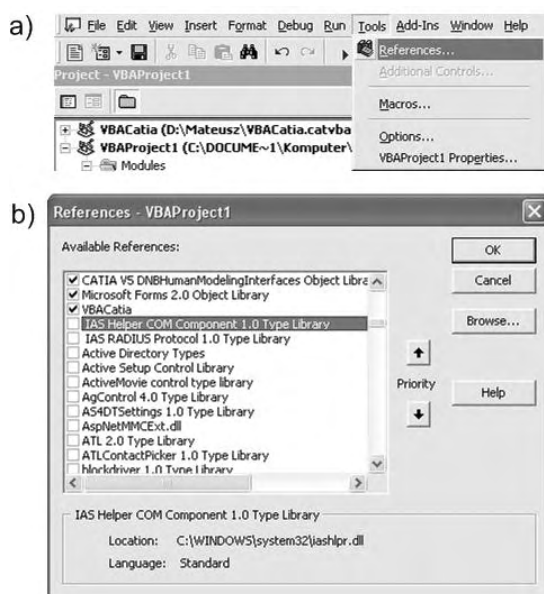
Na dole ekranu znajdują się dwa okna: „Immediate” oraz „Watches”. Pierwsze z nich służy do szybkiego sprawdzenia wykonywanej funkcji przez rozpoczęcie kodu znakiem „?”. Umożliwia to szybki podgląd, czy na przykład nasza zadeklarowana zmienna zwraca właściwą wartość bez konieczności uruchamiania całej procedury programu. Drugie okno z kolei służy do analizowania zmian interesujących nas zmiennych podczas pracy programu. Możemy to osiągnąć za pomocą uruchomienia kodu „krok po kroku” za pomocą klawisza F8. Jest to bardzo przydatne narzędzie podczas tworzenia prostych, jak również bardziej zaawansowanych aplikacji [3].

Głównym i największym oknem jest obszar wprowadzania kodu. Istnieje możliwość przełączania okien, co zwiększa funkcjonalność edytora oraz pozwala na lepsze śledzenie kodu podczas programowania modułowego. Podczas pracy edytor sam wychwytywa błędy w składni i zaznacza je czerwonym kolorem.

Największym atutem narzędzia jakim jest „Visual Basic Editor”, jest możliwość dodania innych zewnętrznych bibliotek pochodzących z innych aplikacji.

Aby to zrobić należy w pasku edytora nacisnąć klawisz „Tools”, a następnie „References” co przedstawiono na rysunku 4a. Po wykonaniu tej czynności wyświetli nam się okno z dostępnymi bibliotekami przedstawionym na rysunku 4b, które możemy dodawać oraz usuwać jak również dodać inne nie dostępne na liście za pomocą przycisku „Browse” [2].

Dodawanie takich bibliotek daje możliwość z poziomu systemu Catia sterowanie dowolną inną aplikacją wspierającą język programowania Visual Basic. Mogą to być zarówno edytory tekstu, arkusze kalkulacyjne, prezentacje multimedialne czy programy do analiz MES bądź CFD.



Rys. 4. a) ścieżka dostępu do zewnętrznych bibliotek, b) okno wyboru dodatkowych bibliotek

Fig. 4. a) access path to external libraries, b) window with references to other external libraries

Zastosowanie języka programowania Visual Basic for Application do analiz kinematycznych otwiera nowe możliwości przez zaawansowaną analizą ruchu. Dzięki temu narzędziu możliwa, jest poprzez odpowiednie utworzenie formuł, analiza między innymi drgań własnych, sił działających na układ i wiele innych oraz wydruk wyników w dowolnej formie, czy to w postaci pliku tekstowego czy wykresu.

ZASTOSOWANIE JĘZYKA VBA W PROJEKCIE WIRTUALNEGO PROTOTYPU UKŁADU STEROWANIA ŚMIGŁOWCA

Projekt wirtualnego prototypu układu sterownia poprzecznego i podłużnego śmigłowca w układzie klasycznym został utworzony w systemie CatiaV5 przy użyciu modułów Part Design, Assembly Design, DMU Kinematics, Knowledge Advisor oraz Generative Shape Design. Dzięki zastosowaniu parametrów i reguł

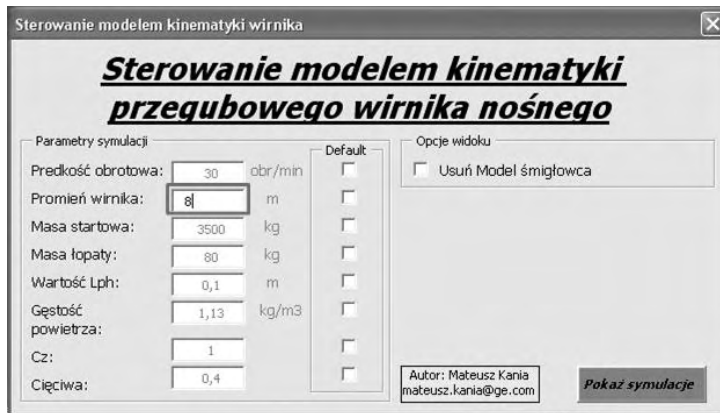
w module Knowledge Advisor możliwa jest szersza analiza ruchu realizowanego dzięki nadanym prawom. Głównym celem modelu jest analiza przemieszczeń, kolizji poszczególnych elementów, maksymalnych amplitud wahań łopat przegubowego wirnika nośnego. Stworzony model wiąże ruch drążka pilota w kabinie załogi z odpowiedzią układu jaką jest wpływ zjawisk aerodynamicznych, co ma bezpośredni wpływ na ruch śmigłowca w przestrzeni [1].



Rys. 5. Wirtualny prototyp układu sterownia poprzecznego i podłużnego śmigłowca w układzie klasycznym wykonany w systemie Catia V5

Fig. 5. Virtual model of helicopter steering system create in Catia V5

Sterowanie prototypem układu sterownia odbywa się poprzez podanie parametrów pracy modelu przy użyciu okna dialogowego utworzonego w edytorze Visual Basic. Okno opisane powyżej zostało przedstawione na rys. 6.



Rys. 6. Okno sterownia modelem wirnikiem nośnym

Fig. 6. Main window of model control

Z lewej strony tego okna w obszarze „Parametry symulacji” wyszczególniono wszystkie niezbędne dane modelu. Istnieje możliwość podania ich w sposób dowolny, poprzez wpisanie wartości parametru w polu edycji w odpowiednich, narzuconych jednostkach.

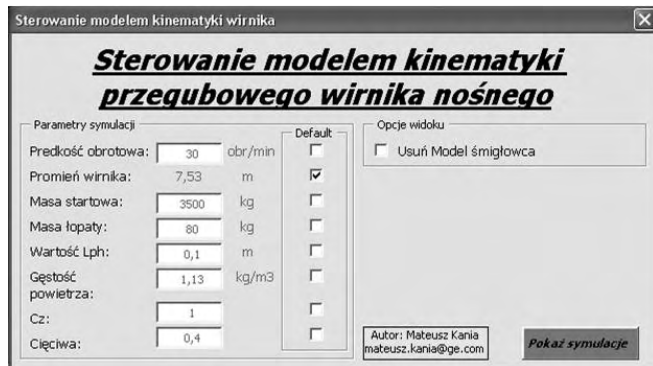
Procedura zmiany parametru zostaje wykonana natychmiast po wpisaniu nowej wartości. Możliwość wykonania określonej procedury w języku Visual Basic jest bardzo szeroka i może być uruchomiona po kliknięciu lub zmianie w którymś z dodanych elementów formularza, przy starcie i zamykaniu aplikacji, w określonym czasie i w wielu innych przypadkach. Przykładowy kod zmiany parametru w module Knowledge Advisor za pomocą procedury pochodzącej z programu sterującego przedstawiono na rysunku 7.

```
Private Sub txbPredkoscObrotowa_Change()  
predkoscObrotowa = txbPredkoscObrotowa.Value  
Call zmiana_parametruOmega  
End Sub  
  
Sub zmiana_parametruOmega()  
Set productDocument1 = CATIA.ActiveDocument  
Set product1 = productDocument1.Product  
Set product1 = product1.ReferenceProduct  
Set parameters1 = product1.Parameters  
Set realParam1 = parameters1.Item("WirnikNosny\PredkoscObrotowa[obr/min]")  
  
realParam1.Value = predkoscObrotowa  
  
End Sub
```

Rys. 7. Kod zmiany parametru prędkości obrotowej wirnika

Fig. 7. Code to change angular velocity in model

W oknie sterownia istnieje również możliwość użycia domyślnych wartości zaszytych w modelu poprzez zaznaczenie jej w obszarze „Default”. W ten sposób zostanie uruchomiona procedura przypisywania wartości wynikających z konstrukcji modelu, bądź założeń projektowych. Funkcja ta została przedstawiona na ilustracji 8.

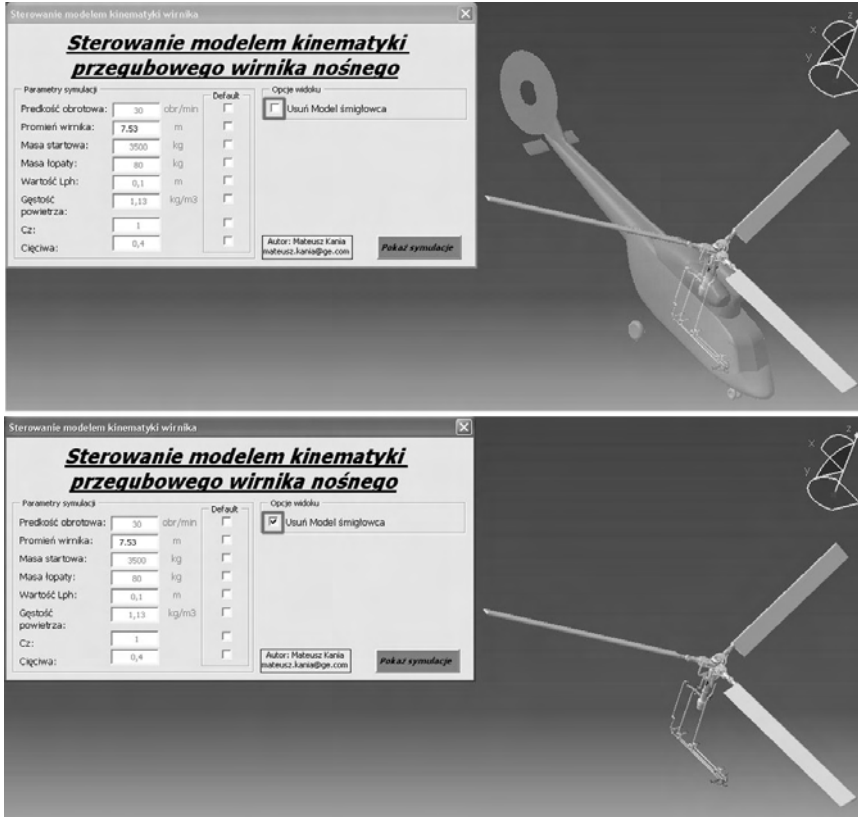


Rys. 8. Okno przedstawiające zastosowanie funkcji Default

Fig. 8. Window present usage of Default function

Z prawej strony głównego okna została umieszczona funkcja ułatwiająca analizę poprzez włączenie lub wyłączenie widoczności modelu śmigłowca. Jeżeli

chcemy badać jedynie kinematykę ruchów sterownic i układu przeniesienia sterownia wewnątrz śmigłowca nie jest potrzebny nam model śmigłowca. Jeśli zaś chcemy analizować wpływ sterownia na ruchy śmigłowca jako całego obiektu, wtedy funkcja ta powinna być nie aktywna.



Rys. 9. Zastosowanie funkcji usuwania modelu śmigłowca

Fig. 9. Picture which present usage of visible function for helicopter model

WNIOSKI

System Catia V5 jest w pełni profesjonalnym dopracowanym systemem do projektowania. Otwarcie infrastruktury programu i umożliwienie wsparcia tego narzędzia przez język Visual Basic jest jego kolejną zaletą. Tworzy to możliwość prawie nieograniczonej funkcjonalności tego systemu poprzez tworzenie przez użytkownika własnych programów bądź projektowania relacji z innymi aplikacjami wspierającymi ten język programowania.

Ważną zaletą jest możliwość tworzenia lub przenoszenia kodów programów obliczających pewne zależności czy zjawiska i bezpośredni transfer wyników tych obliczeń do tworzonego wirtualnego modelu części. Dzięki takim zależno-

ściom, poprzez stworzenie odpowiedniego algorytmu, istnieje możliwość wprowadzenia w konstruowanie części i analizę mechanizmów elementu sztucznej inteligencji wspierającej proces projektowania. Użycie tego narzędzia daje możliwość automatycznej generacji części na podstawie innych modeli, bądź tworzenie wirtualnych modeli na podstawie norm zapisanych na przykład w postaci arkusza kalkulacyjnego. Tworzenie programów w edytorze Visual Basic pozwala również na zaawansowaną optymalizację projektowanych części jeszcze we wstępnej fazie.

Narzędzie to może być w wielu przypadkach używane do wsparcia analiz kinematycznych mechanizmów, zarówno w aspekcie sterowania tą analizą, jak również w celu zmiany jej parametrów. Opisany w tej publikacji program sterowania symulacją kinematyki wirtualnego prototypu układu sterowania śmigłowca jednowirnikowego oraz odpowiedzi na to sterownie całego statku powietrznego spełnia swoją rolę. W znaczący sposób usprawnia wprowadzanie danych do symulacji. Model jest ciągle rozbudowywany i rozwijany.

PIŚMIENNICTWO

1. Mil M. L.: Helicopters. Calculation and design. Volume II. NASA Technical Translation, NASA TT F-519. Washington, D. C. 1968.
2. Liberty J.: Programming Visual Basic 2005. Sewastopol 2005.
3. Petroustos E.: Mastering Microsoft Visual Basic 2010. Indianapolis, Indiana 2010.

APPLICATION OF VISUAL BASIC PROGRAMMING LANGUAGE IN DESIGN AND KINEMATIC ANALYSIS IN CATIA V5

Summary:

This publication contain information about usage of Visual Basic programming language to modeling new parts and steering of kinematic models in CatiaV5. Build external control programs is important element of creating virtual mechanism with high advance degree. In this publication present the control application for virtual helicopter rotor steering system.

Keywords: Visual Basic for Application, VBA, programming, Catia V5, DMU Kinematics, kinematic, helicopter, steering system.

Tomasz Kamiński¹⁾, Przemysław Filipek²⁾

WODOROWE OGNIWO PALIWOWE – EKOLOGICZNE ŹRÓDŁO ZASILANIA POJAZDÓW PRĄDEM STAŁYM

Streszczenie: W artykule opisano zasadę pracy wodorowego ogniwa paliwowego oraz jego możliwości zasilania pojazdów elektrycznych. Porównano wady i zalety pojazdów spalinowych i elektrycznych zarówno pod względem technicznym jak i ekologicznym.

Słowa kluczowe: wodorowe ogniwo paliwowe, pojazd elektryczny.

WSTĘP

Od dawna mówi się o niszczycielskim wpływie działalności człowieka na naszą planetę. Globalne ocieplenie, wycinanie lasów deszczowych, zanieczyszczanie powietrza gazami cieplarnianymi. Dużą część zanieczyszczeń wprowadza transport, którego podstawowym napędem jest obecnie silnik spalinowy. Jednym ze sposobów zapobiegania temu zjawisku jest pokonanie uzależnienia od paliw kopalnych i korzystanie z ekologicznych, odnawialnych i niewyczerpanych źródeł energii. Najlepszą alternatywą dla pojazdów spalinowych jest pod względem ekologicznym – pojazd elektryczny. Nie zużywa on do napędu benzyny, lecz potrzebuje energii elektrycznej. Istnieją metody pozyskiwania energii z promieni słonecznych, są sposoby wykorzystania mocy wiatru, ciepła wewnętrznego Ziemi, a nawet wykorzystania pływów morskich. Istnieją również ogniwa paliwowe zamieniające paliwo (wodór i tlen) w elektryczność, wodę i ciepło. Za stosowaniem silników elektrycznych przemawia również fakt, że silniki spalinowe zużywają tylko ok. 30% energii zawartej w paliwie [1], a sprawność ogniw paliwowych sięga 60%.

OGNIWA PALIWOWE

Historia ogniw paliwowych

Zasadę ich działania odkrył szwajcarski chemik niemieckiego pochodzenia Christian Friedrich Schoenbein w 1838 roku, jednak pierwsze działające ogniwo paliwowe stworzył kilka lat później walijski naukowiec sir Wiliam Grave [4]. Ogniwa te nie znalazły jednak praktycznego zastosowania, aż do lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku, kiedy to Stany Zjednoczone zaczęły wykorzystywać ogni-

¹ Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Studenckie Koło Naukowe Zastosowań Mechatroniki „Elmech”.

² Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn.

wa z membranami polimerowymi, a alkaliczne ogniwa paliwowe (AFC) dostarczały energii elektrycznej, wody i ciepła podczas ówczesnych misji kosmicznych Gemini i Apollo [2].

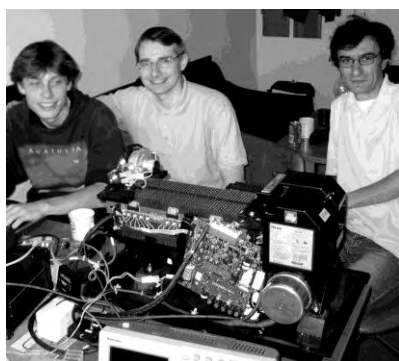
Rodzaje ogniw paliwowych

Klasyfikację ogniw paliwowych można przeprowadzić w zależności od:

- a) sposobu wykorzystania paliwa [2]:
 - bezpośrednie doprowadzenie wodoru,
 - pośrednie – paliwo uzyskiwane jest w procesie reformingu,
- b) temperatury pracy ogniw [2]:
 - niskotemperaturowe (25-100°C),
 - średniotemperaturowe (100-500°C),
 - wysokotemperaturowe (ponad 500°C),
- c) rodzaju zastosowanego elektrolitu [3]:
 - polimerowe – z polimerową membraną (PEMFC),
 - alkaliczne (AFC),
 - alkoholowe (DMFC),
 - kwasowe (DFAFC),
 - węglanowe (MCFC),
 - tlenkowo-ceramiczne (SOFC),
 - cynkowo-powietrzne (ZAFC).

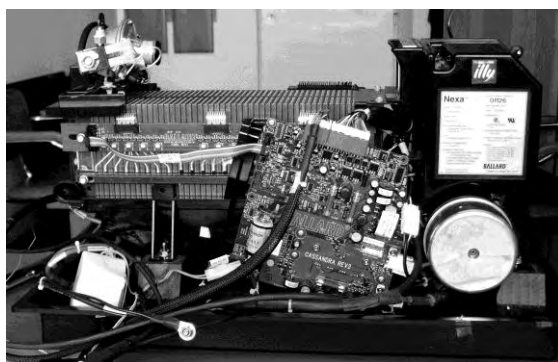
Budowa i zasada pracy spóczesnego ogniwa paliwowego

W budowie wodorowych ogniw paliwowych specjalizuje się kanadyjska firma Ballard. Kilka lat temu autor miał dostęp do systemu ogniw paliwowych Nexa tej firmy (rys. 1 oraz rys. 2).



Rys. 1. Autor (pośrodku) przy systemie ogniw paliwowych Nexa

Fig. 1. Author (in the middle) next to the Nexa fuel cells system

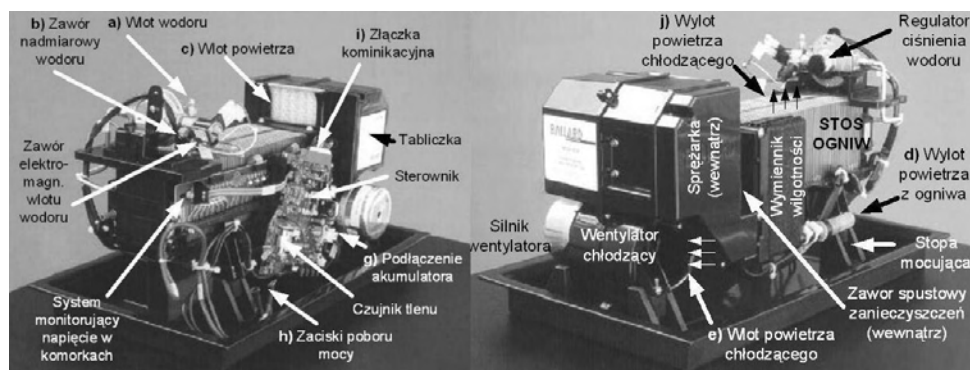


Rys. 2. Widok systemu ogniw paliwowych Nexa firmy Ballard

Fig. 2. View of fuel cells system Nexa from Ballard company

System Nexa TM jest pakietem w pełni zintegrowanym, który wytwarza energię elektryczną prądu stałego z zapasów wodoru i powietrza. Stos ogniw paliwowych firmy BALLARD (rys. 2) zawiera wszystkie układy pomocnicze potrzebne do prawidłowego działania ogniwa paliwowego.

Układy pomocnicze zajmują się dostawą wodoru, dostawą powietrza zaopatrującego układ w tlen oraz dostawą powietrza potrzebnego do chłodzenia stosu ogniw. Czujniki monitorują osiągi systemu, natomiast panel sterujący i mikroprocesor automatyzują jego pracę. Układ Nexa TM zawiera system zapewniający bezpieczną pracę wewnątrz pomieszczeń zamkniętych. Widok części składowych układu Nexa przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Części składowe systemu Nexa [5]

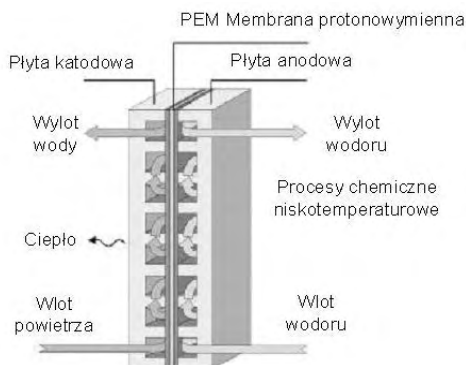
Fig. 3. System Nexa component parts [5]

System Nexa TM został zaprojektowany by dostarczać 1.2 kW mocy netto. Stos ogniw osiąga napięcie od około 43 V bez obciążenia do około 26 V pod pełnym obciążeniem. Podczas pracy systemu Nexa TM napięcie stosu ogniw paliwowych jest monitorowane w celach kontroli diagnostycznej oraz w celach bezpieczeństwa. Dodatkowo kontroler napięcia monitoruje osiągi indywidualnych komórek ogniwa i wykrywa komórki o niskim napięciu. Jeżeli nastąpi defekt komórki albo wystąpi potencjalne niebezpieczeństwo podczas pracy stosu ogniw to system wyłączy się automatycznie.

Jedna celda ogniwa paliwowego firmy BALLARD składa się z dwóch elektrod, anody i katody, które są oddzielone od siebie membraną polimerową. Każda z elektrod jest z jednej strony powleczona cienką warstwą platyny, która jest katalizatorem. Pojedyncza komórka ogniwa paliwowego składa się z elektrod powleczonych katalizatorem, membrany oraz płyt z kanałami doprowadzającymi powietrze i wodór. Przedstawia to rys. 4.

Gazy (wodór i powietrze) są dostarczane do odpowiedniej strony elektrody poprzez system kanałów wykonanych w płycie ogniwa. Wodór dostarczany jest do anody, gdzie w obecności katalizatora platynowego następuje jego rozczepienie na protony i elektrony. Wolne elektrony przechodzą do zewnętrznego obwodu

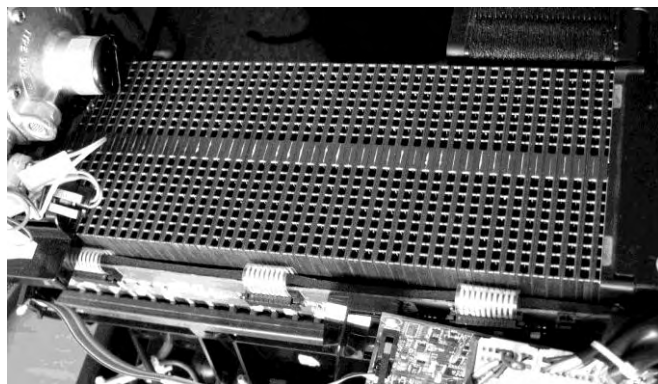
elektrycznego zaś protony migrują poprzez membranę na stronę katodową. Tu w wyniku łączenia się protonów, elektronów z obwodu zewnętrznego i tlenu z powietrza powstaje czysta woda i wydzielą się ciepło.



Rys. 4. Konstrukcja pojedynczej komórki systemu Nexa [5]

Fig. 4. Construction of single cell of Nexa system [5]

Poszczególne komórki ogniwa paliwowego są łączone w stos, tak aby uzyskać potrzebną moc prądu elektrycznego. Rysunek 5 przedstawia widok połączonych w stos komórek ogniwa paliwowego. Z pojedynczej komórki można uzyskać około 1 V w trakcie pracy bez obciążenia i około 0.6 V pod pełnym obciążeniem. Wszystkie komórki są połączone szeregowo w celu uzyskania wymaganego napięcia.



Rys. 5. Połączone w stos komórki ogniwa paliwowego Nexa

Fig. 5. Connected Nexa fuel cells into cells stack

Stos ogniw jest zasilany sprężonym wodorem. Regulator ciśnienia nieustannie uzupełnia wodór który jest zużywany podczas reakcji w komórkach ogniwa. Azot i woda zawarta w strumieniu powietrza powoli migruje przez membranę komórki ogniwa i stopniowo gromadzi się w strumieniu wodoru. Akumulacja azotu i wody na anodzie pogarsza parametry pracy ogniwa, dlatego okresowo jest otwierany zawór, który umożliwia wypłukanie nagromadzonych zanieczyszczeń, a przez to przywrócenie pełnych jego osiągnięć.

POJAZDY ELEKTRYCZNE

Pojazdy elektryczne potrzebują źródła prądu stałego. Zazwyczaj są to akumulatory trakcyjne wspomagane panelami fotowoltaicznymi – doładowywane z zewnątrz. Odpowiednio dobrane ogniwo paliwowe potrafi zapewnić ciągłą dostawę wymaganego prądu a jednocześnie doładowywać akumulatory podczas jazdy i postoju.

Rys historyczny

Historia pojazdów elektrycznych zaczyna się już w 1835 r., kiedy to Thomas Davenport zbudował elektryczną kolej liniową, a w 1838 r. zbudował pierwszą lokomotywę elektryczną (osiągała prędkość 6 km/h). W tym samym roku Sibrandus Stratingh Groningen i Christopher Becker skończyli budowę pierwszego elektrycznego samochodu, a w roku 1899 Camille Jenatton przekroczył barierę 100 km/h.

Najlepsze lata motoryzacji elektrycznej przypadają na pierwszą dekadę XX wieku. Po roku 1912 pojazdy na benzynę przejęły dominację nad elektrycznymi, a 10 lat później całkowicie je wyparły. Pojazdy elektryczne wróciły do łask dopiero od lat 60-tych, ale znaczenia nabrały dopiero w latach 90-tych, kiedy zastrzono wymagania dotyczące emisji spalin.

Współczesne samochody elektryczne i hybrydy

W obecnej chwili rynek pojazdów z silnikami elektrycznymi nie jest zbyt bogaty. Każdy większy producent samochodów prowadzi badania nad tego typu rozwiązaniami, istnieje kilka seryjnych modeli takich jak np.: Mitsubishi i-MiEV, Chery S18 czy RE-VOLT jednak to dopiero początek.

Elektryczny napęd pojazdów ma wiele zalet: prostota wykonania i mało ruchomych części co czyni go bardzo niezawodnym, niższe koszty podróży spowodowane m.in. wyższą sprawnością silników elektrycznych (80-90%), nie wymaga stosowania skrzyni biegów z racji wysokiego momentu obrotowego oraz jest dużo cichszy od silników spalinowych.

W dobie dzisiejszej dominacji pojazdów spalinowych, bezpośrednie przejście na pojazdy elektryczne nie jest realne z powodu małych jeszcze zasięgów. Z tego też względu najczęściej buduje się hybrydy (pojazdy elektryczne z silnikiem spalinowym), które mogą jeździć zarówno ekologicznie, jak i w sposób tradycyjny – spalinowy.

Hybrydowy układ napędowy zastosowano w takich samochodach jak [2]: Toyota Prius, Four Hybryd, Fiat Multipola Hybryd Power, Nissan Tino Hybryd, Mira, Honda Insight, Lexus RX400h oraz w różnego rodzaju autobusach hybrydowych.

Zalety i wady pojazdów elektrycznych

Zalety:

1. Komfort i wygoda jazdy. Pojazd z silnikiem elektrycznym jest bardziej wygodnym środkiem komunikacji od innych środków transportu. Cicha praca silnika elektrycznego, „miękki” start i hamowanie oraz brak wydalenia spalin sprawiają, że podróż takim pojazdem jest zdecydowanie bardziej komfortowa i przyjemna.
2. Brak tradycyjnej skrzyni biegów. Silniki elektryczne przy niskich obrotach zapewniają wysokie momenty obrotowe, więc skrzynia biegów jest zbędna.
3. Czystość ekologiczna. Pojazdy elektryczne są czyste ekologicznie. Ogniwa wodorowe wytwarzają oprócz prądu – tylko ciepło i wodę. Brak emisji do otoczenia szkodliwych toksyn, co łagodzi tendencję globalnego ocieplenia, zalicza je do grupy ZEV (ang. zero emission vehicle).
4. Większa przewidywalność kosztów energii elektrycznej. Komunikacja pojazdami elektrycznymi zmniejsza zależność państwa od cen i rynków ropy naftowej oraz wydarzeń międzynarodowych. Do wytwarzania prądu elektrycznego można wykorzystywać źródła odnawialne (słońce, wiatr, pływy morza).
5. Zdecydowanie niższe koszty eksploatacji. Sprawność pojazdów z silnikiem elektrycznym zawiera się w granicach 75-80%, w porównaniu do silników spalinowych 15-20%. W przeliczeniu, pojazd elektryczny zużywa nawet do 90% mniej energii. Ponadto odpada konieczność wymiany świec, płynów (hamulcowego, chłodzącego, oleju silnikowego) oraz filtrów: oleju i paliwa.
6. Odzyskiwanie prądu. Pojazd elektryczny ma możliwość odzyskiwania prądu podczas hamowania lub jazdy z górki (rekupresory). Silnik pracuje wtedy jako prądnica. Może to zwiększyć wydajność pojazdu nawet o 5-20%.
7. Ekologiczny postój w „korku”. Podczas postoju w „korku” kierowca traci jedynie czas. Silnik elektryczny jest włączany tylko podczas jazdy. Ponadto, w czasie postoju, akumulatory są ładowane przez panele fotowoltaiczne. Ogniwo paliwowe nie jest uruchamiane.
8. Cztery możliwości ładowania akumulatorów. Akumulatory w pojeździe elektrycznym z ogniwem wodorowym oraz panelem solarnym są doładowywane przez prąd z ogniwa paliwowego, a w razie wyczerpania wodoru – z panelu fotowoltaicznego, przez rekupresory lub poprzez gniazdo ładowania zewnętrznego (np. w domu).
9. Wbudowany ABS. Mikroprocesorowe sterowanie w pojeździe elektrycznym zapewnia automatyczne sterowanie hamowaniem (ABS) bez konieczności używania oddzielnych modułów.
10. Uprozczone sterowanie. Do sterowania jazdą w pojeździe elektrycznym wystarczy joystick zamiast kierownicy oraz pedały przyspieszacza i hamulca.
11. Uproszczony przegląd techniczny. W ramach przeglądu technicznego wystarczy wymienić opony i dolać płynu do spryskiwaczy.

Wady napędu elektrycznego w odniesieniu do spalinowego:

1. Mniejszy zasięg pojazdu. Ze względu na ograniczoną pojemność zbiornika wodoru oraz na dość długi proces ładowania (ładowanie może odbywać się w porze nocnej – przez gniazdo ładowania zewnętrznego, oraz w dzień podczas postoju pojazdu – za pomocą panelu fotowoltaicznego) zasięg pojazdu jest mniejszy od zasięgu pojazdów spalinowych. Ponadto, częste przyspieszania oraz jazda z większymi prędkościami powodują dalsze zmniejszenie maksymalnego zasięgu auta.
2. Zakłócenia elektromagnetyczne. Silniki elektryczne emitują podczas pracy różnego rodzaju zakłócenia elektromagnetyczne mogące wpływać np. na pracę telefonów komórkowych czy radia.

Pojazdy z wodorowym ogniwem paliwowym

Do pojazdów elektrycznych z zastosowanym ogniwem paliwowym zalicza się NECAR (New Electronic Car) firmy Mercedes-Benz (rys. 6). Zbiorniki wodoru o masie 300 kg i moc ogniwa paliwowego 75 kW umożliwiały uzyskanie prędkości 110 km/h i zasięgu 300 km [2].



Rys. 6. Pojazd elektryczny NECAR
firmy Mercedes-Benz
z ogniwem paliwowym [6]

Rys. 6. Electric car NECAR
Mercedez-Benz company
with fuel cell [6]

Od roku 2003 powstało już wiele pojazdów elektrycznych z wykorzystaniem ogniwa paliwowego takich firm jak: DaimlerChrysler, Ford, General Motors, Honda, Mazda, Mitsubishi, Nissan, Peugeot, Renault, Toyota i Volkswagen. Ich parametry są porównywalne. Przy rozpiętości mocy ogniwa paliwowego 50-89 kW samochody osiągają prędkość maksymalną 90-145 km/h przy zasięgu 160-640 km [2].

Oprócz samochodów osobowych produkowane są również autobusy osiągające zasięg 300 km przy prędkości maksymalnej 80 km/h przez firmy: DaimlerChrysler, Irisbus, MAN, Scania i Toyota [2].

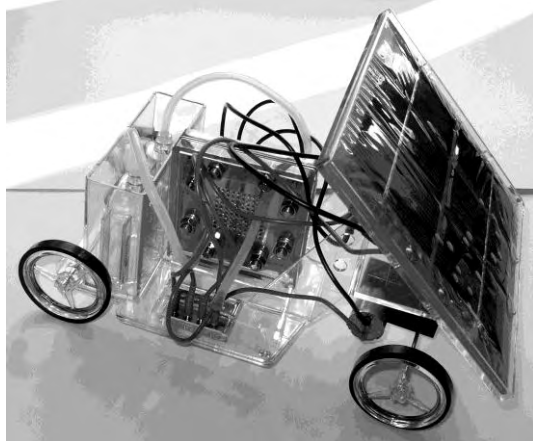
Wydaje się, że zbudowanie pojazdu elektrycznego napędzanego wodorowym ogniwem paliwowym oraz ogniwem fotowoltaicznym to bardzo trudne zadanie. Ale w dzisiejszych czasach może to wykonać nawet 12-letnie dziecko, za sprawą zestawu edukacyjnego - Ogniwo paliwowe - firmy KOSMOS. Zestaw zawiera

wszystkie niezbędne elementy do budowy takiego ekologicznego pojazdu, a więc: jednokomórkowe wodorowe ogniwo paliwowe, podwozie modelu samochodu z kołami, napędzający silnik elektryczny, zbiorniczki na tlen i wodór, panel fotowoltaiczny oraz niezbędne kable i rurki.



Rys. 7. Widok jednokomórkowego wodorowego ogniwa paliwowego z obu stron

Fig. 7. View on the one-cell hydrogen fuel cell from both side



Rys. 8. Widok zmontowanego pojazdu elektrycznego z ogniwem paliwowym i panelem fotowoltaicznym – zestaw edukacyjny firmy Kosmos

Fig. 8. View on the electric vehicle with fuel cell and photovoltaic panel – educate kit Kosmos company

Widok rzeczywistego ogniwa (z obu stron) przedstawiono na rys. 7. Gotowy, zbudowany pojazd przy wykorzystaniu tego zestawu przedstawia rys. 8.

PIŚMIENICTWO

1. Czerwiński A.: Akumulatory baterie ogniwa. WKŁ, Warszawa 2005, s. 152-169.
2. Jastrzębska G.: Odnawialne źródła energii i pojazdy proekologiczne. WNT, Warszawa 2007, s. 120-210.
3. Lewandowski W.: Proekologiczne odnawialne źródła energii. WNT, Warszawa 2007, s. 375-403.
4. Bahnemann D., Pujiula F., Berge Ch.: Instrukcja do zestawu edukacyjnego Ogniwo paliwowe firmy KOSMOS, Stuttgart 2006.
5. Nexa User's Manual Rev. 0A, 2003.
6. Strona internetowa Car Design Online (www.carsdesignonline.com)

HYDROGEN FUEL CELL – ECOLOGY SOURCE OF SUPPLYING VEHICLE DIRECT CURRENT

Summary

The article show base work of hydrogen fuel cell and his possibility to supplying electric vehicles. We compare advantages and disadvantages of electric and petrol vehicles in technical and ecology respect.

Keywords: hydrogen fuel cell, electric vehicle.

Mariusz Kłonica¹⁾

MODYFIKACJA WARSTWY WIERZCHNIEJ TWORZYW POLIMEROWYCH (PP-H I PE 300) OZONEM

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań stanu energetycznego warstwy wierzchniej polipropylenu PP-H oraz polietylenu PE 300. Porównano wartości swobodnej energii powierzchniowej po rozwinięciu struktury geometrycznej powierzchni płótnem ściernym (P320), odtłuszczeniu oraz ozonowaniu. Stężenie ozonu w czasie (5, 10, 20) minut wynosiło 8 g/m³. Pracę zakończono wnioskami.

Słowa kluczowe: modyfikacja powierzchni, ozon, swobodna energia powierzchniowa, polimery.

WSTĘP

Dużą rolę w konstytuowaniu cech eksploatacyjnych połączeń adhezyjnych odgrywa stan energetyczny warstwy wierzchniej materiałów konstrukcyjnych [1, 7-9, 14, 16]. Dotyczy to głównie procesów technologicznych takich jak: klejenie, nanoszenie powłok ochronnych i dekoracyjnych, uszczelniania i innych. Obecnie ważniejsze sposoby przygotowania warstwy wierzchniej dla potrzeb technologii adhezyjnych są następujące: mechaniczne, chemiczne, elektrochemiczne, aktywowanie wyładowaniami koronowymi, aktywowanie płomieniem oraz łączenie wymienionych metod [3, 5, 16].

Tworzywa polimerowe (polipropylen PP-H oraz polietylen PE 300) należą do grupy materiałów, których aktywowanie energetyczne warstwy wierzchniej jest niezbędne do uzyskania odpowiednich właściwości połączeń adhezyjnych z ich udziałem [2-4, 6, 10, 12, 13].

Jednym z głównych kierunków podczas projektowania procesów technologicznych na początku XXI wieku jest ochrona środowiska naturalnego. Dlatego ważne jest, aby w procesie przygotowania materiałów konstrukcyjnych dla technologii, gdzie dominujące znaczenie odgrywa zjawisko adhezji, zużywać minimalne ilości związków chemicznych. Stosowane obecnie w przemyśle metody przygotowania warstwy wierzchniej materiałów konstrukcyjnych wykorzystują w dużej mierze kąpiele o odczynie kwaśnym lub zasadowym, negatywnie wpływające na stan środowiska naturalnego [16]. Dużym problemem jest ilość związków chemicznych zużywanych w przemyśle oraz sposób ich utylizacji. Ozonowanie

¹ Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska.

jest obiecującą metodą aktywowania warstwy wierzchniej bez negatywnego wpływu na stan środowiska naturalnego.

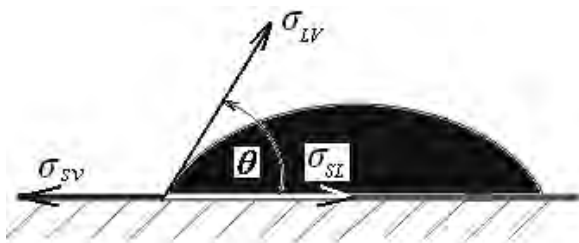
WYZNACZANIE WARTOŚCI SWOBODNEJ ENERGII POWIERZCHNIOWEJ

Najczęściej wartość swobodnej energii powierzchniowej materiałów konstrukcyjnych wyznaczana jest w sposób pośredni. W metodzie tej wykorzystuje się pomiary kątów zwilżania wybranymi cieczami pomiarowymi. Wybór cieczy pomiarowych ściśle zależy od przyjętej metody wyznaczania wartości swobodnej energii powierzchniowej. Istotą oddziaływania pomiędzy ciałem stałym i cieczą opisuje charakterystyczne równanie Younga (1) [9, 16]:

$$\sigma_{SV} = \sigma_{SL} + \sigma_{LV} \cos \Theta_V \quad (1)$$

gdzie: σ_{SV} - napięcie powierzchniowe na granicy faz ciało stałe – gaz, σ_{SL} - napięcie powierzchniowe na granicy faz ciało stałe – ciecz, σ_{LV} - napięcie powierzchniowe na granicy faz ciecz – gaz, Θ_V - równowagowy kąt zwilżania.

Na rys. 1 przedstawiono graficzną interpretację równania Younga wraz z zaznaczonym sposobem pomiaru kąta zwilżania.



Rys. 1. Uproszczony model przedstawiający graficzną interpretację równania Younga oraz pomiar kąta zwilżania

Fig. 1. Simplified model of graphic interpretation of Young's equation and wetting angle measurement

Pożądane jest uzyskanie warstwy wierzchniej o jak najwyższej wartości swobodnej energii powierzchniowej, co jest warunkiem dobrego zwilżania. Z bilansu energetycznego dla punktu równowagi trzech faz równanie to jest zapisane w postaci (4):

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \Theta_V \quad (2)$$

gdzie: symbol γ oznacza swobodną energię powierzchniową, a pozostałe symbole zachowują znaczenie jak w równaniu (1).

Najczęściej stosowaną metodą do wyznaczania wartości swobodnej energii powierzchniowej jest metoda Owensa – Wendta [9, 16]. W metodzie tej przyjęto,

że swobodna energia powierzchniowa jest sumą dwóch składowych: dyspersyjnej i polarnej oraz, że istnieje zależność między nimi:

$$\gamma_s = \gamma_s^d + \gamma_s^p \quad (3)$$

gdzie: symbol γ oznacza swobodną energię powierzchniową.

$$(\gamma_s^d)^{0,5} = \frac{\gamma_d(\cos \Theta_d + 1) - \sqrt{\frac{\gamma_d^p}{\gamma_w^p}} \gamma_w(\cos \Theta_w + 1)}{2 \left(\sqrt{\gamma_d^d} - \sqrt{\gamma_d^p \frac{\gamma_w^d}{\gamma_w^p}} \right)} \quad (4)$$

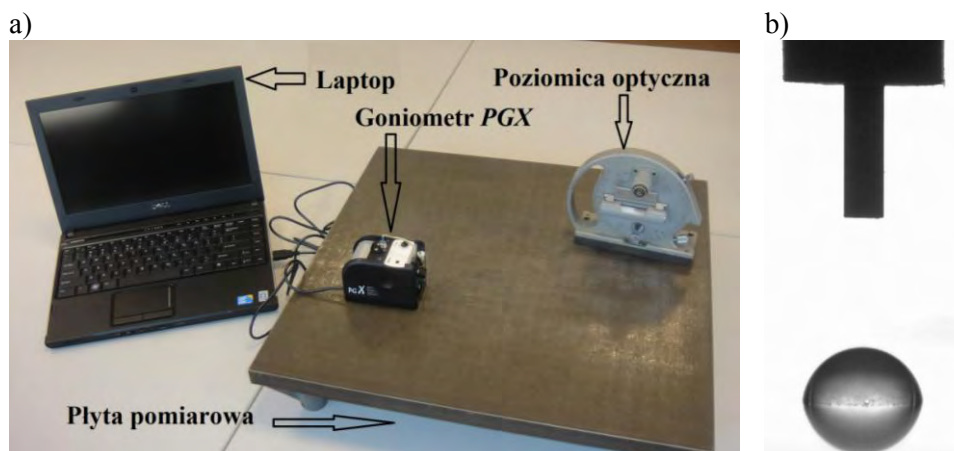
$$(\gamma_s^p)^{0,5} = \frac{\gamma_w(\cos \Theta_w + 1) - 2\sqrt{\gamma_s^d \gamma_w^d}}{2\sqrt{\gamma_w^p}} \quad (5)$$

gdzie: γ_s^d - składowa dyspersyjna swobodnej energii powierzchniowej badanych materiałów, γ_s^p - składowa polarna swobodnej energii powierzchniowej badanych materiałów, γ_d - swobodna energia powierzchniowa diiodometanu, γ_d^d - składowa dyspersyjna swobodnej energii powierzchniowej diiodometanu, γ_d^p - składowa polarna swobodnej energii powierzchniowej diiodometanu, γ_w - swobodna energia powierzchniowa wody, γ_w^d - składowa dyspersyjna swobodnej energii powierzchniowej wody, γ_w^p - składowa polarna swobodnej energii powierzchniowej wody, Θ_d - kąt zwilżania diiodometanem, zaś Θ_w - kąt zwilżania wodą.

MATERIAŁY ORAZ STANOWISKO BADAWCZE

Próbki wykonano z polipropylenu PP-H (o wysokiej wytrzymałości i sztywności) oraz polietylenu PE 300 (o wysokiej odporności chemicznej) o wymiarach 25x100 mm i grubości 4 mm. Każda grupa materiałowa badanych próbek liczyła po 10 sztuk.

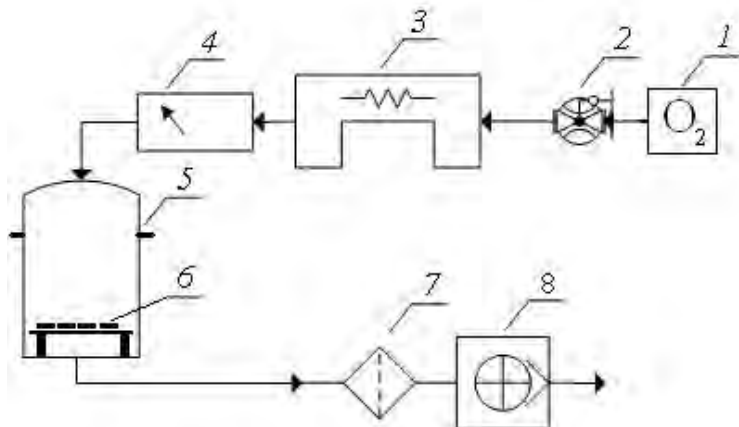
Do pomiarów kątów zwilżania oraz wyznaczenia swobodnej energii powierzchniowej użyto goniometru PGX firmy Fibro Systems AB. Ciecze pomiarowe (woda destylowana oraz diiodometan) były наносzone w postaci kropli o stałej objętości 4 μ l na badaną powierzchnię w sposób automatyczny przez mechanizm goniometru. Na rysunku 2a przedstawiono widok stanowiska badawczego z wyszczególnieniem goniometru PGX oraz na rysunku 2b pokazano przykładowy widok naniesionej kropli cieczy pomiarowej na badaną powierzchnię tworzywa polimerowego. Na każdej z badanych powierzchni próbek postawiono minimum po 10 kropli każdej z cieczy pomiarowej.



Rys. 2. Widok: a) stanowiska badawczego, b) kropli

Fig. 2. View: a) research position, b) drop

Na rysunku 3 przedstawiono schemat stanowiska do syntezy ozonu i modyfikacji warstwy wierzchniej badanych próbek. W skład stanowiska laboratoryjnego wchodzi: 1 – koncentrator tlenu, 2 – przepływomierz z regulacją, 3 – generator ozonu, 4 – miernik stężenia ozonu, 5 – komora reakcyjna, 6 – próbki poddawane modyfikacji warstwy wierzchniej, 7 – destruktor ozonu, 8 – pompka ssąca.



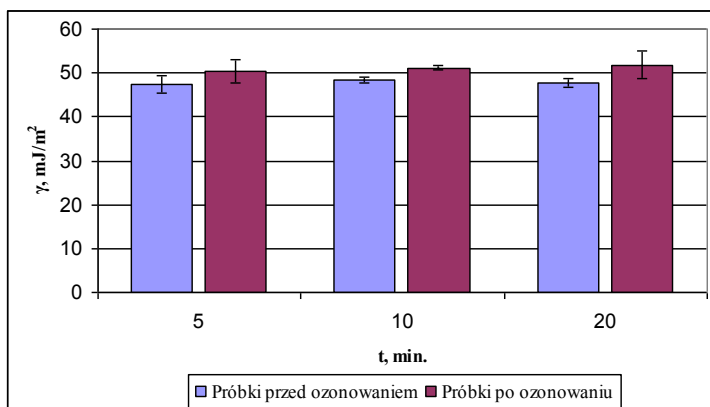
Rys. 3. Schemat stanowiska do ozonowania

Fig. 3. Model of ozonization work-stand

Przepływ ozonu podczas ozonowania próbek wynosił $0,90 \text{ dm}^3/\text{min}$. Stężenie ozonu wynosiło 8 g/m^3 , a czas ekspozycji próbek w komorze reakcyjnej wynosił (5, 10, 20) minut. Do pomiaru stężenia ozonu użyto miernika ozonu Ozone ANALYZER BMT 964. Próbkki poddane modyfikacji warstwy wierzchniej były umieszczone w komorze reakcyjnej (5).

WYNIKI BADAŃ

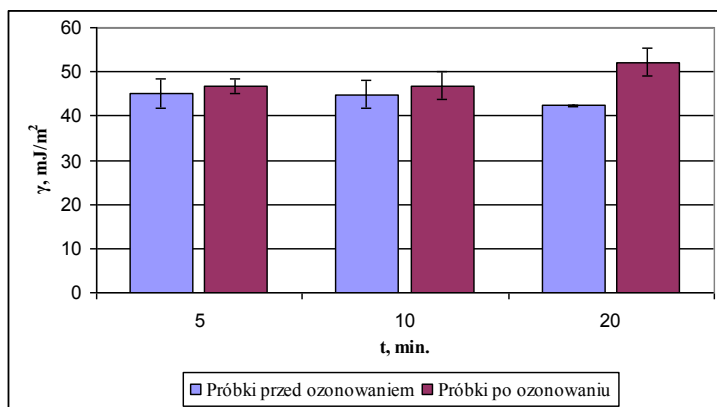
Podczas badań analizowano po dziesięć próbek wykonanych z poszczególnych materiałów. Wartości swobodnej energii powierzchniowej dla polipropylenu PP-H po szorstkowaniu płótnem ściernym P320, wyznaczonej na podstawie pomiarów kąta zwilżania cieczami pomiarowymi, uśredniono i przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Wpływ ozonu na wartość swobodnej energii powierzchniowej polipropylenu PP-H po szorstkowaniu

Fig. 4. Influence of ozone on value of surface free energy of polypropylene PP-H after roughen

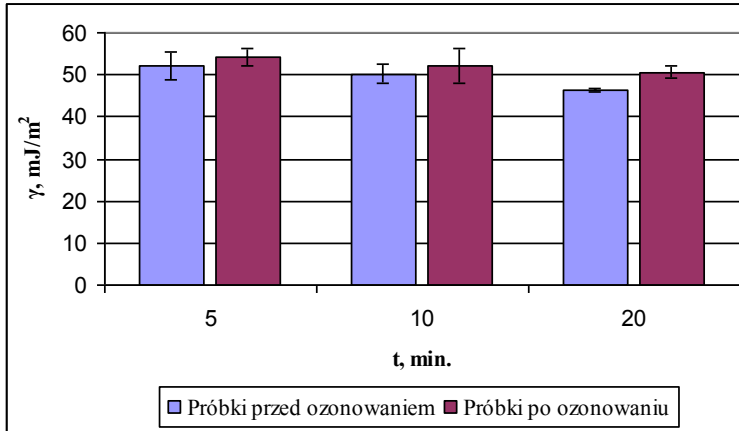
Na rysunku 5 przedstawiono wartości swobodnej energii powierzchniowej dla polipropylenu PP-H po szorstkowaniu płótnem ściernym P320 oraz odfuszczeniu Loctitem 7061.



Rys. 5. Wpływ ozonu na wartość swobodnej energii powierzchniowej polipropylenu PP-H po szorstkowaniu i odfuszczeniu

Fig. 5. Influence of ozone on value of surface free energy of polypropylene PP-H after roughen and remove fat

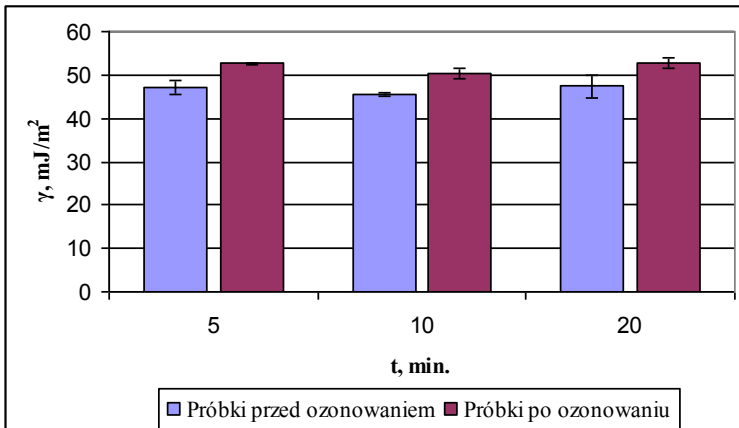
Próbki wykonane z tworzyw polimerowych (polipropylen PP-H i polietylen PE-300) szorstkowane jak i szorstkowane oraz odtłuszczone poddano modyfikacji w atmosferze ozonu w czasie (5, 10, 20) min. odpowiednio dla poszczególnych serii. Rysunek 6 przedstawia wartości swobodnej energii powierzchniowej dla polietylenu PE-300 po szorstkowaniu płótnem ściernym P320.



Rys. 6. Wpływ ozonu na wartość swobodnej energii powierzchniowej polietylenu PE-300 po szorstkowaniu

Fig. 6. Influence of ozone on value of surface free energy of polyethylene PE-300 after roughen

Na rysunku 7 przedstawiono wartości swobodnej energii powierzchniowej dla polietylenu PE-300 po szorstkowaniu płótnem ściernym P320 oraz odtłuszczeniu Loctitem 7061.



Rys. 7. Wpływ ozonu na wartość swobodnej energii powierzchniowej polietylen PE-300 po szorstkowaniu i odtłuszczeniu

Fig. 7. Influence of ozone on value of surface free energy of polyethylene PE-300 after roughen and remove fat

WNIOSKI

Na podstawie analizy przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

1. Ozonowanie badanych tworzyw polimerowych powoduje wzrost wartości swobodnej energii powierzchniowej w porównaniu do wartości tej energii uzyskanej po obróbce płótnem ściernym o ziarnistości P=320.
2. Ozonowanie może być ekologiczną technologią stosowaną w przemyśle, wszędzie tam gdzie mamy do czynienia ze zjawiskiem adhezji.
3. Dla pełniejszej oceny przydatności ozonowania jako metody aktywowania energetycznego warstwy wierzchniej tworzyw polimerowych potrzebne są dalsze badania przy różnych parametrach tego procesu.

PIŚMIENNICTWO

1. Blicharski M. Inżynieria powierzchni. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa 2009. ISBN 978-83-204-3421-7.
2. Cataldo F., Angelini G.: Some aspects of the ozone degradation of poly(vinyl alcohol). *Polymer Degradation and Stability* 91 (2006) 2793 – 2800.
3. Cataldo F.: Stability of polyynes in air and their degradation by ozonolysis. *Polymer Degradation and Stability* 91 (2006) 317 – 323.
4. Cataldo F.: The action of ozone on polymers having unconjugated and cross – or linearly conjugated unsaturation: chemistry and technological aspects. *Polymers Degradations and Stability* 73 (2001) 511-520.
5. Chibowski E., Gonzalez-Caballero F.: Interpretation of contact angle hysteresis. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 11 (1993) 1195-1209.
6. Jańczuk B., Białopiotrowicz T.: Swobodna energia powierzchniowa niektórych polimerów. *Polimery*. 32 (1987) 269-271.
7. Kłonica M., Kuczmazewski J.: Analiza energetyczna warstwy wierzchniej po ozonowaniu materiałów konstrukcyjnych stosowanych w przemyśle lotniczym. *Inżynieria powierzchni. Wybrane zagadnienia. Monografie, Studia, Rozprawy M17* pod redakcją Bogdana Antoszewskiego. Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2011 PL ISSN 1897-2691, s. 171-180.
8. Kłonica M., Kuczmazewski J., Ozonok J.: Ocena porównawcza właściwości energetycznych warstwy wierzchniej stopu tytanu. *Inżynieria materiałowa*. Nr 5 (171) 2009 s. 396-399.
9. Kuczmazewski J.: *Fundamentals of metal-metal adhesive joint design*. Politechnika Lubelska. Oddział PAN w Lublinie, 2006.
10. Kwiatkowski M., Kłonica M., Kuczmazewski J., Ozonok J.: Zastosowanie procesu ozonowania do modyfikacji właściwości energetycznych warstwy wierzchniej poliamidu PA6. *Monografia Komitetu Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk vol. 59. III Kongres Inżynierii Środowiska, Polska inżynieria środowiska pięć lat po wstąpieniu do Unii Europejskiej. Tom 2* pod redakcją J. Ozonka, A. Pawłowskiego, Lublin 2009. s. 71-80.

11. Ozonek J.: Laboratorium syntezy ozonu. Wydawnictwa Uczelniane, Politechnika Lubelska, Lublin 1993.
12. Ozonek J.: Ozon w uzdatnianiu wody i oczyszczaniu zanieczyszczeń przemysłowych. *Ekoinżynieria*, 7(1996), 20-24.
13. Ozonek J., Fijałkowski S.: Energetyczne i procesowe aspekty produkcji i zastosowań ozonu w technice., Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, Lublin 2007.
14. Shalel-Levanon S., Marmur A.: Validity and accuracy in evaluating surface tension of solids by additive approaches. *Journal of Colloid and Interface Science* 262 (2003) 489-499.
15. Żenkiewicz M.: Porównawcza ocena niektórych metod obliczania swobodnej energii powierzchniowej aktywowanej folii polietylenowej. *Polimery* 33 (1988) 328-331.
16. Żenkiewicz M.: Adhezja i modyfikowanie warstw wierzchniej tworzyw wielkocząsteczkowych. WNT, Warszawa 2000.

SURFACE LAYER MODIFICATION OF (PP-H AND PE 300) POLYMERS AFTER OZONIZATION

Summary:

The purpose of the article was to present results of energetic properties of the surface layer of polypropylene PP-H and polyethylene PE-300. Values of free surface energy after machining with abrasive cloth of P320 granularity, degreasing and ozonization were compared. Concentration ozone for $t=(5, 10, 20)$ min. it equals 8 g/m^3 . The paper ends with conclusions.

Keywords: surface modification, ozone, surface free energy, polymer.

Badania realizowane w ramach Projektu Nr POIG.0101.02-00-015/08 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (POIG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

Jerzy Józwik ¹⁾, Marcin Kobyłka ²⁾

BADANIE WPŁYWU PARAMETRÓW GEOMETRYCZNYCH KIESZENI PROSTOKĄTNEJ ORAZ WARUNKÓW REALIZACJI PROCESU SKRAWANIA NA DRGANIA PODCZAS FREZOWANIA TROCHOIDALNEGO

Streszczenie: Obróbka trochoidalna pozwala na usuwanie relatywnie dużej objętości materiału obrabianego w minimalnym czasie. Omówiono generowanie trochoidalnej ścieżki narzędzia podczas frezowania w systemie NX 7.5. Dokonano analizy drgań w przedmiocie podczas frezowania trochoidalnego kieszeni prostokątnej.

Słowa kluczowe: trochoida, obróbka skrawaniem, generowanie ścieżki narzędzia, Uni-graphics NX 7.5.

WSTĘP

Ważnym zagadnieniem podczas obróbki frezowaniem jest osiągnięcie jak najlepszej jakości produktu przy minimalizacji kosztów wytwarzania. Jednym z rozwiązań pozwalających zrealizować to jest usuwanie dużej ilości nadmiaru w jak najkrótszym czasie. Nie daje to jednak zawsze żądanych rezultatów z punktu widzenia jakości powierzchni i jej dokładności geometrycznej. Innym sposobem jest optymalizacja obróbki polegająca na wyborze jak najkorzystniejszej strategii obróbki.

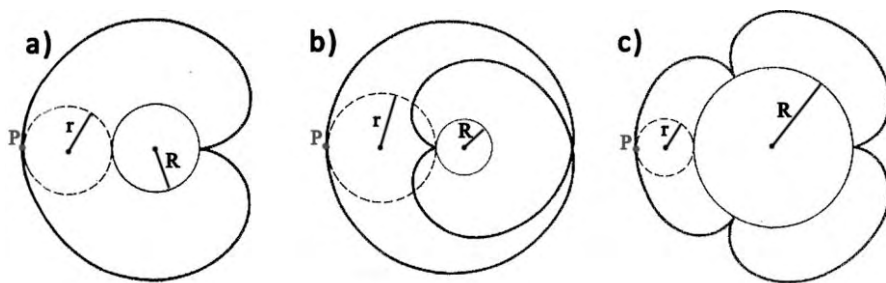
Obróbka materiału po ścieżce trochoidalnej pozwala na usuwanie w jednym przejściu dużej ilości materiału przy jednoczesnym zmniejszeniu kąta opasania narzędzia, a pośrednio zmniejszeniu sił skrawania drgań przedmiotu obrabianego. W badaniach skupiono się na analizie drgań podczas frezowania trochoidalnego kieszeni prostokątnej. Ścieżkę trochoidalną wygenerowano z wykorzystaniem systemu NX 7.5.

KRZYWA TROCHOIDALNA I JEJ INTERPRETACJA W SYSTEMIE NX 7.5

Trochoida (gr. *trochós* – koło, *eidos* – kształt) jest to krzywa płaska zakreślona przez dowolnie obrany punkt P stale związany z kołem O toczącym się wzdłuż wewnętrznej lub zewnętrznej strony stałego (nie poruszającego się) okręgu bez poślizgu. Termin został wprowadzony do matematyki przez Gillesa de Robervalą (rys. 1) [8].

¹ Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji.

² Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Koło Naukowe Podstaw Inżynierii Produkcji.

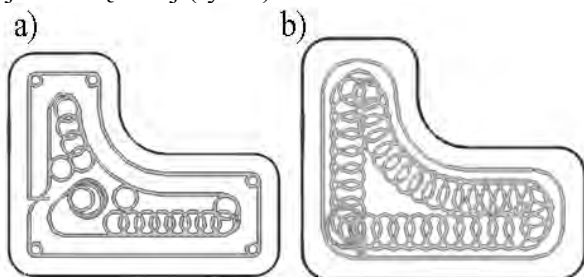


Rys. 1. Przykłady trochoid [8]

Strategia frezowania trochoidalnego najczęściej wykorzystywana jest podczas obróbki wcięć, naroży, wąskich kanałów, rowków i kieszeni. Podczas obróbki tradycyjnej naroży, lub rowków wpustowych następuje gwałtowne zwiększenie kąta opasania narzędzia. Powoduje to zwiększenie siły działającej na narzędzie oraz wzrost ilości generowanego ciepła i drgań. Czynniki te negatywnie wpływają na okres trwałość narzędzia, powodując jego skrócenie.

Ruch narzędzia po ścieżce trochoidalnej powoduje: zwiększenie płynności ruchu narzędzia, co jest istotne w przypadku obróbki HSM/HSC, oraz zmniejszenie kąta opasania frezu podczas obróbki naroży lub rowków [1, 3].

System NX 7.5 umożliwia generowanie dwóch rodzajów ścieżki trochoidalnej: wewnętrznej i zewnętrznej (rys. 2).



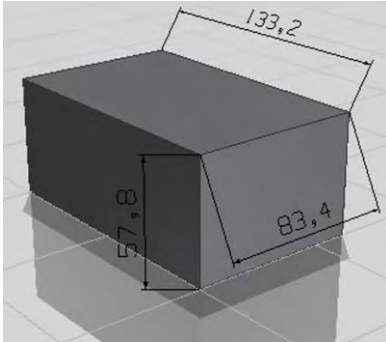
Rys. 2. Ścieżki trochoidalne dostępne w systemie NX: a) trochoida zewnętrzna, b) trochoida wewnętrzna [6]

BADANIE ORAZ ANALIZA DRGAŃ POWSTAŁYCH W PRÓBCE

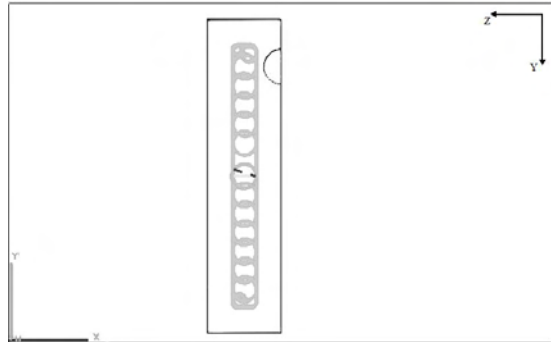
Próbkę do symulacji zaprojektowano w module „Modelling” systemu NX jako wyciągnięcie prostokąta o wymiarach 83,4mm x 133,2mm na wysokość 57,8mm (rys. 3). Docelowo w próbce zamodelowano i wykonano kieszeń o grubości ścianek 2,5mm.

W kolejnym etapie wygenerowano ścieżkę trochoidalną narzędzia z różną szerokością skrawania. Poszczególne kieszenie zaprojektowano jako oddzielne pliki *.prt, tak aby system NX rozpoznawał każdą z nich jako osobny element.

Rozmieszczenie kieszeni o szerokościach $e=18\text{mm}$ i $e=22\text{mm}$ zaprojektowano tak, aby po każdym zabiegu frezowania grubość ścianki próbki skokowo malała do wartości $2,5\text{mm}$ (rys. 4).



Rys. 3. Model próbki wygenerowanej w systemie NX 7.5

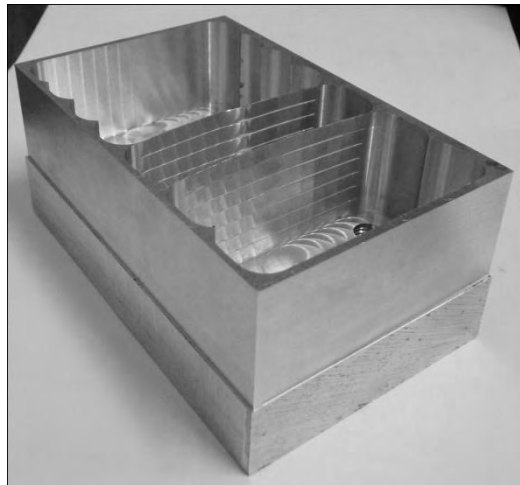


Rys. 4. Ścieżka ruchu narzędzia wygenerowana w systemie NX 7.5

Podczas procesu frezowania badano przebieg czasowy zmian przyspieszeń w trzech osiach za pomocą akcelometru piezoelektrycznego firmy SEQUOIA. Wyniki rejestrowano na komputerze przy użyciu oprogramowania SeTAC Configuration Console ver. 5.14.0. Akcelometr został zamocowany na bocznej ściance próbki (rys. 5). Proces frezowania przeprowadzono na pionowym centrum obróbkowym FV-580A firmy MOC MECHANICY. Badana próbka była wykonana z aluminium 7075.



Rys. 5. Zamocowanie próbki na stole obrabiarki



Rys. 6. Próбка po obróbce

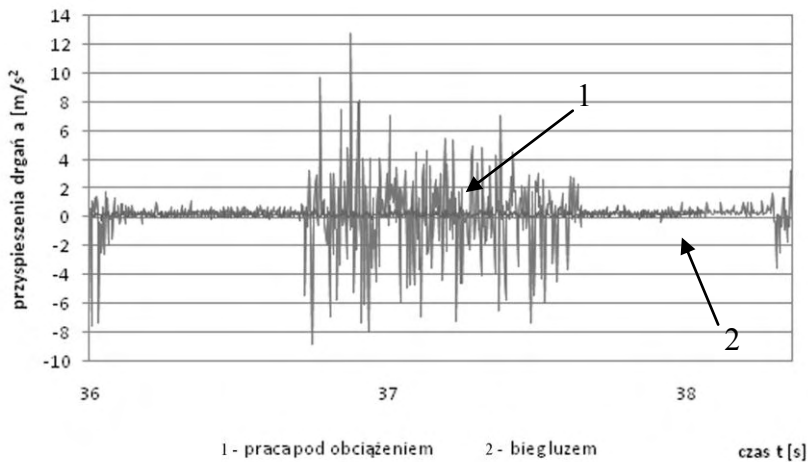
Próby powtarzano 4 – krotnie z szerokością frezowania $e=18\text{mm}$ oraz 3-krotnie z szerokością frezowanej kieszeni $e=22\text{mm}$. Głębokość kieszeni dla obu szerokości frezowanej kieszeni wynosiła 35mm , zaś głębokość skrawania $a_p=5\text{mm}$ (tab. 1).

Tabela 1. Parametry technologiczne obróbki

Parametr	Wartość
a_p [mm]	5
V_c [mm/min]	230
f [mm/oztrz.]	0,07
V_f [mm/min]	840

Po wstępnej analizie w dalszej części pracy uwzględniono drgania tylko w osi Z (rys. 4), która podczas badań była równoległa do najdłuższej krawędzi próbki. Wybór ten wynika z charakteru obróbki ścieżką trochoidalną.

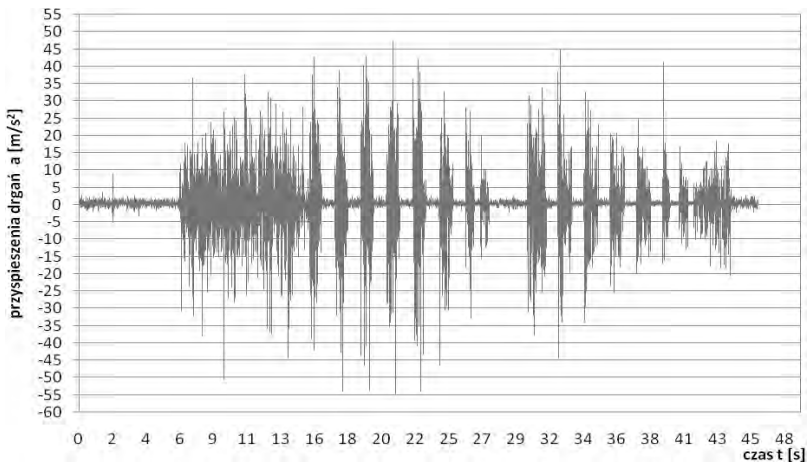
Analizując przeprowadzony proces stwierdzono, że nieznacznie odbiega on od pierwotnych założeń. W kieszeni pozostał materiał w dwóch miejscach. Powodem tego może być błąd w zaprojektowaniu kolejnych kieszeni (zbyt mała długość, na której kieszenie nakładały się na siebie) lub jest to odkształcenie wywołane działaniem sił na materiał (rys. 6).



Rys. 5. Przebieg czasowy zmian przyspieszenia drgań w osi Z podczas biegu luzem ($V_c=230\text{mm/min}$, $n=6000\text{ obr/min}$) centrum obróbkowego FV-580A, przy: $a_p=5\text{mm}$, $f=0,07\text{ mm/oztrz}$, $V_f=840\text{ mm/min}$, $V_c=230\text{ mm/min}$.

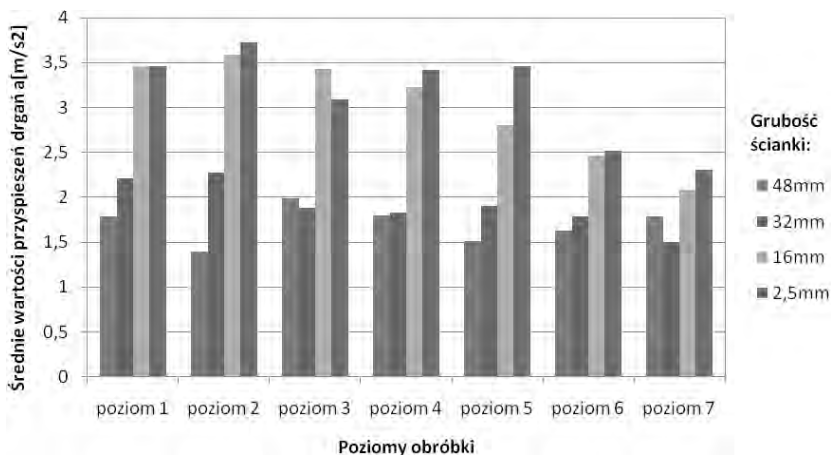
Na rys. 7 przedstawiono przebieg czasowy zmian przyspieszenia drgań dla osi Z przyrządu pomiarowego podczas próby pracą oraz biegu luzem w porównaniu do przebiegu czasowego podczas pracy pod obciążeniem. Wybrany przedział czasowy przedstawia moment w którym narzędzie wykonuje ruch tro-

choidalny w materiale obrabianym. Wartość szczytowa w tym przypadku wynosi $12,81 \text{ m/s}^2$, a odchylenie standardowe $2,21 \text{ m/s}^2$.



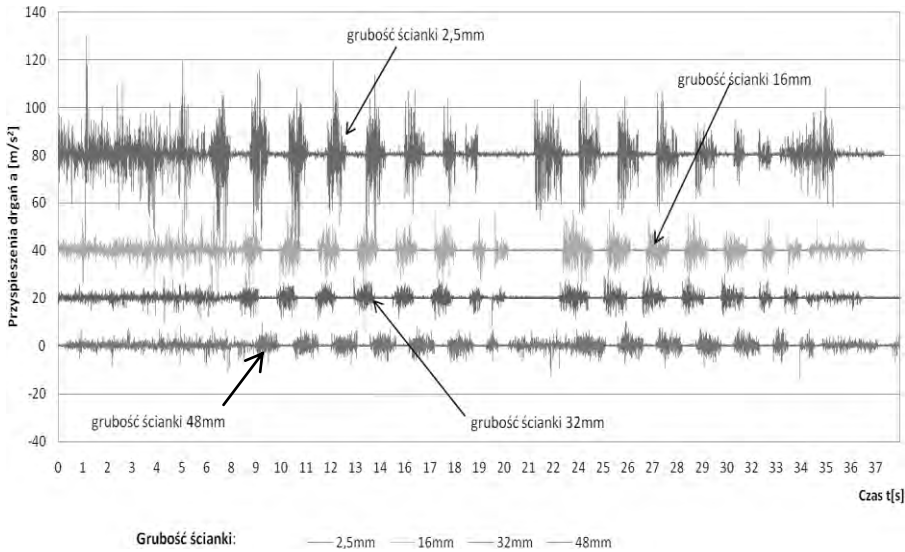
Rys. 6. Przebieg czasowy zmian przyspieszenia drgań w osi Z podczas pracy centrum obróbkowego FV-580A, parametry technologiczne: $a_p=5\text{mm}$, $f=0,07 \text{ mm/strz}$, $V_f=840 \text{ mm/min}$, $V_c=230 \text{ mm/min}$, $e=18\text{mm}$.

Na rys. 8 przedstawiony został przebiegu czasowy przyspieszeń drgań w osi Z podczas pracy ścieżką trochoidalną przy grubości ścianki $2,5\text{mm}$, głębokość skrawania $a_p=15\text{mm}$. Cechą charakterystyczną jest cykliczne zwiększanie się amplitudy drgań przy wchodzeniu narzędzia w materiał krokiem trochoidalnym. W czasie od 6 do 16 sekundy następuje wejście freza w materiał strategią helioidalną. Wartość szczytowa wynosi $54,84 \text{ m/s}^2$, odchylenie standardowe $6,31 \text{ m/s}^2$.



Rys. 7. Średnie wartości przyspieszeń drgań dla szerokości frezowanej kieszeni $e=18\text{mm}$

Analizując wartości przyspieszeń drgań na poszczególnych poziomach obróbki można stwierdzić pewnego rodzaju tendencję zwiększania się wartości drgań wraz z coraz mniejszą grubością ścianki próbki (rys. 9). Wartości przyspieszeń drgań, dla tych samych grubości ścianek, na poszczególnych poziomach obróbki są do siebie zbliżone. Wartości średnie zostały obliczone bez uwzględnienia zwrotu działania wektora przyspieszenia w celu dokładniejszego oszacowania średnich wartości drgań.



Rys. 8. Zestawienie przebiegów czasowych drgań w osi Z, szerokość frezowanej kieszeni $e=18\text{mm}$, parametry technologiczne: $a_p=5\text{mm}$, $f=0,07\text{ mm/ostrz}$, $V_f=840\text{ mm/min}$, $V_c=230\text{ mm/min}$.

Na rys. 10 przedstawiono zestawienie przebiegów czasowych drgań w osi Z podczas frezowania na głębokości $a_p=5\text{mm}$. Analizując wykresy można zauważyć wyraźne zwiększanie się amplitudy oraz wartości szczytowych drgań wraz ze spadkiem grubości ścianki (tabela 2).

Tabela 2. Wartości szczytowe drgań podczas przebiegu czasowego

Grubość ścianki g [mm]	Wartość szczytowa drgań a [m/s ²]
48	11,77
32	12,38
16	20,77
2,5	39,75

Tabela 3. Odchylenie standardowe wartości drgań dla przebiegu czasowego

Grubość ścianki g [mm]	Odchylenie standardowe σ_a [m/s ²]
48	1,62
32	1,55
16	2,5
2,5	5,06

Analizując wartości odchyłeń standardowych można zaobserwować pewnego rodzaju wzrost dynamiczności procesu frezowania dla grubości ścianki $g=2,5\text{mm}$.

Odchylenie standardowe dla grubości ścianki $g=2,5\text{mm}$ wynosi $\sigma_a=5,06\text{m/s}^2$, jednocześnie pozostałe wartości odchyłeń standardowych są około dwukrotnie mniejsze. Świadczy to o mniejszym skupieniu obserwowanych wartości drgań wokół wartości średniej niż w przypadku ścianek o grubościach $g=48\text{mm}$, $g=32\text{mm}$, $g=16\text{mm}$ (tabela 3).

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań wpływu parametrów geometrycznych kieszeni prostokątnych przedmiotu obrabianego oraz warunków realizacji procesu skrawania na drgania podczas frezowania trochoidalnego dokonano oceny wpływu szerokości ścieżki trochoidalnej, grubości frezowanych ścian i głębokości frezowania na poziom generowanych drgań przedmiotu obrabianego.

W oparciu o przeprowadzone badania eksperymentalne stwierdzono, że:

- wraz ze spadkiem grubości ścianki wartości przyspieszenia drgań wzrastają,
- szerokość ścieżki trochoidalnej wpływa na poziom drgań przedmiotu obrabianego,
- frezowanie kieszeni o szerokości $e=18\text{mm}$ generowało w przedmiocie obrabianym mniejsze drgania niż przy szerokości frezowanej kieszeni $e=22\text{mm}$,
- głębokość skrawania w niewielkim stopniu wpływa na poziom generowanych drgań przedmiotu obrabianego.

PIŚMIENNICTWO

1. Ibaraki S., Yamaji I., Matsubara A.: On the removal of critical cutting regions by trochoidal grooving. *Precision Engineering*, Volume 34, Issue 3, July 2010, p. 467-473.
2. Otkur M., Lazoglu I.: Trochoidal milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 47, Issue 9, July 2007, p. 1324-1332.
3. Rauch M., Duc E. Hascoet J.-Y.: Improving trochoidal tool paths generation and implementation using process constraints modeling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 49, Issue 5, April 2009, Pages 375-383.
4. Uddin M. S., Matsubara A., Ibaraki S., Yasuda T.: Comparison of cutting strategies for high productive end milling. *Proceedings of the 35th International MATADOR Conference Formerly The International Machine Tool Design and Research Conference*, 2007.
5. Zalewski A.: Obróbka trochoidalna na frezarkach CNC. *Mechanik* nr 4/2007, s. 303-304.
6. Siemens PLM Software: NX Unigraphics 7.5 Help, Siemens 2010.
7. Cichosz P.: Obróbka skrawaniem. Wysoka produktywność. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2007.
8. Fichtenholz G. M.: Rachunek różniczkowy i całkowity, tom I. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1994.
9. Górski E.: Poradnik frezera. WNT, Warszawa 1999.

STUDY ON THE IMPACT OF GEOMETRICAL PARAMETERS OF THE RECTANGULAR POCKET AND CONDITIONS OF THE CUTTING PROCESS TO VIBRATIONS DURING TROCHOIDAL MILLING

Summary

Trochoid machining allows for the removal of relatively large volumes of material processed in minimal time. Explained are generation the trochoidal tool path in the NX7.5. The analysis of the vibrations in the workpiece during trochoidal milling has been made.

Keywords: trochoid, milling, generating of tool path, Unigraphics NX 7.5.

Aleksander Nieoczym¹⁾, Leszek Gardyński²⁾

BILANS ENERGETYCZNY PRACY GŁOWICY WKRĘCAJĄCEJ

Streszczenie: Wartość momentu dokręcającego łącznika gwintowego nie jest stała, zależy od dwóch głównych zmiennych: kąta dokręcania oraz sztywności kątowej. Dodatkowo analiza pracy głowicy wkręcającej wykazała, że zapotrzebowanie na energię kinetyczną niezbędną do utrwalenia połączenia jest krótkotrwałe i występuje w końcowej fazie dokręcania. W artykule przeprowadzono analizę matematyczną jednostopniowego procesu wkręcania. Cały proces podzielono na przedziały scharakteryzowane przez zmiany momentu użytecznego oraz prędkości kątowej końcówki wkręcającej.

Słowa kluczowe: impuls wkręcający, kąt dokręcania, moment dokręcający, sztywność kątowa.

ENERGETYCZNE ASPEKTY PRACY GŁOWICY WKRĘCAJĄCEJ

Urządzenia przeznaczone do mechanizacji (automatyzacji) procesu wkręcania łączników gwintowych umożliwiają otrzymanie określonego – w granicach tolerancji – momentu dokręcającego. Wartość tego momentu zależy od własności mechanicznych łącznika gwintowego, a w szczególności od wartości kąta dokręcenia φ_d i sztywności kątowej K (rys.1). Moment dokręcający uzależniony jest także od wartości momentu oporowego powstającego w układzie napędowym i roboczym głowicy wkręcającej. Analiza procesu łączenia elementów gwintowych wykazała, że zapotrzebowanie na energię kinetyczną zamienianą na pracę dokręcania jest krótkotrwałe a maksimum energii kinetycznej koniecznej do połączenia występuje tylko w fazie dokręcania (utrwalania połączenia gwintowego). Automatyczna realizacja cykli połączenia gwintowego wymaga aby prędkość kątowa żadnego z ogniw układu roboczego i napędowego w końcu fazy dokręcania nie zmniejszyła się do wartości równej zero. Układy te mogą przekazać jedynie ograniczoną porcję energii kinetycznej koniecznej do utrwalenia połączenia gwintowego. W celu zachowania ciągłości pracy głowicy, po wykonaniu pracy zewnętrznej, cały układ powinien zakumulować energię i osiągnąć prędkość kątową równą prędkości przed następnym cyklem połączenia. Spełnienie tych założeń wymaga kompleksowej analizy zależności funkcjonalnych układu napędowego i roboczego, co w rezultacie pozwala na właściwy dobór silnika napędowego, przekładni zębatej oraz wirujących mas układu roboczego. Równanie ogólne bilansu momentów przyjmuje postać:

¹⁾ Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn.

²⁾ Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Materiałowej.

$$M_{op} + M_{opw} + I\varepsilon = M_{el} \quad (1)$$

gdzie:

M_{op} – suma momentów oporowych w układzie napędowym i roboczym,

M_{opw} – moment oporów wkręcania łącznika gwintowego,

I – masowy moment bezwładności elementów układu roboczego i napędowego; w fazach: wstępnego wkręcania i swobodnego wkręcania oraz dokręcania moment ten jest przenoszony na końcówkę wkręcającą i przybiera wartość I_z ; w fazie akumulacji energii ulega redukcji na oś silnika napędowego i otrzymuje wartość I_{SR} ,

M_{el} – moment elektryczny silnika napędowego,

ε - przyspieszenie kątowe końcówki wkręcającej.

W zależności od fazy pracy urządzenia, moment M_{opw} przyjmuje wartości :

- a) w fazie swobodnego wkręcania $M_{opw} = M_{sw}$, w związku z czym moment M_{sw} ma wartość stałą [1] określoną za pomocą wzoru:

$$M_{sw} = 0,005M_d \quad (2a)$$

- b) w fazie dokręcania przyjmuje postać $M_{opw} = M_d$:

$$M_d = M_{sw} + \alpha\varphi$$

$$\alpha = \arctg \frac{M_d - M_{sw}}{\varphi_d - \varphi_{sw}} \quad (2b)$$

gdzie:

M_d - moment dokręcający,

M_{sw} – moment swobodnego wkręcania,

φ_{sw} – kąt obrotu końcówki wkręcającej w końcu fazy swobodnego wkręcania,

φ_d – kąt obrotu końcówki wkręcającej w końcu fazy dokręcania,

α - kąt pochylenia charakterystyki elektrycznego silnika napędowego opisany we współrzędnych $M=f(\varphi)$.

Wkręcanie może odbywać się dwiema metodami [3]:

- podczas jednego impulsu dokręcany jest z żadaną wartością momentu łącznik gwintowy o średnicy gwintu MA mniejszej od średnicy maksymalnej MY z szeregu łączników przeznaczonych do wkręcania daną głowicą. Łączniki gwintowe o rozmiarze gwintu większym od MA są wkręcane z zadaną wartością momentu podczas n impulsów wkręcających.
- 2- Podczas jednego impulsu dokręcany jest łącznik gwintowy o średnicy maksymalnej gwintu MY .

Model matematyczny procesu wkręcania łączników gwintowych tworzą równania, z których należy obliczyć:

- prędkość końcową procesu dokręcania ω_k ,
- moment wkręcania M ,
- kąt dokręcania φ ,

- liczbę impulsów wkręcających p , z których $n \in \{1, 2, 3 \dots p-1\}$ nazwiemy impulsami wkręcającymi, p -ty zaś impulsem dokręcającym.

Impulsy wkręcające powodują wkręcanie łącznika gwintowego z momentami M_n o rosnących wartościach, lecz mniejszych odżądanego momentu dokręcającego M_d ($M_n < M_d$). Rozwinięcie pełnego momentu dokręcającego M_d otrzymujemy podczas impulsu dokręcającego.

SZTYWNOŚĆ KĄTOWA

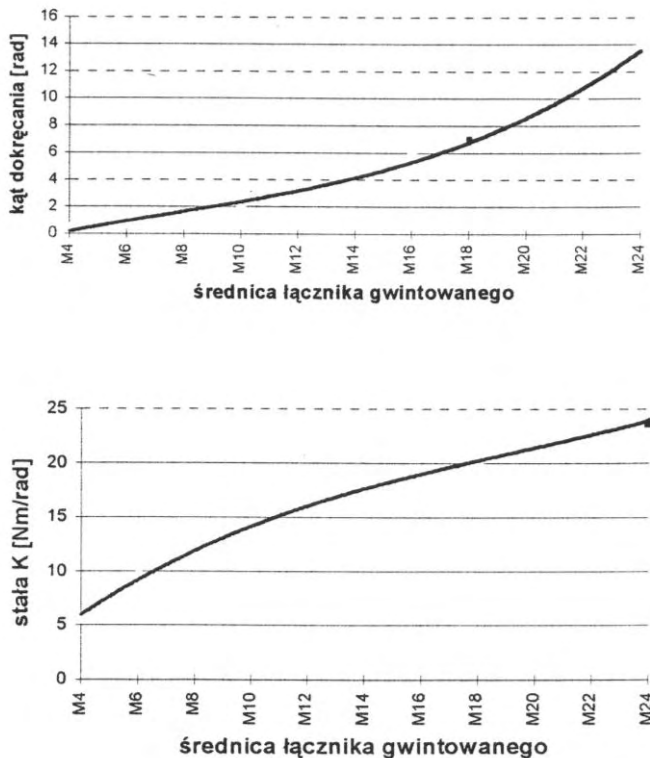
Moment dokręcający można zapisać jako funkcję kąta dokręcenia łącznika gwintowego φ_d i jego sztywności kątowej K :

$$M_d = K\varphi_d \quad (3)$$

gdzie:

φ_d – kąt dokręcenia łącznika gwintowego,

K – sztywność kątowa; stała wyznaczona dla konkretnego łącznika gwintowego.



Rys. 1. Zależność wartości kąta dokręcania φ_d i sztywności kątowej K od średnicy łącznika gwintowego

Fig. 1. Influence of the angle of tightening up φ_d and angle rigidity from diameter screw joint

Podstawową przyczyną niedokładności i niestabilności momentu obrotowego podczas dokręcania są wahania sztywności kątowej łącznika gwintowego wynikające ze zmiany współczynnika tarcia na gwincie i powierzchni oporowej śruby oraz niedokładnością wykonania części przeznaczonych do montażu. Powoduje to, że dokładność utrzymania zadanej siły Q przy kontroli pośredniej momentu M_d wynosi $\pm 20\%$. Sztywność kątowa jest więc składową podatności łącznika gwintowego i współczynnika tarcia na linii śrubowej i pod łbem śruby.

W łącznikach gwintowych określonego typu, posiadających jednakowe rozmiary geometryczne, sumaryczna podatność zmienia się nieznacznie. Zmiany te wynikają z różnych wartości współczynnika tarcia na gwincie i powierzchni oporowej. Wychodząc z zależności pomiędzy momentem dokręcającym i kątem dokręcania można zapisać:

$$Q = \frac{K \sum_{i=1}^n \varphi_i}{\pi d_s} \quad (4)$$

gdzie:

φ_i – kąt obrotu śruby podczas i – tego cyklu dokręcania ,

d_s – średnia średnica współpracy powierzchni gwintowych.

Przy czym sztywność kątowa zawiera się w przedziale:

$$K_{\min} \leq K \leq K_{\max} \quad (5)$$

Rozrzut siły zakręcania określany jest wzorem:

$$\Delta Q = \frac{\sum_{i=1}^n \varphi_i}{\pi d_s} \frac{K_{\max} - K_{\min}}{K_{\max} K_{\min}} \quad (6)$$

KĄT DOKRĘCANIA ORAZ PRĘDKOŚĆ DOKRĘCANIA

Problem zwiększenia wydajności procesów montażowych rozwiązywany jest poprzez skrócenie czasu operacji montażowych. W przypadku procesu wkręcania łączników gwintowych ulega skróceniu czas t_{sw} swobodnego wkręcania oraz t_d dokręcania. Zmiany te powodują jednoczesne zwiększenie prędkości kątowej urządzenia roboczego. Analizując fazę dokręcania należy zwrócić uwagę nie tylko na zjawiska zachodzące w łączniku gwintowym i jego otoczeniu ale także na proces hamowania elementów wykonawczych urządzenia wkręcającego. W warunkach rzeczywistych proces hamowania zachodzi w czasie określonym przez masowy moment bezwładności I_z elementów urządzenia [1, 2]:

$$I_z = f(\omega_k) = \left[\frac{K(\varphi_d + \gamma)}{(\omega_1 - \frac{0.005 M_d \omega_{zs}}{M_{zs} i_p^2})^2 - \omega_k^2} \right] \quad (7)$$

gdzie:

ω_k – prędkość końcowa procesu wkręcania ,

I_Z – masowy moment bezwładności elementów układu napędowego i roboczego zredukowany na końcówkę wkręcającą,

γ - kąt wysprzęglenia sprzęgła przeciążeniowego urządzenia wkręcającego,

ω_1 – prędkość biegu luzem silnika napędowego,

ω_{ZS} – prędkość znamionowa silnika napędowego,

M_{ZS} – moment znamionowy silnika napędowego,

I_p – przełożenie przekładni zębatej w urządzeniu wkręcającym,

M_d – moment dokręcający.

Wpływ masowego momentu bezwładności elementów układu napędowego i roboczego zredukowany na końcówkę wkręcającą urządzenia powoduje zakłócenie kąta dokręcania proporcjonalne do kąta hamowania α_T . W większości przypadków właściwości dynamiczne systemów napędowych urządzeń wkręcających można opisać wyrażeniem [4]:

$$\alpha_T = \int_0^{\infty} \omega_{sw} e^{-\frac{t}{\tau}} dt = \omega_{sw} \tau \quad (8)$$

gdzie:

τ - stała czasowa napędowego silnika elektrycznego

ω_{sw} – prędkość kątowna swobodnego wkręcania.

Zwiększenie dokładności dokręcania można uzyskać przyjmując nowy kąt dokręcania φ_d równy:

$$\varphi'_d = \varphi_d + \alpha_T \quad (9)$$

Przyjmując kąt dokręcania φ'_d uzyskuje się zmianę kąta hamowania $\Delta\alpha_T$ proporcjonalną do wartości $\delta(t)$ błędu stabilizacji prędkości ω_{sw} elementów wykonawczych:

$$\Delta\alpha_T = \delta \omega_{sw} \tau M \quad (10)$$

gdzie: M – krotność stałej czasowej τ .

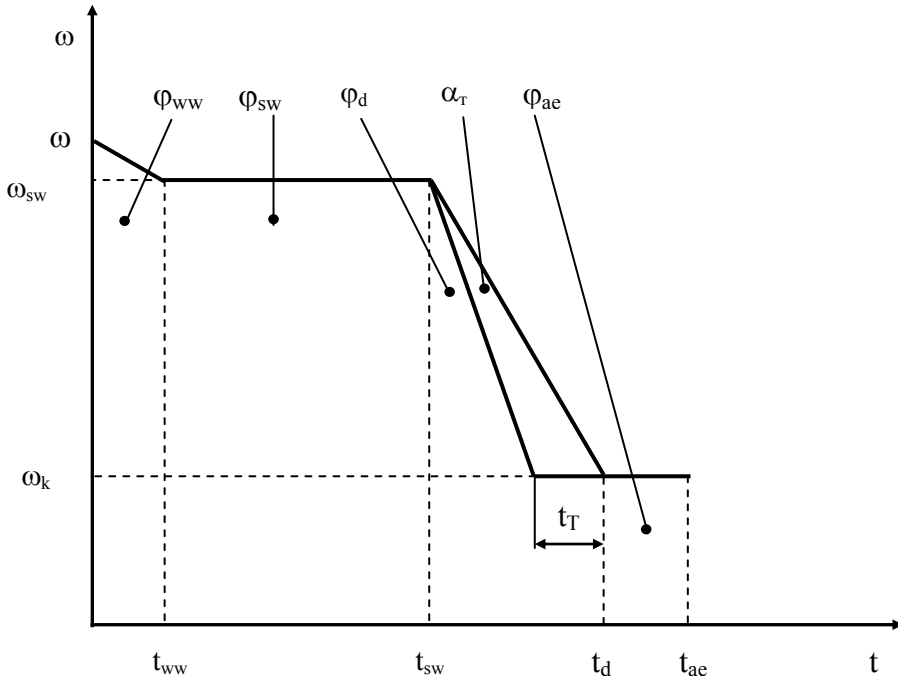
Z wyrażenia (8) wynika, że dopuszczalna prędkość urządzenia $\omega_{sw \max}$, przy której osiąga się niezbędną dokładność dokręcania może być wyrażona wzorem:

$$\omega_{sw \max} = \frac{\Delta\alpha_{T \max}}{\delta \tau M} \quad (11)$$

gdzie: $\Delta\alpha_{T \max}$ – maksymalny dopuszczalny błąd kąta hamowania.

Jeżeli przyjąć jednostopniowy cykl pracy (rys. 2), wówczas czas swobodnego wkręcania i dokręcania określamy:

$$t = \frac{\varphi_{sw}}{\omega_{sw \max} (1 + \delta)} + \frac{\varphi_d + \omega_{sw \max} \tau (1 + \delta)}{\omega_{sw \max} (1 + \delta)} + \tau M \quad (12)$$



Rys. 2. Jednostopniowy przebieg cyklu procesu wkręcania: ω - prędkość kątowna procesu wkręcania łącznika gwintowego, φ - kąt obrotu łącznika gwintowego, t - czas procesu wkręcania, t_{ww} - czas wstępnego wkręcania, t_{sw} - czas swobodnego wkręcania, t_d - czas dokręcania, t_T - czas hamowania, t_{ae} - czas akumulacji energii, ω_l - prędkość kątowna biegu luzem, ω_{sw} - prędkość kątowna początku procesu wkręcania, ω_k - prędkość kątowna końca procesu wkręcania, φ_{ww} - kąt obrotu łącznika gwintowego w końcu fazy wstępnego wkręcania, φ_{sw} - kąt obrotu łącznika gwintowego w końcu fazy swobodnego wkręcania, φ_d - kąt obrotu łącznika gwintowego w końcu fazy dokręcania, φ_{ae} - kąt obrotu łącznika gwintowego w końcu fazy akumulacji energii, α_T - kąt hamowania.

Fig. 2. Screwing-in process by a method of single impulses: ω - angular velocity of screwing-in, φ - angular displacement of threaded fastener, t - time of screw-in process, t_{ww} - time of initial screwing-in, t_{sw} - time of free screwing-in, t_d - time of power tightening, t_T - time of brake, t_{ae} - time of storage energy, ω_l - angular velocity of idle running, ω_{sw} - angular velocity of screwing-in process beginning, ω_k - angular velocity of screwing-in process end, φ_{ww} - angular displacement of threaded fastener at phase end of initial screwing-in, φ_{sw} - angular displacement of threaded fastener at phase end of free screwing-in, φ_d - angular displacement of threaded fastener at phase end of power tightening, φ_{ae} - angular displacement of threaded fastener at phase end of storage energy, α_T - angular of brake

Czas fazy wstępnego wkręcania za względu na bardzo małą wartość w porównaniu z czasem trwania kolejnych faz pracy urządzenia może być pominięty. Ponieważ prędkość elementów wykonawczych stabilizuje się z pewnym błędem δ

kąty obrotu łącznika gwintowego w końcu fazy dokręcania φ_d i akumulacji energii φ_{ae} oblicza się z równania stabilizacji prędkości [4] w pierwszym cyklu dokręcania.

Przy takim założeniu przyjmujemy, że przy prędkości dokręcania ω_{sw} kąt $\varphi_{d2}=0$, wtedy:

$$\varphi_{d1}(\delta) = \varphi_d - \varphi_{ae1}(\delta) - \varphi_{ae2} \quad (13)$$

$$\varphi_{ae2} = \omega_{sw} \tau M \quad (14)$$

$$\varphi_{ae1}(\delta) = (1 + \delta)[(\omega_{sw} - \omega_{k1})\tau + \tau \omega_{sw} M] \quad (15)$$

Przyjmując niekorzystny przypadek, kiedy stabilizacja prędkości kątowej zachodzi w ostatnim cyklu dokręcania, możemy zapisać wyrażenie dla określenia przyrostu kąta akumulacji energii $\Delta\varphi_{ae}$:

$$\Delta\varphi_{ae1} = 2\delta[(\omega_{sw} - \omega_{k1})\tau + \omega_{sw} \tau M] \quad (16)$$

Wtedy czas zakręcania i dokręcania zapisujemy:

$$t = \frac{\varphi_{sw} + \varphi_d}{\omega_{sw}(1 - \delta)} - \frac{1 + \delta}{1 - \delta} \tau + \frac{\tau \omega_k [(1 + \delta)(M - 1) - M]}{\omega_{sw}(1 - \delta)} + \frac{2\delta \tau \omega_{sw}}{\omega_1(1 - \delta)} + \frac{2\delta \tau (M - 1)}{1 - \delta} + 2 \tau M \quad (17)$$

Wyrażenie (17) dla określonego rodzaju łączników gwintowych i typu silnika elektrycznego jest funkcją dwóch zmiennych: ω_{sw} i ω_k . W celu określenia punktu możliwego ekstremum należy wybrać z technologicznych ograniczeń maksymalną prędkość ω_{k1} wyłączenia elementu wykonawczego. Wtedy optymalna prędkość zakręcania wynosi:

$$\omega_{sw \text{ opt}} = \sqrt{\frac{(\varphi_{sw} + \varphi_{d1} + \varphi_{d2} + \varphi_{ae1})\omega_{k1} + [(1 + \delta)(M - 1) - M]\tau \omega_{k1}^2}{2\delta \tau}} \quad (18)$$

Otrzymane wartości optymalnej prędkości początku procesu wkręcania (18) oraz maksymalna prędkość wyłączenia ω_{k1} , mogą w dalszej kolejności służyć do obliczenia wydajności urządzenia wkręcającego przy zachowaniu warunków niezbędnej dokładności dokręcania.

PIŚMIENNICTWO

1. Nieoczym A.: Modelowanie procesu wkręcania łączników gwintowych – Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, vol. 20, nr 2, 2000, s. 121-131.
2. Nieoczym A.: Wybrane zagadnienia wytrzymałościowe połączeń gwintowych. Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin 2003, ISBN 83-87833-43-6. Monografia.
3. Nieoczym A.: Effect of tightening method on tension in bolts. Tribologia, nr 2, 2005.

4. Szabajkowicz W., Nieoczym A.: Montażowe połączenia gwintowe. **Monografia.** Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2009. ISBN 978-83-7199-560-6.

ENERGY BALANCE OF THE WORK SCREWING-IN HEAD

Summary

The tolerance of turning force is defined by accuracy of calculated parameters which are the function of torque. There are two factors influencing the value of torque: the angle of tightening up the threaded fastener and its angle rigidity. Simulation of a device working circumstances necessitates choosing the optimal speed of turning and tightening up which gives the maximal productivity at given tightening speed. In the real process circumstances the moment of inertia value of the power transmission and working elements influences the tightening phase. The article describes how this parameter influences the value of tightening angle and the influence of the working elements speed stabilization error on a change of tightening angle. The time of tightening optimal criteria with limits related to angular velocity of working elements are shown. The factors influencing the value of torsional rigidity of the threaded fastener are described in the article.

Keywords: screwing impulse, angle of tightening up, angle rigidity, moment of torque.

Ireneusz Zagórski, Paweł Pieško¹⁾

BADANIA PORÓWNAWCZE CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI WYBRANYCH STOPÓW MAGNEZU PO FREZOWANIU NARZĘDZIEM PEŁNOWĘGIKOWYM ORAZ PKD

Streszczenie: W artykule przedstawiono: zastosowanie obróbki frezowaniem, właściwości wybranych stopów Mg, przykłady elementów lotniczych wykonywanych ze stopów Mg, problematykę obróbki oraz skrawalność stopów lekkich w oparciu o dane literaturowe oraz dotychczasowe badania, program oraz metodykę przeprowadzonych badań, podsumowanie, wnioski wynikające z przeprowadzonych badań oraz dane literaturowe.

Słowa kluczowe: frezowanie, stopy magnezu, elementy lotnicze, skrawalność.

WSTĘP

Większość elementów wykonywanych na potrzeby przemysłu lotniczego poddawana jest obróbce frezowaniem. Jako półfabrykaty stosuje się odlewy ciśnieniowe (wykonywane ze stopów Al oraz stopów Mg) lub monolityczne bloki (głównie ze stopów Al), z których wytwarzane są później tzw. elementy kieszeniowe [1, 6]. Frezowanie, np. powierzchni uszczelniających i przylegania [3, 4], stanowi częsty zabieg obróbkowy, wykonywany na odlewach ciśnieniowych ze stopów Mg. Jako narzędzia wykorzystuje się głównie głowice frezarskie lub frezy walcowo-czołowe. Materiałem narzędziowym, w przypadku narzędzi monolitycznych, są głównie węgliki spiekane lub wlutowywane wkładki z polikrystalicznego diamentu. Dotychczasowe badania [2] potwierdziły lepszą skrawalność (ze względu na chropowatość powierzchni) stopów Mg w porównaniu do popularnych stopów Al (3031, 7075, AlSi10Mg). Również z badań własnych [5] wynika lepsza skrawalność stopu AZ31 w porównaniu do stopu AZ91 ze względu na chropowatość powierzchni obrobionej.

WŁAŚCIWOŚCI, ZASTOSOWANIE I PRZYKŁADY WYBRANYCH STOPÓW MG

Stopy magnezu są specyficzną grupą materiałów, które ze względu na niewielką gęstość ($\rho=1,8\text{g/cm}^3$ dla stopu AZ91HP oraz $\rho=1,77\text{g/cm}^3$ dla stopu AZ31) są zaliczane do grupy metali lekkich. Tabela 1 podaje przybliżony skład chemiczny wymienionych stopów Mg.

¹⁾ Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska.

Tabela 1. Skład chemiczny wybranych stopów magnezu [6]

Table 1. The chemical composition of selected magnesium alloys [6]

Gatunek	Skład chemiczny [%]									
	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Si	Fe	Ti	Al	inne
AZ31	0,05	0,2-0,1	reszta	-	0,7-1,3	-	-	-	2,5-3,5	Ca 0,04
AZ91HP	0,016	0,17	reszta	-	0,72	0,03	0,002	-	9,45	Ni 0,025

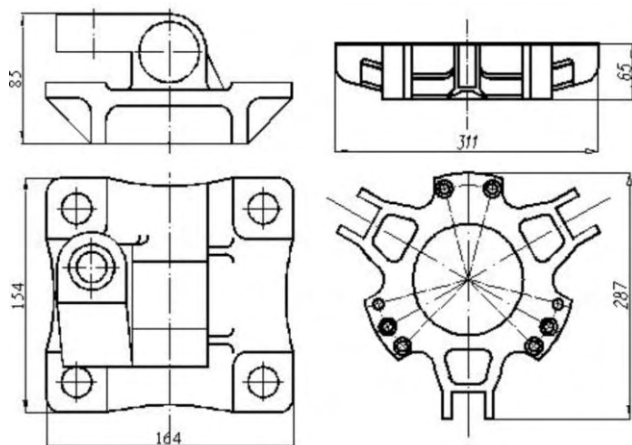
Podstawowe parametry wytrzymałościowe wybranych stopów magnezu są następujące:

1) stop AZ91HP - $R_m=(200-240)\text{MPa}$; $R_{p0,2}=(150-170)\text{MPa}$;

2) stop AZ31 - $R_m=280\text{MPa}$;

Moduł Younga E dla obydwu stopów wynosi ok. 45GPa (w porównaniu dla często stosowanych stopów Al, np. 2024 lub 7075 $E=\text{ok. } 70\text{GPa}$).

Na rys. 1 podano przykładowe elementy wykonywane na potrzeby przemysłu lotniczego, wykonane dla porównania ze stopu Al (7075) oraz stopu Mg (AZ91).



Rys. 1. Przykłady elementów lotniczych: a) wspornik ze stopu Mg, b) część ze stopu Al

PROGRAM I METODYKA BADAŃ

Głównym celem badań było porównanie jednego z użytkowych wskaźników skrawalności, tj. parametrów chropowatości powierzchni, dla wybranych stopów Mg. W badaniach wykorzystano dwa stopy magnezu, stop odlewniczy AZ91HP oraz stop do przeróbki plastycznej AZ31. Są to często stosowane gatunki stopów, zwłaszcza na elementy wykonywane na potrzeby przemysłu lotniczego. Analizowano zmiany takich parametrów jak prędkość skrawania v_c oraz posuw na ostrze f_z , dla dwóch frezów trzpieniowych:

- 1) frez $\varnothing 16\text{mm}$ firmy Fenes - HarndenMetal, z grupy frezów specjalnych VHM do obróbki stopów Al oraz Mg z chwytem walcowym gładkim, wymiary frezu $16 \times 25 \times 100\text{mm}$ W-Z2;

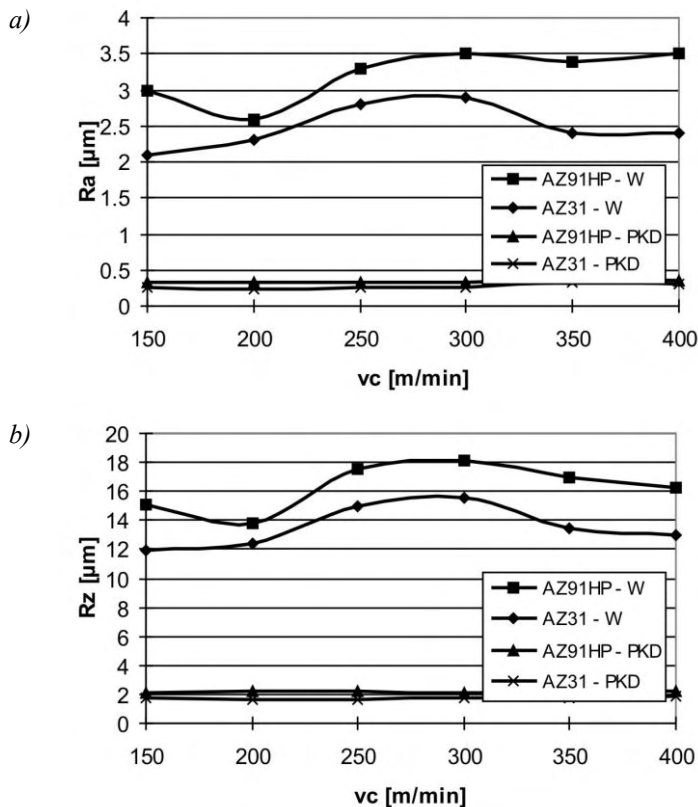
2) frez $\varnothing 16\text{mm}$ firmy Guhring PKD - Fraser WN-R 05492-16,001.

Wymienione frezy są frezami dwuostrzowymi $z=2$.

Obróbkę przeprowadzono na pionowym centrum obróbkowym FV 580A z systemem sterowania Fanuc 0iMC. Do pomiaru chropowatości obrabianych powierzchni wykorzystano profilometr Surtronic3+, firmy Taylor-Hobson. Przy próbie frezowania zastosowano przedziały parametrów: $a_p=6\text{mm}$, $f_z=(0,05-0,3)\text{mm/ostre}$, $v_c=(150-400)\text{m/min}$. Przyjęto również stałą szerokość frezowania $a_e=14\text{ mm}$. Przedstawione wartości parametrów chropowatości są średnią arytmetyczną z pięciu pomiarów tych parametrów.

WYNIKI BADAŃ ORAZ WNIOSKI

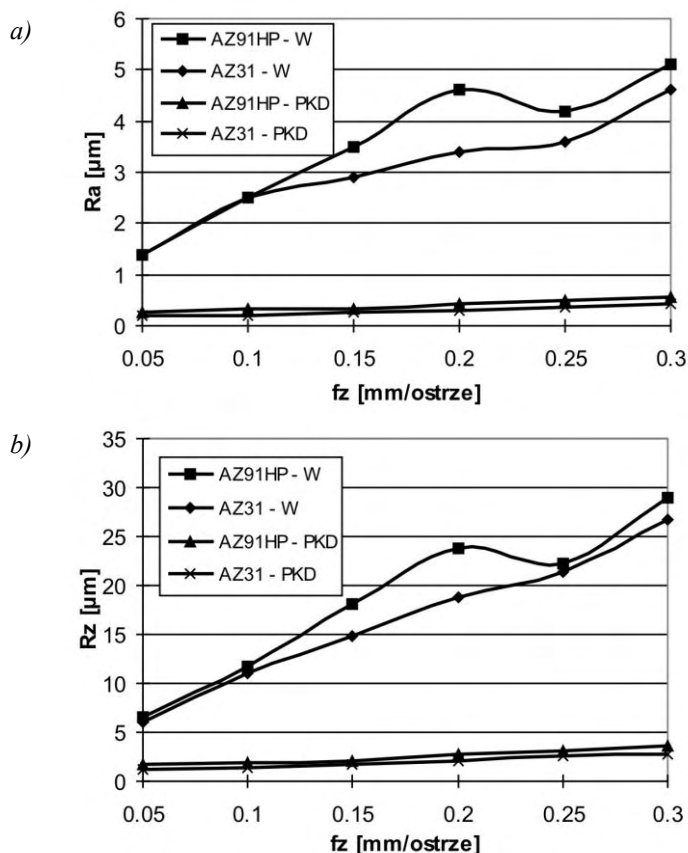
Na podstawie otrzymanych wyników przedstawiono zależności wpływu prędkości skrawania v_c oraz posuwu na ostrze f_z na parametry chropowatości powierzchni, dla obróbki prowadzonej z użyciem frezu pełnowęglkowego firmy Fenes oraz frezu z wlutowanymi wkładkami diamentowymi (PKD) firmy Guhring.



Rys. 2. Wpływ prędkości skrawania V_c na wartość parametrów chropowatości:

a) parametr R_a , b) parametr R_z ; $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$

Rys. 2 przedstawia wpływ prędkości skrawania v_c na wartość parametrów chropowatości: rys. 2a parametru R_a , natomiast rys. 2b parametru R_z . Interesujące jest, iż parametr R_a nie przekroczył wartości $0,5\mu\text{m}$ w przypadku zastosowania narzędzia PKD, oraz w przypadku parametru R_z - ok. $2\mu\text{m}$. Wyższe wartości obydwu parametrów chropowatości uzyskano przy zastosowaniu narzędzia węglkowego. Przy zastosowaniu narzędzia pełnowęglkowego lepszą jakość powierzchni uzyskano dla stopu AZ31. Największą różnicę parametru R_a dla obydwu stopów uzyskano przy prędkości skrawania $v_c=400\text{m/min}$ i wyniosła ona ok. $2\mu\text{m}$, najmniejsza dla prędkości $v_c=200\text{m/min}$ i wyniosła ona $0,5\mu\text{m}$. Dla narzędzia węglkowego parametr R_a nie przekroczył wartości $3,5\mu\text{m}$ dla obydwu stopów oraz $18\mu\text{m}$ w przypadku parametru R_z , również dla zastosowanych dwóch stopów magnezu. Dla przykładu przy prędkości $v_c=400\text{m/min}$ różnica parametru R_a wynikająca z zastosowania różnych materiałów narzędziowych wynosi nawet 4 klasy chropowatości.



Rys. 3. Wpływ posuwu na ostrze f_z na wartość parametrów chropowatości:
a) parametr R_a , b) parametr R_z ; $V_c=300\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$

Większy wpływ na parametry chropowatości powierzchni wykazuje zmiana posuwu na ostrze f_z . Rys. 3 przedstawia wpływ posuwu na ostrze f_z na wartość parametrów chropowatości: rys. 3a parametru Ra, natomiast rys. 3b parametru Rz. Podobnie jak poprzednio znacznie mniejsze wartości parametrów Ra oraz Rz uzyskano stosując narzędzie z płytkami z polikrystalicznego diamentu. Dla posuwu $f_z=0,3\text{mm}$ /ostrze różnica parametrów chropowatości wynikająca z zastosowania różnych materiałów narzędziowych wyniosła 5 klas chropowatości. Przy zmianie posuwu na ostrze f_z (narzędzie pełnowęglkowe) niższymi wartościami parametrów chropowatości charakteryzował się stop AZ31 (podobnie jak w przypadku zmiany v_c). W zakresie posuwu $f_z=(0,05-0,1)\text{mm}$ /ostrze wartości parametru chropowatości Ra pokrywały się dla obu stopów, największa różnica wystąpiła przy wartości posuwu $0,2\text{mm}$ /ostrze i wyniosła ok. $1\mu\text{m}$ (frez węglkowy). W przypadku zmiany posuwu na ostrze f_z parametr Ra nieznacznie przekroczył wartość $5\mu\text{m}$ w całym zakresie zmiany posuwu, parametr Rz nie przekroczył wartości $30\mu\text{m}$ dla obu stopów magnezu, również w całym zakresie zmian parametru posuwu.

Podsumowując, otrzymana chropowatość powierzchni przy zastosowaniu narzędzia z PKD pozwala na uzyskanie jakości powierzchni porównywalnej np. z procesem szlifowania wykańczającego. Zmiany parametrów chropowatości dotyczące obróbki narzędziem z PKD są w zasadzie z technologicznego punktu widzenia nieistotne. Parametry chropowatości powierzchni są jednym ze wskaźników skrawalności. W kolejnych badaniach należałoby uwzględnić stabilność obróbki ze względu na siły skrawania, ich amplitudy, wartość oraz stabilność zmian momentu skrawania, temperatury skrawania, wykonując pomiary zarówno dla obróbki konwencjonalnej jak również wysokowydajnej obróbki szybkościowej.

PIŚMIENNICTWO

1. Kuczaszewski J.: Efektywność wytwarzania elementów lotniczych ze stopów aluminium i magnezu. Komputerowo Zintegrowane Zarządzanie, Oficyna Wyd. Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole 2011, s. 7-18.
2. Matuszak J., Zaleski K.: Badania chropowatości powierzchni i mikrotwardości warstwy wierzchniej wybranych stopów aluminium i magnezu po obróbce frezowaniem. Monografia IV Szkoły Obróbki Skrawaniem, Łódź 2010, s. 349-356.
3. Oczó K.E.: Efektywne skrawanie stopów magnezu, Mechanik 7/2000, s.467 – 474.
4. Oczó K.E.: Rozszerzenie granic stosowalności stopów magnezu, Mechanik 5-6/2009, s.386 – 400.
5. Zagórski I., Kuczaszewski J.: Badania porównawcze skrawalności stopów magnezu AZ 91 HP i AZ 31. Monografia IV Szkoła Obróbki Skrawaniem, Łódź 2010, s. 137-144.
6. Zagórski I., Pieśko P.: Wpływ parametrów technologicznych na wartość wybranych wskaźników skrawalności lotniczych stopów Al oraz Mg. X Międzynarodowa Konfe-

rencja Naukowo-Techniczna, Technologiczne Systemy Informacyjne w Inżynierii Produkcji i Kształceniu Technicznym, czerwiec 2011 (materiały w druku).

COMPARATIVE STUDY OF SURFACE ROUGHNESS OF SELECTED MAGNESIUM ALLOYS AFTER MILLING WITH CARBIDE TOOL AND PKD

Summary:

This article presents: milling application, properties of selected Mg alloys, examples of aviation elements made of Mg alloys, processing problems and machinability of light alloys based on literature data taken from literature sources and previous researches, program and methodology of the research, summary, conclusions and references.

Keywords: milling, magnesium alloys, aviation elements, machinability.

Badania realizowane w ramach Projektu Nr POIG.0101.02-00-015/08 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (POIG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.



**Magdalena Pokrzywa, Rafał Niewiedzielski, Piotr Kula,
Radomir Atraszkiewicz, Sebastian Lipa ¹⁾, Leszek Czechowski,
Jacek Jankowski ²⁾, Tomasz Wajman, Krzysztof Sobczak ³⁾**

NUMERYCZNA ANALIZA PROCESU HARTOWANIA W PIECU RUROWYM Z ZIMNĄ KOMORĄ CHŁODZENIA

Streszczenie: W artykule przedstawiono zagadnienie wymiany ciepła pomiędzy stałym wsadem poddanym uprzednio obróbce cieplno-chemicznej (nawęglanie próżniowe) a przepływającym gazem pod wysokim ciśnieniem. Problem naukowy rozwiązano wykorzystując stworzony w środowisku Delphi, specjalnie dla tego typu zagadnień, zewnętrzny program nadrzędny, umożliwiający połączenie oprogramowania opartego na metodzie objętości skończonej – ANSYS CFX 12.0 i metodzie elementów skończonych – ANSYS 12.0. Do programu zaimplementowane zostały dwa modele: przepływowy i termiczny. Stworzony program pozwala na analizę tempa chłodzenia w każdym punkcie objętości i optymalizację procesu chłodzenia z intensywnie i turbulentnie przepływającym gazem. Dla poprawnego zdefiniowania i modelowania zjawiska wymiany ciepła pomiędzy wsadem a medium chłodzącym stworzono bazę danych materiałowych, obejmującą wielkości fizyczne pozwalające stworzyć model numeryczny uwzględniający przemiany fazowe z tzw. ciepłem utajonym oraz wpływ szybkości chłodzenia na zmiany zachodzące w strukturze detalu. Przy tworzeniu baz materiałowych posłużono się programem JMatPro.

Słowa kluczowe: analiza numeryczna, modelowanie, obróbka cieplna, hartowanie

WSTĘP

O ile stan wiedzy dotyczący teoretycznych aspektów przeprowadzania procesów cieplno – chemicznych jest na ogół znany, o tyle złożoność parametrów fizycznych, mających wpływ na rzeczywisty proces, uzależniona jest od wielu czynników technicznych i technologicznych. W pracy przedstawione zostało rozwiązanie numeryczne tempa chłodzenia w gazie wsadu stalowego po procesie nawęglania próżniowego. W technologii nawęglania próżniowego, kształtowanie warstwy wierzchniej odbywa się w dwóch etapach: pierwszym z nich jest dyfuzyjne nasycanie stali węglem, drugim zaś chłodzenie w gazach. Przy założeniu, iż proces hartowania przebiega przy wyższej szybkości chłodzenia niż krytyczna, wówczas uzyskuje się na powierzchni elementu przemianę martenzytyczną.

¹ Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny, Instytut Inżynierii Materiałowej.

² Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny, Katedra Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji.

³ Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny, Instytut Maszyn Przepływowych.

W wyniku przeprowadzonego procesu świadomie wprowadza się w strukturę powierzchni ściskające naprężenia własne, które korzystnie wpływają na własności wytrzymałościowe i eksploatacyjne wykonywanych detali. Niemniej jednak, generowane podczas obróbki cieplnej naprężenia powodują powstawanie odkształceń w geometrii obrabianego detalu, które w niektórych przypadkach wymagają stosowania dodatkowych zabiegów wykańczających. Usunięcie niepożądanych deformacji jest nie tylko czasochłonne, ale również generuje niepotrzebne koszty. Możliwość przewidywania końcowego efektu, jak również możliwość kontrolowania przeprowadzonego procesu stało się głównym celem poszukiwania właściwego narzędzia symulacji.

Dla większości przypadków kluczowym, decydującym o końcowych właściwościach i geometrii, procesem w obróbce cieplno – chemicznej jest hartowanie [1, 2]. Ograniczenie symulacji do modelowania procesu hartowania miało na celu analizę wpływu szybkości i nierównomierności chłodzenia w gazach na końcową postać elementu. Etap nawęglania uwzględniono jedynie przy tworzeniu złożonej struktury gradientowej o zmiennej zawartości węgla na przekroju wybranego detalu (rozkład węgla). W badaniach modelowych dla poprawnego zdefiniowania środowiska fizycznego, w którym przeprowadzono proces hartowania uwzględniono współczynniki termodynamiczne opisujące przemiany fazowe w stalach, jak również zmiany energii cieplnej przy przejściach fazowych. Wykorzystując znane równanie różniczkowe dla nieustalonego przepływu ciepła (1):

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v(x, y, z, t) \quad (1)$$

gdzie: $T(x, y, z, t)$ – funkcja opisująca pole temperatur,

q_v – objętościowe źródło ciepła,

$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ – ortropowe współczynniki przewodzenia ciepła,

ρ – gęstość,

c – ciepło właściwe.

obliczono rozkład i gradient temperatur wewnątrz analizowanego detalu. Bazując na uzyskanym rozkładzie temperatur dla trójwymiarowego analizowanego przypadku określono wektor odkształceń termicznych w postaci (2):

$$\varepsilon_T = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xT} \\ \varepsilon_{yT} \\ \varepsilon_{zT} \\ \gamma_{xyT} \\ \gamma_{yzT} \\ \gamma_{xzT} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \alpha \Delta T \\ \alpha \Delta T \\ \alpha \Delta T \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

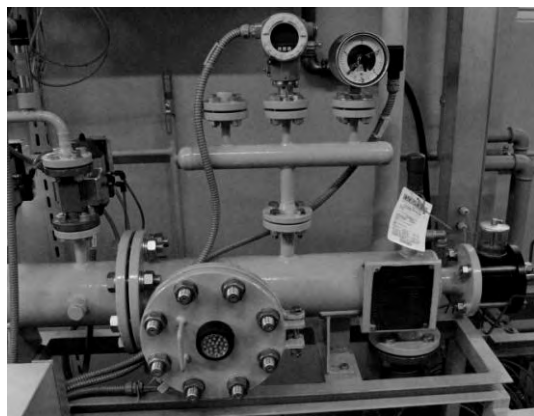
gdzie: α jest liniowym współczynnikiem rozszerzalności termicznej zależnym między innymi od zawartości węgla w strukturze, a ΔT – zmianą temperatury. Do modelowania zjawisk zachodzących wewnątrz detalu użyto metody elementów

skończonych, w których dana wielkość fizyczna jest interpolowana na obszar całej struktury poprzez połączenie wszystkich elementów skończonych węzłami.

MODEL NUMERYCZNY

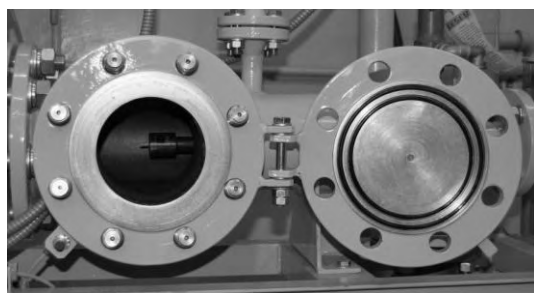
Analiza numeryczna procesu hartowania w urządzeniu laboratoryjnym do obróbki cieplnej z chłodzeniem w gazach pod wysokim ciśnieniem (rys. 1 oraz rys. 2), zwanym ‘piecem rurowym’, wymagała przyjęcia założeń wstępnych zarówno pod względem geometrii wytypowanej do analizy, jak i warunków początkowych i brzegowych.

Geometria przestrzeni komory przyjętej do symulacji, odwzorowuje symetryczny przekrój rzeczywistej komory. Elementem wsadu jest próbka walcowa o wymiarach $\varnothing 25$ mm, $L=150$ mm z warstwą nawęgloną o grubości 0,4 mm, która to podzielona została na 12 warstw.



Rys. 1. Urządzenie laboratoryjne do obróbki cieplnej z chłodzeniem w gazach pod wysokim ciśnieniem

Fig. 1. The laboratory equipment for heat treatment with cooling in gases at high pressure



Rys. 2. Widok komory przyjętej do obliczeń

Fig. 2. Chamber view for calculation purposes

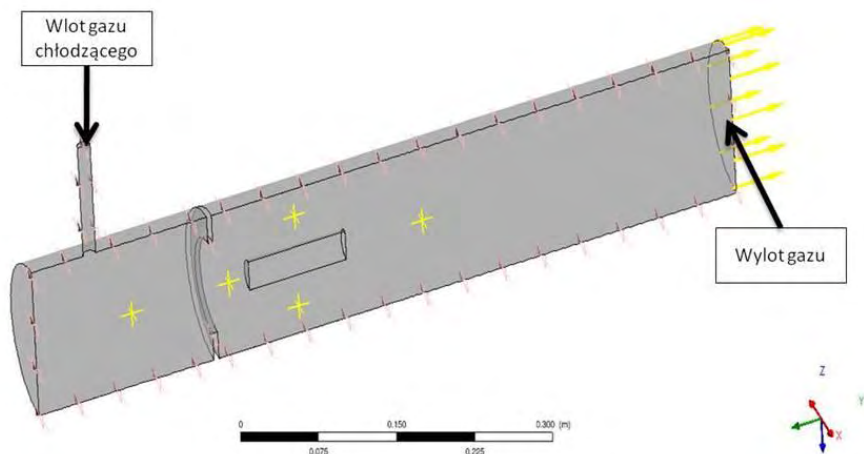
Na podstawie modelu geometrycznego odwzorowującego urządzenie stworzono został model dyskretny oparty o metodę objętości skończonych. W miejscach szczególnie istotnych dla przemian strukturalnych oraz termicznych nastąpiło zagęszczenie siatki [3, 4].

Analizę strukturalną przeprowadzono w programie ANSYS 12.0, natomiast analizę termiczno-przepływową w programie ANSYS CFX 12.0. Podstawą wy-

konania analiz przepływu masy i ciepła w piecu rurowym było wykorzystanie warunków brzegowych zadanych w programie ANSYS CFX 12.0, natomiast podstawą do wykonania analiz strukturalnych, było wykorzystanie warunków brzegowych zadanych w programie ANSYS 12.0 oraz bazy materiałowej wykonanej w oparciu o program JMatPro.

MODEL PRZEPŁYWOWY PROCESU CHŁODZENIA

W programie ANSYS CFX 12.0 stworzona została definicja modelu pieca rurowego (rys.3), w której przyjęte zostały następujące warunki początkowe: ciśnienie gazu chłodzącego $p=2 \times 10^6$ Pa i temperatura hartowania $T=1133,15$ K. Dopływ medium chłodzącego do wnętrza komory hartowniczej realizowany jest przez jeden wlot, usytuowany prostopadłe do komory, natomiast wylot gazu chłodzącego znajduje się na tylnej ścianie pieca.



Rys.3. Model komory ze wsadem – ANSYS CFX

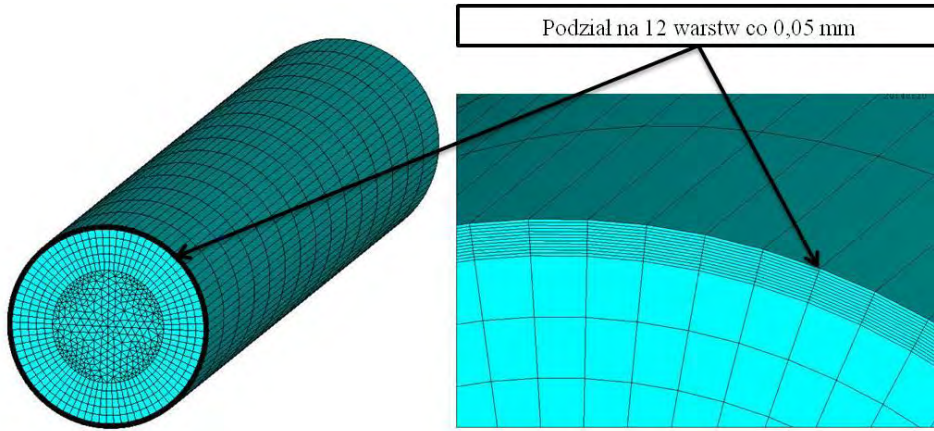
Fig. 3. Chamber model with the steel charge – ANSYS CFX

MODEL STRUKTURALNY PROCESU CHŁODZENIA

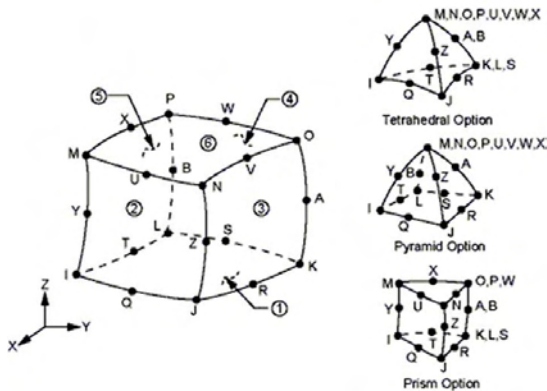
Próbkę walcową o wymiarach 150 x 25 podzielono na elementy skończone elementem typu Solid90/Solid186 (rys. 4). W analizowanej numerycznej próbce wyodrębniono warstwy wierzchnie (warstwa nawęglona – warstwowo zmienia się zawartość węgla) stopniując wysokość elementów wzdłuż promienia co 0,05 mm.

W każdej warstwie przyjęto odpowiednią zawartość węgla wynikającą z rzeczywistej próbki walcowej. Element skończony Solid90 dla analizy termicznej i

Solid186 dla analizy strukturalnej posiada w swojej budowie maksymalnie 20 węzłów (rys. 5) i jest to element trzeciego rzędu [5, 6].



Rys. 4. Model próbki walcowej ANSYS 12.0
Fig. 4. Model of cylindrical samples ANSYS 12.0



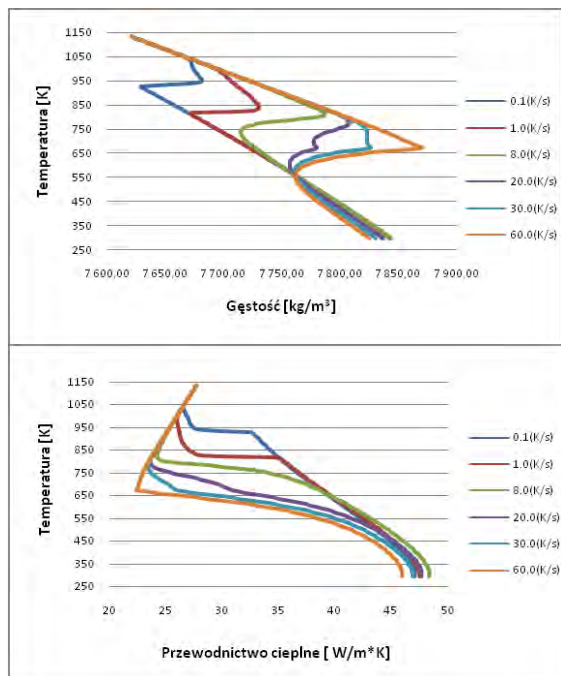
Rys. 5. Dwudziestowęzłowy element typu Solid 90/186
Fig. 5. Twenty-nodal element type Solid 90/186

BAZA MATERIAŁOWA

Zaimportowana baza materiałowa do programu autorskiego zawiera zbiór właściwości materiałowych z procesu chłodzenia dla stali 16MnCr5. W skład tego zbioru wchodzi m.in. takie parametry jak gęstość oraz przewodnictwo cieplne.

Wszystkie dane zostały opracowane i przygotowane w postaci tablic, z których każda odpowiada innej zawartości procentowej węgla. Zmienna zawartość węgla związana jest z dyfuzyjnym nasyceniem węglem warstwy wierzchniej materiału. Dodatkowo każda z tablic uzależnia zmiany poszczególnych właściwości od temperatury oraz szybkości chłodzenia hartowanego elementu wsadu.

W przypadku zawartości procentowej węgla jest to zakres od zawartości w rdzeniu, (0,165%C), przez 0,2%C, aż do 1%C, z krokiem 0,05%. Temperatura zmienia się od 1133,15 K do 298,15 K, z krokiem 5 K.



Rys.6. Wykres zależności gęstości od temperatury dla różnych szybkości chłodzenia

Fig. 6. A graph of the density on temperature for different cooling rates

Rys. 7. Wykres zależności przewodnictwa cieplnego od temperatury dla różnych szybkości chłodzenia

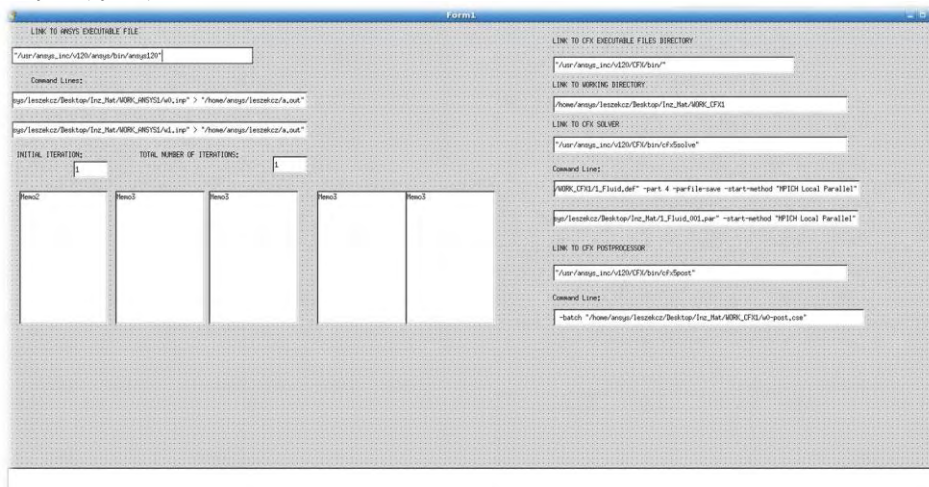
Fig. 7. A graph of the thermal conductivity on temperature for different cooling rates

Szybkość chłodzenia hartowanego materiału, zmienia się w zakresie od 0,1 K/s do 60 K/s. Ma ona pośredni wpływ na daną właściwość, która zależna jest od struktury jaką posiada hartowany materiał. W każdej tablicy znajduje się jednokowy zestaw 27-iu różnych szybkości chłodzenia (rys. 6 oraz rys. 7). Przyjęte wielkości, są ściśle związane z przyjętymi parametrami obróbki cieplno – chemicznej.

ZASTOSOWANE OPROGRAMOWANIE

Do przeprowadzenia symulacji hartowania wielowarstwowej próbki walcowej metodą elementów skończonych wykorzystano programy podrzędne tj. ANSYS CFX 12.0 i ANSYS 12.0. Aby umożliwić wymianę informacji o rozkładzie temperatury i strumienia ciepłego zaadoptowano autorski program napisany w języku Object Pascal w programie Lazarus w środowisku Linux. Program pełni nadrzedną rolę w sterowaniu procesem obliczeń chłodzenia gazowego azotem próbki wykonanej ze stali 16MnCr5 do temperatury 860 °C do temperatury otoczenia 25 °C: uruchamia programy podrzędne wraz z odpowiednimi makrami przygotowanymi w postaci plików tekstowych, archiwizuje informacje o rozkładach temperatur strumieni cieplnych dla każdego elementu skończonego na powierzchni wy-

miany w plikach wymiany informacji, zamienia numerację materiałów dla każdego elementu skończonego, która przypisana została do danego zakresu temperatur i szybkości spadku temperatury w elemencie skończonym w każdym kroku czasowym (rys.8).



Rys.8. Interfejs programu autorskiego
Fig. 8. The program interface copyright

Algorytm obliczeniowy w pierwszym kroku czasowym można przedstawić następująco: jako pierwszy uruchamiany jest Solver programu ANSYS CFX 12.0 wraz z zaimplementowanym modelem do obliczeń (w tym przypadku jest to piec rurowy). W tym czasie program nadrzędny sprawdza, czy Solver wykonał obliczenia. Gdy pojawi się plik rozwiązania program uruchamia CFD – Post 12.0 programu ANSYS CFX 12.0 z odpowiednim makrem do zebrania informacji o rozkładzie temperatury na powierzchni wymiany. Następnie wykonywane są czynności z transferem wartości temperatur do pliku, który będzie służył w dalszym etapie do wprowadzenia ich do elementów skończonych na powierzchni wymiany ANSYS 12.0. W pierwszym kroku czasowym zamiana numeracji materiałów nie jest realizowana. Na koniec uruchamiany jest program ANSYS 12.0. Po wykonaniu obliczeń następuje zapis strumieni cieplnych i szybkości chłodzenia. Ostatnia informacja służy w kolejnym kroku czasowym do zamiany numeracji materiałowej w pliku tekstowym z rozszerzeniem *.cdb.

PODSUMOWANIE

Na podstawie wstępnych symulacji chłodzenia próbki walcowej w ciśnieniu $p=2 \times 10^6$ Pa stwierdzono, iż przepływ medium chłodzącego przez komorę ma charakter silnie turbulentny. Prędkość medium chłodzącego ma duży wpływ na

wartość współczynnika przejmowania ciepła na powierzchni elementu chłodzącego, a w konsekwencji wpływa na odkształcenia badanego elementu.

Numeryczna analiza procesu hartowania w piecu walcowym możliwa jest dzięki stworzeniu bazy materiałowej, która to uwzględnia zależności własności materiałowych poszczególnych faz od temperatury, szybkości chłodzenia hartowanego elementu i zawartość procentową węgla w materiale.

Zaletą stosowania zewnętrznych programów sterujących jest możliwość rozwiązywania złożonych analiz przepływowo – wytrzymałościowych. Innowacyjny sposób połączenia dwóch programów oraz bazy materiałowej za pomocą autorskiego programu pozwoli na wykorzystanie metod numerycznych do optymalizacji procesów obróbki cieplno – chemicznej. Artykuł przedstawia jeden z pierwszych etapów prac nad złożonością analiz numerycznych procesu hartowania z uwzględnieniem przemian fazowych.

PIŚMIENNICTWO

1. Zagrajek T., Krzesiński G., Marek P.: Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji. OWPW Warszawa 2005.
2. Gorockiewicz R., Korecki M., Małdziński L., Olejnik J.: Stan i perspektywy hartowania gazowego na podstawie doświadczeń Seco/Warwick w obszarze obróbki cieplnej stali narzędziowych, HSLA oraz nawęglania próżniowego FineCarb®. MK „Nowoczesne Technologie w Inżynierii Powierzchni”. Spała 10 2006.
3. Pokrzywa M., Atraszkiewicz R., Kula P.: Założenia do analizy wymiany ciepła w procesie chłodzenia w przemysłowej gorącej komorze hartowniczej. Przegląd Mechaniczny. Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego. Warszawa 2010. Nr 12/10, 26-30.
4. Sawicki J., Górecki M.: „Zastosowanie metod numerycznych do analizy zjawisk cieplno-przepływowych procesu chłodzenia elementów o różnych kształtach”. Inżynieria Materiałowa, 2005, nr 5, str. 1207-1210.
5. Czechowski L., Jankowski J., Kubiak T.: Modelowanie procesu hartowania. Mechanik. Agenda Wydawnicza SIMP. Prószków 2010. Nr 7/2010, 484-486.
6. Pacheco P., Souza L.: Modeling of quenching process in steel cylinders, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2007, s. 445-468.

NUMERICAL ANALYSIS OF THE QUENCHING PROCESS IN THE TUBULAR FURNACE WITH COLD COOLING CHAMBER

Summary

The following work presents the issue of heat transfer between the steel charge after vacuum carburizing process and gas which intensively flows through. The external managing program has been created in Delphi environment to solve the scientific research problem, which connect the Finite Volume Method – ANSYS CFX 12.0 with Finite Element Method – ANSYS 12.0. To the program there were implemented two models: flow and thermal. Created program allows to analyze cooling rate at each point of the volume and optimize the cooling process with gas intensively and turbulently flowing

through. For the correct definition and modeling of the phenomenon of the heat transfer between the steel charge and cooling gas, the database of material properties was created, which includes physical quantities that allow to create a numerical model taking into account the so-called phase transitions with latent heat and the influence of the cooling rate to changes in the structure of the detail. Thanks to JMatPro⁴ program, the application of different material properties database of material properties could be applied.

Keywords: numerical analysis, modeling, heat treatment, hardening

⁴ Program firmy Sente Software UK

Emil Sasimowski¹⁾

ZASTOSOWANIE TERMOWIZJI W BADANIACH PROCESU WYTŁACZANIA

Streszczenie: Celem badań było określenie wpływu, na temperaturę otrzymywanej wytłoczyny, współdziałania w układzie uplastyczniającym wytłaczarki ślimaka przetwórczego klasycznego lub specjalnego z tuleją obrotową cylindra. Badania przeprowadzono z zastosowaniem specjalnego stanowiska badawczego wyposażonego w wytłaczarkę jednoślismakową z cylindrem o budowie segmentowej, w którego jednym z segmentów umieszczona została tuleja obrotowa cylindra. Za pomocą kamery termowizyjnej podczas wytłaczania PE-LD przeprowadzono pomiary temperatury otrzymywanej wytłoczyny przy zmiennej szybkości obrotowej dwóch badanych ślimaków przetwórczych oraz zmiennej szybkości tulei obrotowej cylindra. Stwierdzono, że zarówno rozwiązanie konstrukcyjne zastosowanego ślimaka oraz jego szybkość, jak również szybkość tulei obrotowej cylindra ma znaczący wpływ na wartości oraz rozkład temperatury otrzymywanej wytłoczyny.

Słowa kluczowe: badania termowizyjne, temperatura wytłoczyny, wytłaczarka jednoślismakowa, tuleja obrotowa cylindra.

WSTĘP

Termowizja to metoda bezstykowego pomiaru temperatury polegająca na pomiarze promieniowania emitowanego w paśmie zwanym podczerwienią przez każde ciało o temperaturze wyższej niż zero bezwzględne. Natężenie tego promieniowania jest wprost proporcjonalne do temperatury ciała emitującego fale. Efektem pomiaru termowizyjnego jest termogram, czyli wizualizacja pola temperatury powierzchni badanego ciała. Wykorzystywana jest między innymi w zastosowaniach naukowych, medycznych, policyjnych, wojskowych, przy diagnostyce urządzeń mechanicznych, obwodów elektrycznych i budynków [5]. Metoda ta znajduje zastosowanie zwłaszcza przy pomiarze temperatury na powierzchni wytworów oraz elementów maszyn i narzędzi przetwórczych będących w ruchu [6]. W przetwórstwie tworzyw jest stosowana najczęściej do pomiaru temperatury otrzymywanych wytworów oraz narzędzi przetwórczych [4,7-9]. Działanie zastosowanej w omawianych pomiarach kamery termowizyjnej jest następujące. Emitowane przez obiekt promieniowanie podczerwone dociera do układu skanującego kamery, a następnie do układu optycznego, który skupia wiązkę promieniowania

¹ Katedra Procesów Polimerowych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska.

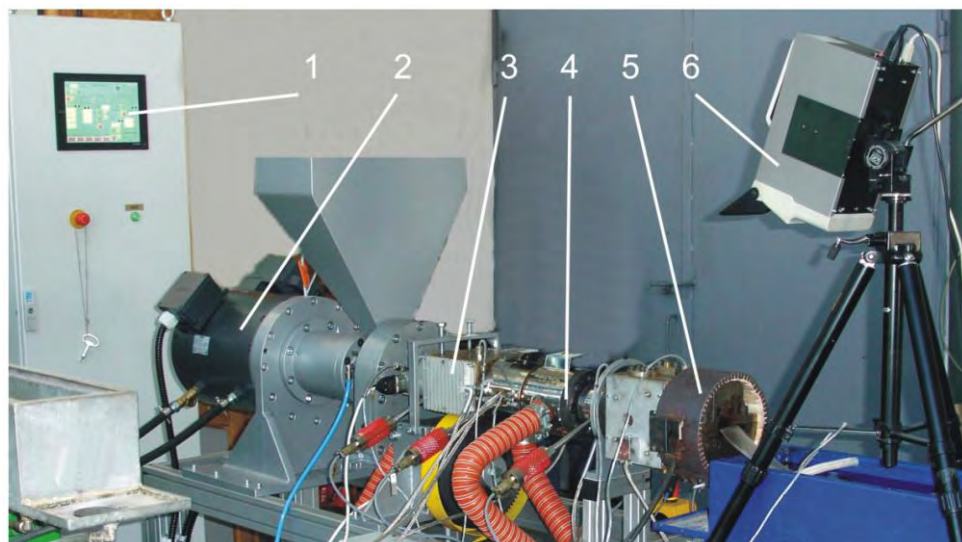
na powierzchni fotoczułej detektora. Detektor przetwarza promieniowanie na impuls prądu elektrycznego, którego parametry, po zamianie na postać cyfrową, są porównywalne z zapisanymi w tablicy kalibracji oraz odpowiadającymi temperaturze odniesienia wbudowanego ciała wzorcowego. W efekcie pomiaru trzymywany jest termogramu barwny.

W omawianych badaniach, metoda termowizyjna została zastosowana do pomiaru temperatury wytłoczyny opuszczającej dyszę głowicy wytłaczarskiej, otrzymywanej z oryginalnego układu uplastyczniającego wyposażonego w tuleję obrotową cylindra [12]. Celem badań było określenie wpływu, na temperaturę otrzymywanej wytłoczyny, współdziałania w układzie uplastyczniającym wytłaczarki ślimaka przetwórczego klasycznego lub specjalnego z tuleją obrotową cylindra. Pomiar temperatury wytłoczyny stanowi bowiem jedno z głównych kryteriów oceny jakości układu uplastyczniającego [1, 3]. Jej wartości zależą od ilości ciepła dostarczonego przez układ ogrzewania cylindra oraz ilości ciepła powstającego w tworzywie w wyniku rozpraszania energii mechanicznej napędu ślimaka [13], a także dodatkowo w badanym układzie uplastyczniającym energii mechanicznej napędu tulei obrotowej cylindra.

STANOWISKO BADAWCZE

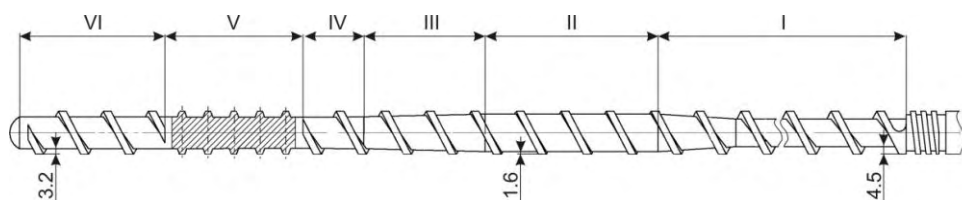
W badaniach zastosowano specjalne stanowisko badawcze (rys. 1) wyposażone w wytłaczarkę jednoślindakową z cylindrem o budowie segmentowej, głowicę wytłaczarską szczelinową płaską, kamerę termowizyjną, układ pomiarowy do zbierania i przetwarzania danych zintegrowany z komputerem oraz szafę sterowniczą. W jednym z segmentów układu uplastyczniającego umieszczona została tuleja obrotowa cylindra o długości $5D$ i średnicy wewnętrznej otworu takiej samej jak pozostałych segmentach cylindra $d = 25$ mm, z sześcioma rowkami prostoliniowymi o przekroju trójkątnym, wykonanymi na jej powierzchni wewnętrznej. W wytłaczarce zastosowano ślimak klasyczny oraz ślimak specjalny, obydwa o średnicy $D = 25$ mm i stosunku $L/D = 24$, przeznaczone do przetwórstwa polietylenu małej gęstości. Ślimak specjalny różnił się od klasycznego m.in. zastosowaniem elementów intensywnego mieszania w postaci pięciu rzędów kołków oraz przesunięciem strefy sprężania w kierunku zasypu. Umieszczenie tulei obrotowej cylindra odpowiadało II strefie ślimaka specjalnego (rys. 2).

W badaniach zastosowano kamerę termowizyjną V-20 II ER005-25 firmy VIGO System S.A. wraz z oprogramowaniem Therm V-20. Kamera ta posiada detektor typu HgCdTe, chłodzony termoelektrycznie oraz rozdzielczość termiczną $0,05$ °C dla temperatury obiektu 30 °C.



Rys. 1. Stanowisko badawcze: 1 – szafa sterownicza, 2 – silnik napędzający ślimak, 3 – segment cylindra z tuleją obrotową, 4 – układ uplastyczniający, 5 – głowica wytłaczarska, 6 – kamera termowizyjna

Fig. 1. The test stand: 1 - control panel, 2 - the engine driving the screw, 3 - segment of the barrel with rotating sleeve, 4 - plasticizing system, 5 - extruder head, 6 - infrared camera



Rys. 2. Ślimak specjalny o średnicy 25 mm i stosunku $L/D = 24$ z elementami intensywnego mieszania; strefy ślimaka: I – zasypu i zasilania, II – sprężania, III – uplastyczniania, IV – rozprężania, V – mieszania, VI – dozowania

Fig. 2. The special screw with a diameter of 25 mm and $L/D = 24$ with the elements of the intensive mixing; screw zones: I – feeding, II – compression, III - plasticizing, IV - decompression, V - mixing, VI - metering

CHARAKTERYSTYKA BADAŃ

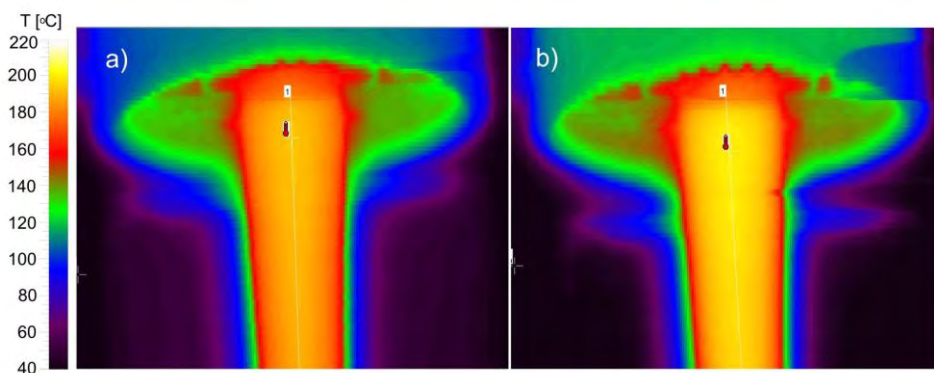
Za pomocą kamery termowizyjnej przeprowadzono pomiary temperatury otrzymywanej wytłoczyny przy zmiennej szybkości dwóch badanych ślimaków przetwórczych oraz zmiennej szybkości tulei obrotowej cylindra. Przeprowadzono pomiary przy ruchu obrotowym badanych ślimaków z szybkością $n_s=1,67$;

5,00 oraz $8,33 \text{ s}^{-1}$ jak również, gdy współdziałały one, z tuleją cylindra obracającą się w kierunku przeciwnym do obrotów ślimaków z szybkością $n_c=1,67$ oraz $3,33 \text{ s}^{-1}$. W czasie pomiarów wytłaczano polietylen małej gęstości w postaci granulatu o nazwie handlowej Malen E oraz symbolu FG NX, 23-D006, produkowany przez firmę Basell Polyolefins S.A. Proces wytłaczania rozpoczynano od nagrzania poszczególnych stref grzejnych układu do zadanej temperatury, którą dobrano zgodnie z wartościami podanymi w literaturze [2, 11] oraz na podstawie doświadczeń własnych. Wynosiła ona odpowiednio $t_I=80^\circ\text{C}$, $t_{II}=160^\circ\text{C}$, $t_{III}=170^\circ\text{C}$, $t_{IV}=180^\circ\text{C}$, $t_V=175^\circ\text{C}$, a temperatura głowicy wytłaczarskiej $t_{VI}=165^\circ\text{C}$ i $t_{VII}=165^\circ\text{C}$. W strefie zasypu chłodzonej wodą, ustalono temperaturę $t_0=40^\circ\text{C}$.

Po ustaleniu szybkości ślimaka i tulei obrotowej cylindra oraz ustabilizowaniu się procesu wytłaczania, co następowało w stopniu zadowalającym, w większości przypadków po upływie około 10 do 20 minut, przeprowadzano rejestrację termogramów otrzymywanej wytłoczyny w sześciu następujących bezpośrednio po sobie powtórzeniach. Następnie na ich podstawie za pomocą oprogramowania Therm V-20 otrzymywano termogram uśredniony, który służył dalszym analizom.

WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

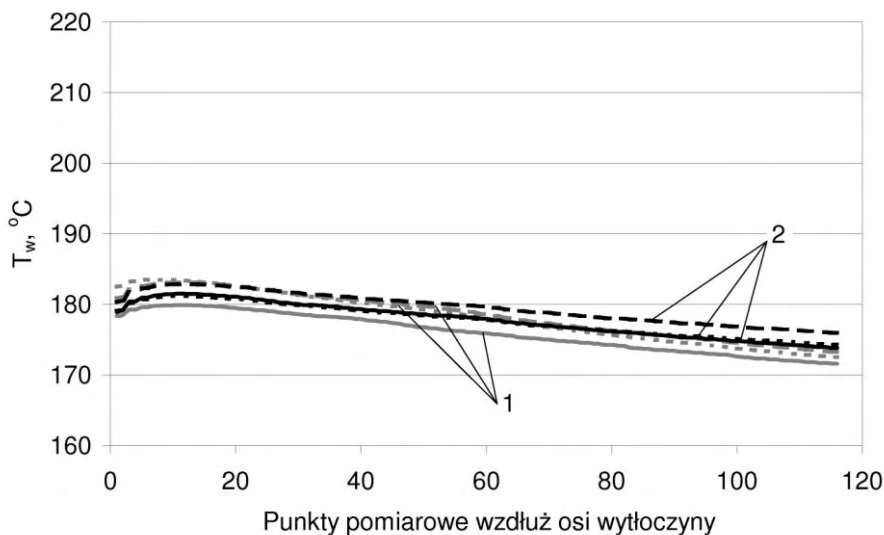
Analizie poddano rozkład temperatury wzdłuż linii pomiarowej - pokrywającej się z osią wzdłużną wytłoczyny, oznaczonej na termogramie (rys. 3a). Na oddzielnych rysunkach 4÷6 zostały przedstawione w postaci graficznej wyniki otrzymane przy trzech badanych wartościach szybkości ślimaka klasycznego jak i specjalnego, zarówno z nieruchomą jak i obracającą się kierunku przeciwnym do obrotów ślimaków tuleją cylindra.



Rys. 3. Termogram wytłoczyny otrzymanej przy szybkości ślimaka klasycznego $n_s=5,00\text{s}^{-1}$, gdy: a) tuleja obrotowa cylindra jest nieruchoma, b) tuleja cylindra obraca się z szybkością $n_c=3,33\text{s}^{-1}$

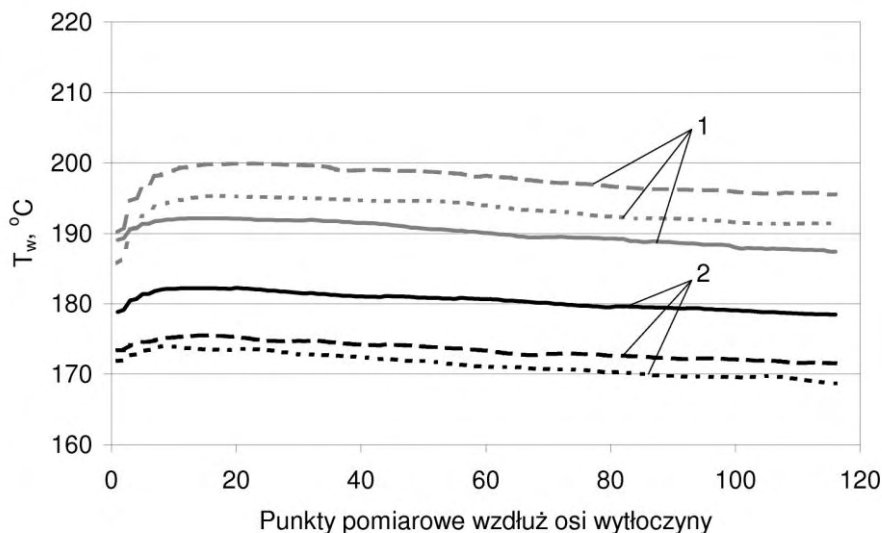
Fig. 3. The thermogram of extrudate obtained at a classical screw speed of $n_s=5,00\text{s}^{-1}$, where: a) rotating barrel sleeve is stationary, b) barrel sleeve rotates at $n_c=3,33\text{s}^{-1}$

Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że zwiększenie szybkości ślimaka klasycznego powoduje znaczący wzrost temperatury otrzymywanej wytłoczyny T_w . W przypadku zwiększenia szybkości ślimaka od $1,67\text{s}^{-1}$ do $5,00\text{s}^{-1}$ a następnie $8,33\text{s}^{-1}$ maksymalna wartość temperatury wytłoczyny zwiększyła się odpowiednio o 12°C i 23°C , ze 180°C do 192°C i 203°C . Wprawienie w ruch tulei obrotowej cylindra współdziałającej ze ślimakiem klasycznym powodowało także zwiększenie temperatury otrzymywanej wytłoczyny. Przy najmniejszej z badanych szybkości ślimaka $1,67\text{s}^{-1}$ tuleja cylindra obracająca się z szybkością $1,67\text{s}^{-1}$ oraz $3,33\text{s}^{-1}$ powoduje taki sam wzrost maksymalnej temperatury wytłoczyny o 3°C do 183°C . Podczas obrotów ślimaka klasycznego z większą szybkością $5,00\text{s}^{-1}$ wraz ze zwiększeniem szybkości tulei wzrastała również maksymalna temperatura wytłoczyny odpowiednio o 3°C i 5°C (do 195°C a następnie 200°C). Także przy największej badanej szybkości ślimaka klasycznego $8,33\text{s}^{-1}$ oddziaływanie tulei obrotowej z szybkością $1,67\text{s}^{-1}$ oraz $3,33\text{s}^{-1}$ powodowało wzrost maksymalnej temperatury wytłoczyny o 2°C i 9°C (od 202°C do 204°C , a następnie 211°C). Podobny charakter zmian zaobserwowano porównując wartości średnie temperatury wytłoczyny w analizowanych przypadkach.



Rys. 4. Temperatura wytłoczyny T_w otrzymanej z zastosowaniem: 1 - ślimaka klasycznego, 2 - ślimaka specjalnego, obracających się z szybkością $n_s=1,67\text{s}^{-1}$, oraz tulei obrotowej cylindra, nieruchomej - linie ciągłe, obracającej się z szybkością $n_c=1,67\text{s}^{-1}$ - linie punktowe, $n_c=3,33\text{s}^{-1}$ - linie przerywane

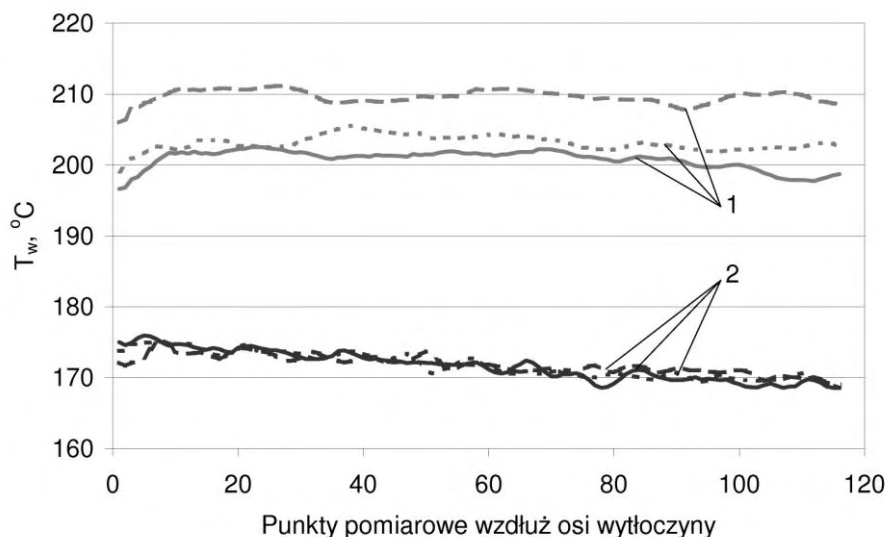
Fig. 4. The temperature T_w of extrudate obtained using: 1 - classical screw, 2 - special screw, rotating speed of $n_s=1,67\text{s}^{-1}$, and rotational sleeve of the barrel, stationary - solid lines, rotating speed of $n_c=1,67\text{s}^{-1}$ - point lines, $n_c=3,33\text{s}^{-1}$ - dashed lines



Rys. 5. Temperatura wytłoczyny T_w otrzymanej z zastosowaniem 1 - ślimaka klasycznego, 2 - ślimaka specjalnego, obracających się z szybkością $n_s=5,00 \text{ s}^{-1}$ oraz tulei obrotowej cylindra, pozostałe oznaczenia jak na rys. 4

Fig. 5. The temperature T_w of extrudate obtained using: 1 – classical screw, 2 – special screw, rotating speed of $n_s=5,00 \text{ s}^{-1}$, and rotational sleeve of the barrel, other symbols as in figure 4

Zwiększanie szybkości zastosowanego ślimaka specjalnego powoduje natomiast obniżanie się temperatury otrzymywanej wytłoczyny w wyniku przeważającego wzrostu natężenia przepływu tworzywa przetwarzanego nad generowaniem w nim ciepła tarcia. Przy szybkości tego ślimaka $1,67 \text{ s}^{-1}$ oraz $5,00 \text{ s}^{-1}$ wartość maksymalnej temperatury wytłoczyny wynosiła 182°C , ale zwiększenie szybkości do $8,33 \text{ s}^{-1}$ spowodowało obniżenie jej wartości o 6°C do 176°C . Tuleja obrotowa cylindra współdziałająca ze ślimakiem specjalnym obracającym się z szybkością $1,67 \text{ s}^{-1}$ nie powodowała wyraźnych zmian temperatury otrzymywanej wytłoczyny. Wówczas gdy tuleja cylindra obracająca się z szybkością $1,67 \text{ s}^{-1}$ oraz $3,33 \text{ s}^{-1}$ współdziałała ze ślimakiem specjalnym obracającym się z szybkością $8,33 \text{ s}^{-1}$ nie stwierdzono wyraźnego jej wpływu na zmianę temperatury otrzymywanej wytłoczyny. W przypadku największej szybkości ślimaka $8,33 \text{ s}^{-1}$ zarówno specjalnego jaki i klasycznego, zaobserwowano natomiast znaczną zmienność temperatury wytłoczyny – niejednorodność pola temperatury, co może świadczyć o pogorszeniu się ujednorodnienia cieplnego tworzywa wytłaczanego. Zaś przy szybkości $1,67 \text{ s}^{-1}$ oraz $5,00 \text{ s}^{-1}$ ślimaka klasycznego i specjalnego, z nieruchomą, jak i obracającą się tuleją cylindra, temperatura otrzymywanej wytłoczyny ulegała równomiernemu obniżaniu wzdłuż linii pomiarowej pokrywającej się z jej osią wzdłużną.



Rys. 6. Temperatura wylłoczyny T_w otrzymanej z zastosowaniem 1 – ślimaka klasycznego, 2 – ślimaka specjalnego, obracających się z szybkością $n_s=8,33 \text{ s}^{-1}$ oraz tulei obrotowej cylindra, pozostałe oznaczenia jak na rys. 4

Fig. 6. The temperature T_w of extrudate obtained using: 1 – classical screw, 2 – special screw, rotating speed of $n_s=8,33 \text{ s}^{-1}$, and rotational sleeve of the barrel, other symbols as in figure 4

PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów stwierdzono, że zarówno rodzaj zastosowanego ślimaka przetwórczego, jak i jego szybkość oraz szybkość tulei obrotowej cylindra ma znaczny wpływ na temperaturę otrzymywanej wylłoczyny. Zwiększanie szybkości ślimaka klasycznego powoduje znaczący wzrost temperatury wylłoczyny w wyniku generowania ciepła w przetwarzanym tworzywie, co występuje szczególnie intensywnie przy współdziałaniu tego ślimaka z tuleją obrotową cylindra. W przypadku zastosowanego ślimaka specjalnego zwiększanie jego szybkości powoduje natomiast obniżanie się temperatury otrzymywanej wylłoczyny w wyniku przeważającego wzrostu natężenia przepływu tworzywa nad generowaniem ciepła w tworzywie. Oddziaływanie tulei obrotowej cylindra, w zależności od szybkości ślimaka specjalnego, powoduje obniżanie temperatury otrzymywanej wylłoczyny lub też nie ma znaczącego wpływu na jej wartości.

Można uznać za celowe podjęcie kontynuacji przeprowadzonych badań, w których zostałyby określony wpływ cech geometrycznych powierzchni wewnętrznej tulei obrotowej, oraz jej umiejscowienia w układzie uplastyczniającym na temperaturę otrzymywanej wylłoczyny.

PIŚMIENNICTWO

1. Anders S., Brunner D.: Plaste und Kautschuk 320, 27, 1980.
2. Hansen F., Knappe W., Potente H.: Handbuch der Kunststoff-Extrusionstechnik. II Extrusionsanlagen, Carl Hanser Verlag, München – Wien 1986.
3. Hansen F., Knappe W., Potente H.: Handbuch der Kunststoff-Extrusionstechnik. I Grundlagen, Carl Hanser Verlag, München – Wien (1989).
4. Klepka T., Samujło B.: The analysis of extrudate cooling in the extrusion process. PPS Europe/Africa Regional Meeting 2007, Gothenburg, Sweden 2007
5. Madura H. i inni: Pomiary termowizyjne w praktyce. Pomiary Automatyka Kontrola. Agenda wydawnicza Paku, Warszawa 2004.
6. Praca zbiorowa pod red. Sikory R.: Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych, podstawy logiczne, formalne i terminologiczne. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2006.
7. Samujło B.: Metoda termowizji w badaniu uniepalnienia PE-HD. Przetwórstwo Tworzyw 2004, 10, 100.
8. Samujło B.: Study of HDPE Flammability by Thermovision Method. The Polymer Processing Society 2004 Annual Meeting and 20th Anniversary Celebration, Akron, Ohio, USA, 119.
9. Samujło B.: Selected aspects of thermovision in extrusion process. ICPP-2007, International Conference on Polymer Processing, Buct Beijing, Chiny 2007, 126.
10. Sasimowski E., Sikora J.W.: Wybrane badania termowizyjne procesu wytłaczania, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Chemia z. 20, Przetwórstwo Tworzyw Polimerowych, Rzeszów 2009, s. 137.
11. Sikora R.: Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych, Wydawnictwo Edukacyjne, Warszawa 1993.
12. Sikora R., Sikora J.W.: Patent polski nr 185728 (2003).
13. Stasiak J.: Wytłaczania tworzyw polimerowych, Zagadnienia wybrane, Wydawnictwo Uczelniane Uniwersytetu Techniczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, Bydgoszcz 2007.

THE USE OF INFRARED IN THE EXTRUSION PROCESS STUDIES

Summary:

The aim of this study was to determine the effect, the temperature obtained extrudate, interaction in the plasticizing system of extruder the classical screw as well as special screw with rotating sleeve of the barrel. Research was conducted on a special test stand equipped with an extruder with a cylinder on the construction segment, in which one of the segments was placed in the rotating sleeve of the barrel. Using the infrared camera during extrusion of LDPE were obtained extrudate temperature measurements at variable speed the processing of two sample screws and variable rotational speed of the barrel sleeve. It was found that both the design solution used screw and its speed as well as the rotational speed of the barrel sleeve has a significant impact on the value and the temperature distribution obtained extrudate.

Keywords: thermal studies, temperature of extrudate, single screw extruder, rotational sleeve of the barrel.

Monika Kulisz¹⁾

IDENTYFIKACJA I WERYFIKACJA MODELU OBIEKTU DYNAMICZNEGO NA PRZYKŁADZIE PROCESU FREZOWANIA

Streszczenie: Przedstawiony w pracy proces jest obiektem dynamicznym, którego proces identyfikacji przeprowadzono za pomocą modelu „czarnej skrzynki”. W tym celu użyto narzędzia System Identification Toolbox w środowisku Matlab. Przeprowadzono identyfikację modelu poprzez estymację struktury i parametrów modelu. Porównano zgodność różnych postaci modeli.

Słowa kluczowe: frezowanie, identyfikacja systemu, model „czarnej skrzynki”, obiekt dynamiczny.

WSTĘP

Proces frezowania jest technologią obróbki skrawaniem szczególnie często stosowaną w przemyśle motoryzacyjnym i lotniczym do obróbki przedmiotów o skomplikowanych kształtach. W celu poprawy wydajności stosowane są duże szybkości skrawania, przy zachowaniu założonej dokładności i powtarzalności obróbki. Przy obróbce wysokowydajnościowej pojawia się problem oddziaływania dynamicznego sił skrawania, które powodują odchylenia od założonego przez technologa toru narzędzia [1, 2]. Jest to szczególnie widoczne dla przedmiotów o zmiennej sztywności. Rozwiązaniem takiego problemu mogłaby być obróbka w obszarach o małej sztywności przy zmniejszonych parametrach skrawania, jednakże zmniejszona by była wydajność obróbki. Zatem nie jest to rozwiązanie optymalne. Innym rozwiązaniem jest potraktowanie procesu frezowania jako obiektu sterowania w którym wielkością regulowaną będzie błąd kształtu przedmiotu powodowany odkształceniem sprężystym w trakcie frezowania. Projektując proces sterowania należy poznać własności procesu sterowanego. Można tego dokonać przez budowę modelu procesu frezowania. Istotnym wyjściem z procesu z punktu widzenia technologa są wartości odchylenia od toru narzędzia czyli błędy wymiaru utrwalone w geometrii wyrobu. Wartości tych błędów są mierzalne dopiero jako odchyłki od wymiaru nominalnego przedmiotu po obróbce. Na odchylenia od toru narzędzia w procesie frezowania ma wpływ geometria przedmiotu oraz składowa siła skrawania, skierowana prostopadle do przedmiotu obrabianego, jednak jest ona trudno mierzalna. Gdy obrabiany przedmiot ma zmienną

¹ Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska.

geometrię to wraz z nią zmienia się sztywność przedmiotu, a co za tym idzie zmienia się tor narzędzia.

Błąd geometrii toru narzędzia będzie zależał, w każdym kolejnym punkcie, od bieżącej sztywności układu narzędzie- przedmiot obrabiany, bieżącego tłumienia, masy zastępczej oraz wartości chwilowej siły skrawania. Biorąc pod uwagę, że z natury procesu frezowania wynika pulsacja siły skrawania związana funkcyjnie z liczbą ostrzy i prędkością obrotową freza, na powierzchni przedmiotu nastąpi odwzorowanie efektów tego zjawiska. Intensywność tego odwzorowania zależy od bieżących właściwości dynamicznych procesu. W celu poznania i analizy właściwości tak złożonego modelu podjęto próbę identyfikacji modeli w kilku wybranych punktach toru narzędzia różniących się sztywnością przedmiotu obrabianego. Zbieranie danych do modelu budowanego na podstawie eksperymentu polega na wykonaniu kilku cykli obróbkowych. Przy każdym cyklu w określonych krótkich odcinkach toru narzędzia rejestrowana jest siła skrawania i dla tych samych odcinków mierzona jest wartość powstałych błędów na przedmiocie. Długość odcinków pomiarowych musi być tak dobrana, aby można było pominąć błąd niestacjonarności procesu.

PRZEDMIOT BADAŃ

W niniejszej pracy zamodelowano proces frezowania przy założeniu, że znane są parametry skrawania, które odpowiednio wynoszą: $V_c=251\text{m/min}$, $f_z=0,05\text{mm/ostre}$, $n=5000\text{obr/min}$, $a_p=6\text{mm}$, liczba ostrzy freza $z=4$ oraz efekty obróbki w określonych punktach przedmiotu obrabianego.

Wstępną analizę statyczną odkształceń przedmiotu poddanego frezowaniu wykonano w programie Abaqus Student Edition. Na podstawie danych materiałowych i parametrów obróbki określone zostały przemieszczenia punktów toru narzędzia pod wpływem statycznych wartości sił skrawania. Przedmiot ma zmienną geometrię, zatem w każdym punkcie zmienia się jego sztywność. Zmiana sztywności powoduje zmianę toru narzędzia co zostało przedstawione na rys.1. W wyniku analizy zjawisk zachodzących podczas frezowania można postawić tezę, że proces frezowania nie można analizować statycznie, należy badać proces jako obiekt dynamiczny, ponieważ przy obróbce wysokowydajnościowej pojawiają się oddziaływania dynamiczne sił skrawania. Siły te powodują dodatkowe odchylenia od założonego toru narzędzia. Tezę tą można udowodnić porównując wyniki błędu toru narzędzia uzyskane z symulacji w programie Abaqus z wynikami symulacji dla modeli dynamicznych w tych samych punktach.

IDENTYFIKACJA I WERYFIKACJA MODELU OBIEKTU DYNAMICZNEGO W ŚRODOWISKU MATLAB

Identyfikacja systemu jest procesem iteracyjnym, w którym porównywane są modele z różnymi strukturami danych i porównywana jest ich zgodność. Rozpo-

czyna się od oszacowania parametrów prostych modeli strukturalnych. Jeśli adekwatność modelu jest niezadowalająca, stopniowo zwiększana jest złożoność struktury modelu. Ostatecznie wybierany jest najprostszy model najlepiej opisujący dynamikę systemu. Inną przyczyną rozpoczynania od modeli prostych jest to, że bardziej złożone modele są nie zawsze bardziej dokładne. Poza tym zwiększanie złożoności modelu zwiększa niepewność oszacowania parametrów i wymaga więcej danych, które są wspólne dla modeli nieliniowych [5].

Użytecznym oprogramowaniem do identyfikacji systemu jest środowisko Matlab, a dokładniej narzędzie: System Identification Toolbox [4], które na podstawie zarejestrowanych sygnałów wejścia i wyjścia, proponuje najlepiej dopasowane równanie dynamicznego modelu.

Identyfikację modelu dynamicznego można podzielić na 2 etapy. Pierwszy to estymacja struktury i parametrów modelu, drugi to weryfikacja modelu.

Identyfikację modelu dynamicznego przeprowadzono w środowisku obliczeniowym Matlab. Biorąc pod uwagę złożoność obiektu dynamicznego wykorzystano do budowy modelu model „czarnej skrzynki”. W oparciu o zmieniające się odcinkach pomiarowych parametry wejścia (wartość siły skrawania) i wyjścia (uzyskane przemieszczenie) konstruowano model. Pakiet System Identification zawiera wiele funkcji do identyfikacji modeli parametrycznych [4]. Do identyfikacji obiektu wybrano model ARX. Przeanalizowano kilka fragmentów toru o różnej sztywności i wyniki przedstawiono dla jednego z nich. Za pomocą polecenia `arxstruc`, które oblicza funkcję strat V , przeszukano szeregi struktur rzędu 1:5, z opóźnieniami 1:3. Następnie wybrano tę strukturę, która ma najmniejszą funkcję strat, czyli $nn = 8 \ 3 \ 1$. Oznacza to, że w przeszukanych modelach najmniejszą funkcję strat ma model z ośmioma biegunami, dwoma zerami, o opóźnieniu rzeczywistym $nk=1$. Obliczono model nn : `model1` w postaci:

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t), \quad (1)$$

gdzie: $A(q) = 1 - 1.659 q^{-1} + 0.8016 q^{-2} - 0.07987 q^{-3} - 0.2749 q^{-4} + 0.2723 q^{-5} - 0.2904 q^{-6} + 0.2288 q^{-7} + 0.02851 q^{-8}$, zaś $B(q) = 1.502e-006 q^{-1} + 4.497e-007 q^{-2} + 1.763e-006 q^{-3}$.

Do celów porównawczych obliczono inne modele. Model `pem`, to ogólny model, który nie wymaga deklarowania a priori rzędu modelu. Struktura jest poszukiwana automatycznie metodą błędu predykcji. Obliczono drugi model: `model2 pem` o następującej postaci:

$$x(t+Ts) = A x(t) + B u(t) + K e(t) \quad (2)$$

$$y(t) = C x(t) + D u(t) + e(t) \quad (3)$$

gdzie:

$$A = \begin{bmatrix} 0.98612 & -0.081762 \\ 0.11464 & 1.0008 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -7.6636e-6 \\ -4.3963e-5 \end{bmatrix}$$

$$C = [0.80507 \quad -0.14566]$$

$$D = 0$$

$$K = \begin{bmatrix} 1.4386 \\ -2.5415 \end{bmatrix}$$

$$x(0) = \begin{bmatrix} 0.10896 \\ -0.022165 \end{bmatrix}$$

Trzeci model to armax: model3=armax w postaci:

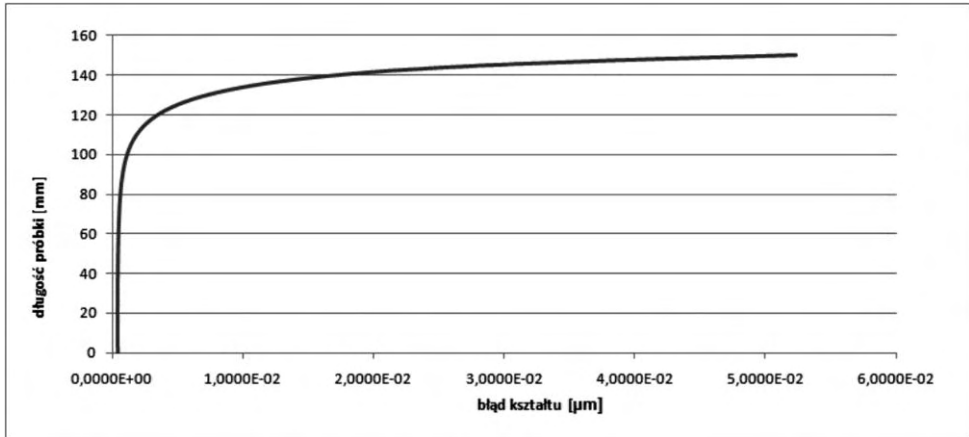
$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + C(q)e(t) \quad (4)$$

gdzie:

$$A(q) = 1 - 1.987 q^{-1} + 0.9963 q^{-2},$$

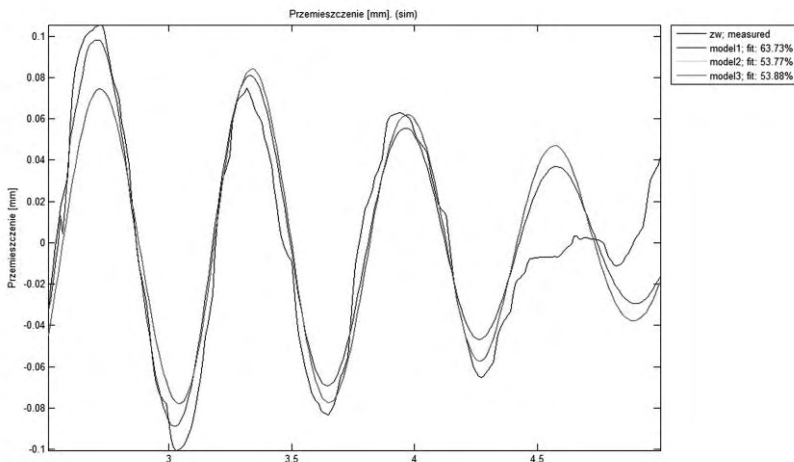
$$B(q) = 2.575e-007 q^{-1} + 2.837e-006 q^{-2},$$

$$C(q) = 1 - 0.4597 q^{-1} - 0.381 q^{-2}.$$



Rys. 1. Wynik symulacji analizy błędu kształtu pod wpływem siły statycznej w programie Abaqus Student Edition

Fig. 1. Error's shape analysis simulation result under the influence of the static force in The Abaqus Student Edition

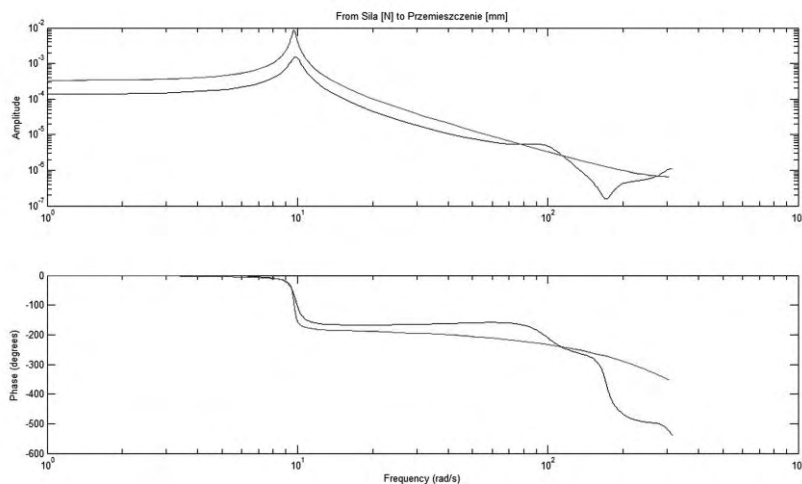


Rys. 2. Przebieg sygnału na wyjściach kolejnych modeli

Fig. 2. The signal's course on the subsequent models outputs

Kolejny etap to weryfikacja modeli, porównano je w dziedzinie czasu i częstotliwości. Na początku wizualnie sprawdzana jest zgodność wyjścia modelu z rzeczywistym pomiarem: przy pomocy funkcji `compare(zw, model0, model1, model2)` [6]. Wykresy przedstawiono na rys.2.

Dla każdego modelu sprawdzono wizualnie niepewność modelu, obserwując granice rozrzutu parametrów w przedziale równym trzykrotnej wartości odchylenia standardowego oraz sprawdzić czy reszty spełniają test białości (próbki nie powinny wychodzić poza zaznaczony obszar). Porównano modele w dziedzinie częstotliwości, obliczając transmitancję widmową obiektu i porównując z nią charakterystyki amplitudowo-fazowe (wykresy Bodego) modeli (rys.3).



Rys. 3. Porównanie charakterystyki amplitudowo-fazowej z widmem pomiarowym.

Fig. 3. Comparison of amplitude-phasing characteristic with the measurement spectrum

Porównanie charakterystyki amplitudowo-fazowej z widmem pomiarowym pokazuje niekorzystne skutki przewymiarowania modelu. Jeśli niezgodność pojawia się na końcu pasm, należy odfiltrować dane lub wypróbować model niższego rzędu. Często model ma rozbieżności przy wysokich częstotliwościach, zmniejszenie rzędu modelu zmniejsza tę rozbieżność.

PODSUMOWANIE

Wyniki dla analizy statycznej i dynamicznej są zgodne tylko dla zerowej amplitudy. Dla maksymalnej amplitudy przemieszczenia są do trzech razy większe. Oznacza to, że dany obiekt należy analizować jako obiekt dynamiczny. Wartość błędów geometrycznych rośnie wraz z częstotliwością wymuszeń siłowych. Wzrost ten jest jednak zróżnicowany dla odcinków pomiarowych o różnej sztywności obrabianego przedmiotu. Model statyczny nie odzwierciedla rzeczywistości, ponieważ pojawiają się siły dynamiczne, których nie uwzględnia. Na odchylenia

od toru narzędzia w procesie frezowania tego przedmiotu ma wpływ zmienna geometria przedmiotu, więc i jego sztywność oraz oddziaływanie dynamicznych sił skrawania, ponieważ proces frezowania nie jest procesem ciągłym. Trudne jest opisanie dynamiki procesu, ponieważ dla danego przedmiotu sztywność elementu zmienia się w każdym punkcie. Poza tym zmienna sztywność jak i zmienna siła skrawania może powodować powstawanie drgań w układzie. Uzyskane z procesu identyfikacji modele będą mogły być wykorzystane do konstruowania systemu adaptacyjnego sterowania procesem frezowania. Przewidując zmianę własności obiektu regulowanego, będzie można dla kolejnych punktów toru narzędzia zmieniać własności regulatora, tak aby kompensował precyzyjniej błędy kształtu w kolejnej chwili na podstawie wcześniejszych pomiarów siły skrawania. Bezpośrednim wejściem sterującym procesem może być zmiana położenia frezu względem toru skierowana przeciwnie do zakłócenia. Zmiana taka może być zrealizowana przy pomocy zespołów posuwowych frezarki.

PIŚMIENNICTWO

1. Tang W.X., Song Q.H., Yu S.Q., Sun S.S., Li B.B., Du B. Ai X.: Prediction of chatter stability in high-speed finishing end milling considering multi-mode Dynamics. *Journal of Materials Processing Technology*, V.209, I. 5, marzec 2009, s. 2585-2591.
2. Yih-fong T., Ming-der J.: Dimensional quality optimisation of high-speed CNC milling process with dynamic quality characteristic. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, V. 21, I.6, grudzień 2005, s. 506-517.
3. Czemplik A.: Modele dynamiki układów fizycznych dla inżynierów, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008.
4. Ljung L.: System Identification Toolbox 7. User's Guide, MathWorks, 2010.
5. Soderstrom T., Stoica P.: Identyfikacja systemów, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1997.
6. Zimmer A., Englot A.: Identyfikacja obiektów i sygnałów. Teoria i praktyka dla użytkowników Matlab, Politechnika Krakowska, Kraków 2005.

IDENTIFICATION AND VERIFICATION OF DYNAMIC OBJECT MODEL ON THE EXAMPLE OF THE MILLING PROCESS

Summary:

The object discussed in the present paper is dynamic. Its identification process was conducted with the use of a "black box" model. For this purpose The System Identification Toolbox in the Matlab environment has been used. The model identification was carried out due to the model structure and parameters' estimation. As a result, various models' forms was compared.

Keywords: milling, system identification, "black box" model, dynamic object.

Maciej Włodarczyk ¹⁾

ANALIZA WPŁYWU SIŁ SKRAWANIA ORAZ ZAMOCOWANIA NA POZIOM NAPRĘŻEŃ W ASPEKcie GRUBOŚCI ŚCIANEK WYBRANEJ KONSTRUKCJI KIESZENIOWEJ

Streszczenie: W pracy przedstawiono fragment pracy dotyczącej symulacji wpływu sił obróbki oraz zamocowania na postać odkształceń oraz rozkład naprężeń w wybranej konstrukcji kieszeniowej. Przedstawiono wpływ zmiany grubości ścianek na wartość naprężeń zredukowanych oraz poziom odkształceń w konstrukcji, dla której symulowano obróbkę skrawaniem. Symulację komputerową prowadzono z wykorzystaniem MES. Uzyskane wyniki zaprezentowano w postaci kolorowych bitmap oraz wykresów.

Słowa kluczowe: Symulacja obróbki skrawaniem, konstrukcja kieszeniowa, MES.

WSTĘP

Opracowanie procesów technologicznych obróbki skomplikowanych części lotniczych wykonanych z stopów aluminium lub magnezu, rodzi konieczność przyjęcia właściwego rozwiązania, co do sposobu zamocowania części na obrabiarce uwzględniającego wpływ naprężeń i odkształceń pochodzących od sił zamocowania a także sił skrawania[1, 2, 3, 4].

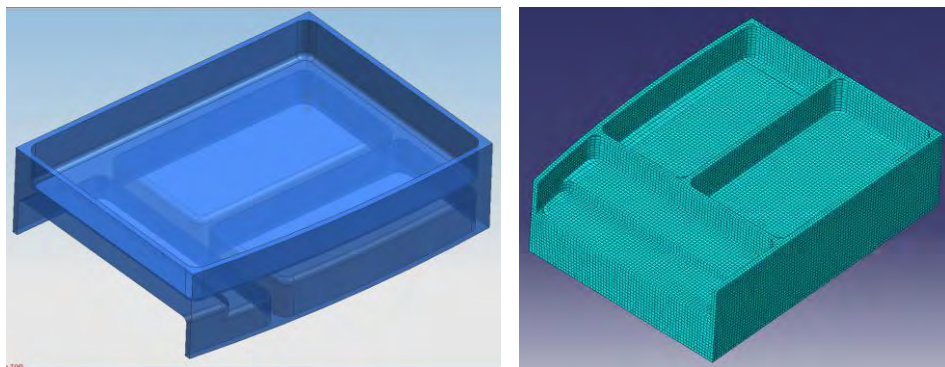
Dzięki programom komputerowym CAE wykorzystującym metodę elementów skończonych (MES) istnieje możliwość symulacji obciążenia zewnętrznego pochodzącego np.: od sił zamocowania, sił skrawania, wpływu ciepła generowanego podczas skrawania na dokładność wymiarowo-kształtową opracowywanej konstrukcji. Definiując właściwie warunki brzegowe możliwa jest analiza przyjętego rozwiązania pod względem zastosowanego oprzyrządowania technologicznego, mocującego element w przestrzeni obróbczej maszyny jak i badanie wpływu przyjętych parametrów technologicznych, takich jak: posuw i prędkość skrawania, na powstałe w materiale obrabianym wartości naprężeń oraz przemieszczeń.

W realizacji zadania posłużono się oprogramowaniem NX6, w celu opracowania modeli geometrycznych części przyjętych do analizy, oraz systemem ABAQUS do prowadzenia symulacji MES.

¹ Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska.

BUDOWA MODELI NUMERYCZNYCH

W pracy przedstawiono jeden z wariantów analizowanej konstrukcji kieszeniowej zaprezentowanej na rys.1. Model stanowi wycinek elementu żebra zamodelowany w postaci bryły cienkościennej o wymiarach gabarytowych 190x140x50 mm. Bryła posiada dwie zamknięte asymetryczne kieszenie po jednej stronie modelu, rozdzielone ścianką od otwartej kieszeni schodkowej. Z drugiej strony modelu, zaprojektowano zamkniętą kieszeń na całej powierzchni żebra. Kieszenie rozdzielają ścianki w zakresie grubości od 0,5 do 12 mm.

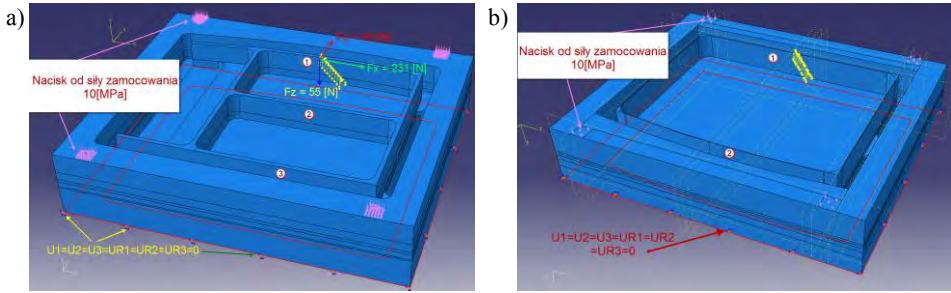


Rys. 1. Widok modelu bryłowego wybranej konstrukcji kieszeniowej typu żebro oraz siatki elementów skończonych wygenerowanej na tym modelu

Modele geometryczne poddano operacji konwertowania na format pośredni „*step*”, a następnie zaimportowano je do środowiska systemu MES Abaqus 6.9 EF1, w środowisku tym poddano je dyskretyzacji.

Warunki brzegowe oraz obciążenie zewnętrzne zdefiniowane zostały w globalnym układzie współrzędnych modelu, opisanych osiami x, y, z. Na powierzchni podstawy modelu w pierwszym zamocowaniu ograniczono możliwości przemieszczania węzłów we wszystkich kierunkach (x, y, z) modelując w ten sposób utwierdzenie modelu (brak rotacyjnych stopni swobody w węzłach elementów bryłowych). Takie przyjęcie mocowania odpowiadać będzie zamocowaniu elementu na płycie podciśnieniowej – uchwytu mocującego.

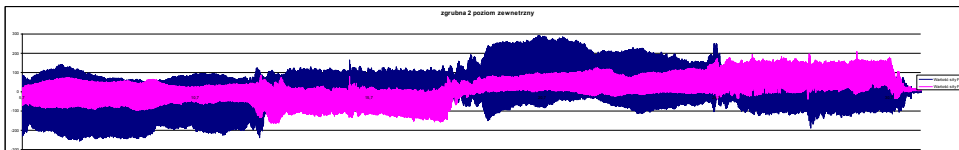
Analiza odkształceń i naprężeń wywołanych siłami skrawania oraz warunkami mocowania, ustalonymi w warunkach brzegowych, prowadzona była wieloetapowo w poszczególnych krokach analizy numerycznej. W zależności od przyjętego wariantu analizowanego modelu, siły skrawania przykładane były zgodnie z założonymi parametrami obróbki wzdłuż linii ścieżek, po których porusza się narzędzie na podstawie torów wygenerowanych w środowisku CAM systemu NX. Widok modelu z miejscami przyłożenia sił obciążających konstrukcję oraz sił zamocowania pokazano na rys. 2.



Rys. 2. a) pierwsze zamocowanie elementu wręgi z zaznaczonymi powierzchniami, na których odebrano stopnie swobody oraz przyłożono obciążenia; b) drugie zamocowanie

Wartość siły skrawania przyjęta w analizie numerycznej została wyznaczona na podstawie przebiegu 3 składowych siły zarejestrowanych podczas próby doświadczalnej.

W eksperymencie skrawaniu frezem R216.33-16040-AJ20UH10F poddano element wykonany w postaci kostki ze stopu EN AW-7075. Frezowanie odbyło się z następującymi parametrami technologicznymi: prędkość skrawania ustalono na poziomie $V_c=251\text{ m/min}$ przy prędkości obrotowej wrzeciona $n=5000\text{ obr/min}$, głębokość skrawania $a_p=4\text{ mm}$, szerokość frezowania $a_e=9,6\text{ mm}$, posuw roboczy $F_z=0,05\text{ mm/ostre}$. Dla tak określonych parametrów skrawania zarejestrowano przebieg amplitudy sił zaprezentowany na rys.3.

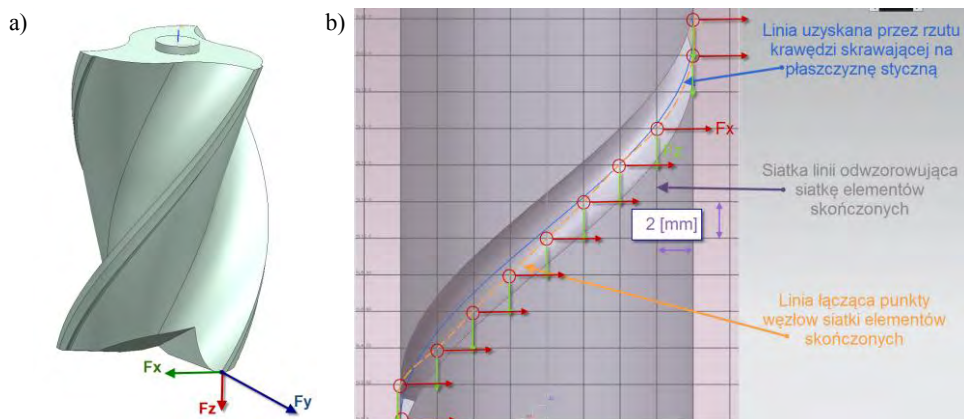


Rys. 3. Przebieg amplitudy siły F_x oraz F_y zarejestrowany podczas próby frezowania stopu EN AW-7075

W celu uproszczenia zadania obliczeniowego, do dalszej analizy numerycznej przyjęto maksymalną wartość składowej F_x z całego przebiegu. Pozostałe składowe siły przyjęto dla danego punktu czasowego, w którym zarejestrowano siłę F_x . Przyjęto następujące wartości sił skrawania na poszczególnych kierunkach: $F_x=231\text{ N}$, $F_y=33\text{ N}$, $F_z=55\text{ N}$.

Podane powyżej wartości siły skrawania przyłożono w 11 punktach węzłowych siatki elementów skończonych. Poszczególne wartości składowych sił zostały podzielone przez liczbę punktów węzłowych, do których przyłożono siły. Położenie tych punktów uzyskano na podstawie rzutu krawędzi skrawającej narzędzia, R216.33-16040-AJ20UH10F o kącie $\alpha=40^\circ$ zamodelowanego w NX7.5 na siatkę linii o podziale równym 2mm odpowiadającym wielkości elementów skończonych przyjętych w analizie, wyznaczając w ten sposób przybliżoną loka-

lizację punktów działania sił skrawania. Przyjęto uproszczenie, że narzędzie obrabia dany materiał przy kącie opasania $A=180^0$. Sposób wyznaczenia punktów, do których przyłożono siły skrawania przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. a) Przestrzenny układ wektorowy sił przyłożonych do modelu frezu oraz kierunki składowych sił; b) rzut krawędzi skrawającej na płaszczyznę styczną oraz linia utworzona przez punkty przyłożenia sił składowych.

Dla elementu wręgi ze względu na jego konstrukcję przyjęto obróbkę w dwóch zamocowaniach. Konieczność obróbki profilu każdej ze ścian w poszczególnym zamocowaniu technologicznym wymusiła zastosowanie zamocowania pośredniego. Poprzez pośredni element mocujący w postaci specjalnie zamodelowanego fragmentu geometrii (łącznika), element wręgi łączy się ze sztywnym elementem ramki. Do ramki przyłożono nacisk pochodzący od elementów mocujących. Na powierzchniach ramki mocującej odebrano poszczególne stopnie swobody.

Jako materiał wręgi przyjęto stop aluminium EN AW-7075, dla którego przyjęto właściwości materiałowe według następujących wartości podanych w tabelicy 1.

Tabela 1. Właściwości stopu aluminium EN AW-7075

Gęstość:	2,81 g/cm ³
Moduł sprężystości E:	72 GPa
Moduł Kirchhoffa G:	27,1 GPa
Liczba Poissona:	0,33

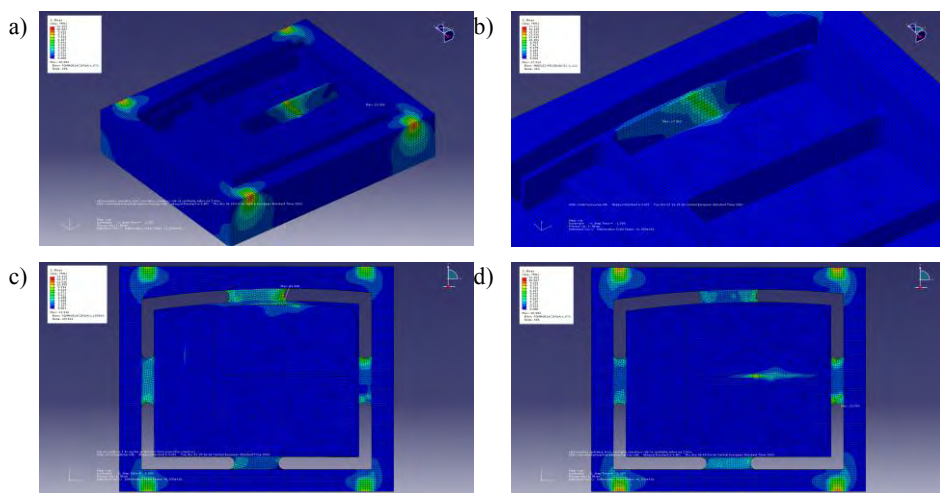
Dla materiału przyjętego do analizy założono charakterystykę materiału, jako liniową.

Analizę numeryczną prowadzono w oparciu o pliki uzyskane po rozwiązaniu ich przez solver „STANDARD” systemu Abaqus. W zadaniu obliczeniowym użyto elementów skończonych typu C3D8R. Zadanie obliczeniowe zdefiniowane

w module „Job” miało następujące założenia: wykonanie analizy, jako kompletnej przy użyciu od 4-8 procesorów.

WYNIKI ANALIZ ODKSZTAŁCEŃ I NAPRĘŻEŃ KONSTRUKCJI

Obliczenia przeprowadzone przez solwer Standard sytemu Abaqus wizualizowano w module *Visualization*. Wyniki zaprezentowano na rys. 5. w postaci kolorowych bitmap przemieszczeń węzłów siatki oraz naprężeń zredukowanych wg hipotezy wytrzymałościowej Hubera-Misesa uśrednionych na poziomie 75%.

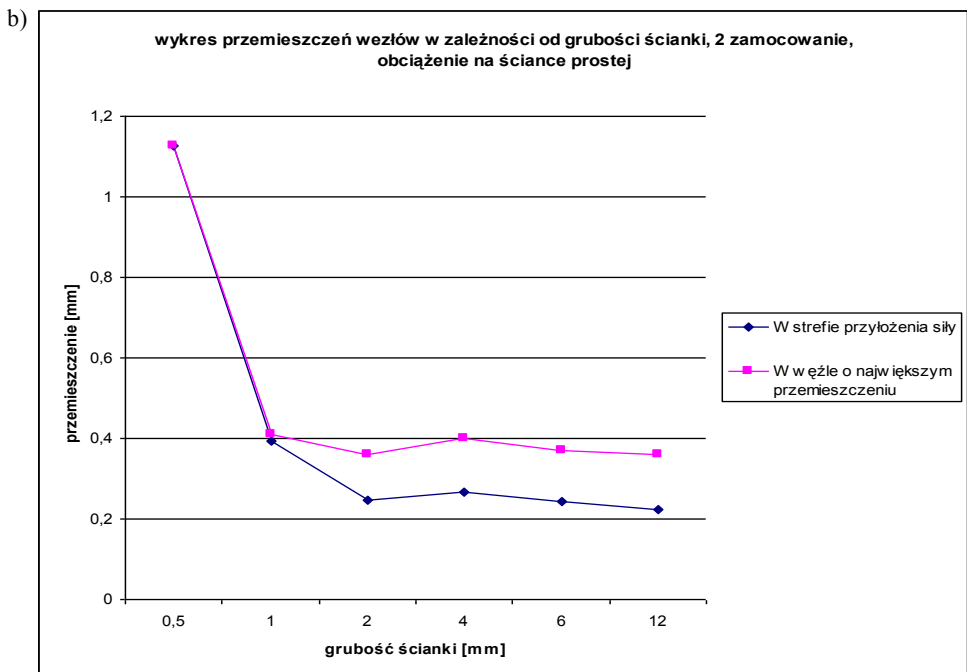
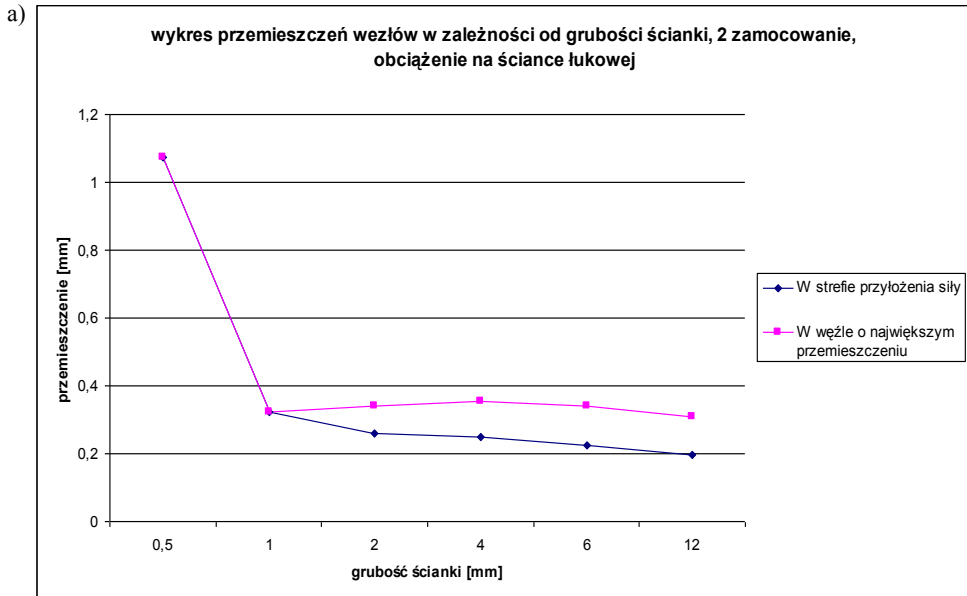


Rys. 5. Rozkład naprężeń zredukowanych wg hipotezy Hubera-Misesa

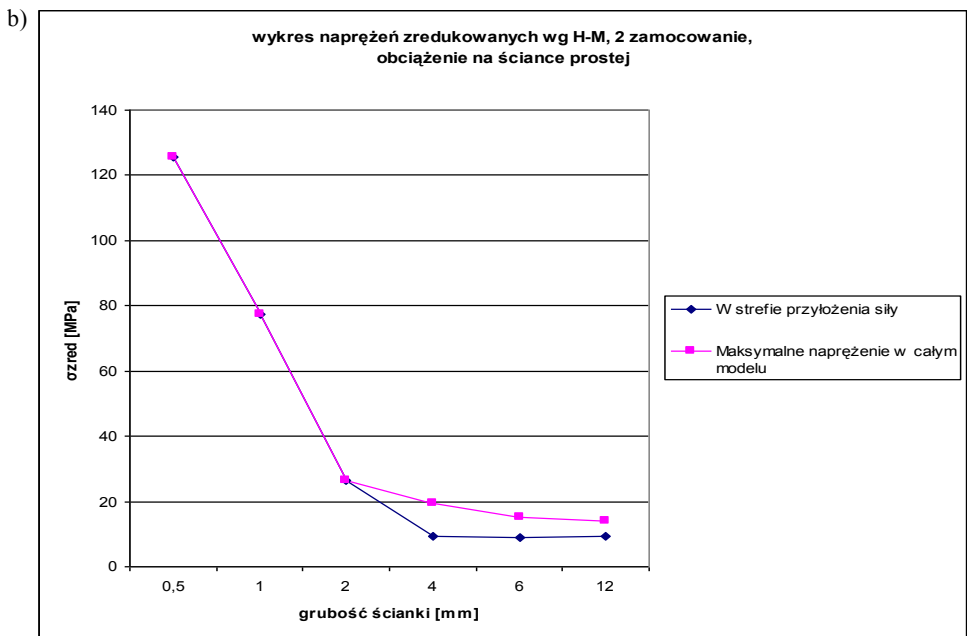
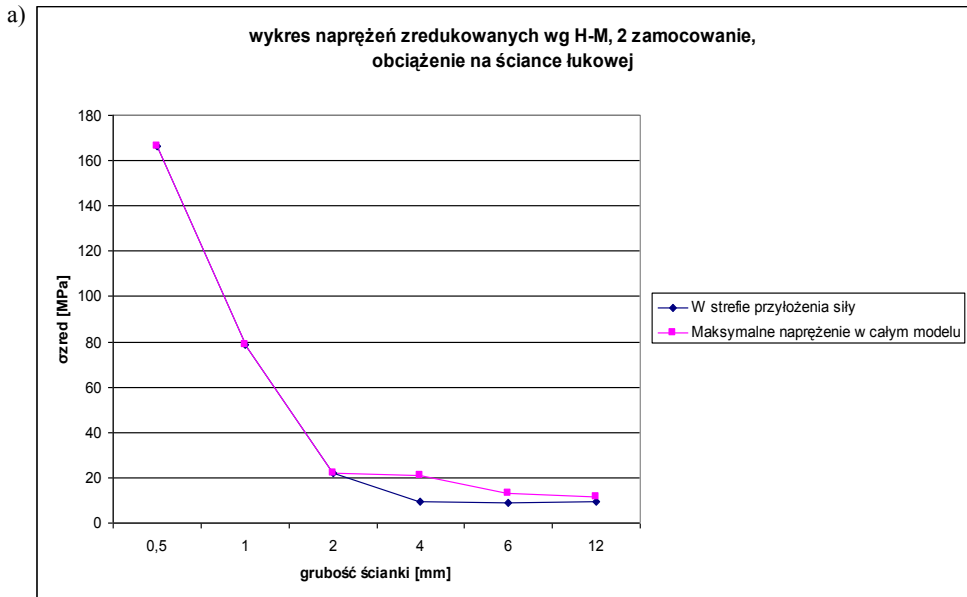
Jak wynika z symulacji największy poziom naprężeń generuje się wokół strefy działania obciążenia pochodzącego od sił skrawania. W zależności od miejsca przyłożenia sił naprężenia generują się również w elemencie łącznika osiągając w nim najwyższy poziom. W strefie przyłożenia sił zamocowania zaobserwowano również zwiększony poziom naprężenia, jednak ich poziom jest na tyle mały, że nie powoduje odkształceń konstrukcji.

ANALIZA WYNIKÓW SYMULACJI MES

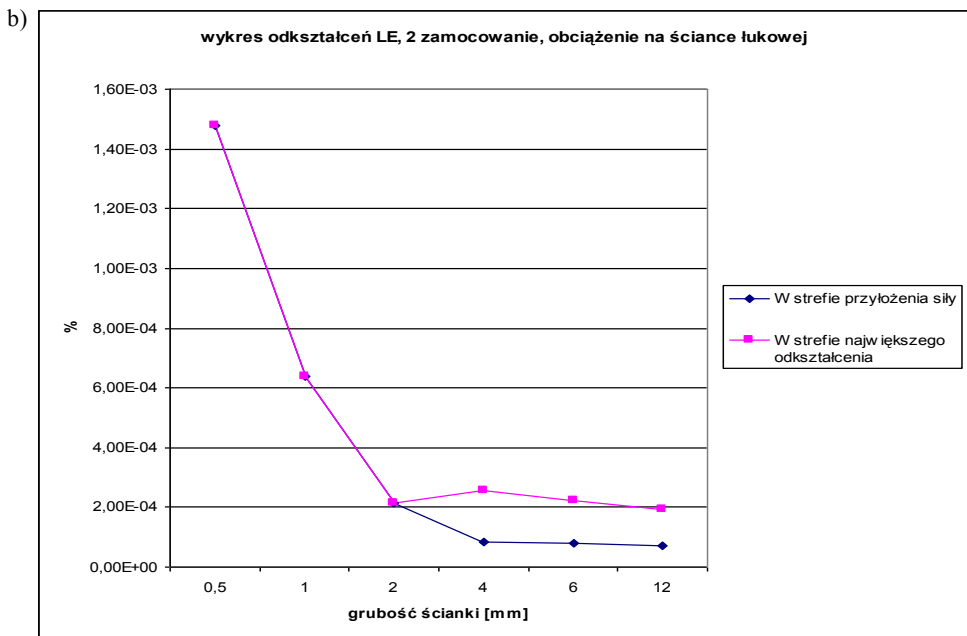
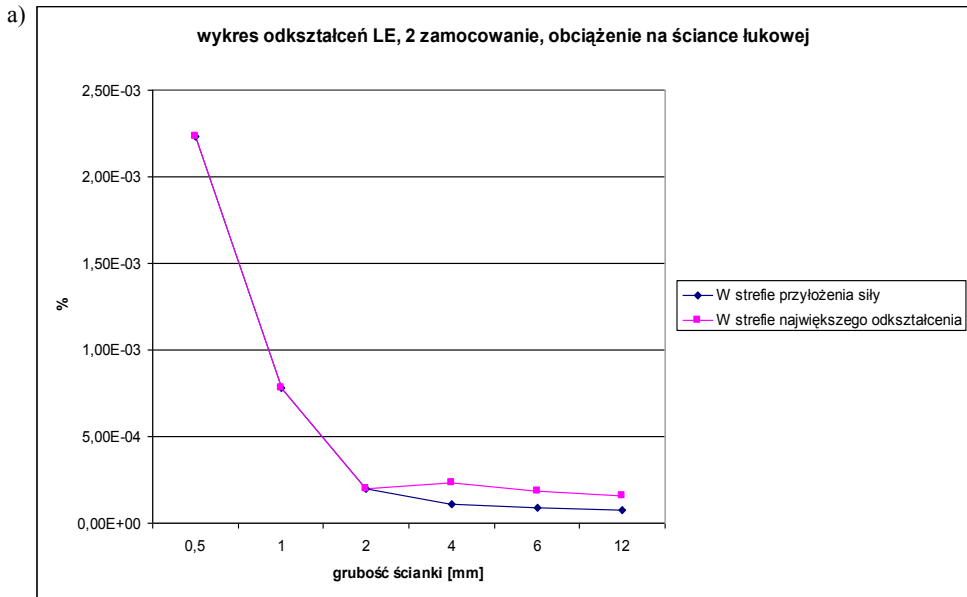
W prowadzonych badaniach symulacyjnych przeprowadzono symulację obciążenia rozłożonego na ściankach o następujących grubościach: 0, 5 – 1 – 2 – 4 – 6 – 12 mm. Wyniki przemieszczeń węzłów siatki, naprężeń zredukowanych oraz odkształceń uzyskane z symulacji MES w zależności od wariantu kształtu obciążonej ścianki w funkcji ich grubości zaprezentowano na wykresach poniżej (od rys. 6 do rys. 8).



Rys. 6. Wykresy największych wartości przemieszczeń węzłów w 2 zamocowaniu w zależności od grubości ścianki: a) przy obciążeniu na łukowej ścianie;
b) przy obciążeniu na prostej ścianie



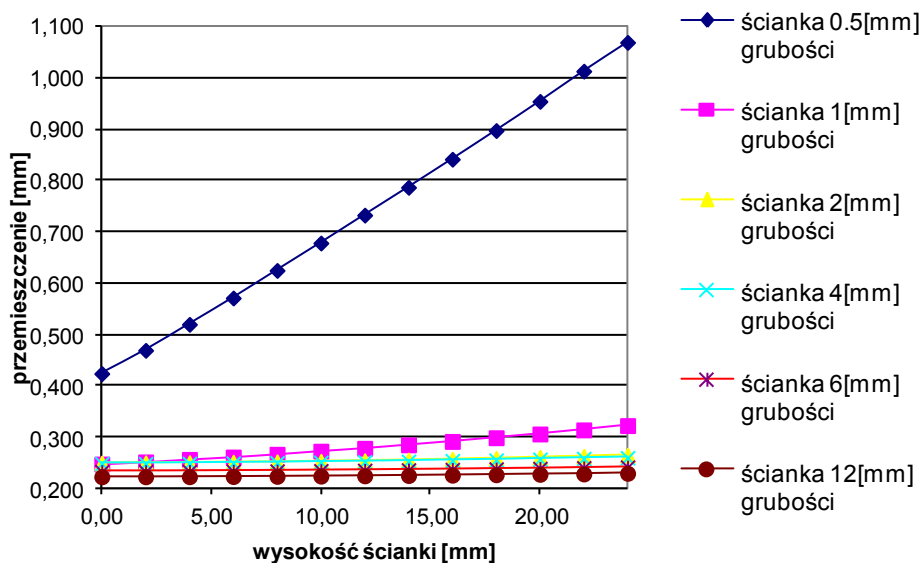
Rys. 7. Wykresy największych wartości naprężeń zredukowanych wg H-M w 2 zamocowaniu w zależności od grubości ścianki: a) przy obciążeniu na łukowej ścianie; b) przy obciążeniu na prostej ścianie



Rys. 8. Wykresy największych wartości odkształceń w 2 zamocowaniu w zależności od grubości ścianki: a) przy obciążeniu na łukowej ścianie; b) przy obciążeniu na prostej ścianie

Na podstawie przeprowadzonych symulacji numerycznych można stwierdzić, że zmiana grubości prostopadłej ścianki obrabianej w tym samym zamocowaniu, przy różnym umiejscowieniu punktów przyłożenia sił skrawania, powoduje wzrost naprężeń zredukowanych, szczególnie w zakresie grubości ścianki 0,5–1 mm (rys. 7). Najwyższy poziom naprężenia zredukowanego 168 MPa, otrzymano dla modelu ze ściankami o grubości 0,5 mm na ściance o kształcie łukowym. Zauważono istotną różnicę w poziomie naprężenia na tym samym rodzaju ścianki, który przy większych grubościach 2–12 mm utrzymywał się na podobnym poziomie około 10–15 MPa. Wzrost naprężeń jest spowodowany zmniejszeniem sztywności ścianki modelu. W pozostałych przypadkach wzrost naprężeń jest nieznaczny zarówno w strefie skrawania jak i w elementach łączników, gdzie przy większej sztywności ścianek obrabianych zaobserwowano zwiększony poziom naprężenia.

Wykres wartości przemieszczenia wzdłuż wysokości ścianki



Rys. 9. Wykresy największych wartości przemieszczeń w węzłach, w przekroju poprzecznym przez ściankę obciążoną siłami skrawania [11]

Na rys. 9 zaprezentowano wykres przemieszczeń węzłów siatki w przekroju poprzecznym w strefie przyłożenia sił skrawania. Zaobserwowano znaczny wzrost przemieszczeń, odkształceń oraz naprężeń wzdłuż przekroju poprzecznego ścianki, obciążonej siłą skrawania dla grubości 0,5 mm. Może to oznaczać, że obciążenie takiego przekroju przy podobnych wymiarach geometrycznych ścianki w warunkach rzeczywistych nie pozwoli osiągnąć żądanej dokładności wymiarowo kształtowej.

WNIOSKI

Modelowanie zagadnień związanych z analizą warunków zamocowania oraz wpływu sił skrawania może pozwolić na wyznaczenie odpowiednich wartości parametrów technologicznych oraz geometrycznych stref zamocowania dla uzyskania właściwej dokładności wymiarowo-kształtowej. Symulując warunki obciążenia w zakresie statycznym możliwe jest wyznaczenie wartości poziomu naprężenia, jaki panuje w konstrukcji podczas skrawania oraz poziomu naprężenia sprężystego w konstrukcji. Prowadzenie symulacji numerycznych w przypadku obróbki elementów cienkościennych wydaje się być szczególnie istotnie ze względu na silnie nieliniowy wzrost poziomu odkształcenia oraz naprężenia w analizowanych przypadkach. Należałoby przeprowadzać w takiej sytuacji symulację z uwzględnieniem nieliniowości materiału po przekroczeniu granicy plastyczności, wyznaczonej na podstawie eksperymentu wytrzymałościowego. W analizowanym przypadku (dla stopu AW-7075) granica plastyczności podawana na poziomie od 80-510MPa.

Należy jednak zauważyć, że zjawiska zachodzące podczas procesu skrawania mają charakter silnie dynamiczny i należałoby zweryfikować uzyskane wyniki poziomu odkształcenia przy założeniu wpływu zmiennego charakteru wymuszenia, w postaci okresowo działających sił skrawania.

PIŚMIENNICTWO

1. Adamski W.: Wybrane kierunki zwiększania wydajności skrawania. *Mechanik* nr 5-6/2009.
2. Mabrouki T., Girardin F., Asad M., Rigal J.: Numerical and experimental study of dry cutting for an aeronautic aluminium alloy (A2024-T351). *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48, (2008).
3. Oczóś K.E., Doskonalenie procesów kształtowania ubytkowego stopów aluminium. *Mechanik* nr 3,4/2009.
4. Zalewski A.: Efektywne wytwarzanie dzięki optymalnej strategii obróbki HSM. *Projektowanie i konstrukcje inżynierskie*, 2007.
5. Bąk R., Burczyński T.: Wytrzymałość materiałów z elementami ujęcia komputerowego. *WNT*, 2001.
6. Dobrzański L.A.: *Leksykon materiałoznawstwa*. Verlag Dashofer Sp. z o.o. 2007.
7. Dobrzański T.: *Uchwyty obróbkowe*. *WNT*, Warszawa 1990.
8. *Getting started with Abaqus version 6.5*.
9. Jemielniak K.: *Obróbka skrawaniem*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa, 2004.
10. Rakowski G., Kacprzyk Z.: *Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa, 2005.
11. Włodarczyk M.: Raport do umowy z realizacji grantu 108/PL/PKAero-ZB5/2010 z projektu kluczowego „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w lotnictwie”.

temat badawczy ZB5 „Nowoczesna obróbka mechaniczna stopów magnezu i aluminium”.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF FIXING AND CUTTING FORCES ON STRESS LEVEL IN TERMS OF THE THICKNESS OF POCKETING CONSTRUCTION

Summary:

The paper presents a fragment of the work focused on simulating the impact of cutting and fixing forces on form of strain and stress distribution in the chosen pocketing structure. The paper presents the effect wall thickness on the value of reduced stresses and strains in the level of construction, for which the machining was simulated. Computer simulation was conducted with FEM. The results obtained are presented in the form of color bitmaps, and charts.

Keywords: simulation of machining, pocketing construction, FEM.

Praca realizowana w ramach projektu Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (POIG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.



Piotr Wolszczak ¹⁾

BADANIE WPŁYWU WŁAŚCIWOŚCI GEOMETRYCZNYCH MIKROSTRUKTURY NA MODUŁ SPRĘŻYSTOŚCI POPPRZECZNEJ KOMPOZYTU ROWINGOWEGO W PROCESIE PRODUKCJI ODPOWIEDZIALNYCH KONSTRUKCJI NOŚNYCH

Streszczenie: W procesie produkcji odpowiedzialnych konstrukcji nośnych, wykonywanych z kompozytów rowingowych, ważnym problemem jest nadzorowanie jakości części kompozytowych. Obecnie stosowanymi miarami w ocenie jakości takich kompozytów są średnica włókien i objętość względna włókien wzmacniających. Pomijana jest równomierność rozmieszczenia włókien wzmacniających. W pracy przedstawiono wyniki badań z użyciem miar przydatnych do prognozowania wytrzymałości i ich związku z wytrzymałością próbek pochodzących z procesu produkcji dźwigarów łopatek śmigłowcowych.

Słowa kluczowe: pomiar rozmieszczenia, teselacje, kompozyty rowingowe, rozmieszczenie włókien.

WSTĘP

W budowie maszyn interesującą grupę materiałów stanowią kompozyty zbudowane z włókien ciągłych (szklanych, węglowych) o przekroju kołowym, ułożonych jednokierunkowo i zatopionych w osnowie żywicy epoksydowej. Dzięki zatopieniu twardych, kruchych włókien w żywicy epoksydowej o znacznie niższej wytrzymałości na zniszczenie niż wytrzymałość włókien, uzyskuje się kompozyt o budowie anizotropowej. Jego wytrzymałość zależy od: kierunku przyłożenia obciążenia w stosunku do osi włókna, wytrzymałości składników, połączenia tych składników oraz objętości względnej składników i równomierności ułożenia włókien wzmacniających. Równomierne ułożenie włókien zależy z kolei od procesu wytwarzania kompozytów [1, 2, 3, 4].

Standardowo według literatury przedmiotu ocenę rozmieszczenia składników wzmacniających dokonuje się na podstawie obrazów mikrostruktur. Podstawą oceny są: ilość, wielkość, kształt i rozmieszczenie każdego ze składników [5,6]. Wielkości te charakteryzowane są wskaźnikami globalnymi oraz lokalnymi (średnimi). Wymieniane są następujące metody charakteryzowania niejednorodności struktury materiałów wielofazowych [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13]:

¹ Katedra Automatyzacji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska.

- za pomocą elementów testowych (sieczne), za pomocą elementów testowych rozmieszczanych systematycznie, wykorzystując: skaniny systematyczne (pola siatki, otwarte kształty krzywoliniowe, funkcję kowariancji (równoległe sieczne), funkcję rozkładu radialnego (pierścieniowe elementy testowe),
- pomiar odległości i kąta pomiędzy sąsiadującymi włóknami,
- przez pomiar właściwości wieloboków będących wynikiem teselacji, obejmujące: pole (A_i), obwód (B_i) i liczbę boków wieloboku, grubość osnowy pomiędzy włóknami wzmacniającymi oraz współczynnik kształtu (q_i), określony wzorem (1),

$$q_i = 4 \pi (A_i / p_i^2) \quad (1)$$

- z wykorzystaniem entropii topologicznej oraz funkcji charakteryzujących lokalne koncentracje.

Przytaczane w literaturze wyniki badań dotyczą obiektów modelowych, a nie rzeczywistych, które mogą charakteryzować się znaczną losowością [7].

MATERIAŁ I METODYKA

Testy wytrzymałościowe przeprowadzono z użyciem próbek pochodzących z procesu produkcji dźwigarów łopat śmigłowców. Dla 81 próbek przygotowano zgłady i wykonano ponad 1400 obrazów mikroskopowych. Pomiary i obliczenia przeprowadzono przy użyciu komputerowego, wizyjnego systemu pomiarowego opracowanego przez autora [14].

Wynikami pomiarów geometrycznych były: zbiory wartości współrzędnych środków włókien i ich średnic oraz lokalizacje i powierzchnie wad (wtrąceń i porów gazowych). Na tej podstawie obliczono objętości względne szkła i porów gazowych, a także miary charakteryzujące równomierność rozmieszczenia włókien.

Poza miarami charakteryzującymi makrobudowę kompozytu i założeniami projektowymi (objętość względna szkła $U_{sz}[\%]$, średnica włókien – $D[\mu\text{m}]$), rozpatrywano także: objętość względną pęcherzy gazowych $U_p[\%]$, wzajemne położenie włókien określone przez: entropię topologiczną S i minimalną odległość między sąsiadującymi włóknami $G_{Imin} [\mu\text{m}]$.

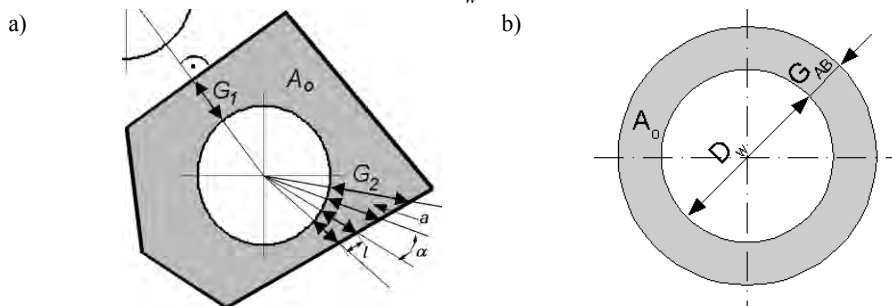
Zgodnie z rys. 1 grubość warstewki osnowy otaczającej pojedyncze włókno, może być definiowana przez: G_1 , G_2 , G_{AB} , $G_{AD} [\mu\text{m}]$, gdzie:

- G_1 – odstęp pomiędzy sąsiadującymi włóknami – lokalne grubości warstewki mierzone na odcinkach łączących sąsiednie włókna,
- G_2 – lokalne grubości warstewki mierzone w stałych odstępach wzdłuż obwodu,
- G_{AD} – średnia grubość warstewki G_{AD} obliczana wg wzoru:

$$G_{AD} = \frac{\sqrt{D_w^2 + 4 \frac{A_o}{\pi}} - D_w}{2} \quad (2)$$

- G_{AB} – proporcja pola wydzielonej osnowy A_o do obwodu włókna B_w , według wzoru:

$$G_{AB} = \frac{A_o}{\pi D_w} \quad (3)$$



Rys. 1. a) lokalne grubości pola osnowy wydzielonego wokół pojedynczego włókna,
b) pierścieniowy model warstewki osnowy wokół włókna (oprac. własne)

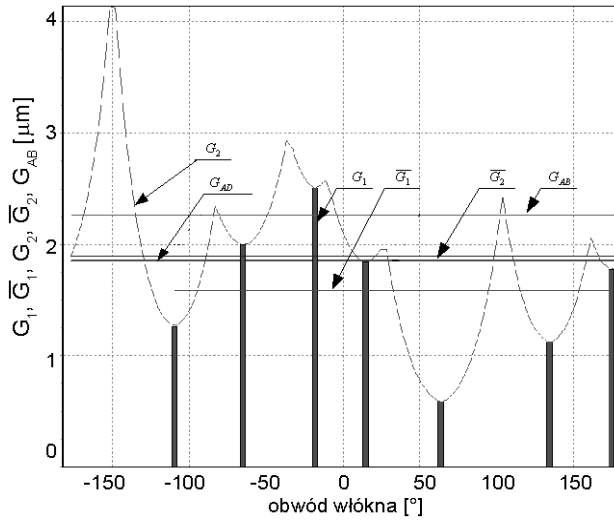
Fig. 1. a) local thickness of polygon layer around single fiber,
b) ring model of matrix around fiber (author's study)

Rys. 1 definiuje także rozpatrywane w literaturze wielkości wieloboków teselacji, takie jak: liczba boków, długość obwodu i pole powierzchni wieloboku. Analizując rys. 1 określić również można: proporcję pól powierzchni wieloboku i włókna, która nawiązuje do objętości względnej szkła [13].

Dla zilustrowania wzajemnego położenia średnich opisujących grubość warstewki osnowy na rys. 2 linią przerywaną koloru czerwonego, przedstawiono rozwinięcie wydzielonej warstewki osnowy wzdłuż obwodu przykładowego włókna B_w , wraz z naniesionymi lokalnymi grubościami G_1 , G_2 i G_{AB} oraz średnimi \bar{G}_1 i \bar{G}_2 .

ANALIZA WYNIKÓW

Analizując wyniki serii próbek trudno w sposób bezpośredni dostrzec wpływ równomierności rozmieszczenia włókien wzmacniających na wyniki testów wytrzymałościowych. Przyczyną jest wysoka jakość materiałów otrzymywanych w procesach produkcyjnych przemysłu lotniczego, wynikająca z poziomu kontroli jakości. Jednak analizując szereg próbek, uporządkowanych rosnąco według wartości modułu sprężystości poprzecznej E_{2t} , wyróżniono dwie grupy próbek zlokalizowane po przeciwnych stronach skali E_{2t} . Próbkę te sygnalizują istnienie wpływu nierównomierności rozmieszczenia na wartość E_{2t} . Zróżnicowanie wartości współczynnika sprężystości takich dwu kategorii próbek (grupy A i B), potwierdzone testem t-Studenta przedstawia rys. 3.

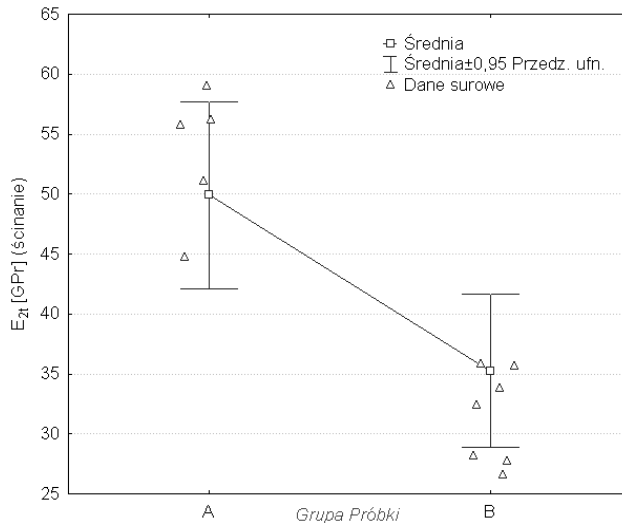


Rys. 2: Grubość warstwy osnowy otaczającej pojedyncze włókno wzdłuż jego obwodu (kąt $\pm 180^\circ$ na osi poziomej) wyrażona miarami:

$G_1, \bar{G}_1, G_2, \bar{G}_2, G_{AB}$ (oś pionowa) (oprac. własne) [15]

Fig. 2: Thickness of matrix layer circumfluent single fiber along its perimeter (horizontal axis - angle $\pm 180^\circ$) defined as measurement:

$G_1, \bar{G}_1, G_2, \bar{G}_2, G_{AB}$ (vertical axis) (author's study) [15]



Rys. 3: Uśrednione (\square) wartości modułu sprężystości poprzecznej w dwu grupach próbek-świadków A i B, dane surowe (Δ) oraz przedział ufności oznaczony „wąsami” (\perp/\top) (wyniki własne)

Fig. 3: Modulus of shear averaged values (\square) in two groups of samples, raw data (Δ) and confidence interval (\perp/\top) (author's study)

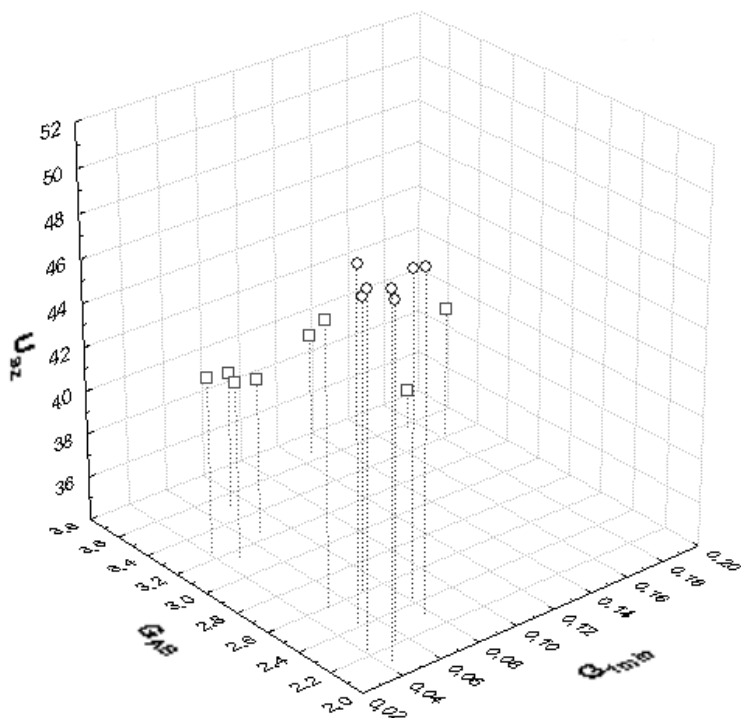
Pojawił się zatem problem wymagający wyjaśnienia: dlaczego występuje wyraźne zróżnicowanie E_{21} i jakie wielkości są tego powodem. W pierwszej kolejności dokonano analizy znaczenia średnic włókien D_w oraz znaczenia objętości względnej szkła U_{sz} [%].

Kolejnym etapem była analiza dyskryminacyjna, za pomocą której usiłowano określić znaczenie wytypowanych czynników [16].

Na podstawie kolejnych etapów analizy korelacyjnej z ogólnej grupy 13 miar charakteryzujących budowę mikrostruktur próbek wyróżniono:

- umowną grubość warstewki osnowy wokół pojedynczego włókna $G_{AB}=A_o/\pi D_w$,
- minimalną grubość osnowy wokół pojedynczego włókna² G_{1min} ,
- objętość względną szkła U_{sz} .

Położenie punktów charakteryzujących grupy próbek, w przestrzeni zdefiniowanej przez wyróżnione w analizie korelacyjnej zmienne, przedstawia rys. 4.



Rys. 4: Wartości U_{sz} , G_{AB} i G_{1min} próbek podgrup A(○) i B(□) (wyniki własne)

Fig. 4: U_{sz} , G_{AB} i G_{1min} values of subsets A(○) and B(□) samples (author's study)

² G_{1min} wyznaczana jest na linii biegnącej przez środki rozpatrywanego włókna i najbliższego sąsiada (jest to połowa dystansu do krawędzi najbliższego włókna).

Uzyskane wyniki upoważniły do sklasyfikowania próbek grup A i B, scharakteryzowanych wektorami $[U_{sz}, G_{AB}, G_{Imin}]$ za pomocą następującej funkcji dyskryminacyjnej:

$$D_1 = 14,357 + 1,649 G_{AB} - 16,944 G_{Imin} - 0,396 U_{sz} \quad (4)$$

Poziom jej istotności, określony w teście chi-kwadrat, wyniósł $p = 0,0001$. Wysoka wartość korelacji kanonicznej $R = 0,9151$ wskazuje na silne powiązanie grup A i B oraz funkcji dyskryminacyjnej [17-22]. Funkcja pozwala na klasyfikację przynależności próbek do grup A lub B.

Zastosowana analiza dyskryminacyjna (dla kryterium różnicowania próbek A i B) wskazała jako znaczące następujące charakterystyki geometryczne: G_{AB} , G_{Imin} , U_{sz} . Ten zestaw wielkości geometrycznych z pewnością należy uzupełnić o D_w i V_{SGab} ³⁾. Dlatego też przeprowadzono weryfikację wpływu tych charakterystyk na wartość poprzecznego modułu sprężystości E_{2t} . Weryfikacja została przeprowadzona przy użyciu metody analizy regresji wielorakiej.

Celem tej analizy było ostateczne rozstrzygnięcie czy wybrane w trakcie analizy dyskryminacyjnej charakterystyki jednoznacznie i wyczerpująco określają budowę kompozytu, w sposób umożliwiający określenie wartości poprzecznego modułu sprężystości E_{2t} .

Analiza ta polega na obliczeniu współczynników funkcji $E_{2t}(G_{Imin}, G_{AB}, U_{sz})$, ich interpretacji oraz weryfikacji wyników otrzymanych z jej użyciem w odniesieniu do wyników eksperymentalnych.

Liniowe równanie regresji uzyskało następującą postać:

$$E_{2t} = 93,82 - 20,52 G_{AB} + 77,74 G_{Imin} - 0,0076 U_{sz} \pm 6,47 \quad (5)$$

(115,4) (13,7) (50,9) (1,7)

Poniżej równania, w nawiasach wymieniono błędy standardowe szacowania wartości E_{2t} . Uzyskany model wyjaśnia 74,39%⁴⁾ zmienności E_{2t} w rozpatrywanych próbkach kompozytu.

Analizując zależność (5) należy zwrócić uwagę, że w rozpatrywanej zmienności materiału badawczego największy wpływ na E_{2t} ma wartość średniej grubości warstewki osnowy G_{AB} . Uwzględniając, że charakterystyki budowy kompozytu są ze sobą powiązane, znaczenie wartości współczynników w równaniu liniowym jest proste w interpretacji i zgodne obserwacjami poczynionymi w trakcie analizy dyskryminacyjnej.

³⁾ S_{VGab} - średnie odchylenie grubości G_{AB} .

⁴⁾ Wartość procentową podano na podstawie wartości wielorakiej $R_2=0,74389$.

WNIOSKI

Wykazano, że wytrzymałość kompozytów rowingowych rozpatrywana według wartości modułu sprężystości poprzecznej E_{2t} , w zakresie zmienności badanych próbek, klasyfikowana jest na odmienne grupy przez: średnią grubość warstewki $\overline{G_{AB}}$, minimalną grubość osnowy G_{lmin} i względną objętość szkła U_{sz} . W zakresie rozpatrywanych czynników wymienione wielkości tworzą liniową funkcję umożliwiającą prognozowanie modułu sprężystości poprzecznej E_{2t} . Największe znaczenie w wymienionej prognozie odgrywa średnia grubość warstewki osnowy otaczającej pojedyncze włókno $\overline{G_{AB}}$.

Stwierdzone eksperymentalnie znaczenie właściwości mikrogeometrycznych budowy kompozytu, wyrażone głównie przez G_{AB} , dla właściwości wytrzymałościowych kompozytu oznacza, że w przypadkach występowania obciążenia poprzecznego, materiał ten nie powinien być traktowany jak homogeniczny, a w obliczeniach wytrzymałościowych należy uwzględniać zmienność wielkości G_{AB} .

PIŚMIENNICTWO

1. Ochelski S. „Metody doświadczalne mechaniki kompozytów konstrukcyjnych”, Warszawa, WNT Warszawa 2004.
2. Ślężiona J. „Podstawy technologii kompozytów”, WPS, Gliwice 1998.
3. German J. „Podstawy mechaniki kompozytów włóknistych”, PK Kraków 2001.
4. Kelly A., Zweben, C. “Comprehensive Composite Materials”, Elsevier Science 2000.
5. Rudawska A.: “Swobodna energia powierzchniowa i struktura geometryczna powierzchni wybranych kompozytów epoksydowych” Polimery, 2008, 53, 452.
6. Siejka-Kulczyk J., Lewandowska M., Kurzydłowski K.J.: „Effect of particle size and particle surface pretreatment of fillers on selected properties of model ceramic-polymer composites used as dental fillings” Polimery 2008, 53, 208.
7. Pyrz R., Bochenek B.: “Topological disorder of microstructure and its relation to the stress field” Int. J. Solids Structures 1998, 19, 2413-2427.
8. Roźniatowski K. „Metody charakteryzowania niejednorodności struktury materiałów wielofazowych”, PTS Katowice 2001.
9. Kurzydłowski K. J., Ralph B. “The quantitative description of the microstructure of materials”, CRC Press USA 1995.
10. Kołosow A., Kljawn W.: „Determinowanie parametrów geometrycznej modeli struktury orientowanych armowanych włóknistych kompozytów” Mechanika kompozytowych materiałów 1987, 6, 990-998.
11. Gusev A. A., Hineb P. J., Ward, I. M.: “Fiber packing and elastic properties of a transversely random unidirectional glass/epoxy composite” Compos. Sci. Technol. 2000, 60, 535-541.
12. Missoum-Benziane D., Ryckelynck D., Chinesta F. “Micro-Macro approach for mechanical problems involving microstructure” 10 ESAFORM Conference on Material Forming (pod red. Cueto E. i Chinesta F.) 2007, 1342-1347.

13. Krywult B. „Wybrane problemy technologiczne i badawcze z zakresu przetwórstwa tworzyw wzmocnionych włóknem” Postęp w przetwórstwie materiałów polimerowych, Częstochowa 2002, 136-140.
14. Wolszczak P. „Automatyzacja komputerowej analizy obrazów mikrostruktur” Przegląd Mechaniczny. 2006, 65, s. 150-153.
15. Płaska S. i Wolszczak P. „Pomiar i ocena rozmieszczenia równolegle ułożonych włókien wzmacniających tworzywa” Materiały polimerowe i ich przetwórstwo. Częstochowa 2004, 65-74.
16. Płaska S. „Wprowadzenie do statystycznego sterowania procesami technologicznymi”, PL Lublin 2000.
17. Stanisław A. „Przystępny kurs statystyki z zastosowaniem Statistica PL na przykładach z medycyny. Tom 3. Analizy wielowymiarowe”, Statsoft Kraków 2007.

EXAMINATION OF THE INFLUENCE OF MICRO-GEOMETRICAL PROPERTIES ON TRANSVERSE SHEAR MODULE ROVING COMPOSITES IN PROCESS PRODUCTION OF RESPONSIBLES CONSTRUCTIONS

Summary:

Monitoring of quality is an important task in production process of responsible supporting structures, made from roving composites. This paper presents examination results of samples from the production process of girders for helicopter blades, using geometrical measures for prediction of material strength and durability. The connections of geometrical measurement of microstructure with values of elasticity modulus determined in the transverse shear strength test by short beam method, were assessed. Tests of strength and geometric images were prepared for 81 samples. Fig. 2 presents a fragment of a geometric model, determined for the sample, where each circle describes the average thickness of the matrix around every fiber. Circle diameters correspond to different measurements of matrix thickness. To illustrate the relationship between different measurements of matrix thickness, in figure 3, the red dotted line presents layer of matrix around a single fiber along the perimeter B_w , together with local thicknesses G_1 , G_2 and G_{AB} and averages \bar{G}_1 and \bar{G}_2 . During correlation analysis, the following were distinguished: conventional film thickness around a single fiber G_{AB} (2), minimum local film thickness of the matrix around a single fiber G_{1min} , relative volume of the glass U_{sz} .

Fig. 7 presents position of the points characterizing both groups in the space defined by the variables distinguished in the correlation analysis. Samples of groups A and B, characterized by $[U_{sz}, G_{AB}, G_{1min}]$ vectors, were classified with discriminant function (3). In subsequent stages of the multiple regression analysis, it was decided if selected characteristics clearly and explicitly define the composite micro-construction, so that determination of the value of transverse elasticity modulus E_{2t} is possible. Linear regression equation obtained the form (4). Analyzing the relationship (4) it should be noted that average thickness G_{AB} has the greatest impact on value E_{2t} in case of considered variability of examined material.

Keywords: arrangement measuring, tessellations, roving composites, fibers distribution.

Mirosław Wendeker, Michał Biały, Adam Majczak ¹⁾

OPRACOWANIE MODELU UKŁADU WYMIANY ŁADUNKU SILNIKA SUBARU EJ25 Z ZASTOSOWANIEM METODY INŻYNIERII ODWROTNEJ (*REVERSE ENGINEERING*)

Streszczenie: W artykule przedstawiono proces opracowania geometrii układu dolotowego i wylotowego oraz komory spalania silnika Subaru EJ25 z wykorzystaniem przestrzennego skanowania poszczególnych części silnika (tłok, głowica, zawory, przepustnice, kolektor dolotowy). W tym celu użyto skanera ZScanner 700 firmy ZCorporation. Uzyskaną geometrię w postaci chmury punktów eksportowano do programu Catia v5, gdzie następnie na jej podstawie opracowano geometrię układu. Model ten zostanie później wykorzystany do badań symulacyjnych zjawisk przepływowych wymiany ładunku w tym silniku.

Słowa kluczowe: inżynieria odwrotna, bezstykowe metody pomiarowe, skanowanie przestrzenne, CAD.

WSTĘP

Bezstykowe metody pomiarowe należą do grupy współrzędnościowych technik pomiarowych. Techniki te zyskują coraz większą popularność w przemyśle oraz jednostkach badawczo rozwojowych. Zwiększenie udziału współrzędnościowych technik pomiarowych w procesach produkcyjnych związane jest z wprowadzeniem nowoczesnych technologii opartych na wytwarzaniu elementów z wykorzystaniem modeli CAD. Bezstykowe techniki pomiarowe oraz systemy CAD znacząco przyspieszają prace projektowe oraz wdrożeniowe, co pozwala na znaczną redukcję kosztów ponoszonych na przygotowanie nowych wyrobów. Aktualnie bezstykowe techniki pomiarowe w połączeniu z zaawansowanymi systemami CAD oraz narzędziami szybkiego prototypowania są niezbędne w wielu gałęziach przemysłu.

Bezstykowe techniki pomiarowe pozwalają na pozyskanie geometrii z istniejących modeli rzeczywistych, dzięki czemu możliwe jest wprowadzanie zmian konstrukcyjnych lub weryfikacja zgodności wykonanych elementów z założeniami konstrukcyjnymi. W artykule przedstawiono proces tworzenia trójwymiarowego modelu układu wymiany ładunku silnika spalinowego Subaru EJ25. Ze względu na skomplikowany kształt kanałów układu dolotowego oraz wylotowego

¹ Katedra Termodynamiki, Mechaniki Płynów i Napędów Lotniczych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska.

bardzo trudne byłoby dokładne odwzorowanie ich geometrii przy użyciu tradycyjnych narzędzi i technik pomiarowych. W artykule przedstawiono proces tworzenia geometrii trójwymiarowej na przykładzie opracowania modelu głowicy silnika. Opisano również proces przetwarzania przygotowanego modelu w programie *CAD*. Opracowany model umożliwi wykonanie trójwymiarowych badań symulacyjnych zjawisk przepływowych układu wymiany ładunku.

OBIEKT BADAŃ

Obiektem badań był samochodowy silnik o zapłonie iskrowym *Subaru EJ25*. W celu opracowania geometrii układu wymiany ładunku niezbędne było wykorzystanie elementów silnika takich jak głowica, kolektor dolotowy, tłok, zawory dolotowe i wylotowe. Przedstawiono proces opracowywania geometrii kanałów dolotowych i wylotowych oraz komory spalania silnika. Podczas skanowania użyto ręcznego samopozycjonującego laserowego skanera *ZScanner 700* firmy *ZCorporation*. Urządzenie to pozwala na przekształcanie fizycznych obiektów geometrycznych do cyfrowej trójwymiarowej postaci.



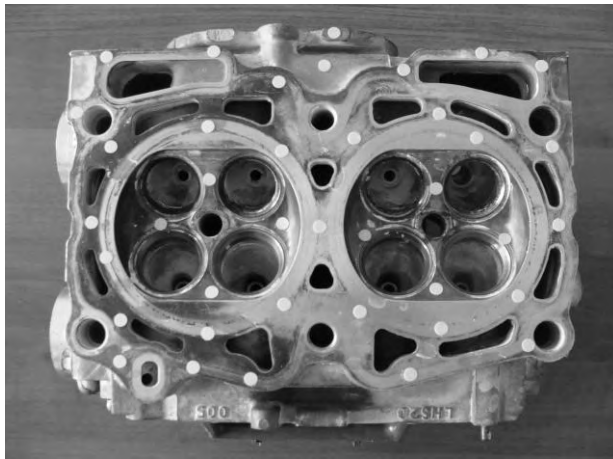
Rys. 1. Skaner *ZScanner 700*

Dane techniczne skanera *ZScanner 700*:

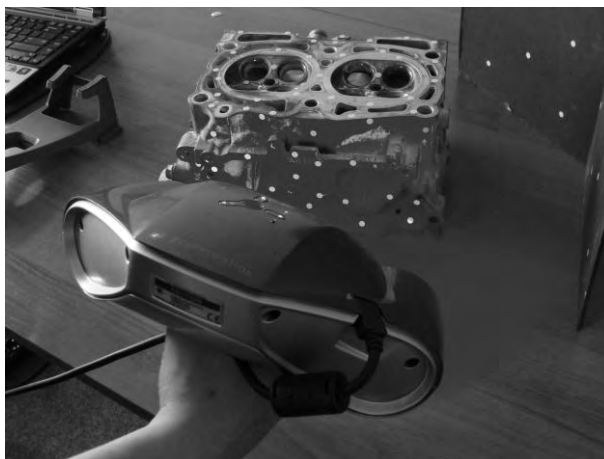
- masa: 0,98 kg,
- wymiary: 160 x 260 x 210 mm,
- liczba kamer: 2,
- formaty eksportowanych danych .DAE, .FBX, .MA, .OBJ, .PLY, .STL, .TXT, .WRL, .X3D, .X3DZ, .ZPR,
- pomiary: 18 000 pomiarów/s,
- klasa lasera: II (bezpieczny dla oczu),
- dokładność: do 0,05mm,

- rozdzielczość w osi z: 0,1 mm,
- transfer danych: *FireWire*,
- zasilanie: *FireWire*.

Skaner umożliwia skanowanie nietransparentnych matowych przedmiotów. Przed przystąpieniem do pracy niezbędne jest umieszczenie na powierzchni przedmiotu obrabianego refleksyjnych markerów pozycjonujących, które umożliwiają orientację skanera w przestrzeni roboczej, wyznaczonej przez markery. Skanowanie mniejszych obiektów można również przeprowadzić przy użyciu specjalnej maty z markerami. Ze względu na rozmiary głowicy silnika uniemożliwiające wykorzystanie maty markerowej niezbędne było umieszczenie markerów na jej powierzchni. Obiekt z markerami kontrolnymi przedstawiony został na rysunku 2, natomiast przebieg procesu skanowania na rys. 3.

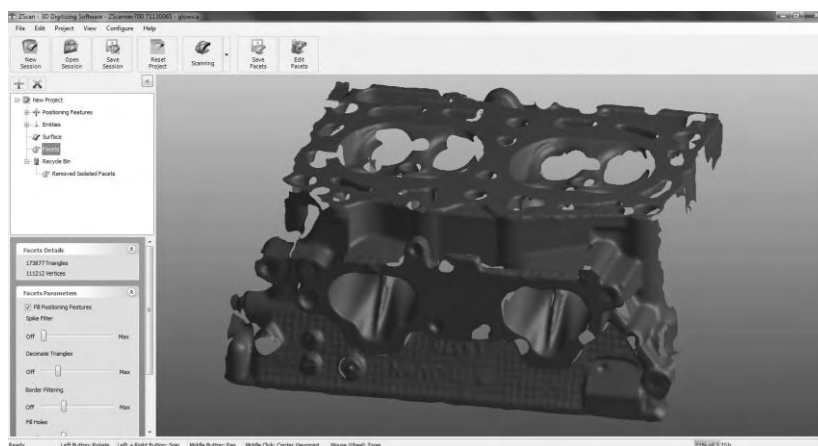


Rys. 2. Obiekt badań z markerami kontrolnymi



Rys. 3. Przebieg procesu skanowania

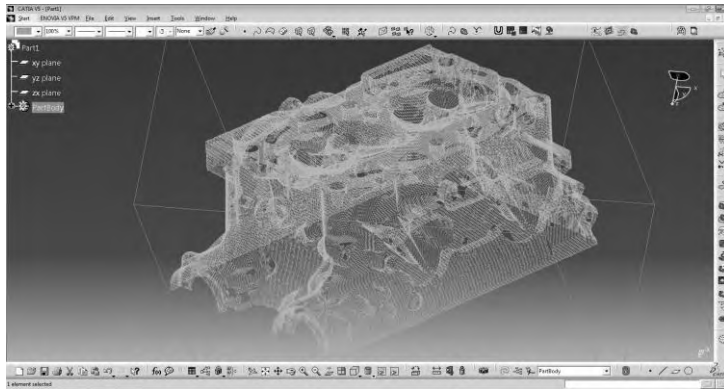
Dzięki oprogramowaniu *ZScan 3D Digitizing Software* możliwa jest bieżąca rejestracja postępów tworzenia powierzchni trójwymiarowej w czasie rzeczywistym. Po dezaktywacji trybu skanowania oprogramowanie umożliwia przeprowadzenie wstępnego procesu obróbki powierzchni, polegającego na usuwaniu izolowanych elementów, wygładzeniu krawędzi lub automatycznym wypełnieniu ubytków. W przypadku nieprawidłowego doboru parametrów skanowania możliwa jest zmiana głównej wartości parametru decydującego o dokładności otrzymywanej powierzchni, czyli rozdzielczości skanowania. Dzięki temu proces skanowania rozpoczęty ze zbyt małym parametrem rozdzielczości nie wymaga przerwania i ponownego rozpoczęcia, lecz po uprzednio zdefiniowanej zmianie dokładności możliwa jest jego kontynuacja. Uzyskaną geometrię można zapisać do pliku w postaci chmury punktów (plik tekstowy *.txt*) lub powierzchni (plik *.stl*). Tak otrzymane dane mogą być eksportowane do dowolnego programu środowiska CAD (*CATIA*, *NX*, itp) lub programu dedykowanego do obróbki formatów metody inżynierii odwrotnej (*GEO Magic Studio*). Widok modelu powierzchniowego podczas etapu skanowania przedstawiono na rys. 4.



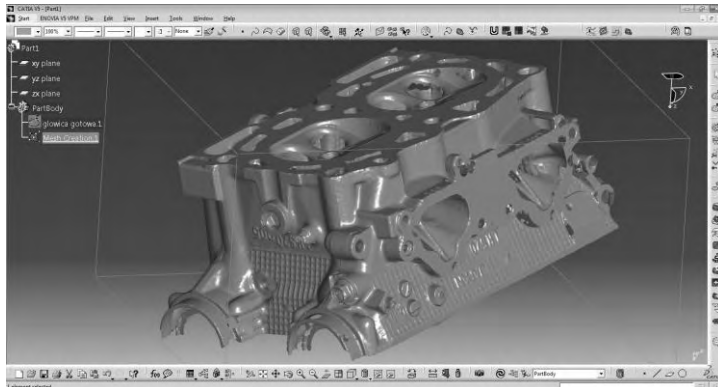
Rys. 4. Interfejs użytkownika programu *ZScan 3D Digitizing* podczas pracy skanera

Wyeksportowany z programu *ZScan 3D Digitizing Software* model obiektu rzeczywistego w postaci chmury punktów posłużyć może do budowy modelu geometrycznego w systemie CAD, np. *CATIA V5*. Moduł *Digitized Shape Editor* (*Catia V5*) umożliwia dostosowanie płaszczyzn definicyjnych (odniesienia) do przyjętego układu współrzędnych co znacząco ułatwia budowę modelu geometrycznego. Ponadto moduł ten umożliwia wygenerowanie splajnowych krzywych interpolacyjnych oraz aproksymacyjnych umieszczonych na poszczególnych płaszczyznach przekroju chmury punktów. Krzywe definicyjne umożliwiają odwzorowanie geometrii obiektu rzeczywistego. Chmurę punktów importowaną do systemu *Catia V5* przedstawia rys. 5. Chmura punktów umożliwia uzyskanie powierzchni „mesh” w oparciu o funkcję *Mesh Creation* (rys. 6), która wraz z

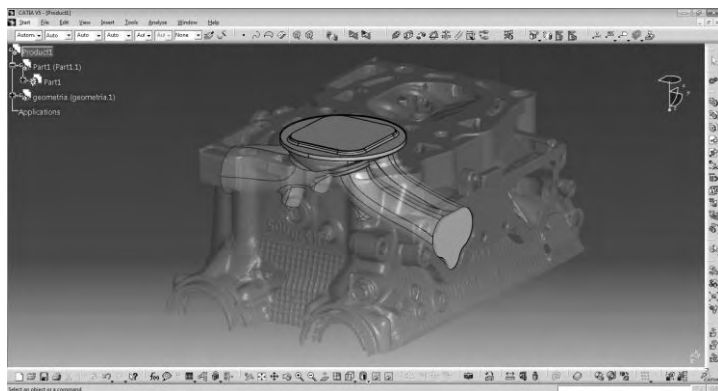
krzywymi definicyjnymi umożliwia opracowanie geometrycznego modelu układu wymiany ładunku silnika *Subaru EJ25* (rys. 7).



Rys. 5. Chmura punktów importowana do systemu *Catia v5*



Rys. 6. Powierzchnia utworzona na podstawie chmury punktów



Rys. 7. Otrzymana skanowana powierzchnia z opracowaną geometrią układu wymiany ładunku

PODSUMOWANIE

Skanowanie przestrzenne w znaczący sposób przyspiesza proces projektowania inżynierskiego. Znalazło zastosowanie głównie w metodzie inżynierii odwrotnej (*Reverse Engineering*). Skanowanie stosowane jest również w grafice komputerowej, archeologii, muzealnictwie, medycynie oraz wielu innych dziedzinach. Przyspieszenie prac projektowych uzyskiwane jest poprzez dokładne odwzorowanie geometrii modelu rzeczywistego, bez konieczności wykonywania jakichkolwiek zabiegów metrologicznych. W opracowywanym modelu ze względu na znaczne skomplikowanie ukształtowania przestrzennego kanałów dolotowych i wylotowych oraz przestrzeni roboczej silnika (komory spalania) bardzo trudne byłoby odwzorowanie kształtu i wymiarów tradycyjnymi technikami pomiarowymi. Zastosowanie metody inżynierii odwrotnej pozwala na zmniejszenie czasochłonności opracowania modelu oraz związane z tym ograniczenie kosztów. Na podstawie tak przygotowanego modelu w prosty sposób można przygotować dokumentację techniczną oraz technologiczną elementu lub całego zespołu. Ponadto model taki umożliwia wprowadzanie dowolnych modyfikacji, na przykład na podstawie wyników wygenerowanych ze środowiska oprogramowania *CFD*.

PIŚMIENNICTWO

1. Budzik G., Jaskólski J.: „Application laser scanner ZScanner 700 for digitalization process of turbocharger rotor”, *Silniki Spalinowe*, SC1 2007.
2. Budzik G., Grzelka M., Jaskólski J., Oleksy M.: „Three dimensional scanning of geometry of blade aircraft engine non-contact measuring methods”, *Silniki spalinowe*, SC1 2009.
3. Wyleżoł M., „Inżynieria odwrotna w doskonaleniu konstrukcji”, *Modelowanie inżynierskie*, Gliwice 2006.
4. Strona internetowa: www.Zcorp.com.

THE STUDY OF THE MODEL OF LOAD EXCHANGE SYSTEM OF SUBARU EJ25 ENGINE WITH THE USE OF REVERSE ENGINEERING

Summary:

The article presents a process to develop the geometry of the intake and exhaust valves and combustion chamber *Subaru EJ25* engine using the spatial scan engine parts (piston, head, valves, gate valves, intake manifold). To this end, the scanner was used *ZScanner 700 ZCorporation*. The resulting geometry of the point cloud was exported to the *Catia v5*, where they were developed based on its geometry. This model is later used for simulation studies of flow phenomena in the charge exchange engine.

Keywords: reverse engineering, non-contact measurement methods, three dimensional scanning, CAD.

Przemysław Filipek ¹⁾, Tomasz Kamiński ²⁾

URZĄDZENIA O SPRAWNOŚCI PONAD 100 %

Streszczenie: W artykule przedstawiono kilka przykładów różnego rodzaju urządzeń, których sprawność przekracza 100%. W Internecie istnieje wiele tego typu przykładów lecz tylko nieliczne z nich są autentycznie udokumentowane badaniami i uzyskanymi na nie patentami. Mimo, że powstały niedawno, niektóre już znalazły zastosowanie w praktyce dając znaczne oszczędności energii w porównaniu do urządzeń klasycznych.

Słowa kluczowe: silnik magnetyczny, ogniwo, stos, sprawność.

WSTĘP

W dobie współczesnej, rozwiniętej nauki, nie może istnieć żadne urządzenie, którego sprawność przekracza 1 (czyli ponad 100 %), podobnie jak niemożliwe jest stworzenie perpetuum mobile. Jak w takim razie wyjaśnić fakt istnienia i nieprzerwanego od 60 lat działania źródła napięcia, jakim jest stos Karpena? Skąd czerpią energię konstruowane silniki, których udowodniona badaniami i patentami sprawność przekracza 100%, sięgając nawet 330%? A może wyjaśnienie jest bardzo proste, tylko nie umiemy go znaleźć?

Fizyka klasyczna nie obejmuje swoim zakresem wszystkich zjawisk. W takim rozumieniu magnes stały nigdy nie wykona pracy – w odróżnieniu od elektromagnesu – choć oba elementy mogą przyciągnąć do siebie ciało o masie „m” na odległość „h”. Podobnie jest ze zjawiskiem nadprzewodności (zjawisko kwantowe), które nie jest możliwe do wyjaśnienia na gruncie fizyki klasycznej.

STOS ELEKTRYCZNY NICOLAE VASILESCU KARPENA

W 1950 roku jego twórca - Rumun Nicolae Vasilescu Karpen – zapowiedział, że jego bateria będzie działać wiecznie. Stos Karpena jest nazywany stosem termoelektrycznym i nieprzerwanie od 61 lat dostarcza prądu o napięciu 1 V (rys. 1). Ten nietypowy eksponat znajduje się w Narodowym Muzeum Techniki w Bukareszcie. Do tej pory nikt nie potrafi wyjaśnić tego zjawiska.

Urządzenie składa się z dwóch stosów elektrycznych, napędzających mały silnik galwanometryczny, który porusza śmigłem podłączonym do przełącznika. Śmigło co pół obrotu otwiera obwód, by go zamknąć po kolejnym pół obrotu [2].

¹⁾ Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn.

²⁾ Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Studenckie Koło Naukowe Zastosowań Mechatroniki ELMECH.



Rys. 1. Widok Stosu Karpena [1]
Fig. 1. View on the Karpen's pile [1]

W 2006 r. dokonano pomiaru napięcia stosu podczas pokazu jego działania dla rumuńskiej gazety „Dziennik”. Pomiar wykazał, że stos generuje napięcie elektryczne o wartości 1V i jest to identyczna wartość, jaką urządzenie wytwarzało w 1950 r. Stwierdzono, że jedna z elektrod stosu Karpena zrobiona jest ze złota, a druga z platyny. Całość zatopiona jest w najwyższej jakości kwasie siarkowym [2].

Urządzenie było badane w wielu instytucjach naukowych w Bukareszcie, Paryżu i Bolonii, lecz naukowcy nie byli w stanie w jasny sposób wytłumaczyć zasad jego działania. Nicolae Vasilescu Karpen uzyskał na swój wynalazek patent w 1924 r. we Francji (nr FR577087) [2].

SILNIK KOHEI MINATO

Kohei Minato to Japończyk, który w swoim warsztacie zaprojektował i wykonał wiele silników opartych na zasadzie odpychania magnetycznego z zastosowaniem magnesów stałych oraz małych elektromagnesów pracujących tylko w chwili pokonywania niekorzystnego pola od magnesów trwałych.

Silnik Minato (przedstawiony na rys. 2 oraz rys. 3) wykorzystuje odpychanie magnetyczne jako podstawowe źródło energii. Charakteryzuje się niewielkimi stratami, minimalnym wytwarzaniem ciepła i jest znacznie wydajniejszy od silników konwencjonalnych (nawet o 330 %) [3].

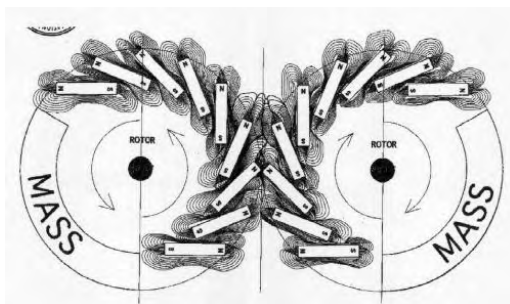
Większość prototypów Minato składa się z trójwarstwowego niemagnetycznego rotora wyposażonego w potężne neodymowe magnesy o sile 5000 gausów rozmieszczone co 5 stopni w odległości 175 stopni od siebie na obwodzie rotora

[3]. Magnesy działają odpychająco na dwa umieszczone po przeciwnych stronach elektromagnetyczne statory.



Rys. 2. Kohei Minato ze swoim silnikiem [3]

Fig. 2. Kohei Minato with his engine [3]



Rys. 3. Zasada działania silnika magnetycznego Kohei Minato [5]

Fig. 3. The principle of the working of the Kobei Minato's magnetical engine [5]

Rotor kręci się w wyniku odpychania jego magnesów od statorów w kierunku pochylonych magnesów rotora. Elektromagnesy statora są włączane impulsowo na około 10 ms przy ruszaniu, z redukcją do 2 ms, gdy rotor osiągnie swoją normalną prędkość obrotową. Zapewnia to uaktywnienie elektromagnesów tylko wtedy, kiedy naprzeciw nich znajdują się odchodzące magnesy rotora.

Od lat dziewięćdziesiątych XX w. firma Minato (Japan Magnetic Fan) udoskonalała konstrukcję silników. W 2004 roku Minato sprzedał 40 000 swoich silników (w zbudowanych wentylatorach) dla sieci sklepów z artykułami gospodarstwa domowego [3]. Wentylator wygląda prawie identycznie jak model Mitsubishi, który jest obecnie w powszechnym użytku. Testy dowiodły, że wydajność tłoczenia powietrza jest podobna dla obu silników. Czym się więc różnią? Silniki Minato zużywają tylko 20 % energii silników konwencjonalnych o tym samym momencie obrotowym i mocy. Pracują prawie bez wydzielania ciepła i hałasu, a po za tym są bezpieczniejsze i dużo tańsze (w kategoriach zużytej energii) oraz są bardziej przyjazne środowisku. Minato twierdzi, że średnia sprawność jego silników wynosi 330 %. Opatentował swój wynalazek aż w 48 krajach (m. in. Patent USA nr 5394289) [3].

Kolejnym jego urządzeniem jest prototyp klimatyzatora samochodowego, przeznaczony dla Nippon Denso - największego japońskiego producenta klimatyzatorów samochodowych. Urządzenie jest bardzo kompaktowe i ma taki sam kształt oraz wymiary, co urządzenie konwencjonalne.

Niestety, dynamiczny rozwój wynalazków Kohei Minato został zahamowany po tym, jak w 2007 roku wynalazca został zamordowany. Takie wynalazki w krótkim czasie bardzo zaniżyłyby przychody koncernów naftowych, które dostarczają paliwa do powszechnie stosowanych silników spalinowych.

SILNIK MAGNETYCZNY MUAMMERA YILDIZA

W kwietniu 2010 r. na Uniwersytecie Delft w Holandii przeprowadzono naukową prezentację działającego prototypu silnika magnetycznego wynalazcy z Turcji - Muammera Yildiza (rys. 4 i 5).



Rys. 4. Muammer Yildiz ze swoimi silnikami magnetycznymi [4]

Fig. 4. Muammer Yildiz with his magnetic engines [4]



Rys. 5. Silnik magnetyczny Muammera Yildiza – pokaz na uniwersytecie Delft [4]

Fig. 5. Muammer Yildiz Magnetic engine - show on the Delft university [4]

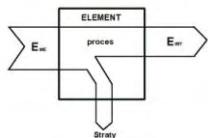
Pokaz się udał, a silnik działał nieprzerwanie i bez problemów przez 10 minut. Dodatkowo zamontowano do niego śmigło od wentylatora. Moc użyteczną tego wynalazku oszacowano na 250 W [4].

Niektórzy spośród obecnych na prezentacji studentów i naukowców stwierdzili, że póki nie sprawdzą, że w silniku nie ma ukrytego żadnego zasilania, nie uwierzą w to, że silnik działa tylko dzięki siłom magnetycznym. Wynalazca zezwolił więc na rozebranie swojego urządzenia na czynniki pierwsze i przekonanie się, że silnik jest czysto magnetyczny. Muammer Yildiz zaprezentował swój silnik również w tureckiej telewizji. Ponieważ silnik magnetyczny nie jest zasilany przez żadną energię elektryczną, a wykonuje pracę (kręcąc śmigłem), trudno mówić o klasycznym obliczaniu sprawności – która wielokrotnie przekroczy 100%.

Ten wynalazca nie jest pierwszym, który pokazuje światu swoje genialne odkrycie. Było już kilka osób (Nicolae Tesla, Howard Johnson, John Searl), które również skonstruowały różne silniki magnetyczne, lecz do dzisiaj nie widać ogólnodostępnych silników magnetycznych ich produkcji. Może być to związane z tym, że rozwój i wdrożenie silników magnetycznych na rynek konsumpcyjny w dość krótkim czasie wyparłoby silniki spalinowe - co zrujnowałoby cały biznes naftowy, który obecnie jest światową potęgą.

UWAGI KOŃCOWE

Sprawność to wielkość fizyczna określająca w jakim stopniu dany element przekształca energię z jednej postaci – w inną. Schemat sprawności obrazuje rysunek 6.



Rys. 6. Schemat sprawności
Rys. 6. Efficiency scheme

Ogólnie można zapisać:

$$\eta = \frac{E_{wy}}{E_{we}} \quad (1)$$

gdzie:

η – sprawność [%],

E_{wy} – energia przekształcona (wyjściowa) [J],

E_{we} – energia dostarczona (wejściowa) [J].

Z zasady zachowania energii wynika, że sprawność nie może być większa od jedności czyli od 100%.

Patrząc na opisane powyżej urządzenia okiem klasycznej nauki, rzeczywiście można stwierdzić po zmierzeniu mocy wejściowej i wyjściowej (zwłaszcza jeśli chodzi o silnik Minato), że sprawność grubo przewyższa wartość 100 %. Zastanawiając się – dlaczego tak się dzieje – należy zwrócić uwagę, skąd silnik Minato czerpie energię. W większości jest to pole magnetyczne od stałych (odpowiednio ułożonych) magnesów. Gdyby więc do energii wejściowej doliczyć energię od pola magnetycznego magnesów stałych to okaże się, że sprawność nie przekroczy 100 %.

W ogniwie Karpena mogą natomiast występować pewne zjawiska fizyczne, których do tej pory nie odkryto. Możliwe, że po ich odkryciu okaże się, że i w tym przypadku sprawność nie przekracza 100 % a ogniwo pobiera energię np. z otoczenia (temperatura) lub jej źródło znajduje się wewnątrz stosu (jakiś rodzaj promieniotwórczości).

PIŚMIENNICTWO

1. Mateucă G. S.: O sursă inepuizabilă de energie: pila Karpen; artykuł ze strony internetowej Energo Biologie : <http://www.energobiologie.ro/index.php/Energii/O-sursa-inepuizabila-de-energie-pila-Karpen.html> (wersja źródła z 04.04.2011).
2. Opis stosu Karpena oraz jego patent: artykuł ze strony internetowej <http://www.rexresearch.com/karpen/karpen.htm> (wersja źródła: 04.04.2011).

3. Wynalazki Kohei Minato: artykuł ze strony internetowej http://www.magnesy.tanio.net/silnik_magnetyczny.html (wersja źródła 04.04.2011).
4. Silnik magnetyczny Muammera Yildiza: artykuł ze strony internetowej <http://prawdaxlpl.wordpress.com/2010/04/26/na-universytecie-delft-w-holandii-przedstawiono-w-pelni-dzialajacy-silnik-magnetyczny/> (wersja źródła 04.04.2011).
5. Energy free and pollution free technology. Hidden technologies about alternative energy. Artykuł ze strony internetowej: http://www.wiibeez.com/directory_new-technologies.htm (wersja źródła: 04.04.2011).

APPLIANCES ABOUT EFFICIENCY OVER 100 %

Summary

In the article we show some appliance examples, which efficiency is over 100 %. In the internet we can find a lot of such appliances but only few of them are documentary and have got patents. Despite they were constructed recently some are now using, giving more energy safer than classic.

Keywords: magnetic engine, cell, pile, efficiency.

Mirosław Ferdynus ¹⁾, Mateusz Kania ²⁾

ANALIZA KINEMATYCZNA MECHANIZMU UKŁADU STEROWANIA POCHYLENIEM I PRZECHYLENIEM ŚMIGŁOWCA W SYSTEMIE CATIA V5

Streszczenie: W pracy przedstawiono model układu sterowania pochyleniem i przechyleniem śmigłowca wykonany w systemie Catia v5. Analizę kinematyczną modelu wykonano w środowisku DMU Kinematics. Zaprezentowano analizę kolizji i prześwitów oraz odległości komponentów w trakcie symulacji ruchu.

Słowa kluczowe: analiza kinematyczna, układ sterowania śmigłowca, system Catia v5.

WSTĘP

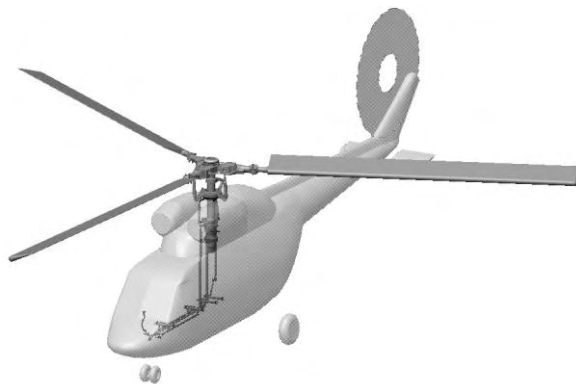
Mechanizm sterowania wirnikiem nośnym śmigłowca w układzie klasycznym realizowany jest przy pomocy ruchomej tarczy sterującej. W tym układzie sterowanie realizowane jest skokiem ogólnym oraz obrotami wirnika nośnego przy pomocy dźwigni skoku ogólnego. Cykliczna zmiana nastawienia łopat dająca możliwość sterownia kierunkowego śmigłowca realizowana jest przy pomocy drążka pilota. Model układu sterowania jest układem klasycznym i został wpisany w nowy kadłub tworzonego prototypu. Wykorzystano nowe położenia wręg, gdzie będą mocowane wsporniki drążków. Wirtualny model składa się ze sterownicy skoku okresowego, drążków sterujących w kabinie pilota, układu dźwigni i popychaczy, który zapewnia przeniesienie sterowania na tarczę sterującą wirnika nośnego. Sterownie realizowane jest poprzez sterownicę w kabinie pilota. W niniejszej publikacji przedstawiono budowę modelu mechanizmu sterowania lotem śmigłowca w aspekcie jego przechylania (na boki) i pochylenia (nos–ogon). Model powstał w systemie Catia v5. Poszczególne elementy powstawały w module Part Design i Generative Shape Design. Tworzenie złożenia i nadanie więzów kinematycznych odbywało się w aplikacji Assembly Design i DMU Kinematics. Niezwykle ważne w tak skomplikowanym modelu było nadanie odpowiednich relacji do sterowania ruchem. Relacje te i związki zostały nadane w module Knowledge Advisor. Na rysunku 1 przedstawiono model układu sterowania śmigłowca wpisany w sylwetkę kadłuba.

Ze względu na specyfikę obiektu jakim jest układ sterowania, nie ma sensu badać prędkości i przyspieszenia, czy też trajektorii poszczególnych punktów mechanizmu (choć oczywiście jest to możliwe). W publikacji koncentrowano się

¹ Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn.

² Instytut Lotnictwa w Warszawie, Engineering Design Center.

na opisie funkcjonalnym modelu oraz na bardzo ważnym aspekcie- analizie kolizji i prześwitów, która ma zasadnicze znaczenie w projektowaniu tego typu obiektów. Realne problemy konstruktorów to tego typu wady.



Rys. 1. Mechanizm sterowania zabudowany w wirtualnym śmigłowcu
Fig. 1. Mechanism of steering built over in virtual helicopter

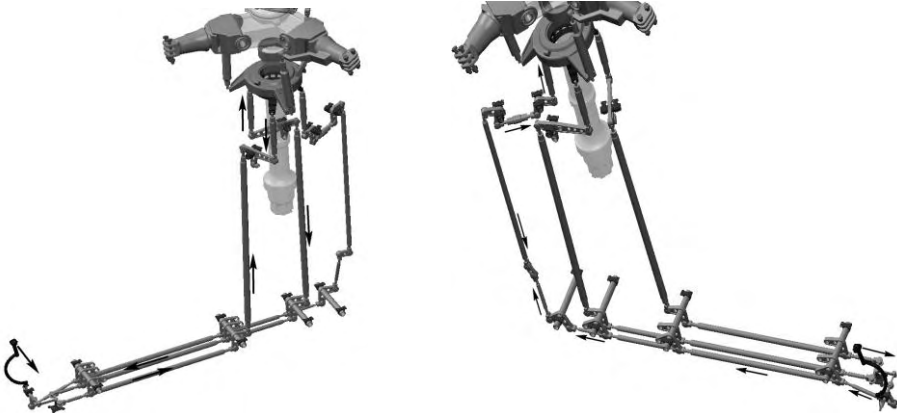
DEFINIOWANIE MECHANIZMU ZŁOŻONEGO UKŁADU STEROWANIA ŚMIGŁOWCA ORAZ SYMULACJA JEGO RUCHU

Celem procesu modelowania mechanizmu jest otrzymanie poprawnej struktury kinematycznej cechującej się sterowalnym i ciągłym jej łańcuchem. Zdefiniowanie mechanizmu w systemie Catia v5 polega na jednoznacznym określeniu rodzaju więzów pomiędzy poszczególnymi elementami ruchomymi urządzenia. Część z tych relacji może być zaimportowana ze złożenia Assembly Design, co znacząco skraca czas tworzenia mechanizmu. W przedstawionym modelu wykorzystane zostały następujące więzy kinematyczne: Revolute Joint - ruch obrotowy pomiędzy dźwigniami a osiami na której są osadzone, Spherical Joint - modelujące pracę przegubów kulistych oraz Rigid Joint - realizujące utwierdzenie elementów w przestrzeni poprzez ich sztywne połączenie z ostoją mechanizmu.

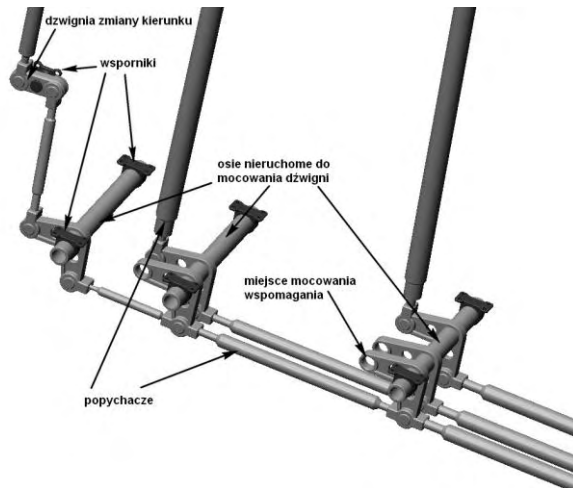
Ze względu na złożoność układu, model był tworzony etapami i na poszczególnych etapach budowano mechanizm realizujący określoną funkcję, następnie sukcesywnie go rozbudowywano i łączono w większe grupy. Po nadaniu wszystkich więzów kinematycznych (a jest ich aż 186) i określeniu sterowań prowadzono symulację z wykorzystaniem komend w celu weryfikacji poprawności modelu.

W projektowanym układzie wyróżniono trzy strefy. Strefa pierwsza (rysunek 2) to sterownica w kabinie pilotów wraz z układem dźwigni, który ruch drążka steru zamienia na ruch posuwisty odpowiednich popychaczy. Sterowanie układem w module DMU Kinematics odbywa się poprzez poruszanie dźwignią bezpośrednio w oknie roboczym (opcja Immediate) lub poprzez zastosowanie suwaków

ze ruch popychaczy jest bardziej złożony. System Catia v5 zapewnia narzędzia do analizy tego ruchu pod kątem kolizyjności z fragmentami kadłuba lub innymi elementami infrastruktury pokładowej. Na uwagę zasługuje także konieczność stosowania dźwigni zmieniającej zwrot kierunku ruchu popychacza. Dzięki temu ruch sterownicy powoduje właściwą odpowiedź tarczy sterującej.



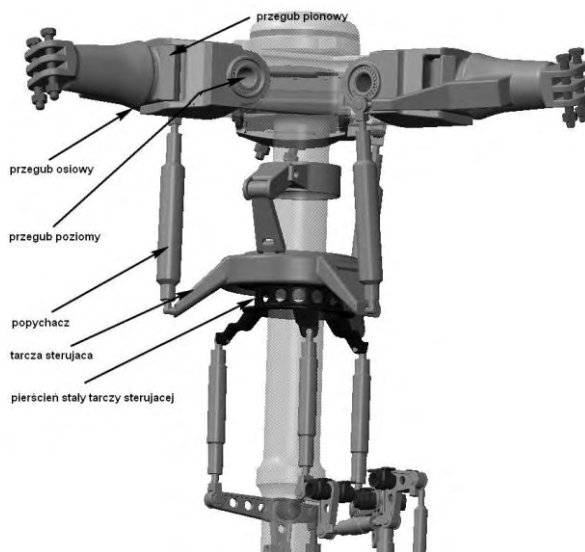
Rys. 4. Sterowanie przechyleniem i pochyleniem śmigłowca
Fig. 4. Control of the helicopter angling and tilting



Rys. 5. Strefa druga układu sterowania
Fig. 5. Second zone of control system

Strefa trzecia zawiera w sobie układ popychaczy i tarczę sterującą. Głównym elementem układu jest mechanizm tarczy sterującej, składający się m.in. z dwóch pierścieni. Dolny pierścień, nie obracający się, może być przechylany w dowol-

nym kierunku zadawanym przez pilota za pomocą sterownicy skoku okresowego. Górny pierścień obraca się wraz z wałem wirnika w taki sposób, że jest on zawsze równoległy do pierścienia dolnego. Pierścień górny jest połączony z łopatom za pomocą popychaczy i dźwigni przekreśień łopat. Przechylenie tarczy sterującej powoduje zmianę kąta nastawienia łopaty (ruch łopaty względem przegubu osiowego). Nietrudno jest zauważyć, że przy obrocie wirnika, łopaty zmieniają kąt nastawienia okresowo tzn. raz na obrót. Zespół wirnika głównego przedstawiono na rysunku 6.



Rys.6. Zespół wirnika głównego

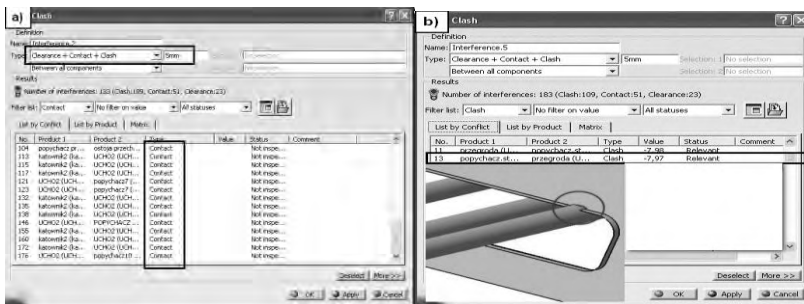
Fig.6. The main rotor assembly

ANALIZA KINEMATYCZNA UKŁADU STEROWANIA I WERYFIKACJA PRAWDŁOWOŚCI ZAPROJEKTOWANEGO MECHANIZMU

Analiza prawidłowości projektu układu sterowania pod względem jego kinematyki w systemie Catia V5 polega na doprowadzeniu do możliwości symulacji jego ruchu. System nie pozwoli na symulację, jeśli układ nie jest jednoznacznie zdefiniowany. Liczba stopni swobody musi być równa zero. W drzewie struktury modelu pojawia się informacja $DOF=0$ a Catia informuje użytkownika, że mechanizm może być symulowany. A zatem celem, nie łatwym do osiągnięcia, jest uzyskanie ciągłego łańcucha kinematycznego, który zapewni przeniesienie ruchu z członu sterownego na ostatni człon roboczy łańcucha.

Specyfika obiektu badań jakim jest układ sterowania śmigłowca sprowadza analizy kinematyczne do dwóch zagadnień istotnych dla konstruktora: analiza ewentualnych kolizji i prześwitów podczas ruchu mechanizmu (Check Clash and

Clearence) oraz analiza odległości, która pokazuje jaki skok wystąpi na poszczególnych elementach roboczych (Distance and Band Analysis). Takie możliwości praktycznie niedostępne poza systemami 3D umożliwiają precyzyjne poprowadzenie układu sterowania przez meandry korytarzy współdzielonych często z inną infrastrukturą pokładową. Zastosowanie polecenia Clash, które służy do testowania modeli pod kątem prawidłowości ich wykonania, może odbywać się z dwóch poziomów: z poziomu ogólnego - funkcja jest dostępna w większości modułów, a także z poziomu w aplikacji DMU Kinematics gdzie umożliwia testowanie modeli będących w ruchu (konieczne jest podczas symulacji wybranie polecenia Activate Sensors, zaznaczenie, które obiekty mają być śledzone i uruchomienie funkcji Detect Clashes). Aby zaprezentować możliwości systemu do modelu wprowadzono przegrodę i badano kolizje elementów układu sterowania między sobą, a także z przegrodą. Ustawiono także opcję Clearance= 5 mm dzięki której system będzie sygnalizował gdy elementy zbliżą się do siebie bliżej niż 5 mm. Na rysunku 7 przedstawiono wygląd okna Check Clashes w którym można szczegółowo zapoznać się z relacjami pomiędzy poszczególnymi elementami. Istnienie relacji typu Contact świadczy o tym, że elementy zostały dopasowane prawidłowo. Jeżeli pojawia się kolizja (także podczas ruchu) wówczas typ relacji zmienia się na Clash i dodatkowo pojawia się parametr mówiący o wielkości tej penetracji. Widać to na rysunku 7b gdzie przedstawiono także miejsce wystąpienia kolizji.

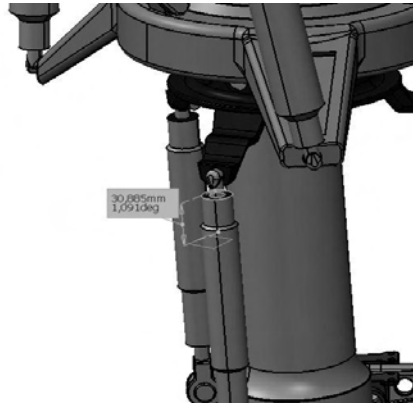


Rys.7. a) analiza prawidłowości wykonania modelu, b) sygnalizacja kolizji (Clash) z przegrodą

Fig.7. a) correctness analysis of execution of model, b) signalling a collision with the baffle

Na rysunku 8 przedstawiono realizację komendy Distance and Band z pomocą której można analizować w trakcie ruchu odległość wybranego obiektu od innego obiektu (także ruchomego). Po wygenerowaniu płaszczyzny referencyjnej na wysokości neutralnego położenia popychacza można określić jego dolne i górne położenie. W ten sposób przed wykonaniem prototypu można analizować przemieszczenia poszczególnych węzłów. Przemieszczenia w trakcie symulacji moż-

na także uzyskać w funkcji czasu po uaktywnieniu odpowiednich sensorów (Activate Sensors) a wyniki wyprowadzić w postaci wykresu lub w pliku Excel.



Rys. 8. Analiza odległości pomiędzy położeniem neutralnym a krańcowym popychacza
Fig. 8. Analysis of distance among neutral site but extreme of the follower

WNIOSKI

Opracowany model układu sterowania śmigłowcem w aspekcie jego pochylania i przechylania jest prawidłowy. Ze względu na ograniczone możliwości dostępu do rzeczywistej konstrukcji śmigłowca nie przedstawiono ze szczegółami przebiegu instalacji pokładowych przez zakamarki śmigłowca. Pokazano jednak możliwości systemu Catia w zakresie wykrywania kolizji, deklarowania niezbędnych prześwitów i analizy funkcjonalności zaprojektowanego układu. Waga tych zagadnień jest niezwykle, gdyż wykrycie wszelkich nieprawidłowości w trakcie testowania wirtualnego prototypu skraca czas uruchomienia produkcji i obniża jej koszty. Wszelkie nieuniknione błędy podczas projektowania generują koszty, tym większe im później zostaną odkryte. Nowoczesne metody projektowania zaprezentowane w pracy wraz z narzędziami do testowania modeli (także w ruchu) sprawiają, że błędów jest znacznie mniej i pojawiają się w fazie gdzie ich usunięcie odbywa się w środowisku wirtualnego modelu. Faza uruchomienia produkcji związana z budową rzeczywistego prototypu, jego badaniami i nieuniknionymi poprawkami jest bardzo kosztowna i czasochłonna. Dobrze zatem, aby prototyp był zbliżony do ideału. Nowoczesne systemy projektowe i przede wszystkim dobrze wyszkoleni konstruktorzy pomagają to osiągnąć. Unika się niezwykle kosztownych zmian konstrukcyjnych na etapie wdrażania wyrobu do produkcji lub w jej trakcie. Zmniejszają się również koszty serwisowe dzięki wyższej jakości produktu oraz zaawansowanym symulacjom, gdzie sprawdzana jest montowalność oraz inne aspekty związane z przyszłymi naprawami.

Bardzo ważnym aspektem w kontekście projektowania statków powietrznych jest zmniejszenie masy startowej. Bardzo precyzyjne prowadzenie układu sterowania, wiązek elektrycznych, rur i wszelkiego rodzaju infrastruktury pokładowej znacząco zmniejsza masę startową śmigłowca oraz redukuje koszty jego produkcji. Zapewnienie odpowiednich odstępów elementów sterowania od fragmentów kadłuba i innych obiektów infrastruktury pokładowej, tak aby w przypadku wystąpienia wibracji nie wchodziły w kontakt z kadłubem jest podstawowym wymogiem bezpieczeństwa i niezawodności projektowanych maszyn.

Presja rynku, konkurencji i coraz ostrzejszych przepisów w celu podniesienia niezawodności i innowacyjności wyrobów, znalazła swoje odzwierciedlenie w diametralnym unowocześnieniu metod projektowania. System Catia v5 w pełni potwierdza swoje olbrzymie możliwości wspomagania nowoczesnego projektowania maszyn i urządzeń.

PIŚMIENNICTWO

1. Wyleżoł M. : Catia v5. Modelowanie i analiza układów kinematycznych. Helion. Gliwice 2007.
2. Wełyczko A.: Catia v5. Przykłady efektywnego zastosowania systemu w projektowaniu mechanicznym. Helion. Gliwice 2005.

KINEMATIC ANALYSIS OF THE HELICOPTER INCLINATION AND TILT CONTROL SYSTEM IN CATIA V5

Summary

In this paper we present kinematics analysis of helicopter steering system model. Particularly it is: trajectory of a moving points analysis, clashes and distance between parts. Application DMU Kinematics in Catia v5 provides easy methods to simulate mechanisms, run kinematics simulations and speed up virtual prototyping. This analysis are useful to study a mechanism behavior to improve its design.

Keywords: Kinematics analysis, Control system, steering, helicopter, CatiaV5.

Agnieszka Skoczylas ¹⁾

ANALIZA PORÓWNAWCZA PROCESU CIĘCIA WIĄZKĄ LASEROWĄ I STRUMIENIEM WODNO- ŚCIERNYM

Streszczenie: W artykule przedstawiono porównanie procesu cięcia wiązką laserową oraz strumieniem wodno- ściernym w ujęciu technicznym i ekonomicznym. Zaprezentowano także algorytm do wyznaczenia kosztu cięcia przedmiotu o długości jednego metra.

Słowa kluczowe: cięcie laserem, cięcie strumieniem wodno- ściernym, analiza techniczno-ekonomiczna.

WSTĘP

Cięcie metali jest operacją technologiczną, od której zaczyna się najczęściej cały proces wytwarzania elementów maszyn. Wybór metody cięcia zależy od wymagań stawianych przez konstruktora danego elementu oraz od możliwości technicznych, tj. rodzaju i grubości ciętego materiału, wymaganej jakości cięcia (dokładności kształtu, szerokość strefy wpływu ciepła (SWC)), tolerancji wymiarowych, odchyłki prostopadłości, oraz od kształtu wycinanego elementu. Do czynników, od których zależy wybór metody cięcia można zaliczyć również: koszty inwestycji, koszty eksploatacji, efektywność procesu i stopień wykorzystania urządzenia [1, 4].

Obecnie istnieje wiele metod cięcia, poza cięciem mechanicznym stosowanych w technice, są to: cięcie wiązką laserową oraz strumieniem wodno- ściernym.

Cięcie wiązką laserową jest technologią stosowaną w wielu dziedzinach przemysłu, na przykład samochodowym, lotniczym, maszynowym. Do zalet cięcia laserowego można zaliczyć: łatwość automatyzacji procesu i jego dużą elastyczność, szeroki zakres materiałów poddających się procesowi cięcia (od bardzo miękkich i kruchych do supertwardych), duża szybkość procesu, wąska szczelina cięcia, i strefa wpływu ciepła, możliwość otrzymania półwyrobu na wymiar oraz bezkontaktowość procesu co skutkuje brakiem zużycia narzędzia [1, 2, 3, 5].

Cięcie strumieniem wodno- ściernym jest technologią rozwijającą się w sposób bardzo dynamiczny. Przewagą tej technologii nad innymi jest możliwość cięcia niemal wszystkich materiałów, np. materiały izolacyjne, metal, szkło, karton. Technologia ta stosowana jest do cięcia tych elementów, których wykonanie innymi technologiami jest trudne, kosztowne lub niemożliwe. Do zalet tej techno-

¹ Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska.

logii należy zaliczyć: uzyskanie wysokiej jakości powierzchni cięcia, brak zmian strukturalnych materiału przy krawędziach (brak SWC), brak odkształceń cieplnych, wysoką czystość powierzchni. Metoda ta jest szczególnie opłacalna dla małych i średnich serii wyrobów [1, 5, 6].

Poza aspektem technicznym, który ma istotny wpływ przy wyborze technologii cięcia bardzo ważnym czynnikiem są koszty. Aby zapoznać się z konkurencyjnością danej metody, istotne jest zapoznanie się z kosztem cięcia przedmiot o długości jednego metra. Dlatego też, w niniejszej pracy przedstawiono koszt cięcia wiązką laserową i strugą wodno-ścierną, w celu ukazania opłacalności ich zastosowania. Kompleksowa analiza aspektów technicznych i ekonomicznych zastosowania technologii cięcia wiązką laserową i strumieniem wodno-ściernym pozwala na uniknięcie nie trafionych decyzji, co do wyboru metody cięcia i związanych z nim strat.

ANALIZA EKONOMICZNA

Analiza ekonomiczna procesu cięcia została przeprowadzona dla stali kwasoodpornej XCrNi18-10 (wcześniejsze oznaczenie OH18N9) o grubości $g=5\text{mm}$. Koszt cięcia przedmiotu o długości jednego metra wyznaczono dla wycinarki laserowej firmy Bystronic, Bystar 4025 o mocy lasera 4000W i wymiarach stołu 2000x4000mm oraz dla urządzenia Waterjet Maschining Center 3020 (WCM-3020) firmy Flow o wymiarach stołu 4000x2000mm. Urządzenie to pozwala na cięcie strugą wodną jak i wodno-ścierną.

Przeprowadzając analizę ekonomiczną procesu cięcia strugą wodno-ścierną oraz wiązką laserową pominięto koszt wynagrodzenia pracownika obsługującego dane urządzenie.

W celu wyznaczenia kosztu przecinania przedmiotu o długości jednego metra zostały uwzględnione czynniki stałe oraz zmienne, są to dane dotyczące wycinarki laserowej Bystar 4025 oraz urządzenia WCM - 3020 (tabela 1, tabela 2) oraz koszty jednostkowe (tabela 3) dla każdej z metod cięcia.

W celu uproszczenia posługiwania się czynnikami i kosztami jednostkowymi, niezbędnymi do przeprowadzenia analizy ekonomicznej wprowadzono skrótowe oznaczenie dla poszczególnych składowych.

Tabela 1. Czynniki stałe proces cięcia wiązką laserową i strumieniem wodno-ściernym
Table 1. Solid factors of laser cutting and water jet cutting

Czynnik stały	Oznaczenie	Jednostka	Bystar 4025	WCM -3020
Koszt zakupu	K_z	PLN	1 815 432	1 018 240,92
Okres amortyzacji	O_A	lata		5
Zajmowana powierzchnia	F	m^2	230	300
Wysokość kredytu (50% wartości maszyny)	W_K	PLN	907 716	509 120,46
Oprocentowanie kredytu	O_K	%		10,11
Zakładana ilość godzin pracy	L	h/rok		3500

Tabela 2. Czynniki zmienne procesu cięcia wiązką laserową i strumieniem wodno- ściernym

Table 2. Variable factors of laser cutting and water jet cutting

Czynnik	Oznaczenie	Jednostka	Wartość
CIĘCIE WIĄZKĄ LASEROWĄ			
Wskaźnik efektywności pracy*	T_L	%	80
Zużycie sprężonego powietrza	Z_G	Nm^3/h^{**}	45
Zużycie energii elektrycznej	E_Z	kW	49
Zużycie gazu tnącego	G_Z	Nm^3/h^{**}	32
Prędkość cięcia	v	m/h	150
CIĘCIE STRUMIENIEM WODNO- ŚCIERNYM			
Ciśnienie pompy	p	MPa	350
Zużycie ścierniwa	$Z_{\dot{S}}$	kg/min	0,69
Moc maszyny	N	kW	42
Zużycie wody	Z_W	l/min	3,8
Wskaźnik efektywności pracy*	Q	%	80
Prędkość cięcia	v	m/h	39,96
Współczynnik empiryczny ***	B	-	0,912

*czas efektywnej pracy (czas pracy/ czas włączenia maszyny)

** Nm^3 - normalny metr sześcienny (jednostka rozliczeniowa, oznaczając ilość suchego gazu zawartą w objętości $1m^3$ przy ciśnieniu 101,325kPa i temperaturze $0^\circ C$)

*** współczynnik wyznaczony doświadczalnie uwzględniający zależność prędkości cięcia od grubości

Tabela 3. Koszty jednostkowe procesu cięcia wiązką laserową oraz strugą wodno- ścierną

Table 3. Elementary costs of laser cutting and water jet cutting

Koszty jednostkowe	Oznaczenie	Jednostka	Bystar 4025	WCM -3020
Podatek od nieruchomości	P_{NI}	PLN/ m^2 /rok	15,68	
Podatek gruntowy i wieczyste użytkowanie	P_{GI}	PLN/ m^2 /rok	1,68	
Koszt jednostkowy energii elektrycznej	K_{EJ}	PLN/kWh	0,25	
Koszt gazu tnącego O_2	K_{GJ}	PLN/ Nm^3 *	1,00	-
Koszt gazu tnącego N_2	K_{GJ}	PLN/ Nm^3 *	0,65	-
Koszty gazów laserowych	K_{GL}	PLN/h	1,10	-
Koszt sprężonego powietrza	K_{SJ}	PLN/ Nm^3 *	0,10	-
Koszt dzierżawy zbiornika O_2	K_{O2M}	PLN/miesiąc	800	-
Koszt dzierżawy zbiornika N_2	K_{N2M}	PLN/miesiąc	1760	-
Koszt części zamiennych i szybko zużywających	K_{CZ}	PLN/h	21,62	-
Koszt ścierniwa	$K_{\dot{S}J}$	PLN/kg	-	16,52
Koszt wody	K_{WJ}	PLN/h	-	8,17
Koszt ścieków	$K_{\dot{S}C}$	PLN/h	-	0,15
Koszty narzędzi wymiennych + uszczelnienia + przegląd	K_{NUP}	PLN/h	-	11,66

* Nm^3 - normalny metr sześcienny (jednostka rozliczeniowa, oznaczając ilość suchego gazu zawartą w objętości $1m^3$ przy ciśnieniu 101,325kPa i temperaturze $0^\circ C$)

Na rachunek ekonomiczny kosztu cięcia przedmiotu o długości jednego metra składają się koszty stałe (niezależne od grubości ciętego materiału) i koszty zmienne (zależne od grubości ciętego materiału).

Do kosztów stałych należy zaliczyć:

- odpis amortyzacyjny: $A = \frac{K_Z}{O_A \times L}$ (1)

- odsetki: $O = \frac{W_K \times O_K}{100 \times L}$ (2)

- podatek od nieruchomości: $P_N = \frac{F \times P_{N1}}{L}$ (3)

- podatek gruntowy: $P_G = \frac{F \times P_{G1}}{L}$ (4)

- koszt dzierżawy zbiornika O₂ (laser): $K_{O2} = \frac{K_{O2M} \times 12}{L}$ (5)

- koszt dzierżawy zbiornika N₂ (laser): $K_{N2} = \frac{K_{N2M} \times 12}{L}$ (6)

Koszty zmienne to:

- koszt energii elektrycznej maszyny (laser): $K_E = \frac{E_Z \times K_{EJ} \times T_L}{100}$ (7)

- koszt gazów tnących (laser): $K_G = \frac{G_Z \times K_{GJ} \times T_L}{100}$ (8)

- koszt gazów laserowych (laser),

- koszt sprężonego powietrza (laser) $K_S = Z_G \times K_{SJ}$ (9)

- koszt części zamiennych szybko zużywających (laser),

- koszt utrzymania maszyny (laser i AWJM): $K_{UM} = \frac{2\% \times K_Z}{L}$ (10)

W przypadku technologii cięcia strumieniem wodno- ściernym należy uwzględnić:

- koszt energii elektrycznej pompy: $K_P = B \times P \times K_{EJ}$ (11)

- koszt energii elektrycznej maszyny: $K_{EM} = \frac{N \times Q \times K_{EJ}}{100}$ (12)

- koszt ścierniwa: $K_{\dot{S}} = Z_{\dot{S}} \times K_{\dot{SJ}}$

- koszt wody: $K_W = Z_W \times K_{WJ}$ (13)

- koszt ścieków

- koszt narzędzi wymiennych, uszczelnienia i przeglądu (14)

Przedstawione powyżej zależności pozwoliły na wyznaczenie kosztów które stanowiły podstawę do rachunku ekonomicznego pracy wycinarki laserowej Bystar 4025 i urządzenia WCM-3020. W tabeli 4 przedstawiono koszty stałe dla wycinarki laserowej i urządzenia do cięcia strugą, a w tabeli 5 koszty zmienne.

Tabela 4. Koszty stałe (PLN) cięcia stali XCrNi18-10 laserem i strumieniem wodno-ściernym

Table 4. Solid costs of laser cutting and water jet cutting XCrNi18-10 steel

KOSZT	Bystar 4025 [PLN/h]	WCM-3020 [PLN/h]
Odpis amortyzacyjny	103,74	58,19h
Odsetki	26,22	14,71
Podatek nieruchomości	1,03	1,34
Podatek gruntowy	0,11	0,15
Dzierżawa zbiornika O ₂	2,74	-
Dzierżawa zbiornika N ₂	6,03	-
RAZEM	139,87	74,39

Tabela 5. Koszty zmienne (PLN) cięcia stali XCrNi18-10 laserem i strumieniem wodno-ściernym

Table 5. Variable costs of laser cutting and water jet cutting XCrNi18-10 steel

KOSZT	Bystar 4025 [PLN/h]	WCM-3020 [PLN/h]
Koszt energii elektrycznej maszyny	9,80	8,40
Koszt gazów tnących	25,60	-
Koszt gazów laserowych	1,10	-
Koszt sprężonego powietrza	4,50	-
Koszt części zamiennych szybko zużywających	21,62	-
Koszt utrzymania maszyny	10,14	5,82
Koszt energii elektrycznej pompy	-	79,80
Koszt ścierniwa	-	11,40
Koszt wody	-	31,05
Koszt ścieków	-	0,15
Koszty narzędzi wymiennych + uszczelnienia + przegląd	-	11,66
RAZEM	72,76	148,28

Suma kosztów stałych i zmiennych stanowi koszt maszynogodziny netto cięcia blachy XCrNi18-10 o grubości 5 mm (tabela 6).

Tabela 6. Koszt maszynogodziny cięcia laserem i strumieniem wodno-ściernym stali XCrNi18-10

Table 6. Machine- hour cost of laser cutting and water jet cutting XCrNi18-10 steel

Koszt maszynogodziny [PLN/h]	Bystra 4025	WCM - 3020
	212,63	222,67

Jest to etap pośredni do wyznaczenia rzeczywistego kosztu cięcia przedmiotu o długości jednego metra. Kolejnym krokiem było wyznaczenie czasu cięcia próbki o grubości 5 mm z zależności:

$$t = \frac{S}{v} \quad (15)$$

gdzie:

v - prędkość cięcia [m/h]

s - długość cięcia = 1 m

a następnie:

$$K = K_M \times t \quad (16)$$

gdzie:

K - koszt cięcia długości s [PLN]

K_M - koszt maszynogodziny netto [PLN/h]

t - czas cięcia [h]

Uwzględniając powyższe zależności (15) i (16) obliczono koszt cięcia przedmiotu o długości jednego metra o grubości 5 mm, wykonanego z XCrNi18-10 (tabela 7).

Tabela 7. Koszt cięcia przedmiotu o długości jednego metra

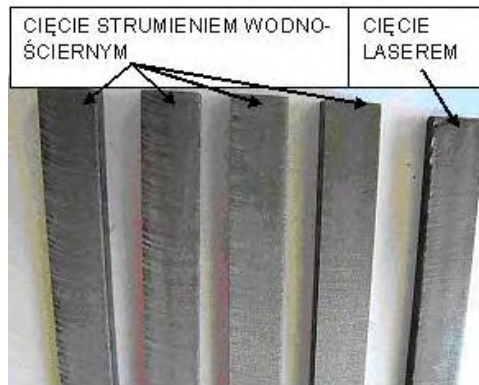
Table 7. Cutting cost object at length 1 meter

Koszt cięcia [PLN]	Bystar 4025	WCM-3020
	1,42	5,57

ANALIZA TECHNICZNA

Analiza technologii cięcia laserem i strumieniem wodno- ściernym w ujęciu technicznym sprowadza się przede wszystkim do porównania uzyskanych wyników w obróbce obiema metodami.

Na rys. 1 przedstawiono widok powierzchni stali C45 po przecinaniu wiązką laserową oraz strumieniem wodno- ściernym, przy zastosowaniu różnych prędkości cięcia.



Rys. 1. Widok powierzchni stali C45 po cięciu laserem (jedna prędkość cięcia) i strumieniem wodno- ściernym (różnych prędkości cięcia)

Fig. 1. Surface of C45 steel after laser cutting (one cutting speed) and water jet cutting (different cutting speed)

Rozpatrując otrzymaną jakość powierzchni stali C45 po cięciu wiązką laserową, widoczna jest na powierzchni charakterystyczna prążkowana struktura oraz przy krawędzi dolnej metaliczny grant, jako pozostałość płynnego materiału, nie do końca wydmuchanego ze szczeliny cięcia. Jakość otrzymanej powierzchni jest niska, co jest przesłanką do poddania ich obróbce wykończeniowej.

Jakość powierzchni po cięciu strumieniem wodno-ściernym jest zadawalająca. Dla odpowiednio dobranej prędkości cięcia można otrzymać powierzchnie gładką, pozbawioną prążków przy dolnej krawędzi. Zbyt duża prędkość cięcia przyczynia się do powstania prążkowanej struktury oraz powoduje ukosowanie próbek. Przedmioty cięte za pomocą strumienia wodno-ściernego nie posiadają strefy wpływu ciepła, nie tworzą się także niedopuszczalne przetopy.

PODSUMOWANIE

Rozpatrując oba analizowane sposoby cięcia pod względem ekonomicznym i technicznym trudno jednoznacznie wskazać, która z tych technologii jest efektywniejsza. Pod względem ekonomicznym bardziej konkurencyjne jest cięcie laserem.

Koszt cięcia przedmiotu o długości jednego metra jest o około 3,5 razy mniejszy niż dla cięcia strumieniem wodno-ściernym, pomimo wysokich nakładów inwestycyjnych przy zakupie wycinarki laserowej.

Koszt maszynogodziny netto dla cięcia laserem i strumieniem wodno-ściernym jest porównywalny.

Cięcie strumieniem wodno-ściernym jest technologią bardziej elastyczną. Pozwala to na cięcie prawie wszystkich rodzajów materiałów o różnej grubości. Istnieje także możliwość obróbki w pakietach.

Po przeprowadzonej analizie można zauważyć że, technologia cięcia laserem i strumieniem wodno-ściernym są w niektórych aspektach podobne i bardzo dobrze się uzupełniają.

PIŚMIENNICTWO

1. Górka J., Krysta M.: Jakość cięcia stali obrobionej termomechanicznie plazmą powietrzną, laserem i strumieniem wody, Przegląd Spawalnictwa 2007, 8, 102-106.
2. Feldshtein E., Koman I.: Wycinanie laserowe elementów o dużej grubości w blachach ze stali nierdzewnej, Przegląd Mechaniczny 2010, 4, s.13-18.
3. Okseniuk A.: Analiza techniczno- ekonomiczna procesu przecinania za pomocą lasera oraz wysokociśnieniowego strumienia cieczy, praca dyplomowa inżynierska, promotor dr hab. inż. K. Zaleski, prof. PL, Politechnika Lubelska 2006.
4. Zaborski S., Szpunar P., Poroś P.: Efektywność cięcia laserowego blach niestopowych, Inżynieria Maszyn 2009, 4, s. 94-102.

5. Zheng H. Y., Han Z. Z., Chen Z. D., Chen W.L., Yeo S.: Quality and Cost Comparisons between Laser and Waterjet Cutting, *Journal of Material Processing Technology* 1996, 62, 294-298.
6. Cięcie laserem czy strumieniem wody? (artykuł promocyjny), *Mechanik* 2003, 3, 146-147.

THE COMPARATIVE ANALYSIS OF THE PROCESS OF THE LASER CUTTING AND WATER JET CUTTING

Summary:

The article presents the comparison of laser beam machining and water jet cutting in technical and economic picture. It was also presented the algorithm determining the cost of cutting object at length 1 meter.

Keywords: laser cutting, water jet cutting, technical-economical analysis.

Piotr Pękała¹⁾

MODELOWANIE POWIERZCHNIOWE W SYSTEMIE CATIA V5

Streszczenie: Projektowanie i konstruowanie w systemach komputerowych opiera się o zasadę tworzenia modeli geometrycznych. Narzędzia i metody modelowania geometrycznego muszą być starannie wybrane a znajomość ich jest konieczna do świadomego ich stosowania. W doborze tych metod projektant musi uwzględniać dalsze procesy projektowe, tak, aby model był podstawą całego procesu rozwoju produktu, a nie źródłem problemów projektowych. System CATIA v5 jest dobrym narzędziem w zakresie modelowania powierzchniowego. W artykule przedstawiono możliwości modelowania powierzchni swobodnych oraz powierzchni rozpiętych na profilach.

Słowa kluczowe: projektowanie, model geometryczny, modelowanie powierzchniowe.

WSTĘP

Wymagania obecnie stawiane przedmiotom projektowania, czyli konstruowanym obiektom, różnią się od wymagań formułowanych tradycyjnie, nie tylko tym, że są coraz ostrzejsze. Pojawiają się wymagania jakościowo nowe, wynikające z tego, że ustawicznie zwiększa się wielkość projektowanych urządzeń i systemów w sensie rozległości i różnorodności obejmowanej tematyki, a także w sensie kompleksowości powiązań zewnętrznych i ponoszonych kosztów. Powyższe żądania w stosunku do rezultatów projektowania narzucają nowe wymagania dla systemu projektującego.

Zaawansowane systemy CAD/CAM/CAE oferują nam szerokie możliwości w zakresie modelowania geometrycznego. Polecenia w poszczególnych programach różnią się pewnymi atrybutami, w każdym z nich można wyróżnić pewne uogólnione metody modelowaniu. Ten sam model geometryczny można wykonać na wiele różnych sposobów. W przypadku złożonego modelu geometrycznego liczba tych sposobów jest praktycznie nieograniczona. Z nieograniczonej liczby hipotetycznych sposobów tworzenia modeli geometrycznych tylko nieliczny odsetek zapewnia wykonanie poprawnego. Jest to o tyle istotne, że w przeciwieństwie np. do programów graficznych, w których celem jest zapewnienie „dobrego wyglądu” modelu, model w zaawansowanym systemie CAD/CAM/CAE jest tworzony tak, aby spełniał wiele różnych zadań i mógł być zastosowany do wielu dalszych procesów projektowych.

¹ Instytut Technologicznych Systemów Informacyjnych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska.

TWORZENIE MODELI POWIERZCHNIOWYCH

Modelowanie powierzchniowe znajduje zastosowanie w przypadku, gdy powierzchnia elementu projektowanego ma zbyt skomplikowany kształt, aby zamodelować ją tradycyjnymi metodami modelowania bryłowego. Funkcje modelowania powierzchni są nastawione na modelowanie złożonych kształtów powierzchni i w takim przypadku doskonale się sprawdzają. Często jest tak, że w całej konstrukcji jeden lub kilka elementów mają złożone kształty i muszą być modelowane metodami modelowania powierzchni - wynikiem tego procesu są modele powierzchniowe tych elementów. Pozostałe elementy konstrukcji są zamodelowane innymi technikami i mogą być zapisane, jako modele bryłowe. Dla zgodności form modelu całej konstrukcji modele powierzchniowe są przekształcane na modele bryłowe. Takie modele noszą nazwę modeli hybrydowych. Są one tworzone technikami modelowania powierzchniowego i za pomocą zestawu funkcji, przekształcających je do formy modelu bryłowego, przekształcane w następnej fazie do modelu bryłowego. Dalej takie modele bryłowe mogą być edytowane tradycyjnymi technikami modelowania bryłowego [3].

Do tworzenia modeli powierzchniowych można stosować kilka metod [5]. Najważniejsze z nich to:

- wyciągnięcie równoległe profilu lub wzdłuż zadanej ścieżki,
- obrót profilu wokół wybranej osi,
- operacje przycinania i łączenia powierzchni,
- edycja cech modelu powierzchniowego,
- modelowanie swobodne,
- rozwinięcie powierzchni na profilach.

Cztery pierwsze metody są bezpośrednim przeniesieniem metod stosowanych w modelowaniu bryłowym, i jako takie, dla głównego zastosowania, czyli odzwierciedlenia kształtu powierzchni, która nie da się odzwierciedlić technikami modelowania bryłowego, nie wnoszą nic nowego. Za pomocą tych czterech pierwszych metod dają się zamodelować tylko takie kształty, które dają się zamodelować bezpośrednio metodami modelowania bryłowego. Dwie ostatnie metody są najbardziej wydajne dla modelowania złożonych kształtów.

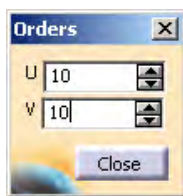
MODELOWANIE POWIERZCHNIOWE ZA POMOCĄ POWIERZCHNI SWOBODNYCH

Powierzchniami swobodnymi określamy powierzchnie, które nie dają się opisać w sposób analityczny. Z tego też powodu modelowanie takich powierzchni jest bardzo utrudnione. Ten rodzaj modelowania powierzchniowego umożliwia dowolne kształtowanie powierzchni. Termin „modelowanie” w tym przypadku, oprócz technicznego znaczenia, zyskuje nowe, potoczne znaczenie, gdyż kształtowanie powierzchni realizowane jest poprzez jej uchwycenie w dowolnym punk-

cie i wyciąganiu jej lub naciskaniu. Powierzchnia poddaje się tym zabiegom zmieniając kształt, tak jakby była wykonana z elastycznego tworzywa. Konstruktor modeluje powierzchnie tak, jak modeluje się rzeźbę z gliny. Modelowanie tym sposobem daje nam możliwość praktycznie nieograniczonego kształtowania powierzchni.

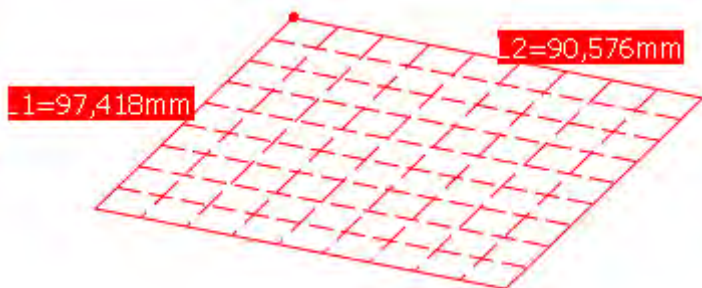
Modelowanie za pomocą powierzchni swobodnych przeprowadzamy w module **FreeStyle** (wybierając kolejno *Start/Shape/FreeStyle*).

Pierwszą czynnością, jaką musimy wykonać, jest utworzenie powierzchni, którą będziemy później modelować. W tym celu wybieramy narzędzie **Planar Patch**. Następnie wskazujemy w dowolnym punkcie naszej wirtualnej przestrzeni roboczej (tło) i wybieramy prawym przyciskiem myszy. Pojawia się przycisk **Edit Orders**. Po jego naciśnięciu pojawi się okno **Orders** (przedstawione na rys. 1), w którym definiujemy liczbę krawędzi (pole U,V), z których będzie składała się nasza siatka (siatka ta posłuży do utworzenia pierwszej podstawowej powierzchni). Im więcej krawędzi siatki zdefiniujemy, tym dokładniej będziemy mogli modelować naszą powierzchnię, ale spowoduje to zwiększenie obciążenia naszego komputera.



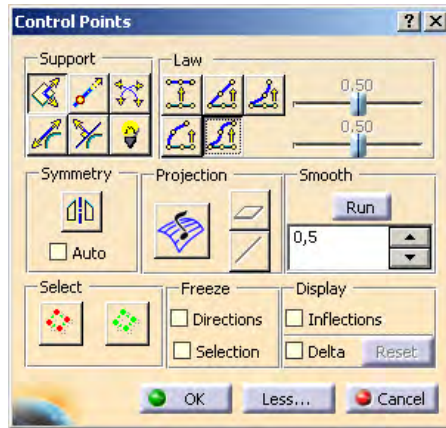
Rys. 1. Definiowanie liczby elementów siatki

Po dokonaniu wyboru liczby krawędzi naciskamy przycisk **Close**. Poprzez określenie liczby krawędzi siatki zdefiniowano liczbę węzłów na siatce we współrzędnych ortogonalnych. Węzły te są o tyle istotne, że formują siatkę rozpinaną na tej powierzchni i stanowią uchwyty, za które będzie można „złapać” i zmieniać kształt siatki (powierzchni).



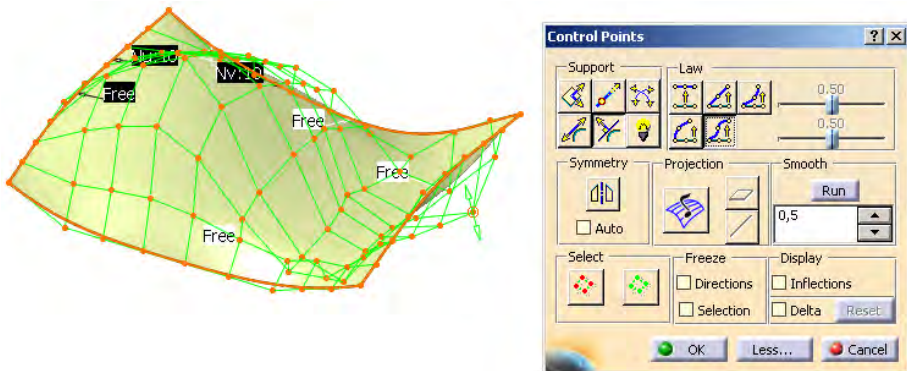
Rys. 2. Zdefiniowana siatka powierzchni swobodnej

W ten sposób rozpinamy siatkę, która utworzy naszą pierwszą powierzchnię (rys. 2). Ponownie naciskamy lewy przycisk myszy. Pojawia się nasza pierwsza powierzchnia. W praktyce, chociaż nie potrafimy opisać współrzędnych dowolnego punktu na powierzchni, to potrafimy jednak podać współrzędne „naroży” lub innych punktów charakterystycznych powierzchni. Siatkę rozpina się na przygotowanym wcześniej płacie powierzchni. Aby ją uaktywnić, wybieramy narzędzie **Control Points**. Po naciśnięciu stosownej ikony, oprócz widocznej siatki pojawia się okno **Control Points**, przedstawione na rys. 3.



Rys. 3. Okno narzędzia *Control Points*

Deaktywujemy teraz aktywne punkty i krawędzie siatki poprzez naciśnięcie przycisku **De-Select all**, mieszczącego się w polu **Select**. W obszarze **Support** okna dialogowego znajdują się przyciski do wskazywania kierunków przemieszczania punktów lub krawędzi siatki (np. przycisk **Translation along the Direction**, przedstawiający wybór przemieszczenia punktów lub krawędzi siatki wzdłuż określonego kierunku).

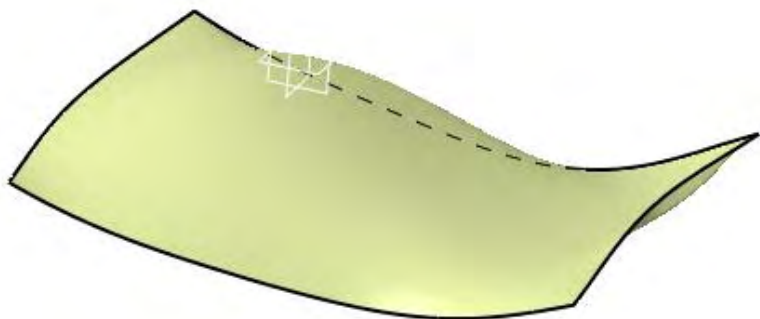


Rys. 4. Modyfikacja powierzchni poprzez "rozciąganie" siatki

W obszarze *Law* wskazujemy czy przemieszczenie węzłów siatki ma się odbywać wzdłuż prostych, czy też krzywych.

Aby transformować naszą siatkę należy zaznaczając dowolny punkt lub krawędź i trzymając zaznaczony (-ą), przemieścić do innego punktu na ekranie. W ten sposób możemy modelować naszą powierzchnię (rys. 4).

W połączeniu z innymi narzędziami dostępnymi w module *FreeStyle*, uzyskujemy szeroki wachlarz możliwości dowolnego kształtowania powierzchni. Narzędzia okna *Control Points* umożliwiają łatwe kształtowanie powierzchni, ale również i sprawiają problemy, szczególnie, gdy konieczne jest uzyskanie określonej postaci powierzchni.

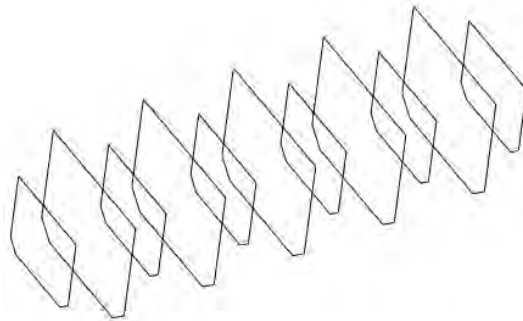


Rys. 5. Powierzchnia swobodna zamodelowana w module *FreeStyle*

ROZPINANIE POWIERZCHNI NA PROFILACH

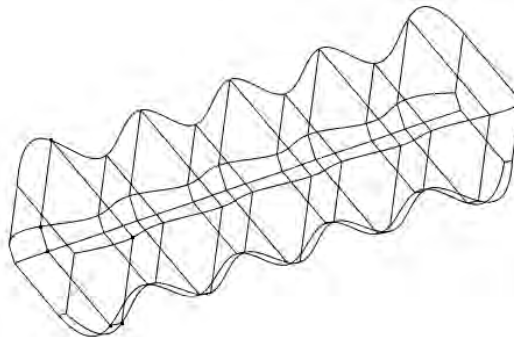
Inną z metod modelowania, umożliwiających swobodne kształtowanie powierzchni, jest rozpinanie powierzchni na wcześniej zdefiniowanych profilach (patrz rys. 7 oraz rys. 9). Metoda ta stanowi naturalne rozwinięcie technik opisu powierzchni o złożonych kształtach, stosowanej np. w rysunku technicznym czy też technikach wytwarzania. Przykładem mogą być rysunki techniczne niektórych złożonych kształtów, które są opisywane poprzez wymiary przekroju poprzecznego w wielu równoległych do siebie przekrojach poprzecznych, ma to swoje odzwierciedlenie także w przypadku konstrukcji niektórych kadłubów np. statków, gdzie korespondują one z wręgami czy żebrami konstrukcji. Analogicznie jak w przypadku kadłubów statków, na wręgach rozpięte jest poszycie kadłuba, tak i w modelowaniu powierzchni rozpinanej na profilach mamy do czynienia z profilami, na których rozpiną się powierzchnię.

Modelowanie poprzez rozpinanie powierzchni na profilach w systemie CATIA przeprowadzamy w module **Generative Shape Design** (naciskamy kolejno w menu *Start/Shape/Generative Shape Design*). Następnym etapem jest narysowanie profili, które są definiowane w tym przypadku w równoodległych od siebie i równoległych płaszczyznach (rys. 6).



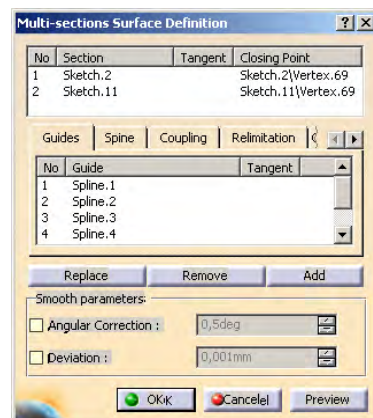
Rys. 6. Profile stanowiące bazę do rozpinania powierzchni

Punkty charakterystyczne profili dodatkowo łączone są liniami krzywymi typu splajn.



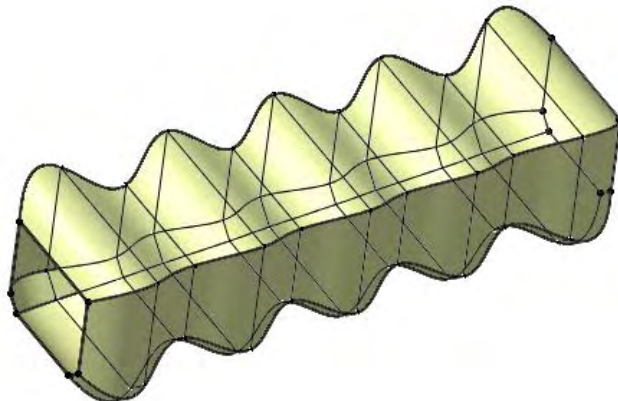
Rys. 7. Profile połączone krzywymi typu splajn

Z paska narzędziowego *Surface* wybieramy polecenie **Multi-sections Surface**. W oknie **Multi-sections Surface Definition** wprowadzane są kolejne wskaziwane profile, na których ma być rozwinięta powierzchnia. Po zdefiniowaniu wszystkich profili wybieramy zakładkę *Guides* i wskazujemy wszystkie utworzone wcześniej krzywe splajn.



Rys. 8. Okno narzędzia *Multi-sections Surface*

Po wskazaniu wszystkich elementów potwierdzamy wybór przyciskiem **OK**. Powierzchnia (rys. 9) rozpinana jest na wskazanych profilach tak, że zawiera krzywe profili i opiera się na krzywych splajn łączących te profile. Manipulując wielkością profili możemy zmieniać kształt uzyskanej powierzchni.



Rys. 9. Powierzchnia rozpięta na profilach

PODSUMOWANIE

Modele powierzchniowe często są tworzone po to, aby na ich bazie zbudować model bryłowy. Taki model bryłowy, utworzony w oparciu o powierzchnie tworzące jego krawędź, zdefiniowany metodami modelowania powierzchniowego, nazywany jest modelem hybrydowym. Model ten posiada jednocześnie cechy modelu bryłowego i powierzchniowego. Cechami modelowania powierzchniowego są m.in. możliwość definiowania bardzo skomplikowanych postaci powierzchni modeli (szczególnie powierzchni nie występujących na podstawowych bryłach geometrycznych, jak: prostopadłościany, kule, walce, ostrosłupy itp.) oraz brak „wnętrza” modelu, a co za tym idzie - cech tworzywowych (masa, gęstość, środek ciężkości, momenty bezwładności itp.). Model taki tworzony jest w przypadku, gdy kształt powierzchni modelu bryłowego nie da się zdefiniować metodami modelowania bryłowego. Wymagane jest wtedy sięgnięcie do metod modelowania powierzchniowego, które pozwalają na dużo efektywniejsze modelowanie powierzchni. Typowymi elementami tak modelowanymi są np. odlewy, odkuwki, elementy z tworzywa polimerowego, niektóre elementy z blachy (kadłuby, układy wydechowe samochodów).

PIŚMIENNICTWO

1. Kazimierczak G., Pacuła B.: „Solid Edge. Komputerowe wspomaganie projektowania”. Wydawnictwo „Helion”, Gliwice 2004.

2. Penkała P., Gorecki T.: „Modelowanie bryłowe i powierzchniowe w systemach CAD/CAM”. Postępy Nauki i Techniki nr 4/2010, Lublin 2010.
3. Skarka W., Mazurek A.: „Catia – podstawy modelowania i zapisu konstrukcji”. Wydawnictwo „Helion”, Gliwice 2005.
4. Tarnowski W.: „Podstawy projektowania technicznego”. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1997.
5. Winkler T.: „Komputerowy zapis konstrukcji”. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1997.

SURFACE MODELING IN CATIA V5 SYSTEM

Summary:

Design and construction of computer systems based on the principle of geometric modeling. Tools and methods for geometric modeling must be carefully selected, and the knowledge they need to be conscious of their use. In choosing these methods, the designer must take into account a further design processes, so that the model was based on the entire product development process, not a source of design problems. CATIA v5, it is a good tool for surface modeling. In the paper they have present possibilities of free surface modeling and surface span on section.

Keywords: design, geometric model, surface modeling.

Anna Rudawska ¹⁾, Monika Czarnota ²⁾

WPŁYW OPERACJI ODTŁUSZCZANIA NA WŁAŚCIWOŚCI ADHEZYJNE WARSTWY WIERZCHNIEJ ORAZ WYTRZYMAŁOŚĆ POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH BLACH MIEDZIANYCH

Streszczenie: Właściwości adhezyjne odrywają istotną rolę w procesie wykonywania połączeń adhezyjnych. Dobre właściwości adhezyjne przyczyniają się m.in. do uzyskania odpowiedniej wytrzymałości połączenia adhezyjnego. Jedną z metod konstytuowania właściwości adhezyjnych jest zastosowanie odpowiedniego sposobu przygotowania powierzchni materiałów przeznaczonych do wykonania połączeń. Właściwości adhezyjne można oceniać poprzez swobodną energię powierzchniową.

W prezentowanej pracy rozpatrywamy przykładem połączeń adhezyjnych są połączenia klejowe, dla których podjęto próbę określenia wpływu operacji odtłuszczania na wartość swobodnej energii powierzchniowej oraz wytrzymałość połączeń klejowych. W połączeniach adhezyjnych wskazane jest bowiem uzyskanie powierzchni wysokoenergetycznych. Usuwanie organiczne i nieorganiczne zanieczyszczenia z rozpatrywanych powierzchni, następuje wzrost ich zdolności adhezyjnych, a w konsekwencji występuje korzystny wpływ na prawidłowe związanie spoiny klejowej z powierzchnią materiału łączonego.

Słowa kluczowe: połączenia adhezyjne, swobodna energia powierzchniowa, wytrzymałość połączeń klejowych.

WSTĘP

Znajomość wartości swobodnej energii powierzchniowej jest znacząca dla różnych procesów takich jak klejenie, laminowanie, drukowanie, malowanie, flotacja, smarowanie i wiele innych. Swobodna energia powierzchniowa występuje bowiem wszędzie tam, gdzie występuje granica faz dwóch różnych ośrodków i odzwierciedla oddziaływanie międzycząsteczkowe, jakie występują na granicy tych faz [16, 17]. Istnieją zależności pomiędzy zwilżalnością, swobodną energią powierzchniową i właściwościami adhezyjnymi warstwy wierzchniej. Jednym z rodzajów połączeń adhezyjnych jest połączenie klejowe. Łączenie metali przy pomocy kleju jest coraz powszechniejsze, gdyż oferuje wiele zalet, trudnych do uzyskania tradycyjnymi metodami łączenia [2, 6, 9, 15]. Jedną z ważnych zalet jest stosunkowo duża wytrzymałość takiego połączenia. Na wytrzymałość połączeń klejowych wpływa bardzo wiele czynników [6, 9]. Jednym z tych czynni-

¹⁾ Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji.

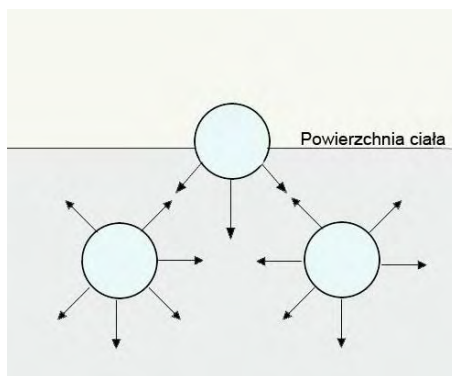
²⁾ Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Studenckie Koło Naukowe Podstaw Inżynierii Produkcji.

ków jest przygotowanie powierzchni łączonych elementów, poprzez jej oczyszczenie, odtłuszczenie, obróbkę mechaniczną, obróbkę chemiczną oraz nakładanie różnych podkładów. Czynnikiem ten w znacznym stopniu decyduje o odpowiednim złączeniu kleju i powierzchni, a tym samym o prawidłowej pracy połączenia. W przypadku klejenia, przygotowanie powierzchni elementów łączonych odgrywa ważniejszą rolę niż przy lutowaniu lub spawaniu [8].

W pracy starano się określić, w jakim stopniu operacja odtłuszczenia wpływa na wartość swobodnej energii powierzchniowej oraz wytrzymałość połączeń klejowych. W połączeniach adhezyjnych wskazane jest bowiem uzyskanie powierzchni wysokoenergetycznych. Usuwanie organiczne i nieorganiczne zanieczyszczenia z rozpatrywanych powierzchni, następuje wzrost ich zdolności adhezyjnych, a w konsekwencji występuje korzystny wpływ na prawidłowe związanie spoiny klejowej z powierzchnią materiału łączonego. Tak więc można znacząco wpływać na uzyskanie zadowalającej adhezji, poprzez staranne przygotowanie powierzchni do klejenia.

CHARAKTERYSTYKA WARSTWY WIERZCHNIEJ

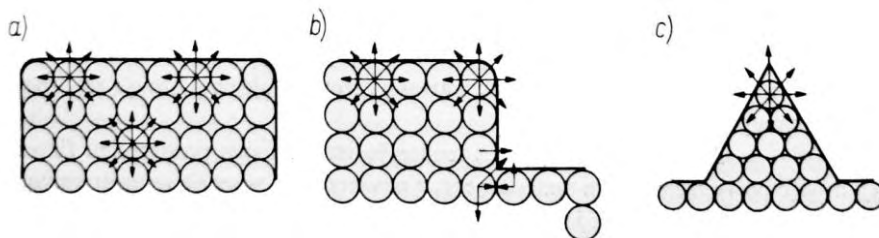
Powierzchnia fizyczna nie jest homogeniczną strefą między dwiema fazami [5, 7, 13, 14]. Ponieważ powierzchnia atomowo czysta jest bardzo aktywna fizycznie i chemicznie to każde zetknięcie ciała stałego z ciałem materialnym powoduje przyłączanie zetkniętych substancji. Nowe przyłączone substancje mogą być zaczątkiem nowej fazy. Z drugiej strony pod warstwą fizycznie czystą znajdują się różnego rodzaju odkształcenia i defekty wynikające ze sposobu kształtowania powierzchni, stąd różni się ona właściwościami od rdzenia przedmiotu [1, 3, 5, 10, 12]. W wyniku tych zjawisk powstają kolejne strefy: przypowierzchniowe, podpowierzchniowe, czy nadpowierzchniowe, które razem tworzą warstwę wierzchnią [3,7].



Rys. 1. Obrazowe przedstawienie sił działających na cząsteczki znajdujące się wewnątrz ciała stałego i na jego powierzchni [7]

Powierzchnię ciała stanowią różnego rodzaju atomy, cząsteczki czy jony, które są w innych warunkach niż te, które znajdują się wewnątrz ciała. Cząsteczki podlegają jednakowym ze wszystkich stron siłom oddziaływania. Cząsteczki na powierzchni stykają się natomiast z własną fazą i inną fazą, co powoduje występowanie asymetrii sił oddziaływania (rys. 1). Cząsteczki znajdujące się na powierzchni są silniej wciągane do wnętrza fazy objętościowej, w wyniku tego powierzchnia ma wyższą energię niż wnętrze ciała. Powierzchnia taka jest aktywna i ma sposobność do przyłączania różnych innych atomów, czy cząsteczek znajdujących się w pobliżu [3, 5, 7, 12, 13].

Ważne również jest to w jakim stopniu cząsteczki z powierzchni otoczone są innymi cząsteczkami tj. czy powierzchnia jest płaska, czy chropowata (rys. 2). Większy stopień niewysycenia sił ma powierzchnia chropowata niż powierzchnia płaska, a tym samym jest ona bardziej aktywna fizycznie i chemicznie [3, 7, 12].



Rys. 2. Wpływ chropowatości na pole sił różnych powierzchni [7]

Oceną niewysycenia sił oddziaływania między cząsteczkami na powierzchni, a cząsteczkami wewnątrz ciała jest swobodna energia powierzchniowa i cechuje ona głównie ciała stałe.

SWOBODNA ENERGIA POWIERZCHNIOWA

Swobodna energia powierzchniowa jest jedną z funkcji termodynamicznych opisujących stan równowagi między atomami w warstwie wierzchniej materiałów. Jest ona liczbowo równa pracy potrzebnej do utworzenia nowej jednostki powierzchni, podczas rozdziału dwóch faz będących w równowadze w odwracalnym procesie izotermicznym. Wartość swobodnej energii powierzchniowej często wykorzystuje się jako miarę zdolności adhezyjnych danych ciał fizycznych [16].

Podstawowe znaczenie przy wyznaczaniu swobodnej energii powierzchniowej mają metody oparte na pomiarach kąta zwilżania, przede wszystkim ze względu na łatwość przeprowadzania pomiarów oraz dużą dokładność uzyskiwanych wyników.

Istnieje wiele metod, które korzystając ze znajomości kąta zwilżania, pozwalają określić swobodną energię powierzchniową. Podstawę tych metod stanowi,

w większości przypadków, równanie Younga. Najbardziej znane metody to metoda: Fowkesa, Owensa-Wendta, Neumanna oraz van Ossa-Chaunhury'ego-Gooda [16, 17, 18].

Metoda Owensa-Wendta oparta jest na metodzie Fowkesa. Metoda ta jest powszechnie stosowana w badaniach wartości swobodnej energii powierzchniowej m.in. polimerów. Była i jest przedmiotem licznych badań. Metoda ta zakłada, że swobodna energia powierzchniowa ma dwie składowe pochodzące od sił międzycząsteczkowych: dyspersyjną i niedyspersyjną, głównie polarną [16, 17].

PRZYGOTOWANIE POWIERZCHNI DO KLEJENIA

O prawidłowej pracy połączenia w dużym stopniu decyduje m.in. przygotowanie powierzchni materiałów łączonych. Od tego etapu rozpoczyna się właściwy proces technologiczny klejenia. Poprzez usunięcie organicznych i nieorganicznych zanieczyszczeń w postaci osadów, pyłów, tlenków, spolaryzowanych molekuł, zaadsorbowanej wody i gazów oraz warstw reakcyjnych, znacząco bowiem wzrastają zdolności adhezyjne warstwy wierzchniej. Stosuje się różne metody przygotowania powierzchni, w celu jej rozwinięcia oraz zapewnienia spójności i zwilżalności [6, 9, 15].

Prawidłowo przygotowana powierzchnia do procesu klejenia powinna charakteryzować się: brakiem zanieczyszczeń zmniejszających adhezję, zdolnością do wytwarzania wiązań międzyfazowych, dobrą zwilżalnością klejem, stabilnością dla założonych warunków i czasu eksploatacji połączenia, a także powtarzalnością uzyskiwanych właściwości [6].

Zazwyczaj pierwszym i końcowym etapem przygotowania powierzchni do klejenia jest jej odtłuszczenie. Aby uzyskać jak najlepsze połączenie klejowe konieczne jest całkowite usunięcie oleju, tłuszczu, kurzu i innych pozostałości z obu klejonych powierzchni. Najbardziej nadają się do tego rozpuszczalniki organiczne lub roztwory substancji powierzchniowo czynnych, które wyparowują nie pozostawiając osadu.

METODYKA BADAŃ

Badany materiał

Do badań użyto miedzi o symbolu M1Ez4. Jest to miedź rafinowana elektrolitycznie o wysokiej czystości. Rafinacja elektrolityczna jest to proces oczyszczania metali otrzymanych drogą hutniczą, poprzez elektrolityczne osadzanie z użyciem rozpuszczalnych anod.

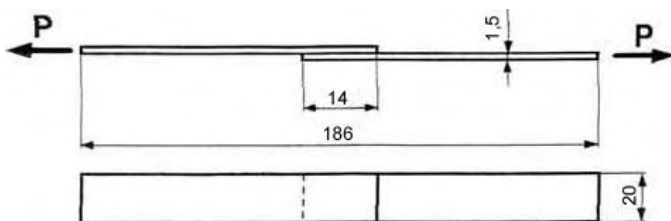
Symbol z4 oznacza półtwardy stan umocnienia zgniotem. Zawartość zanieczyszczeń miedzi M1 przedstawia tabela 1.

Tabela 1. Zawartość zanieczyszczeń miedzi M1 wg PN/H-82129 [4, 11]

Gatunek		Zawartość Cu min. %	Zawartość zanieczyszczeń, max. %										Ogółem zanieczyszczeń %
znak	cecha		Bi	Sb	As	Fe	Ni	Pb	Sn	S	O	Zn	
Cu99,9	M1	99,9	0,002	0,002	0,002	0,005	0,002	0,005	0,002	0,005	0,080	0,005	0,1

Charakterystyka połączenia klejowego

Badania doświadczalne wykonano w oparciu o próbki wykonane z blachy miedzianej gatunku M1Ez4 o grubości 1,5mm. Próbki użyte do klejenia zostały przygotowanej w formie prostokątów o wymiarach: 20x100mm, w ilości 48 sztuk. Próbki te zostały podzielone na dwie partie: z powierzchnią bez odtłuszczania oraz z powierzchnią po odtłuszczaniu.



Rys. 3. Kształt i wymiary połączenia klejowego zastosowanego w badaniach

Szerokość zakładki wykonanego połączenia klejowego w przeprowadzonym doświadczeniu wynosiła 14mm, a więc powierzchnia kontaktu wyniosła 280 mm². Wykonane połączenia zostały obciążone na ścinanie, co obrazuje siła P przedstawiona na rys. 3.

Warunki wykonywania połączeń

Podczas wykonywania połączeń klejowych próbki podzielone na dwie grupy, które poddano różnym sposobom przygotowania powierzchni. Pierwsza partia próbek nie została poddana żadnej obróbce przygotowującej powierzchnię. Natomiast druga część próbek została poddana odtłuszczaniu środkiem firmy Loctite 7061. Loctite 7061 to środek czyszczący i odtłuszczający ogólnego zastosowania często używany przed klejeniem wielu materiałów konstrukcyjnych (rys. 4a) [19]. Jest przygotowany na bazie rozpuszczalnika i nie pozostawia osadu [19].

W badaniach wykorzystano klej epoksydowy dwuskładnikowy firmy Loctite 3430 (rys. 4b). Klej ten był utwardzany w temperaturze otoczenia w ciągu 48 godzin. Jest to dwuskładnikowy klej epoksydowy ogólnego zastosowania, szybko się utwardza oraz jest przezroczysty [19].



Rys. 4. Środki używane podczas doświadczenia: a) odtłuszcacz Loctite 7063, b) klej epoksydowy dwuskładnikowy Loctite 3430 A&B

Połączenia klejowe zostały wykonane w temperaturze otoczenia równej $20 \pm 2^\circ\text{C}$ oraz wilgotności powietrza $25 \pm 2\%$. Po nałożeniu kleju oraz odpowiednim ustaleniu łączonych elementów względem siebie próbki zostały poddane naciskowi wynoszącemu $0,02\text{MPa}$, przez czas trwania utwardzania oraz kondycjonowania połączenia klejowego, wynoszący 48 godzin.

Opis metody określania swobodnej energii powierzchniowej

Do wyznaczenia swobodnej energii powierzchniowej (SEP) wybrano metodę Owensa-Wendta, ze względu na jej liczne zalety oraz prostotę wykonania pomiarów i obliczeń. Podstawy teoretyczne tej metody opisano w pracach [16, 17]. Ostatecznie, uwzględniając wszystkie zależności i dokonując odpowiednich przekształceń, składowa polarna energii powierzchniowej badanego ciała ma postać:

$$\gamma_s^p = \left[\frac{\gamma_w * (\cos \theta_w + 1) - 2 * \sqrt{\gamma_w^d * \gamma_s^d}}{2 * \sqrt{\gamma_w^p}} \right]^2 \quad (1)$$

natomiast składowa dyspersyjna:

$$\gamma_s^d = \left[\frac{\gamma_d * (\cos \theta_d + 1) - \sqrt{\frac{\gamma_d}{\gamma_w}} * \gamma_w * (\cos \theta_w + 1)}{2 * \left(\sqrt{\gamma_d^d} - \sqrt{\gamma_d^p * \frac{\gamma_w^d}{\gamma_w^p}} \right)} \right]^2 \quad (2)$$

gdzie: γ – energia powierzchniowa; indeksy górne: p – składowa polarna, d – składowa dyspersyjna; indeksy dolne: d - diiodometan, w - woda, s - ciało stałe; Θ – kąt zwilżania ciała stałego cieczą pomiarową.

Cieczami użytymi do pomiarów była woda destylowana i diiodometan. Swobodną energię powierzchniową i jej składowe, dla obu cieczy pomiarowych zawarto w tabeli 2.

Tabela 2. Swobodna energia powierzchniowa γ_L stosowanych cieczy małowcząstkowych i jej składowe [16]

Ciecz	γ_L^d [mJ/m ²]	γ_L^p [mJ/m ²]	γ_L [mJ/m ²]
Woda	21,6	51,0	72,6
Dijodometan	48,5	2,3	50,8

γ_L^d – składowa dyspersyjna swobodnej energii powierzchniowej cieczy,

γ_L^p – składowa polarna swobodnej energii powierzchniowej cieczy.

Dla cieczy tych zmierzono kąty zwilżania wodą Θ_w i diiodometanem Θ_d badanych próbek miedzi, co było podstawą do rozwiązania układu równań (1, 2). Następnie sumując składową dyspersyjną SEP i składową polarną SEP otrzymano wartość swobodnej energii powierzchniowej SEP.

Analizę kropli pomiarowych osadzonych na powierzchni miedzi przeprowadzono za pomocą goniometru z wykorzystaniem komputerowej analizy rozpatrywanego obrazu.

Dla każdej próbki wykonano 30 pomiarów, 15 kropeł dla wody destylowanej oraz 15 kropeł dla diiodometanu. Jako wartości kątów zwilżania Θ przyjęto średnie arytmetyczne z wykonanych pomiarów.

WYNIKI BADAŃ

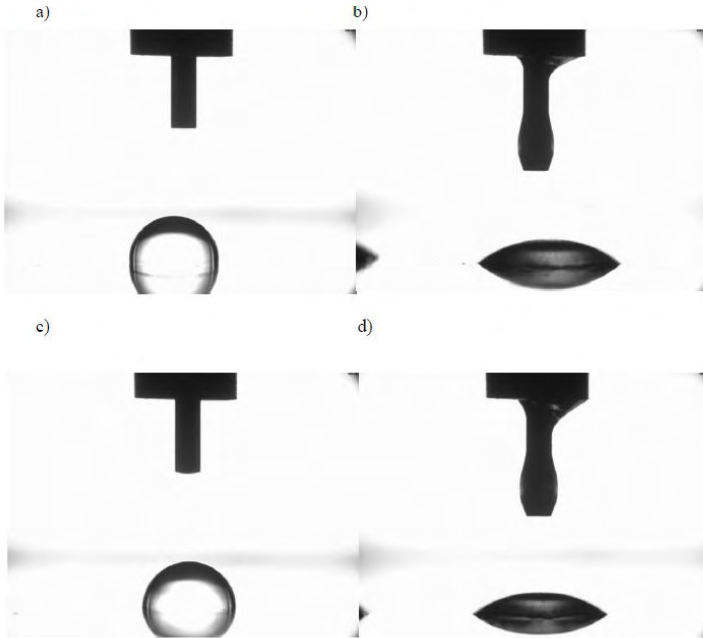
Swobodna energia powierzchniowa

W celu wyznaczenia wartości swobodnej energii powierzchniowej należało zmierzyć kąty zwilżania wodą i diiodometanem nieodtłuszczonej powierzchni miedzi oraz powierzchni miedzi po odtłuszczeniu. Przykładowe obrazy uzyskanych kropli pomiarowych przedstawiono na rys. 5.

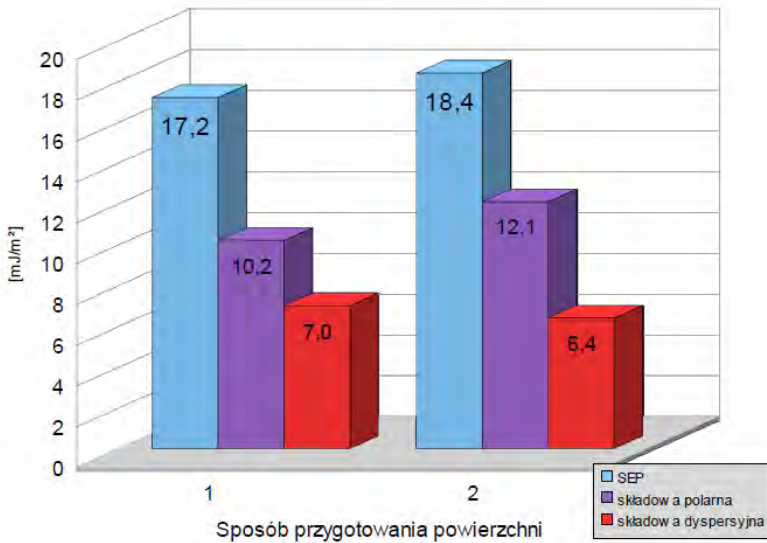
Średnie wartości swobodnej energii powierzchniowej oraz jej składowe dla powierzchni nie poddanej żadnej operacji oraz powierzchni odtłuszczonej przedstawiono na rys. 6.

Otrzymane wyniki poddano analizie statystycznej. Do analizy tej wykorzystano testy istotności służące do porównania wartości średniej badanej cechy w dwóch populacjach generalnych: test t-Studenta oraz test F-Snedecora-Fishera. Testy te uwzględniają błąd pierwszego rodzaju, polegający na odrzuceniu testowanej hipotezy w przypadku, gdy jest ona prawdziwa. Poziom istotności przyjęto na poziomie $\alpha=0,05$.

Uzyskane wyniki analizy pozwoliły na wnioskowanie, iż porównywane średnie są różne. W związku z tym można stwierdzić, że wartość swobodnej energii powierzchniowej powierzchni odtłuszczonej jest większa od wartości dla powierzchni nieodtłuszczonej.



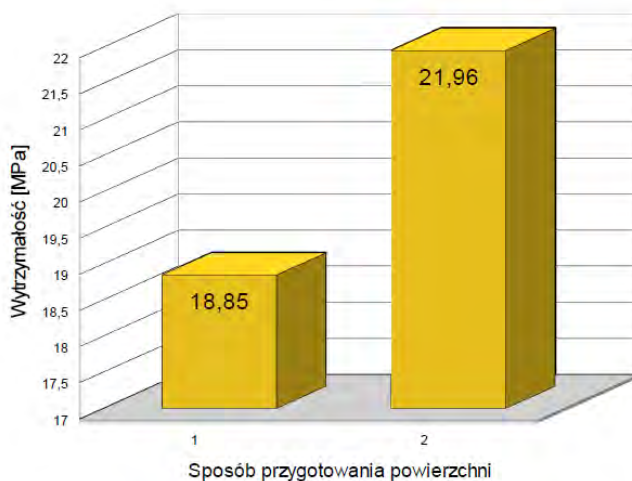
Rys. 5. Obrazy kropli pomiarowych na powierzchni: nieodtłuszczonej a) woda, b) diiodometan; oraz odtłuszczonej c) woda, d) diiodometan



Rys. 6. Wartość swobodnej energii powierzchniowej miedzi: 1 - bez przygotowania powierzchni, 2 - po operacji odtłuszczenia

Wytrzymałość połączeń klejowych

W celach porównawczych przeprowadzono próby wytrzymałościowe klejowych połączeń zakładkowych miedzi M1Ez4, których powierzchnie nie były poddane żadnej obróbce przygotowawczej oraz których powierzchnie były poddane wyłącznie operacji odtłuszczania. Otrzymane wyniki badań zamieszczono na rys. 7.



Rys. 7. Wytrzymałość połączeń klejowych blach miedzianych: 1- bez przygotowania powierzchni, 2- po operacji odtłuszczania

Po przeprowadzeniu badań wytrzymałościowych także przeprowadzono analizę statystyczną uzyskanych wyników. Na jej podstawie wykazano, że wartości wytrzymałości połączeń klejowych powierzchni po odtłuszczeniu jest większa niż połączeń klejowych których powierzchnia nie została odtłuszczona.

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że operacja odtłuszczania korzystnie wpływa na poprawę właściwości energetycznych blach miedzianych, a także na zwiększenie wytrzymałości połączeń klejowych tych blach. W analizowanym przypadku zauważono pozytywny wpływ odtłuszczania na wytrzymałość połączeń klejowych blach miedzianych w porównaniu z połączeniami, w których powierzchnie materiałów nie były poddane jakiegokolwiek obróbce przygotowawczej. Interesującą informacją dotyczącą swobodnej energii powierzchniowej jest wartość jej składowej polarnej, gdyż to ona w dużej mierze decyduje o przydatności powierzchni do klejenia. Wartość tej składowej dla odtłuszczonej powierzchni miedzi jest o $1,83 \text{ mJ/m}^2$ większa niż dla powierzchni nieodtłuszczonej. Można więc stwierdzić, że przy większej wartości swobodnej energii powierzchniowej miedzi, otrzymujemy bardziej wytrzymałe połączenie, gdyż klej silniej łączy się z powierzchnią łączonych elementów, dzięki lepszym

właściwościom adhezyjnym tych powierzchni. W połączeniach adhezyjnych zasadne jest uzyskanie powierzchni wysokoenergetycznych. Materiał, który ma wysokoenergetyczną powierzchnię, jest lepiej zwilżalny, czyli klej lepiej rozpływa się na jego powierzchni.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzone badania dowodzą, że wartość swobodnej energii powierzchniowej miedzi w znacznym stopniu zależy od sposobu przygotowania tej powierzchni, co również ma istotny wpływ na wytrzymałość połączeń klejowych. Operacja odtłuszczania korzystnie wpływa na poprawę właściwości energetycznych blach miedzianych. Usunięcie zanieczyszczeń powoduje znaczny wzrost zdolności adhezyjnych powierzchni. Można zauważyć, że po tej operacji znacznie wzrasta składowa polarna swobodnej energii powierzchniowej, istotnie decydująca o przydatności powierzchni do klejenia. Na podstawie przeprowadzonych badań można zauważyć, że przygotowanie powierzchni za pomocą operacji odtłuszczania korzystnie wpływa na wytrzymałość połączeń klejowych. Próbkę, których powierzchnie nie zostały poddane jakiegokolwiek obróbce przygotowawczej, uzyskały znacznie niższą wytrzymałość. Można więc zauważyć, że przy większej wartości swobodnej energii powierzchniowej miedzi otrzymujemy wytrzymalsze połączenie. Im większa swobodna energia powierzchniowa, tym lepiej zwilżana jest dana powierzchnia. Dlatego też wskazane jest stosowanie zabiegów podwyższających wytrzymałość adhezyjną połączeń, m.in. operacji odtłuszczania.

PIŚMIENNICTWO

1. Adamson A.W.: Chemia fizyczna powierzchni, Warszawa, PWN 1963.
2. Babraj E.G., Starikov D., Evans J., Shafeev G.A., Bensaoula A.: Enhancement of adhesive joint strength by laser surface modification. *Int. J. Adhesion Adhesives* 27 (2007) 268-276.
3. Burakowski T., Wierzchoń T.: Inżynieria powierzchni metali, Warszawa, WNT 1995.
4. Domke W.: Vademecum materiałoznawstwa, Stal, Metale nieżelazne, Tworzywa sztuczne, Badania materiałów, Warszawa, WNT 1989.
5. Dutkiewicz E.T.: Fizykochemia powierzchni, Warszawa, WNT 1998.
6. Godzimirski J., Kozakiewicz J., Łunarski J., Zielecki W.: Konstrukcyjne połączenia klejowe elementów metalowych w budowie maszyn. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1997.
7. Hebda M., Wachal A.: Trybologia, Warszawa, WNT 1980.
8. Jasiulek P.: Łączenie tworzyw sztucznych metodami spawania, zgrzewania, klejenia i laminowania, Krosno, KaBe 2006.
9. Kuczmazewski J.: Technologia śmigłowców. Teoria i technika klejenia. Wyd. Ucz. PL Lublin 1990.
10. Kula P.: Inżynieria warstwy wierzchniej, Łódź, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej 2000.

11. Kurski K.: Miedź i jej stopy techniczne, Katowice, Wydawnictwo „Śląsk” 1967.
12. Łaskawiec J.: Fizykochemia powierzchni ciała stałego, Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej 2000.
13. Missol W.: Energia powierzchni rozdziału faz w metalach, Katowice, Wydawnictwo „Śląsk” 1975.
14. Paderewski M.: Adsorpcja i adsorbenty, Szczecin, Wydawnictwo Politechniki Szczecińskiej 1982.
15. Sikora R.: Tworzywa wielkocząsteczkowe rodzaje, właściwości i struktura. Wydawnictwo politechniki Lubelskiej, Lublin, 1991.
16. Żenkiewicz M.: Adhezja i modyfikowanie warstwy wierzchniej tworzyw wielkocząsteczkowych. WNT, Warszawa 2000.
17. Żenkiewicz M.: Analiza głównych metod badania swobodnej energii powierzchniowej materiałów polimerowych, POLIMERY 2007, 52, nr 10, 760-767.
18. Żenkiewicz M., Gołębiowski W.E.: Doświadczalna weryfikacja niektórych elementów metody van Ossa-Gooda, POLIMERY 1999, 44, nr 3, 212-217.
19. <http://www.kleje-loctite.pl/>, 08.01.2011.

THE INFLUENCE OF THE REMOVING FAT OPERATION ON ADHESIVE TOP LAYER PROPERTIES AND STRENGTH OF ADHESIVE JOINTS BETWEEN COPPER SHEETS

Summary

Adhesion properties play an essential role in the process of making adhesive joints. Good adhesion properties contribute to such to obtain adequate strength adhesive joints. One method of constituting adhesive properties is to use the appropriate method of surface treatment materials intended to joining. Adhesion properties can be assessed by the surface free energy.

In the present study considered an example of adhesive joints are bonded joints for which an attempt to determine the effect of degreasing on the value of the surface free energy and the strength of the bonded joints. The adhesive joints are desirable for obtaining high-energy surface. Removing organic and inorganic contaminants from the considering surface, followed by an increase in their ability of adhesion. Moreover in such case there is beneficial effect on properly bound of adhesive layer to the surface of the joining material.

Keywords: adhesive joints, surface free energy, bonded joints strength.

Praca realizowana w ramach projektu nr POIG. 01.01.02-00-015/08 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (POIG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.



Jakub Szabelski ¹⁾

WSTĘP DO KOMPUTEROWEGO MODELOWANIA CHARAKTERYSTYK UKŁADU DYNAMICZNEGO OBRÓBK UBYTEKOWEJ WAŁÓW O MAŁEJ SZTYWNOŚCI

Streszczenie: Artykuł prezentuje opracowany model matematyczny układu dynamicznego obróbki ubytkowej wałów z uwzględnieniem obróbki części o małej sztywności. Z wykorzystaniem aproksymacji funkcji wykładniczej przy jej rozkładzie w szereg Padé model został uproszczony. W oparciu o wyżej wymieniony model zbudowany został program komputerowy do symulacji układu obróbki zarówno szlifowaniem jak i toczeniem. Praca ta opisuje wyniki modelowania charakterystyk układu z wykorzystaniem stworzonego narzędzia komputerowego.

Słowa kluczowe: modelowanie, wałki, mała sztywność, programowanie, układ dynamiczny, obróbka skrawaniem, Visual Basic.

WSTĘP

Zwiększanie dokładności bez jednoczesnego zmniejszania efektywności obróbki skrawaniem części o małej sztywności szczególnie w sytuacji oddziaływania na układ technologiczny szeregu zakłóceń, może być realizowane na dwa sposoby – poprzez modyfikacje unowocześniające charakterystyki istniejących maszyn skrawających i wykorzystywanych narzędzi bądź też przez bezpośrednie sterowanie procesem obróbki, tj. parametrami skrawania, a przede wszystkim właściwościami sprężystymi i wspomnianymi zakłóceniami, które podczas obróbki mogą występować.

Modelowanie matematyczne jest z kolei pierwszym krokiem do budowy kompletnego i w pełni działającego systemu sterowania każdym procesem. Budowa modelu jak najbardziej zbliżonego do modelu rzeczywistego jest konieczna do rozwiązania problemu stabilności układów sterowania automatycznego oraz syntezy członów korygujących z wymaganymi wskaźnikami jakości sterowania procesem przejściowym [6].

MODEL UKŁADU DYNAMICZNEGO OBRÓBK WAŁÓW O MAŁEJ SZTYWNOŚCI

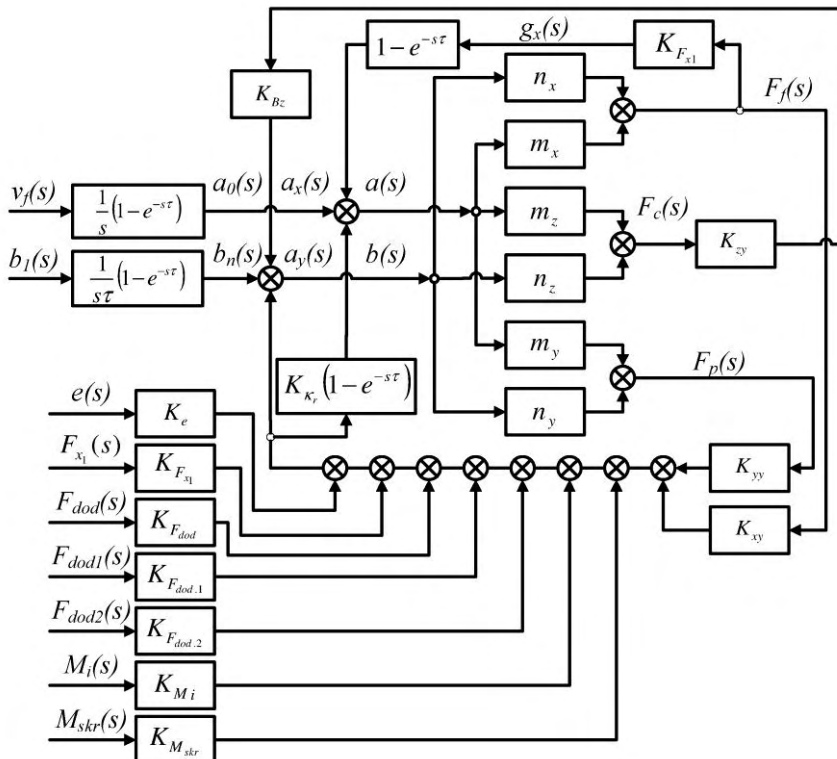
Pod pojęciem rozpatrywanego układu dynamicznego rozumiemy w tym przypadku układ technologiczny (OUPN – obrabiarka - uchwyty - przedmiot obrabiany

¹ Instytut Technologicznych Systemów Informacyjnych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska.

- narzędzie) łącznie z przeprowadzaniem w nim procesem technologicznym (toczenie, szlifowanie).

Poprzez wprowadzenie do istniejącego modelu matematycznego układu dynamicznego obróbki wałów [1] równania opisującego zachowanie części o małej sztywności zbudowany został wyjściowy, uogólniony model matematyczny układu dynamicznego obróbki wałów o małej sztywności w stanie sprężystości odkształcalnym [2]. Dodatkowo uwzględniono proces zmiany grubości warstwy skrawalnej, tj. fakt, że w bieżącej chwili składowe warstwy skrawanego materiału zależą jednocześnie od położenia krawędzi ostrza w chwili bieżącej jak i w chwili poprzedniego obrotu półfabrykatu (tzw. zjawisko skrawania po śladzie). Na podstawie układu równań stworzono schemat strukturalny układu (rys. 1).

Odształcenia sprężyste układu technologicznego w kierunku promieniowym, rozpatrywane jako suma odkształceń sprężystych układu obrabiarka-przedmiot-narzędzie i odkształceń sprężystych części, są funkcją parametrów materiałowych i geometrycznych obrabianej części, składowych siły skrawania, punktu przyłożenia siły skrawania względem długości półfabrykatu, a także dodatkowych oddziaływań sterujących, tj. siły rozciągającej, momentu zginającego, skręcającego, dodatkowych sił lub kombinacji powyższych.



Rys. 1. Schemat strukturalny układu

OPIS PROGRAMU KOMPUTEROWEGO

W oparciu o wyżej przedstawiony model matematyczny oraz program MATMOD1 [2] został w środowisku programistycznym Microsoft Visual Studio (w języku Visual Basic) zbudowany program komputerowy do określania parametrów układu dynamicznego, transmitancji operatorowych, współczynników wzmocnienia, stałych czasowych oraz charakterystyk czasowych i częstotliwościowych.

Stworzony program pozwala na ustalenie warunków procesu skrawania. Podając parametry obrabiarki, części i warunki skrawania w procesie technologicznym, w oparciu o wcześniej wspomniany model układu dynamicznego procesu skrawania, wyodrębniane są podstawowe charakterystyki dynamiczne: transmitancje operatorowe, odpowiedzi sił skrawania oraz odkształceń sprężystych na skokową zmianę prędkości posuwu oraz charakterystyki częstotliwościowe: amplitudowa i fazowa.

Ostateczna wersja programu zbudowana jest z 7 okien – w skład których wchodzi razem ok. 400 kontrolerek (przycisków, pól tekstowych, etykiet, itd.). Kod programu składa się łącznie z około 6000 linii. W czasie ok. 2 miesięcy budowy programu powstało kilkadziesiąt pośrednich wersji testowych.

Model Matematyczny Obróbki Wałków o Małej Sztywności

Parametry Części

Długość części (l) mm

Średnica części (d) mm L/d= 40: 1

Material

Wybierz materiał z listy lub wpisz ręcznie jego parametry:
Własny materiał

Moduł Younga (E) GPa

Granica Wytrzymałości (G) MPa

Sposób Mocowania

☐ W uchwycie bez podparcia drugiego końca

☐ W uchwycie z podparciem kłom konika

☒ Zamocowanie części w kłach

Podatność obrabiarki

☒ Przyjąć uśrednione?

w kierunku osiowym (2-4)
hctx mm/N

w kierunku promieniowym (0.8-2)
hcty mm/N

w kierunku stycznym (2-4)
hctz mm/N

Obliczenia podatności

Maksymalna podatność części w kierunku promieniowym
 mm/N

Ekwiwalentna podatność obrabiarki i części w kierunku promieniowym
 mm/N

Parametry Obróbki

Toczenie **Szlifowanie**

Głębokość skrawania (ap) mm

Posuw na obrót (f) mm/obr

Współczynnik skrawania (Kp)

Główny kąt przystawienia (fp) stopni

Obroty (n) obr/min

Sily skrawania:

Px N

Py N

Pz N

Współczynnik wzmocnienia procesu skrawania

* według przyrostu posuwu na obrót:

rx N/mm

my N/mm

mz N/mm

* według przyrostu głębokości skrawania:

rx N/mm

ry N/mm

nz N/mm

B (szlifowanie)

Współczynnik B, charakteryzujący ekwiwalentną sztywność skrawania:
B

Obliczenia współczynników **O programie...**

Charakterystyki częstotliwościowe modelu obiektu

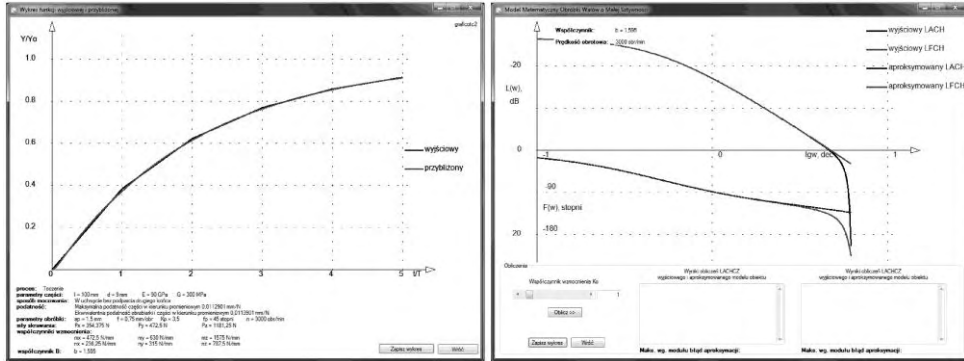
Rys. 2. Wprowadzanie danych wejściowych do modelowania i podstawowe obliczenia

Parametrami wejściowymi do obliczeń są: długość wałka, jego średnica (wyznaczony zostaje stosunek L/D definiujący „sztywność” wałka). Z listy należy wybrać wcześniej zdefiniowany materiał, istnieje również możliwość dodania materiału własnego - przez podanie modułu Younga i granicy wytrzymałości na rozciąganie. Określany jest również sposób zamocowania części do obróbki: w uchwycie bez podparcia drugiego końca, w uchwycie z podparciem kłmem konika lub zamocowanie części w kłach a także definiowana jest w trzech współrzędnych - podatność obrabiarki. W kolejnych polach ustalane są parametry obróbki, w przypadku toczenia: głębokość skrawania, posuw na obrót, główny kąt przystawienia narzędzia skrawającego, obroty wrzeciona oraz wskaźnik skrawalności uwzględniający okresową prędkość skrawania lub jej pochodne (okres trwałości noża, intensywność zużycia ostrza) i chropowatość powierzchni obrobionej [5]. Program na bieżąco przelicza siły skrawania dla trzech współrzędnych i wyświetla je na ekranie razem z współczynnikami wzmocnienia procesu skrawania wg. przyrostu posuwu oraz przyrostu głębokości skrawania. Dodatkowo wyznaczane są maksymalna podatność części w kierunku promieniowym, ekwiwalentna podatność obrabiarki wraz z częścią w kierunku promieniowym i współczynnik B określający ekwiwalentną sztywność skrawania (rys. 2). Współczynnik ten jest o tyle istotny, że posiada wartość graniczną (0,077), która definiuje kształt transmitancji operatorowej na jedną z dwóch postaci. Jego badanie jest istotną częścią modelowania.

Rys. 3. Wyznaczanie postaci transmitancji operatorowej i współczynników wzmocnienia dla modelu aproksymowanego

Następnie, po wybraniu co będzie współzrzedną wyjściową: siła skrawania czy odształcenie sprężyste, program wyznacza dla wcześniej zadanych warunków postać transmitancji operatorowej obiektu i oblicza współczynniki wzmocnienia

obiektu według oddziaływania sterującego dla trzech składowych kierunkowych oraz czas opóźnienia. Ponadto dla modelu uproszczonego przez aproksymację funkcji wykładniczej przy jej rozkładzie w szereg Padé - również stałe czasowe (rys. 3, rys. 4).



Rys. 4. Generowanie wykresów odpowiedzi na skok jednostkowy i charakterystyk fazowych i częstotliwościowych

W dalszej kolejności program pozwala na porównanie na jednym wykresie funkcji wyjściowej (uogólnionej) i funkcji przybliżonej (aproksymowanej rozwinięciem funkcji wykładniczej w szereg Padé) (rys. 4). Umożliwia to praktyczne zaobserwowanie dokładności aproksymacji.

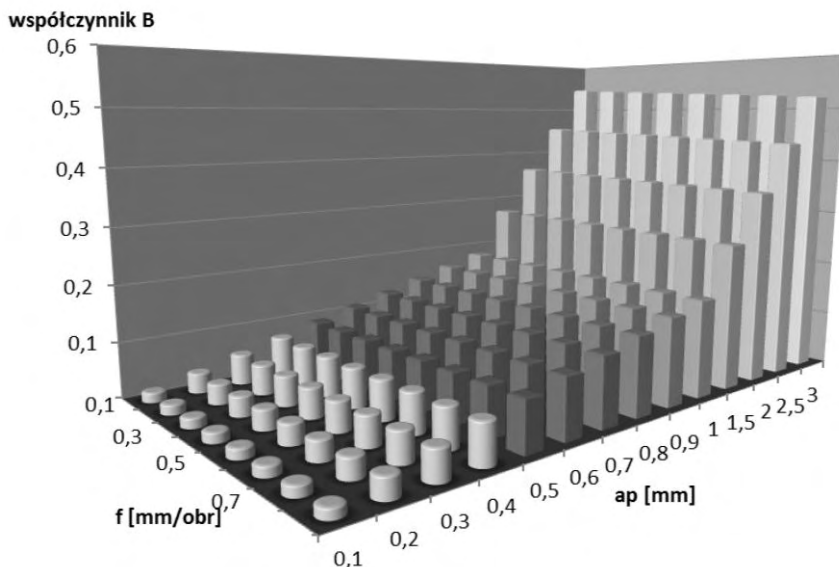
Na koniec, dla ustalonych w pierwszym oknie parametrów, użytkownik może wykreślić charakterystyki fazową i częstotliwościową znów dla dwóch przypadków – dokładnego i aproksymowanego (rys. 4).

KOMPUTEROWE MODELOWANIE UKŁADU DYNAMICZNEGO

Przeprowadzone zostały analizy teoretyczne wybranych parametrów przy obróbce toczeniem wałów o małej sztywności. Modelowano wał o długości 200mm i średnicy 5mm. Stosunek $L/D=40$ kwalifikował wał do rozpatrywania jako mało sztywny. Wybrano jako materiał stal S235JRG2 (ST3S - stara norma) – program odczytał z bazy wartości modułu Younga $E=2,1 \times 10^5$ MPa i granicę wytrzymałości na rozciąganie 380MPa. Przyjęto domyślne wartości podatności obrabiarki, tj.: w kierunku osiowym (x) - 3mm/N, w kierunku promieniowym (y) - 1 mm/N, w kierunku stycznym (z) - 3mm/N. Parametry obróbki zostały zdefiniowane w następujący sposób: głębokość skrawania $a_p=0,4$ mm, posuw $f=0,2$ mm/obrót, współczynnik skrawania $K_p=2$, główny kąt przystawienia $\kappa_r=90^\circ$, obroty wrzeciona 1500obr./min.

Tak zdefiniowany układ wykazuje maksymalną podatność wałka w kierunku promieniowym na poziomie ok. 0,025mm/N w przypadku zamocowania go w kłach i ponad 15 razy większą, tj. 0,406 mm/N, gdy wałek zostanie zamocowany

w uchwycie bez podparcia drugiego końca kłem. Następnie program wyznacza siły skrawania, w tym przypadku wynoszą one kolejno: $F_f = 18,24\text{N}$, $F_p = 24,32\text{N}$ i $F_c = 60,8\text{N}$. Wyznaczony zostaje również współczynnik B określający ekwiwalentną sztywność skrawania (a jednocześnie definiujący postać transmitancji operatorowej) – dla zadanych warunków obróbki i parametrów części - wynosi on 0,0107. Ponadto program wyznacza: współczynniki wzmocnienia obiektu według oddziaływania sterującego dla trzech składowych dla modelu wyjściowego - przyjmując za wyjściowe siły skrawania ($K_{ox}=35,8\text{N/mm}$, $K_{oy}=47,7\text{N/mm}$, $K_{oz}=119,2\text{N/mm}$) bądź też odkształcenia sprężyste ($K_{aox}=0,01074\text{N/mm}$, $K_{aoy}=1,2162\text{N/mm}$, $K_{aoz}=3,06306\text{N/mm}$), oraz czas opóźnienia $T=0,04\text{s}$.



Rys. 5. Badanie współczynnika B w zależności od wartości posuwu i grubości warstwy skrawanej.

Współczynnik B był również badany w aspekcie zależności od podstawowych parametrów skrawania (głębokości skrawania i posuwu) dla wałka $l=500\text{mm}$, $d=20\text{mm}$, przy $n=1000\text{obr/min}$ i $\kappa_r=90^\circ$. Dane numeryczne uzyskane w procesie modelowania (przy wykorzystaniu jednej z pierwszych wersji programu) przedstawia wykres – rys. 5 [2].

Wartość graniczna, której przekroczenie zmienia postać transmitancji operatorowej, jest równa 0,077 i została przedstawiona na wykresie za pomocą jaśniejszych walców. Z analizy wyników modelowania wynika, że współczynnik B ulega wzrostowi w funkcji zmiany głębokości skrawania, oraz nieznacznie maleje wraz ze wzrostem posuwu. Dodatkowo po zmianie kąta przystawienia narzędzia z

$\kappa_r = 90^\circ$ na 45° można stwierdzić niewielki przyrost wartości współczynnika B (przy posuwie 0,8mm/obr. i głębokości 0,5mm różnica wynosi 0,008).

PODSUMOWANIE

Wyniki uzyskane przy pomocy modelowania komputerowego będą weryfikowane doświadczalnie. Zaprojektowane zostało do tego celu stanowisko badawcze, które po rozszerzeniu będzie służyło badaniom właściwym, tj. sterowaniu stanem sprężystości odkształcalnym poprzez wykorzystanie siły osiowej. Artykuł przedstawia wyniki badań jedynie części wybranych charakterystyk układu dynamicznego. Modelowane były ponadto między innymi parametry opóźnienia i stałe czasowe oraz ich zmiany w zależności od zmian parametrów skrawania. Istnieją narzędzia umożliwiające sterowanie dokładnością obróbki części o małej sztywności [6]. Zbudowany program może być wykorzystywany do budowy narzędzi umożliwiających jeszcze dokładniejszą obróbkę wałów o małej sztywności bez jednoczesnego obniżania efektywności procesu skrawania. Ponadto może służyć precyzyjnemu określaniu parametrów przy procesie prostowania wałów o małej sztywności.

PIŚMIENNICTWO

1. Szabelski J., Taranenko G., Taranenko W.: Zagadnienia modelowania własności dynamicznych procesów obróbki wałów o małej sztywności. W: Modele inżynierii teleinformatyki (Wybrane zastosowania) 3 Monografia, red. Marian Kopczewski, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2008. 253 – 260.
2. Palica J., Szabelski J., Taranenko G., Taranenko W.: Modelowanie charakterystyk układów dynamicznych obróbki wałów o małej sztywności. Podstawy informatyczne w organizacji produkcji. Monografia, red. Wiktor Taranenko, Wydawnictwo Lubelskiego Towarzystwa Naukowego, Lublin 2009, 124 – 139.
3. Palica J., Szabelski J., Taranenko G., Taranenko W.: Modelowanie charakterystyk układów dynamicznych obróbki toceniem wałów o małej sztywności. Modele inżynierii teleinformatyki (Wybrane zastosowania) 4, Monografia, red. Krzysztof Bzdrya, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2009, 168 – 182.
4. Taranenko G., Taranenko W., Świć. A., Szabelski J.: Modelowanie układów dynamicznych obróbki skrawaniem wałów o małej sztywności, Modelling of dynamic systems of low-rigidity shaft machining, Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, nr 4(48)/2010, 4-16.
5. Grzesik W.: Podstawy skrawania materiałów metalowych, Wydawnictwa Naukowo Techniczne, Warszawa, 1998 r.
6. Zubrzycki J., Abakumov A., Taranenko G., Taranenko W.: Experimental studies of characteristics of dynamic technological system of turning (in Polish). In: Zagadnienia pękania i skrawania materiałów plastycznych. Monografia, red. Józef Jonak, Wyd. LTN, Lublin 2008, 24 – 41.

7. Taranenko W., Świć A.: Urządzenia sterujące dokładnością obróbki części maszyn o małej sztywności. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2006, 186.

THE INTRODUCTION TO COMPUTER MODELLING OF DYNAMIC SYSTEM CHARACTERISTICS OF MACHINING OF SHAFTS WITH LOW RIGIDITY

Summary:

The paper presents a formulated mathematical model of dynamic system of machining shafts including non-rigid parts. Using the approximation of exponential function by Padé series the model has been abridged. Basing on that model, the computer programme for simulating the dynamic system of turning and grinding was build. The article introduces results of mathematical modelling obtained using created tool.

Keywords: modelling, shafts, low rigidity, programming, dynamic system, machining, Visual Basic.

Marian Gielmuda¹⁾

ZASTOSOWANIE METODY „RAPID PROTOTYPING” W BUDOWIE SILNIKA KJ – 66SM

Streszczenie: W artykule zawarto informacje na temat zastosowania metod szybkiego prototypowania w projektowaniu i prototypowaniu części maszyn. Opisano ich wpływ na czas realizacji projektu na przykładzie wlotu turbodrzutowego silnika KJ – 66SM zbudowanego przez studentów Politechniki Lubelskiej przy wykorzystaniu trójwymiarowej drukarki proszkowej.

Słowa kluczowe: szybkie prototypowanie, drukowanie 3D, modelarskie silniki turbinowe, silnik KJ – 66SM, wlot silnika turbinowego.

WSTĘP

Pojęciem „Rapid Prototyping” (ang. szybkie prototypowanie) określa się zbiór metod projektowania służących do szybkiego, precyzyjnego i powtarzalnego produkowania addytywnych elementów. Historia stosowania metod szybkiego prototypowania sięga końca lat 90, właśnie wtedy znaczną popularnością zaczęło się cieszyć wykonywanie modeli makrocząsteczek za pomocą jednej z tzw. metod szybkiego prototypowania będących automatycznymi technikami budowy obiektów fizycznych na drodze: warstwowego klejenia, stapiania, spiekania czy utwardzania różnych materiałów za pomocą lasera lub innych wiązek promieniowania.

Wyróżnić można następujące metody szybkiego prototypowania:

- Stereolithography (SLA) – utwardzanie za pomocą lasera UV,
- Fused Deposition Modeling (FDM) – wtapianie porcji wypełniacza lub drutu,
- Selective Laser Sintering (SLS) – spiekanie za pomocą lasera cząstek budulca,
- Electron Beam Melting (EBM) – stapianie za pomocą wiązki elektronowej,
- Laminated Object Manufacturing (LOM) – sklejanie arkuszy papieru, tworzywa sztucznego lub metalu,
- Three Dimensional Printing (3DP) – sklejanie za pomocą nakładanego kleju.

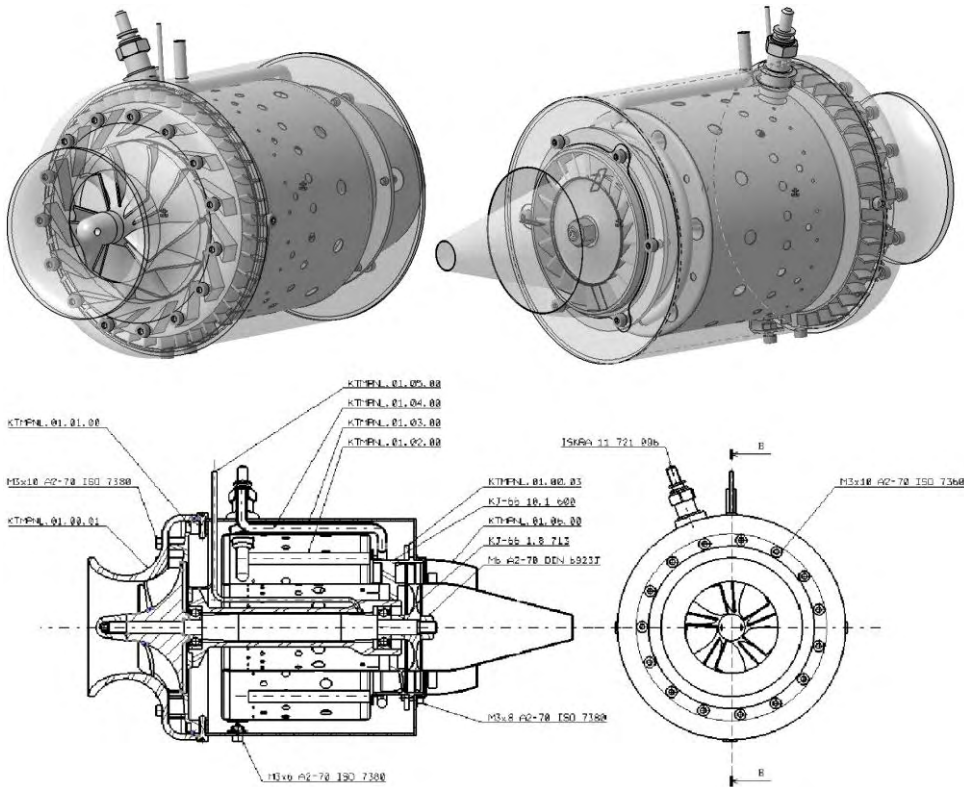
Metoda 3D Printing (3DP) – jest bardzo prostą i tanią metodą wykonywania modeli koncepcyjnych. Druk 3D polega na selektywnym zespalaniu warstwa po warstwie materiału proszkowego za pomocą strumieniowo dozowanej cieczy zespalającej zwanej lepiszczem. System drukujący tworzy fizyczne modele będą-

¹ Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Koło Naukowe Napędów Lotniczych.

ce dokładnym odwzorowaniem uprzednio zaprojektowanych komputerowo modeli w programach CAD.

SILNIK TURBINOWY KJ – 66SM

Metoda szybkiego prototypowania została użyta przy wykonaniu turbodrzutowego silnika o nazwie KJ-66SM. Jest to silnik do zastosowań modelarskich zbudowany przez studentów Politechniki Lubelskiej na bazie planów silnika KJ-66 skonstruowanego przez Kurta Schrecklinga. Silnik KJ-66SM ma konstrukcję charakterystyczną dla większości silników turbodrzutowych małej mocy do tych zastosowań (rys. 1).



Rys. 1. Model 3D silnika KJ – 66SM oraz dokumentacja złożenia
Fig. 1. Model 3D of the engine KJ – 66SM and assembling documentation

Jest to jednowałowy i jednoprzepływowy silnik turbodrzutowy wyposażony w sprężarkę promieniową, co oznacza że powietrze przepływa we wlocie w kierunku osiowym, zaś w sprężarce zostaje skierowane w kierunku promieniowym. Silnik KJ-66SM posiada parownicową komorę spalania z przeciwbieżnym prze-

plywem paliwa. Sprężarkę napędza jednostopniowa reakcyjna turbina osiowa, na której rozprężane i przyspieszane są spaliny. Silnik posiada, także dyszę zbieżną z wewnętrznym stożkiem formującym.

Pierwszym krokiem w realizacji projektu silnika KJ-66SM było stworzenie modelu i dokumentacji silnika na podstawie obliczeń gazo-dynamicznych i wytrzymałościowych. Na rysunku nr 1 został przedstawiony model 3D oraz dokumentacja złożenia silnika KJ-66SM wykonane przez studentów w programie Catia V5 [3].

PROTOTYP SILNIKA KJ-66SM

Na podstawie opracowanej dokumentacji technicznej wykonano prototyp silnika. Podstawowe podzespoły silnika takie jak: sprężarka, kierownica spalin, turbina, komora spalania, wlot i dysza wylotowa silnika zostały zakupione za granicą (tj. Chiny). Pozwoliło to na obniżenie kosztów i znaczne skrócenie czasu realizacji projektu, lecz jednocześnie wpłynęło w znacznej mierze na pojawienie się dodatkowych kłopotów. Najważniejsze z zakupionych części zostały przedstawione na rys. 2 [3].



Rys. 2. Części zakupione w Chinach

Fig. 2. Purchased parts in China

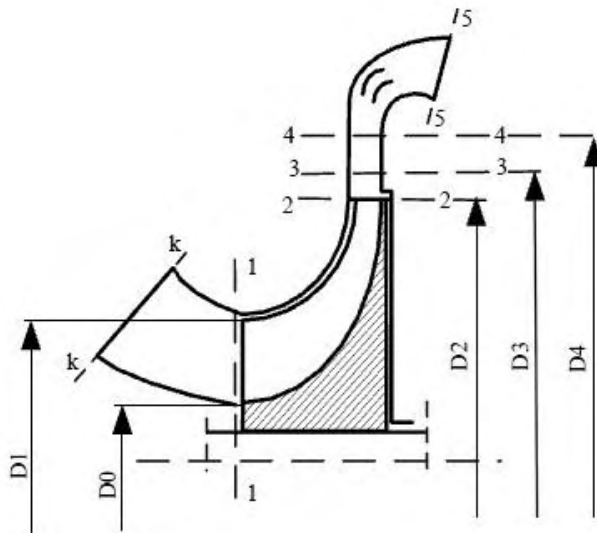
Największy problem pojawił się z związku z wlotem silnika. W projekcie wlot został zaprojektowany jako jednolita część wykonana z aluminium PA6 i ukształtowana w dyszę. Głównym zadaniem wlotów silników turbodrzutowych jest doprowadzenie do silnika odpowiedniej ilości powietrza przy w miarę równomiernym rozkładzie pola prędkości i ciśnień na wlocie do sprężarki. Jednocześnie zadaniem wlotu jest, także częściowa zmiana energii kinetycznej napływającego strumienia na energię potencjalną sprężonego powietrza. Ważne jest, także aby

wlot spełniał stawiane przed nim zadania we wszystkich fazach lotu przy jednocześnie możliwie dużych wartościach współczynnika zachowania ciśnienia i małych wartościach współczynnika oporów aerodynamicznych stawianych przez wlot [1].

Najważniejszym parametrem konstrukcyjnym poza kształtem chwytu powietrza jest luz wierzchołkowy łopatek sprężarki (luz między łopatkami sprężarki a wlotem silnika). Dla sprężarek odśrodkowych zaleca się aby luz ten nie przekraczał wartości około 0,2mm. W przypadku wlotu zakupionego w punktach krytycznych luz przekraczał wartość 5mm, co powodowało duże straty przeciekania przez luz promieniowy i jednocześnie wpływało na ciśnienie w komorze spalania i współczynnik nadmiaru powietrza. Zakupiony wlot nie spełniał tych wymagań co spowodowało wiele problemów i nieudanych prób stanowiskowych uruchomienia silnika. Zbyt duży luz powodował, że sprężarka zamiast sprężać powietrze i w odpowiedni sposób kierunkować jego przepływ funkcjonowała jak „mieszadło” jednocześnie nie dostarczając odpowiedniej ilości powietrza do spalania paliwa. Konieczne stało się całkowite przeprojektowanie i wykonanie wlotu.

OPRACOWANIE I WYKONANIE WLOTU SILNIKA

Wymiary geometryczne wlotu zostały uzyskane na podstawie obliczeń gazodynamicznych wlotu [2]. Obliczenia wlotu osiowego silnika KJ – 66SM zostały przeprowadzone przy założeniu, że w przekroju wlotowym, w osi silnika znajdowało się będzie opływowe ciało stałe (ponieważ konieczny będzie montaż rozrusznika silnika w tym przekroju). Na rys. 3 zostały przedstawione wymiary geometryczne przekroju wlotu silnika.



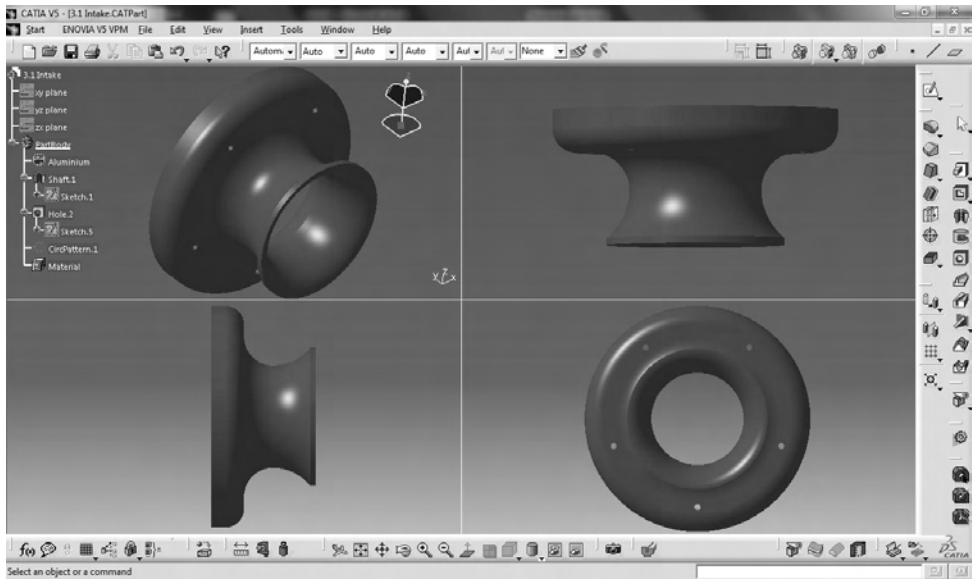
Rys. 3. Wymiary wlotu silnika
Fig. 3. The dimensions of the engine inlet

W tabeli poniżej zostały przedstawione wyniki obliczeń wymiarów geometrycznych wlotu silnika. Obliczenia zostały przeprowadzone przy założeniach: prędkości lotu $c=100$ m/s i użycia jako sprężarki zaadaptowanego koła kompresora z turbosprężarki pojazdu trakcyjnego. Numer katalogowy sprężarki firmy KKK to: 5327 – 123 – 2000.

Kolejnym krokiem w realizacji projektu było stworzenie modelu 3D. Do tego celu użyto programu Catia w wersji V5R20. Stworzony model 3D wlotu silnika został przedstawiony na rysunku 4. Do fizycznego wykonania wlotu zdecydowano się na wybór jednej z metod szybkiego prototypowania tj. proszkowego drukowania 3D.

Tabela 1. Wyniki obliczeń wlotu silnika (results of calculations of the engine inlet)

Wymiar	Wartość [m]
D_0	0,014
D_1	0,046
D_2	0,065
D_3	0,072
D_4	0,093
D_k	0,070



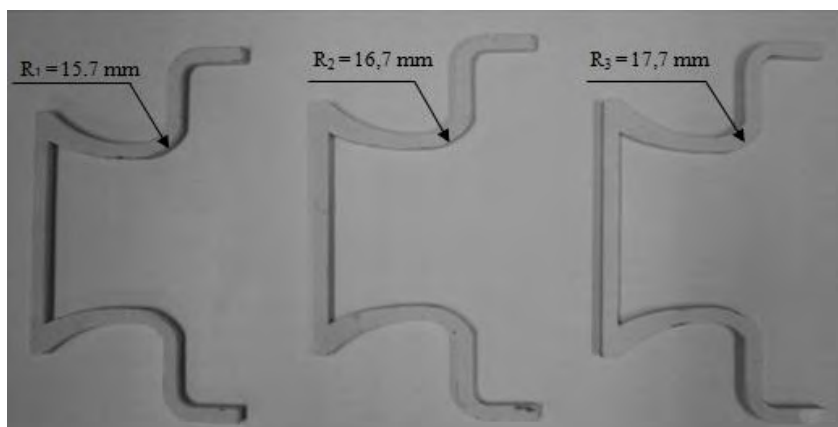
Rys. 4. Model 3D wlotu silnika
Fig. 4. 3D model of the engine inlet

Temperatura, w jakiej pracuje wlot silnika, mieści się w dopuszczalnych granicach pracy elementów wykonanych w drodze drukowania proszkowego. Wlot silnika nie jest narażony na obciążenia mechaniczne, jedynym odcieżeniem dzia-

łającym na wlot jest obciążenie pochodzące od rozrusznika w czasie rozruchu silnika, gdy dochodzi do zasprężenia rotora z rozrusznikiem. Przy założeniu zastosowania grubości wlotu około 6 mm i dodatkowo wzmocnienie wydruku żywicą epoksydową przyjęto, że wydruk proszkowy powinien spełnić stawiane przed nim wymagania. Do wydruków użyto drukarki proszkowej 3D firmy Z Corporation model Z450, dostępnej w laboratorium Katedry Termodynamiki, Mechaniki Płynów i Napędów Lotniczych Politechniki Lubelskiej. Na potrzeby wydruku konieczny jest zapis plików modelowanych części w uniwersalnym formacie zapisu plików „.stl”.

Głównym problemem podczas projektowania wlotu silnika okazało się dopasowanie wewnętrznej powierzchni wlotu silnika do sprężarki a dokładnie do tworzącej łopatek sprężarki. Związane było to z brakiem dokładnych wymiarów koła sprężarki i trudnościami w pomiarze tych wielkości. Dlatego też zdecydowano się na dobór tych wielkości metodą kolejnych przybliżeń.

Do tego celu wydrukowano przekroje wlotu silnika w trzech wariantach promienia przejścia od prostoliniowej osiowej części wlotu do promieniowej części przechodzącej ze sprężarki do dyfuzora łopatkowego. Wydruki przedstawione zostały na rys. 5.

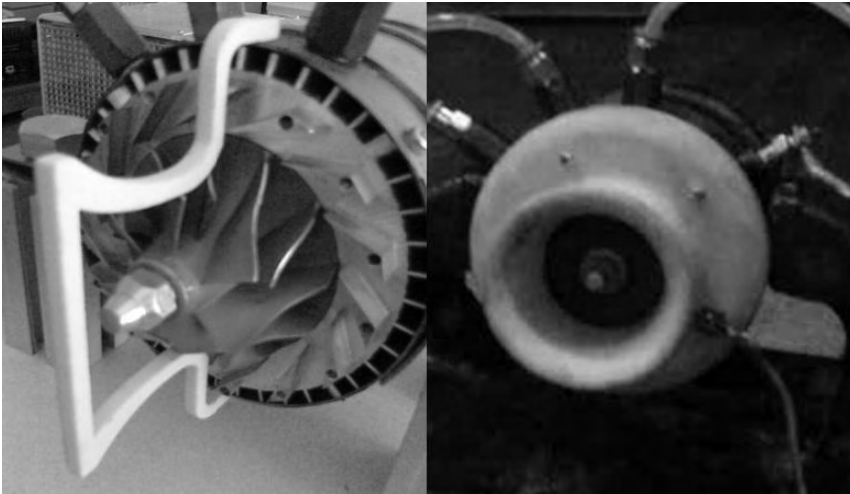


Rys. 5. Wydruki przekrojów wlotu silnika
Fig. 5. Print engine inlet sections

Następnie dobrano przekrój najbardziej odpowiedni do zmontowanego silnika. Z promieni R_1 , R_2 i R_3 wybrano promień $R_3=17,7\text{ mm}$. Następnie wydrukowano kompletny wlot silnika i przeprowadzono kolejne próby stanowiskowe pracy silnika.

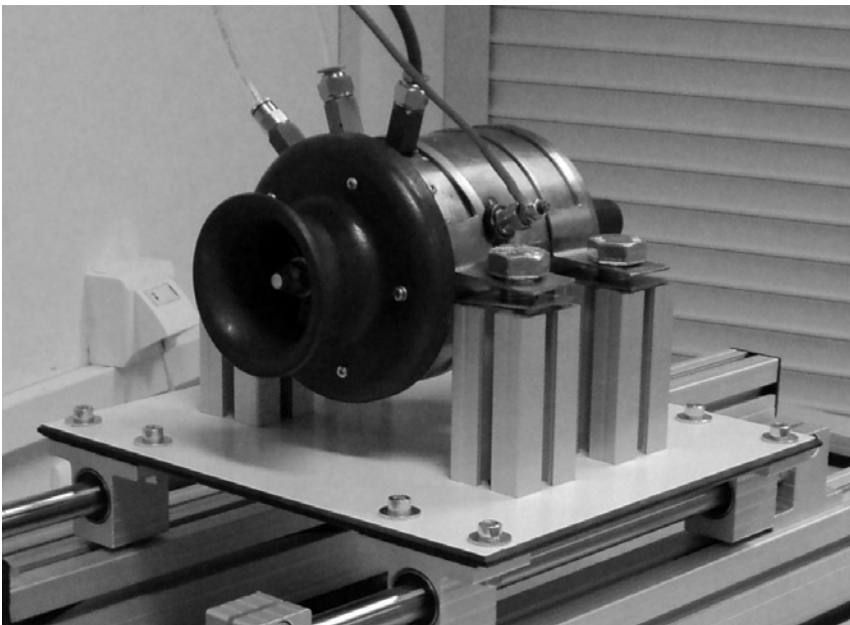
Próby te zakończyły się sukcesem. Z nowym wlotem zbudowanym przy użyciu metod „rapid prototyping” silnik po raz pierwszy podjął samodzielną pracę i funkcjonował zgodnie ze wcześniejszymi założeniami. Rysunek 6 po lewej stronie przedstawia sposób doboru właściwego przekroju wlotu silnika, zaś prawa

strona rysunku przedstawia zdjęcie z pierwszej próby uruchomienia silnika z wydrukowanym wlotem, zakończonej sukcesem.



Rys. 6. Dobranie właściwego przekroju wlotu (po lewej), pierwsza próba uruchomienia silnika z wydrukowanym wlotem (po prawej)

Fig. 6. Choosing the appropriate section of the inlet (left), the first test of the engine with a printed intake (right)



Rys. 7. Silnik KJ – 66SM zamontowany na stanowisku hamownianym

Rys. 7. Engine KJ - 66SM mounted on a test bed

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Metody szybkiego prototypowania z punktu widzenia projektowania i wytwarzania części maszyn są bardzo przydatnymi. Dzięki wykorzystaniu metod „rapid prototyping” w znacznym stopniu można przyspieszyć procesy projektowania i prototypowania. Bardzo często metody te używane są do budowania wielkogabarytowych elementów w odpowiedni sposób przeskalowanych. Do realizacji wydruku konieczny jest model 3D drukowanego elementu w uniwersalnym formacie zapisu co oznacza, że w modele wydruku mogą być zrealizowane w praktycznie każdym programie CAD (Computer Aided Design). Na przykładzie silnika odrzutowego KJ – 66SM zbudowanego przez studentów udowodniono jak bardzo przydatnymi narzędziami są drukarki 3D. Na rys. 6 przedstawiono końcowe wyniki projektu silnika KJ – 66SM zamontowanego na stanowisku hamownianym wyposażonego we wlot powietrza w postaci proszkowego wydruku 3D. Wlot dodatkowo w celu nadania odpowiedniej gładkości powierzchni pokryty został farbą emulsyjną. Nadmienić należy że na użytej drukarce można także wykonywać wydruki o dowolnej kolorystyce.

Główne korzyści płynące z możliwości zastosowania metod szybkiego prototypowania w projektowaniu i wytwarzaniu to na podstawie budowy silnika KJ–66SM to m.in.:

- skrócenie czasu realizacji projektu,
- obniżenie kosztów,
- wysoka jakość wykonania,
- możliwość szybkiego wprowadzenia zmian i przebudowania prototypu,
- zastosowanie prototypu do budowy obiektu rzeczywistego.

PIŚMIENNICTWO

1. Gielmuda M. : Projekt stanowiska hamownianego do badań silników turbinowych małych mocy, Praca dyplomowa pod kierunkiem dr inż. Jacka Czarnigowskiego, Politechnika Lubelska, Lublin 2011.
2. Kozłowski M : Projekt koncepcyjny modelarskiego silnika odrzutowego do napędu samolotu, Praca dyplomowa pod kierunkiem dr inż. Jacka Czarnigowskiego, Politechnika Lubelska, Lublin 2011.
3. Kraska J : Projekt techniczny silnika odrzutowego o ciągu rzędu 100 N, Praca dyplomowa pod kierunkiem dr inż. Jacka Czarnigowskiego, Politechnika Lubelska, Lublin 2011.

THE USE OF THE METHOD "RAPID PROTOTYPING" IN THE BUILD ENGINE KJ-66SM

Summary:

This paper provides information on the use of methods of rapid prototyping in the design and prototyping of machine parts. The paper describes the impact on the acceleration of these processes on the example of jet engine inlet KJ - 66SM built by students of the Lublin University of Technology using three-dimensional printer powder.

Keywords: rapid prototyping, 3D printing, model turbine engines, engine KJ-66SM, turbine engine inlet.

Janusz Kisiel, Józef Jonak, Jakub Gajewski, Łukasz Jedliński ¹⁾

ANALIZA WYBRANYCH DYSKRYMINANT STOSOWANYCH DO OCENY STANU TECHNICZNEGO PRZEKŁADNI

Streszczenie: W opracowaniu przedstawiono wyniki badań zmierzających do określenia „obrazu wibroakustycznego” przekładni końcowej zabudowanej na śmigłowcu PZL-SW-4 oraz analizę wartości wybranych dyskryminant diagnostycznych i zakresu ich zmienności w różnych warunkach lotu śmigłowca. Wartości dyskryminant obliczone na podstawie przeprowadzonych pomiarów poddano konfrontacji z doniesieniami literaturowymi sprawdzając ich przydatność w zastosowaniu do oceny stanu technicznego przekładni.

Słowa kluczowe: przekładnia, śmigłowiec, obraz wibroakustyczny, stan techniczny.

WSTĘP

Systemy oceny rzeczywistego stanu technicznego przekładni z użyciem metod wibroakustycznych są od szeregu lat badane i wdrażane w praktyce produkcyjnej i eksploatacyjnej maszyn, pojazdów a także obiektów latających. W warunkach eksploatacyjnych śmigłowca, z punktu widzenia prowadzonej diagnostyki, bardzo przydatne jest stosowanie jak najprostszych miar zjawisk drganiowych, które są łatwe do wyznaczenia oraz pozwalają wstępnie ocenić rodzaj powstającego uszkodzenia a co szczególnie ważne stopień zagrożenia bezpieczeństwa latających załóg.

Systemy monitorowania i diagnozowania stanu przekładni wyposażone są w sensory pomiarowe zainstalowane w punktach zbierania informacji znajdujących się w badanym obiekcie lub na badanym obiekcie. Jako sensory informacji diagnostycznych stosowane są czujniki prędkości obrotowych wirujących elementów, czujniki temperatury, ale przede wszystkim czujniki drgań. Drgania korpusów przekładni, a w szczególności wartości i zmiany wartości amplitud przyspieszeń drgań i prędkości drgań a także zmiany częstotliwości bądź przesunięcia fazowe niosą istotne informacje diagnostyczne charakteryzujące stan techniczny badanych obiektów.

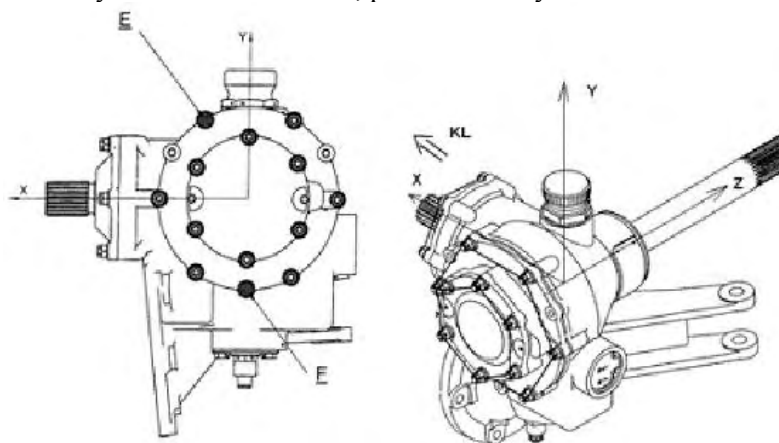
Podstawą prawidłowego funkcjonowania systemu monitorującego pracę przekładni lub diagnozującego badaną przekładnię jest dobór odpowiednich miar, które przy wykorzystaniu zmierzonych parametrów drgań w sposób jednoznaczny opisują stan techniczny przekładni.

¹ Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn.

OBIEKT BADAŃ I PROFIL OBCIĄŻEŃ

Obiektem badań jest przekładnia końcowa śmigłowca PZL-SW4, nazywana w skrócie PK-4. Jest to przekładnia zębata jednostopniowa, kątowna z kołami stożkowymi o zębach łukowo-kołowych o przełożeniu równym 2,2105.

Nominalna prędkość obrotowa wału wejściowego wynosi 6016obr/min. Zakres mocy na wale wejściowym do przekładni wynosi nominalnie 22kW przez 90% czasu pracy, 56kW przez około 10% i 132kW przez 0,01% czasu pracy. Liczby zębów, częstotliwości obrotowe i częstotliwości zazębień kół zębatych zastosowanych w przekładni PK-4 zestawiono w tablicy 1. Warunkiem koniecznym, w celu osiągnięcia przydatnych praktycznie wyników pomiarów, jest prawidłowe mocowanie czujników drgań na korpusie przekładni w wytypowanych miejscach posadowienia. Najkorzystniejsze jest takie usytuowanie czujników, przy którym ich osie pomiarowe pokrywają się z liniami działania wektorów sił wypadkowych reakcji łożysk. Postulat ten nie zawsze może być w pełni spełniony wówczas gdy niemożliwa jest ingerencja mechaniczna w korpus przekładni polegająca na przykład na wykonaniu otworu służącego do mocowania czujnika. Wytypowane miejsca posadowienia czujników drgań na korpusie przekładni, w których możliwe było ich zamontowanie, pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Rysunek poglądowy przekładni PK-4 i wytypowane miejsca mocowania czujników drgań na korpusie przekładni.

Tablica 1. Częstotliwości obrotowe i zazębień kół w przekładni PK-4

Nr koła zębatego	Liczba zębów	Prędkość obrotowa [obr/min]	Częstotliwość obrotowa $f_o(k)$ [Hz]	Częstotliwość zazębienia $f_z(k)$ [Hz]
1	19	6016	100,267	1905,073
2	42	2721,5238	45,3589	1905,073

Do rejestracji drgań użyto trójkierunkowe czujniki drgań, oznaczono je dużymi literami: E i F. Kierunki lokalnych układów współrzędnych czujników drgań

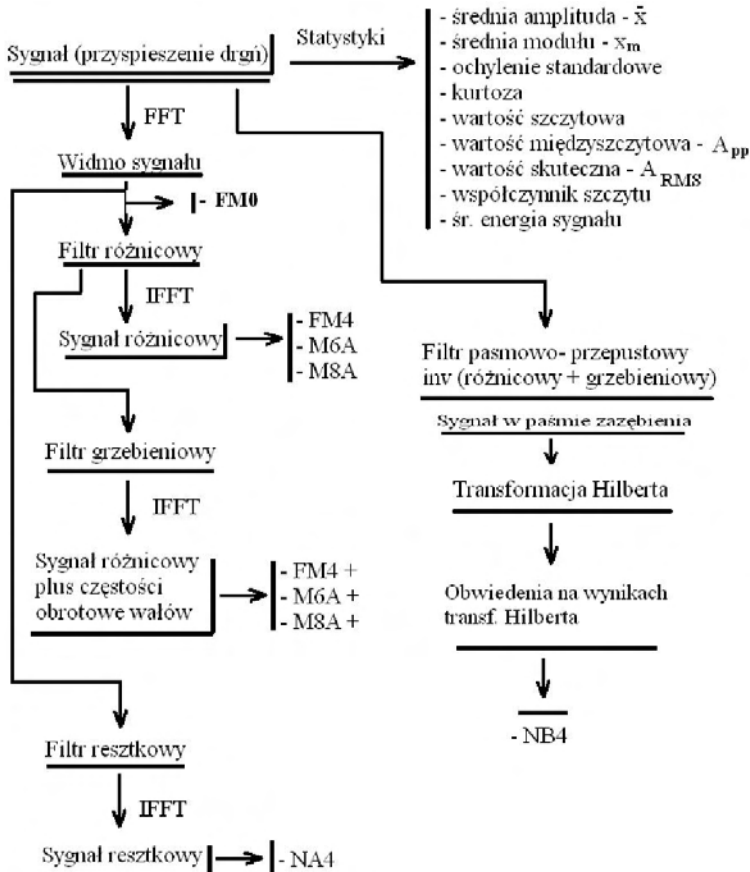
X, Y, Z są zgodne z kierunkami osi układu współrzędnych związanego z przekładnią PK-4:

- Oś X - oś wału wejściowego (+ do przodu),
- Oś Y - prostopadła do osi X w płaszczyźnie symetrii śmigłowca (+ do góry),
- Oś Z - prostopadła do płaszczyzny X-Y (+ w prawo).

Pomiary drgań były wykonywane w stałych odcinkach czasu z częstotliwością próbkowania 26kHz. Czas trwania zapisu danego stanu wynosił ok. 5s. Stany nieustalone zapisywano w całości. W stanach pomiarowych utrzymywano zadaną prędkość obrotową wirnika w/g wskaźnika pokładowego śmigłowca SW-4.

Podczas badań nie stwierdzono wystąpienia nietypowych zdarzeń lotniczych związanych z eksploatacją śmigłowca, jak również przekroczenia ograniczeń lotnych zawartych w IUL.

ZASTOSOWANE DYSKRYMINANTY DIAGNOSTYCZNE I ALGORYTM OBLICZANIA ICH WARTOŚCI



Rys. 2. Algorytm wyznaczania dyskryminant diagnostycznych

Dla sygnałów drganiowych zarejestrowanych podczas badań obliczone zastały wartości dwudziestu wytypowanych wskaźników diagnostycznych. Zastosowano proste miary punktowe wymiarowe i bezwymiarowe jak też dyskryminanty bezwymiarowe oparte o momenty wyższych rzędów.

Zastosowany algorytm obliczania wartości dyskryminant diagnostycznych przedstawiono na rys. 2.

PRZYKŁADOWE WYNIKI OBLICZEŃ I ANALIZ WARTOŚCI OBLICZONYCH DISKRYMINANT

Wszystkie sygnały drganiowe zarejestrowane na przekładni podczas wykonywania przez śmigłowiec zadanych manewrów poddano analizie w funkcji czasu oraz w funkcji częstotliwości.

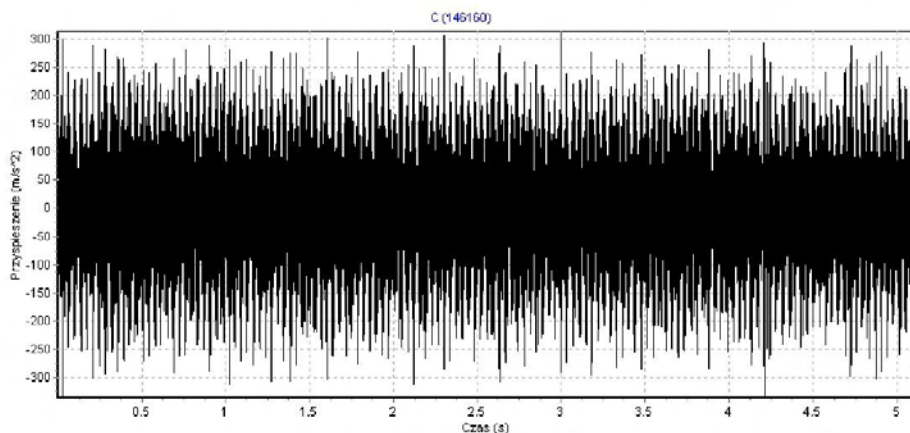
Tablica 2. Wartości wskaźników diagnostycznych sygnałów zarejestrowanych na PK-4 podczas „biegu jałowego”

czujniki E i F - bieg jałowy - n=60% (3610 obr/min), Mo=8 - 9%						
dyskryminanty	Ex_03	Ey_03	Ez_03	Fx_03	Fy_03	Fz_03
x(X)	1,2	-0,2	-2,1	-0,6	-0,8	0,2
xm(X)	73,4	174,0	81,0	218,0	35,7	112,5
sd(X)	90,6	202,0	98,3	249,8	47,4	130,7
zp(X)	440,2	573,3	442,2	631,9	441,1	442,1
pp(X)	775,4	1064,8	806,7	1190,5	668,8	844,4
C(X)	4,9	2,8	4,5	2,5	9,3	3,4
rms(X)	90,6	202,0	98,3	249,8	47,4	130,7
mzp(X)	100,4	274,4	113,6	341,5	44,0	159,0
kurt(X)	-0,3	-1,0	-0,5	-1,1	1,5	-1,0
E(X)	0,3	1,4	0,3	2,2	0,1	0,6
A(X)	-0,5	-1,1	-0,2	-0,9	1,2	-1,2
FM0	2,8	1,2	2,2	1,4	6,3	1,7
FM4	7,9	5,8	4,6	62,7	89,1	3,8
M6A	3571,3	1342,8	580,8	144589,8	285632,7	141,5
M8A	2750989,6	727549,9	235362,1	381508400,9	954902758,5	30277,9
NA4	3,0	2,9	2,9	2,6	3,6	2,5
NB4	2,6	2,3	2,7	2,6	5,3	2,6
FM4+	8,0	5,8	4,6	61,7	82,1	3,9
M6A+	3769,8	1296,2	591,8	138211,0	252230,5	149,6
M8A+	2958149,3	692614,5	241555,1	358558145,3	809133600,8	32339,1

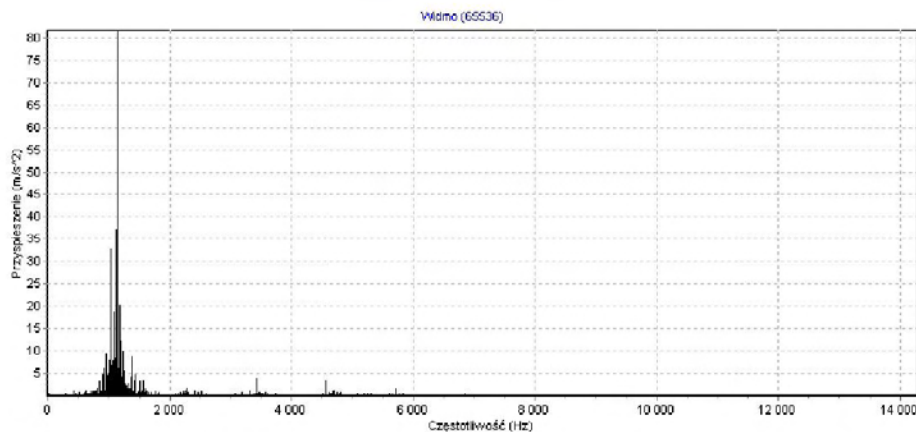
Na rysunkach o numerach od 3 do 8 pokazano przykładowe wyniki przebiegów wartości przyspieszeń drgań oraz widma częstotliwościowe sygnałów mie-

rzonych w wybranych kanałach pomiarowych podczas „biegu jałowego”, gdy śmigłowiec stał na płycie lotniska, wartość momentu obciążającego przekładnię wynosiła wówczas od 8,5% do 9,5% wartości nominalnej, a prędkość obrotowa wahała się nieznacznie, od 60,6% do 61,1% wartości nominalnej oraz podczas lotu, gdy śmigłowiec wykonywał manewr „przemieszczania w lewo”. Wartość momentu obciążającego przekładnię podczas tego manewru wynosiła od 65% do 74% wartości nominalnej. Prędkość obrotowa wahała się od 102,5% do 104% wartości nominalnej.

W tablicach 2 i 3 zestawiono wartości dyskryminant diagnostycznych obliczone na podstawie wyników pomiarów zarejestrowanych przy wymienionych powyżej stanach pracy przekładni.



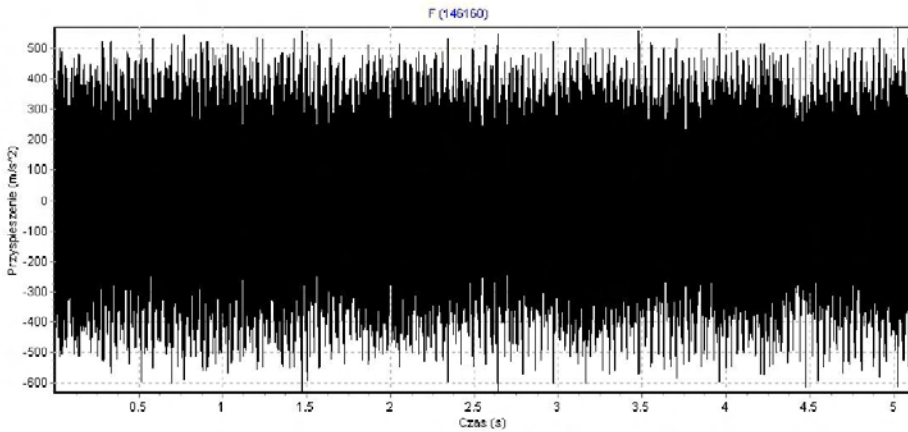
Rys. 3. Przyspieszenia drgań mierzone czujnikiem E w kierunku osi X podczas biegu jałowego



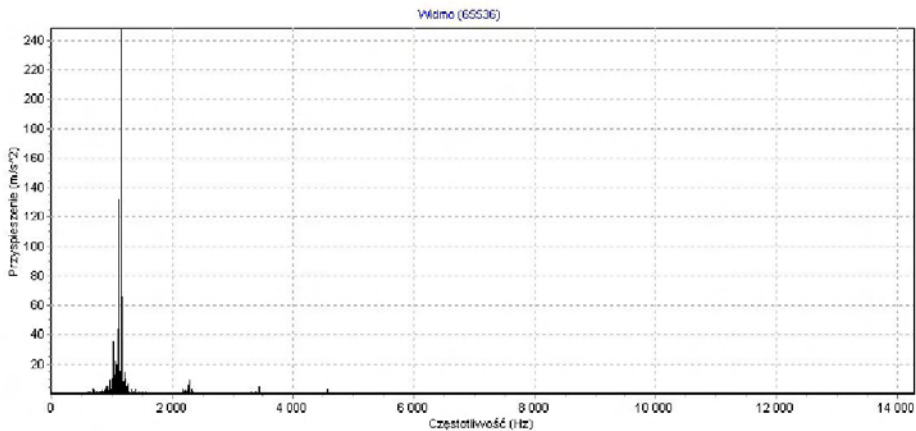
Rys. 4. Widmo sygnału mierzonego czujnikiem E w kierunku osi X podczas biegu jałowego

W pierwszych kolumnach tablic wypisano nazwy dyskryminant lub ich skróto-
towe oznaczenia. Znaczenie zastosowanych skrótów jest następujące:

- $x(X)$ - średnia wartość mierzonego sygnału,
- $xm(X)$ - średnia z modułów,
- $sd(X)$ - odchylenie standardowe,
- $zp(X)$ - wartość szczytowa,
- $pp(X)$ - wartość międzyszczytowa,
- $C(X)$ - współczynnik szczytu,
- $rms(X)$ - wartość skuteczna,
- $mzp(X)$ - średnia wartość szczytowa,
- $kurt(X)$ - kurtოza,
- $E(X)$ - średnia energia sygnału,
- $A(X)$ - współczynnik asymetrii mierzonego sygnału.



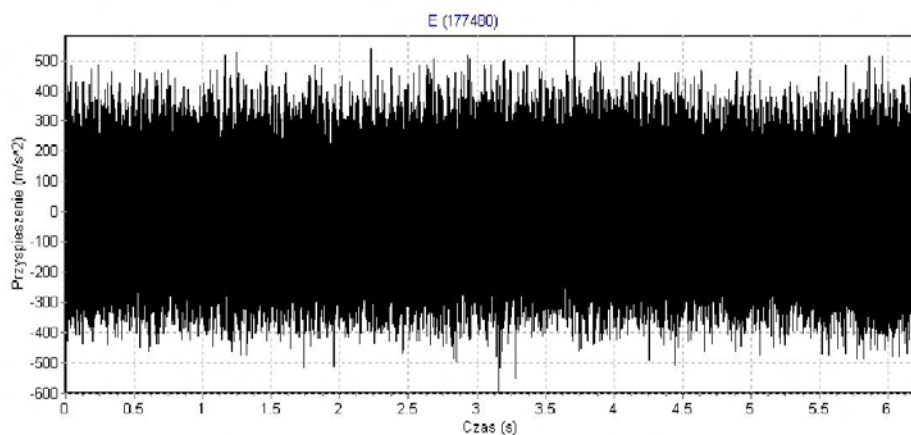
Rys. 5. Przyspieszenia drgań mierzone czujnikiem F w kierunku osi X podczas biegu jałowego



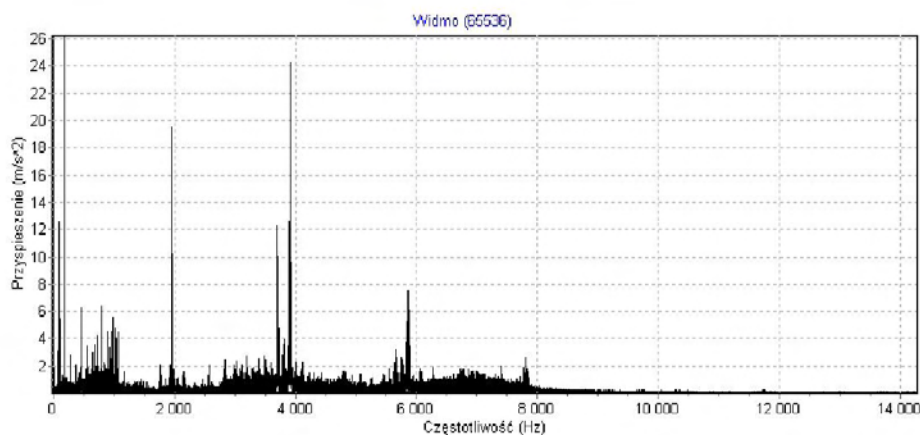
Rys. 6. Widmo sygnału mierzonego czujnikiem F w kierunku osi X podczas biegu jałowego

Tablica 3. Wartości wskaźników diagnostycznych sygnałów zarejestrowanych na PK-4 podczas manewru „przemieszczania w lewo”

czujniki E i F - przemieszczanie w lewo - n=103% (6196 obr/min), Mo=65-74%						
dyskryminanty	Ex_13	Ey_13	Ez_13	Fx_13	Fy_13	Fz_13
x(X)	1,24	-0,10	-2,15	-0,57	-0,75	0,17
xm(X)	58,58	71,89	115,91	64,97	38,12	83,52
sd(X)	73,08	88,94	143,57	82,63	47,97	102,92
zp(X)	440,20	441,20	601,30	440,10	441,10	442,10
pp(X)	740,00	797,10	1185,50	792,40	666,40	843,20
C(X)	6,02	4,96	4,19	5,33	9,19	4,30
rms(X)	73,09	88,94	143,58	82,64	47,98	102,92
mzp(X)	85,47	102,09	177,39	85,42	50,85	128,40
kurt(X)	-0,09	-0,23	-0,24	0,31	0,09	-0,30
E(X)	0,19	0,28	0,72	0,24	0,08	0,37
A(X)	-0,28	0,75	-0,06	1,19	-0,40	-0,19
FM0	1,74	1,11	1,07	2,37	5,89	1,23
FM4	3,04	3,11	3,15	3,23	3,10	3,17
M6A	15,87	18,22	17,24	17,47	17,66	17,58
M8A	128,62	249,16	137,02	129,89	234,40	144,91
NA4	3,02	3,11	3,05	3,22	3,11	3,09
NB4	2,71	2,72	2,75	2,36	3,33	2,77
FM4+	2,96	3,13	3,04	3,18	3,08	3,11
M6A+	14,35	18,05	15,66	16,93	17,10	16,62
M8A+	99,00	202,61	114,56	123,75	199,53	130,39



Rys. 7. Przyspieszenia drgań mierzone czujnikiem E w kierunku osi Z podczas przemieszczania w lewo



Rys. 8. Widmo sygnału mierzonego czujnikiem E w kierunku osi Z podczas przemieszczania w lewo

W kolejnych kolumnach, opisanych u góry nazwą czujnika i nazwą osi pomiarowej czujnika, podano wartości wskaźników diagnostycznych dla wszystkich kanałów pomiarowych.

W zestawieniach + wyniki obliczeń, których wartości przekraczają podawane, dla adekwatnych dyskryminant, w literaturze wartości dopuszczalne.

UWAGI KOŃCOWE

Podczas badań przekładni zamontowanej na śmigłowcu wartości niektórych wskaźników diagnostycznych, obliczanych w oparciu o momenty matematyczne wyższych rzędów, zostały bardzo mocno przekroczone w stosunku do ich wartości granicznych podawanych w literaturze. Przekroczenia te są największe, gdy przekładnia pracuje na „biegu jałowym” z prędkością 50% prędkości znamionowej a śmigłowiec utrzymuje kontakt z podłożem startowym. W widmach amplitudowo-częstotliwościowych nie występują wówczas składowe w paśmie powyżej 8 kHz.

W warunkach pracy przekładni na śmigłowcu, przy dużej dynamice obciążenia, konieczne jest stosowanie miar diagnostycznych cechujących się małą wrażliwością na zmiany warunków pracy przekładni.

Nierozpoznana jest dotychczas w pełni przydatność wielu miar do diagnozowania stanu przekładni pracujących na śmigłowcach. Do analiz zastosowano zatem aż 20 dyskryminant diagnostycznych. Są to miary punktowe wymiarowe, bezwymiarowe, jak i dyskryminanty bezwymiarowe oparte o momenty matematyczne wyższych rzędów. Ciągły charakter monitoringu obiektu wymusza, aby algorytmy analiz sygnałów charakteryzowały się krótkim czasem obliczeń.

Niezależnie od lokalizacji czujników na przekładni oraz orientacji ich osi, wartości dyskryminant opartych na momentach wyższych rzędów, osiągały zbliżone wartości.

Przeprowadzone dotychczas badania potwierdzają ogólną możliwość stosowania dyskryminant opartych na momentach matematycznych wyższych rzędów w diagnostyce i monitorowaniu stanu przekładni końcowej śmigłowca SW-4.

PIŚMIENNICTWO

1. Grabill P., Berry J., Grant L., Porter J.: Automated Helicopter Vibration Diagnostics for the US Army and National Guard. American Helicopter Society 57- th Annual Forum, Washington, DC, May 9-11, 2001.
2. Samuel P. D., Darryll J. Pines: A review of vibration-based techniques for helicopter transmission diagnostics. *Journal of Sound and Vibration* 282 (2005) 475–508.
3. Mosher M., Pryor A. H. and Huff E. M.: Evaluation of standard gear metrics in helicopter flight operation. Presented at 56th Mechanical failure Prevention Technology Conference, Virginia Beach, VA, April 15-19, 2002.
4. Decker H.J.: Crack Detection for Aerospace Quality Spur Gears. NASA/TM-2002-211492.
5. Wilk A., Bartelmus W.: Diagnostowanie przekładni zębatych. Monografia: Inżynieria diagnostyki maszyn. Pod red. Żółtowski B., Cempel Cz. Warszawa, Bydgoszcz, Radom, 2004.
6. “Wykorzystanie sygnału wibroakustycznego w analizie ryzyka technicznego”- pod red. Jacka Dybały, Jędrzeja Mączaka, Stanisława Radkowskiego. ITE, Warszawa- Radom, 2006.
7. Zielinski T. P.: Cyfrowe przetwarzanie sygnałów, WKiŁ Warszawa 2007.

THE ANALYSIS OF SELECTED DIAGNOSTIC DISCRIMINANTS VALUES IN THE CONTEXT OF APPLICATION TO ASSESS THE TECHNICAL STATE OF GEAR

Summary:

The article presents the results of research vibroacoustic image of helicopter PZL-SW4 final gear. This paper also describes the analysis of selected diagnostic discriminants values and their variation range during different flight conditions.

Keywords: gear, helicopter, vibroacoustic image, technical state.

Aneta Mager, Grzegorz Moryson ¹⁾
Andrzej Cellary, Lidia Marciniak ²⁾

ZASTOSOWANIE TECHNIK RAPID PROTOTYPING DO WYTWARZANIA WYROBÓW METALOWYCH

Streszczenie: W zakładach przetwórstwa metali wielokrotnie można spotkać się z zapytaniem klientów o możliwości produkcji jednostkowej wyrobów lub produkcji krótkiej serii. Jednym z rozwiązań tego typu problemu może być zastosowanie technik Rapid Prototyping do wytwarzania modeli odlewniczych. Analiza możliwości wykorzystania technik Rapid Prototyping do wykonania modeli odlewniczych w połączeniu z zastosowaniem odlewania precyzyjnego, a w szczególności najstarszej i najbardziej rozpoznanej metody wytapianych modeli, to zagadnienie, które podejmuje artykuł. Zakres badań dotyczył wykonania odlewów próbnych ze stopu cynku metodą wytapianych modeli z modeli wykonanych techniką Rapid Prototyping oraz ocenę jakości uzyskanego odlewu na podstawie badań chropowatości powierzchni.

Słowa kluczowe: odlewanie precyzyjne, Rapid Prototyping, jakość odlewów, chropowatość powierzchni.

TECHNOLOGIA SZYBKIEGO PROTOTYPOWANIA (RAPID PROTOTYPING)

Metody szybkiego wykonywania prototypów, w tym modeli i rdzennic, określone nazwą Rapid Prototyping rozwinęły się w końcu lat osiemdziesiątych XX wieku głównie w Stanach Zjednoczonych [1]. Szybkie i precyzyjne wytwarzanie jednostkowych wyrobów metodą przyrostową, polega na budowaniu wyrobu warstwa po warstwie z określonego materiału [2].

Modele o bardzo złożonym kształcie zewnętrznym i wewnętrznym mogą być wykonywane w bardzo krótkim czasie, zwykle w ciągu kilku godzin, a największym polem zastosowań tych modeli jest analiza rozwiązań konstrukcyjnych, montażu oraz badania funkcjonalne. Zastosowania te wymagają od prototypowanych modeli dużej dokładności odwzorowania cech geometrycznych, implikujących z kolei właściwości użytkowe prototypowanych części urządzeń.

Z uwagi na uniwersalność budowanych modeli w technice i medycynie najczęściej stosowane są następujące metody Rapid Prototyping: stereolitografia

¹ Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Materiałów, Zakład Odlewnictwa.

² Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Mechanicznej, Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych.

(SLA), Solid GroundCuring (SGC), Selective Laser Sintering (SLS), Fused Deposition Modeling (FDM) oraz Laminated Object Manufacturing (LOM).

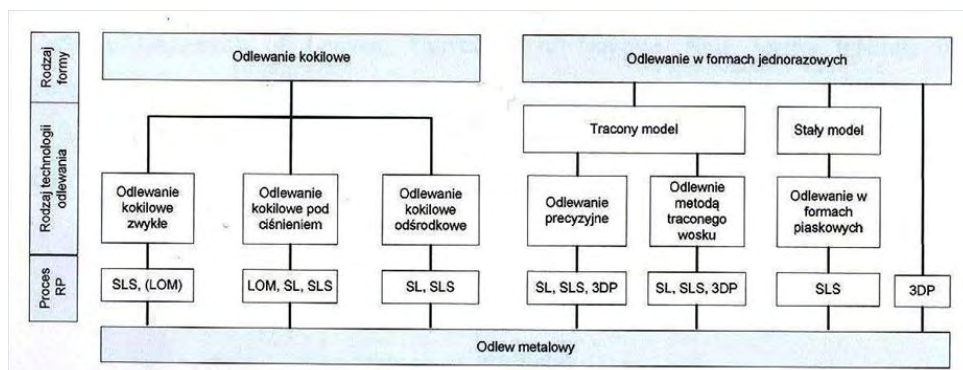
Ponadto zastosowanie znajdują także inne metody jak np. Direct Production Casting (DSPC) czy 3D Printing. Wymienione metody można podzielić na przystosowane do pracy w technice 2D lub 3D, z dodawaniem materiału w sposób punktowy (dyskretny lub ciągły), warstwowy lub powierzchniowy. W tabeli 1 zestawiono zasadnicze zalety i wady technik Rapid Prototyping.

Tabela 1. Główne zalety i wady technik Rapid Prototyping [3]

Table 1. Main advantages and disadvantages of rapid prototyping techniques [3]

ZALETY	WADY
<ul style="list-style-type: none"> – szybkie tworzenie fizycznych wzorców, – stosowane do części o złożonej geometrii (przede wszystkim dla zarysów wewnętrznych), – małe koszty wykonania w porównaniu z innymi metodami (frezowanie, toczenie itd.) przede wszystkim przy małej liczbie sztuk, – możliwość zastosowania różnych metod w obrębie całego łańcucha procesów (Rapid Engineering). 	<ul style="list-style-type: none"> – ograniczone wymiary budowanych obiektów, – ograniczona gama materiałów, – części spełniają wymagania mechaniczne tylko w ograniczonym zakresie, – ograniczona dokładność ($\pm 0,1$ mm), – jakość powierzchni uwarunkowana stosowaną techniką wykonania, – często konieczna jest dodatkowa obróbka wygładzająca powierzchnię elementu.

Techniki Rapid Prototyping są przydatne w tych gałęziach przemysłu, w których istnieje potrzeba tworzenia modeli fizycznych, a więc w: budowie prototypów, wytwarzaniu części i urządzeń, budowie modeli fizycznych, projektowaniu i wytwarzaniu narzędzi oraz projektowaniu i wytwarzaniu wzorców i modeli. Możliwości wykorzystania systemów Rapid Prototyping w odlewnictwie stopów metali przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Możliwości zastosowania systemów Rapid Prototyping w odlewnictwie metali [4]

Fig. 1. Possibility of using Rapid Prototyping systems in metal casting [4]

ODLEWANIE PRECYZYJNE ZA POMOCĄ METODY WYTAPIANYCH MODELI

Metoda wytapianych modeli jest najstarszą i najbardziej rozpowszechnioną metodą wykonania odlewów precyzyjnych wykorzystywaną do produkcji seryjnej odlewów ze wszystkich tworzyw odlewniczych, a zwłaszcza z materiałów trudnoobrabialnych i stopów żelaza. Wykonanie odlewów według tej metody polega na zastosowaniu modeli oraz form nadających się do jednorazowego użycia. Jednorazowe stosowanie modelu niedzielonego oraz niedzielonej formy odlewniczej to najbardziej charakterystyczne cechy tej metody formowania.

Przebieg procesu technologicznego metodą wytapianych modeli składa się z następujących operacji: wykonanie modelu, tworzenie zestawu modelowego, wytworzenie formy, wytopienie modeli i układu wlewowego, zalewanie formy ciekłym metalem oraz otrzymanie gotowego odlewu.

Na dokładność wymiarową odlewów wykonanych metodą wytapianych modeli wpływa: dokładność wykonania matrycy i jej stan podczas eksploatacji, zmiany wymiarowe matrycy, modeli oraz formy ceramicznej wskutek zmian temperatury, jak też skurcz odlewu. Odchyłki wymiarowe odlewów wykonanych metodą wytapianych modeli odpowiadają 11 i 12 klasie dokładności według ISO. Chropowatość surowej powierzchni odlewu w tej klasie chropowatości odpowiada powierzchni obrobionej skrawaniem - tocznej lub obrabianej wykańczająco, czyli 5 lub 6 klasie dokładności według PN. Średnia wysokość nierówności mieści się w przedziale $1 \div 10 \mu\text{m}$ [4].

Zastosowanie metody wytapianych modeli pozwala na:

- osiąganie największych dokładności wymiarowych i niskiej chropowatości odlewów spośród wszystkich znanych metod odlewania,
- zastępowanie w bardzo szerokim zakresie drogich odkuwek i kosztownej obróbki skrawaniem znacznie tańszymi odlewami,
- wykonywanie przedmiotów i części, których innymi metodami odlewania, ze względu na złożony kształt, w ogóle nie można otrzymać (np. frezy, wiertła, wirniki turbin itd.)
- wykonywanie przedmiotów i części maszyn o konstrukcji integralnej, które innymi metodami wytwarzania wykonywane są z wielu elementów łączonych w jedną całość.

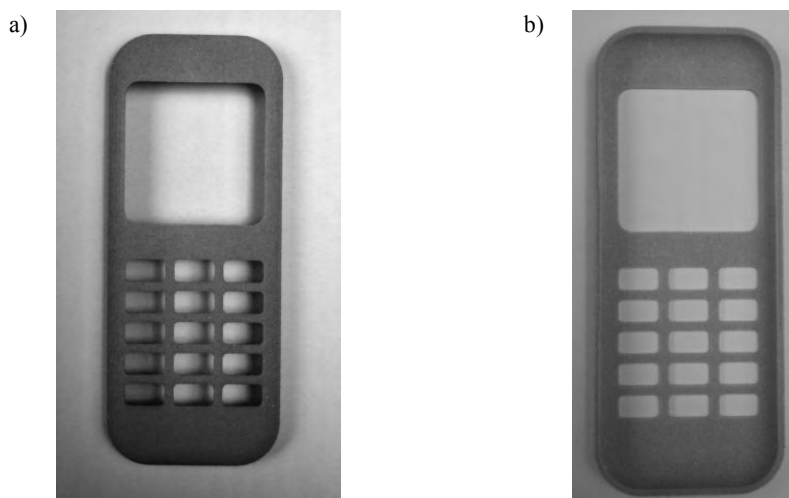
OPIS BADAŃ

Aby dokonać analizy możliwości zastosowania technik Rapid Prototyping do wytwarzania odlewów metodą wytapianych modeli postanowiono wykonać modele odlewnicze techniką 3DPrinting. Wykonanymi modelami była górna część obudowy do telefonu komórkowego wytworzona przez niemiecką firmę Voxjet w Fiedberg. Przydatność metody Rapid Prototyping do wytworzenia

modeli odlewniczych została określona na podstawie poziomu chropowatości powierzchni modelu i wykonanego odlewu.

Wykonanie modelu odlewniczego

Modele odlewnicze z polimetakrylanu metylu (rys. 2), wykonane zostały przez firmę FormTech Sp. z o. o. techniką 3DPrinting.



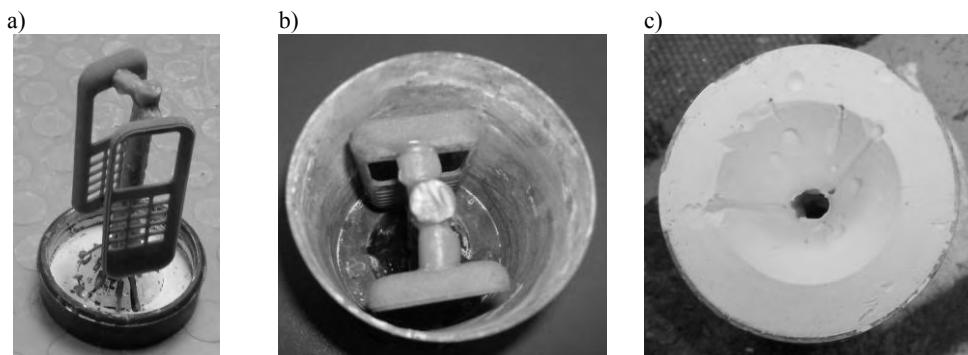
Rys. 2. Nieimpregnowany model obudowy do telefonu komórkowego wykonany metodą Rapid Prototyping: a) widok z góry, b) widok z dołu.

Fig. 2. Not impregnated model of the mobile phone produced with Rapid Prototyping: a) top view, b) bottom view.

Wykonanie formy

Ze względu na to, że modele odlewnicze wykonane metodą Rapid Prototyping charakteryzowały się dużą porowatością, a wykonane próby wykazywały dużą chłonność wody przez materiał modeli, nasycono je mieszkanką woskową firmy Kerr. Nasylenie dokonano przez zanurzenie modeli w roztopionym wosku i wygrzaniu ich w suszarce laboratoryjnej w temperaturze $70 \pm 5^\circ\text{C}$.

Przygotowanie zestawu modelowego (modele wraz z układem wlewowym) polegało na połączeniu modeli z woskowym modelem wlewu głównego w podstawie z gumy silikonowej, w której odwzorowany został zbiornik wlewowy. Na gotowy zestaw modelowy wraz z podstawką nałożona została tuleja ze stali kwasoodpornej o wymiarach: wysokość – 120mm, średnica – 75mm, którą wypełniono masą gipsową - mieszaniną odlewniczego gipsu formierskiego i wody demineralizowanej (rys. 3).



Rys. 3. a) modele połączone z układem wlewowym, b) gotowy zestaw modelowy wraz z tuleją, c) gotowa forma gipsowa.

Fig. 3. a) models combined with the infusion system, b) complete model set with a sleeve, c) complete gypsum mould

Proporcje udziałów odlewniczego gipsu formierskiego i wody demineralizowanej wynosiły 40ml na 100g gipsu. Przed wymieszaniem składników woda destylowana została odgazowana w urządzeniu próżniowym, a następnie odgazowano gotową masę ceramiczną.

Zalewanie formy

Zastosowanie metody wytapianych modeli do wykonania odlewów wymaga usunięcia modeli i modelu układu wlewowego bez rozkładania formy. Wykonaną formę gipsową umieszczono w suszarce laboratoryjnej na okres 2 godzin w temperaturze $120 \pm 2^\circ\text{C}$, a następnie formę umieszczono w piecu komorowym Nabertherm na okres 12 godzin. W tym czasie nastąpił proces zgazowania modeli i wyżarzanie formy. Cykl wyżarzania formy gipsowej przedstawia tabela 2.

Tabela 2. Cykl wyżarzania formy gipsowej [7]

Table 2. Plaster mould annealing cycle [7]

Czas wyżarzania [h]	Temperatura [$^\circ\text{C}$]
4 godziny	180°C – forma gipsowa wkładana do rozgrzanego pieca
4 godziny	Przyrost temperatury od 180°C do 720°C
3 godziny	720°C
1 godzina	Schłodzenie do $550 \pm 650^\circ\text{C}$ i przetrzymywanie do momentu odlewania

W końcowym etapie wyżarzania formy (okres chłodzenia formy) przygotowano ciekły metal (stop cynku ZnAl4Cu1). Przed wprowadzeniem metalu do formy temperatura stopu wynosiła 450°C . W celu prawidłowego wypełnienia formy wykorzystany został piec indukcyjny z wirówką zapewniającą odlewania pod ciśnieniem odśrodkowym (rys. 4). Rysunek 5 przedstawia wykonane odlewy.



Rys. 4. a) piec indukcyjny F. IliGiacetti w Zakładzie Odlewnictwa Politechniki Poznańskiej b) zamocowana tuleja na tygiel pieca indukcyjnego

Fig. 4. a) induction furnace F. IliGiacetti in the Department of Foundry, Poznan University of Technology b) attached sleeve on the crucible of the induction furnace



Rys. 5. Wykonane odlewy ze stopu cynku ZnAl4Cu1

Fig. 5. Casts made of zinc alloy ZnAl4Cu1

OCENA ZASTOSOWANIA TECHNOLOGII RAPID PROTOTYPING DO WYTWARZANIA ODLEWÓW METALOWYCH

Analizę metrologiczną wykonanych modeli oraz odlewów przeprowadzono na podstawie pomiarów na optycznym skanerze współrzędnościowym ATOS II firmy GOM oraz na profilometrze Perthometer S8P z głowicą FRW-750 firmy PERTHEN znajdujących się na wyposażeniu Zakładu Metrologii i Systemów Pomiarowych Politechniki Poznańskiej.

Ocenę odwzorowania wymiarów przeprowadzono na podstawie porównania modelu wykonanego w technologii Rapid Prototyping do odlewu. W tym celu przekształcono powierzchnie modelu oraz odlewu do postaci cyfrowej wykorzystując współrzędnościowy skaner optyczny ATOS II (rys. 6). Staranne skanowanie badanych powierzchni pozwoliło na zebranie chmury punktów reprezentującej mierzony element. Punkty te połączono odcinkami w celu uzyskania siatki trójkątów, co w rezultacie doprowadziło do uzyskania modelu powierzchniowego [5]. Porównano wymiary modelu RP z odlewem. Podczas projektowania modelu RP uwzględniono poprawkę wynikającą z liniowego skurczu odlewniczego stopu cynku, który wynosi 1,2%. Analiza wymiarów odlewu potwierdziła słuszność

zastosowania owego współczynnika korekcji, gdyż otrzymane wymiary odlewu odpowiadały założeniom konstrukcyjnym zawartym w dokumentacji technicznej wyrobu.



Rys. 6. Współrzędnościowy skaner optyczny Atos II [6]

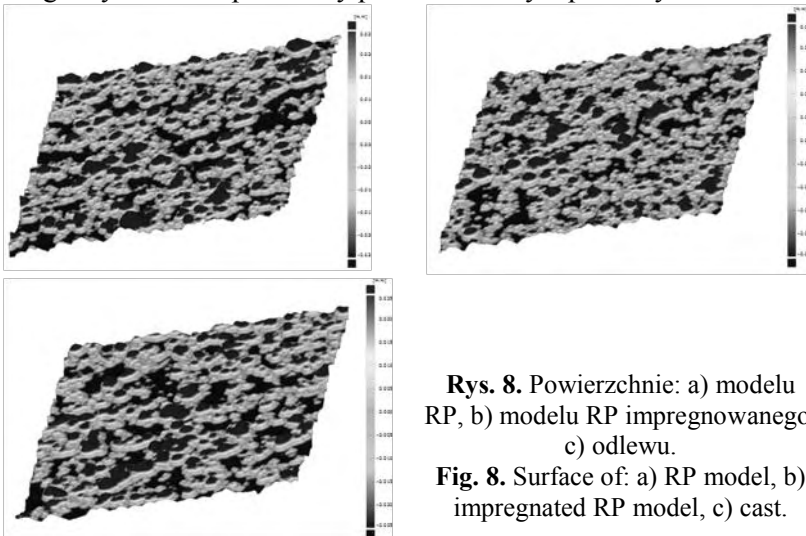
Fig. 6. Optical measuring scanner Atos II [6]



Rys. 7. Lokalizacja obszaru próbkowania powierzchni

Fig. 7. Sampling area on element surface

Porównano ponadto parametry powierzchni modelu RP, zaimpregnowanego modelu RP oraz odlewu. Pomiar powierzchni wykonano na profilometrze Perthometer S8P na obszarze próbkowania o wymiarach 2,4x2,5mm (rys. 7), zgodnym z normą ISO 4288, który odpowiada liczbie punktów w osi X – 247, w osi Y – 251. Promień zaokrąglenia igły wynosił 10 μ m. Elementem odniesienia, względem którego wyznaczano parametry powierzchni była płaszczyzna średnia.



Rys. 8. Powierzchnie: a) modelu RP, b) modelu RP impregnowanego, c) odlewu.

Fig. 8. Surface of: a) RP model, b) impregnated RP model, c) cast.

Na rys. 8 przedstawiono zmierzone powierzchnie. Wyznaczono następujące parametry 3D powierzchni [7]:

- Sa – średnie arytmetyczne odchylenie rzędnych powierzchni
- Sq – średnie kwadratowe odchylenie rzędnych powierzchni
- Sp – wysokość największego wzniesienia powierzchni
- Sv – głębokość najniższego wgłębienia powierzchni
- St – całkowita wysokość nierówności
- Ssk – współczynnik asymetrii powierzchni

Tabela 3. Wyznaczone parametry zmierzonych powierzchni

Table 3. Estimated parameters of measured surfaces

	model RP	model RP + impregnat	odlew
Sa	20,68 μ m	17,8 μ m	19,93 μ m
Sq	26,13 μ m	22,48 μ m	25,1 μ m
Sp	120,13 μ m	75,4 μ m	85,24 μ m
Sv	94,73 μ m	82,06 μ m	105,11 μ m
St	214,86 μ m	157,45 μ m	190,34 μ m
Ssk	0,02	0,02	-0,18

Wyznaczone charakterystyki badanych powierzchni różnią się nieznacznie. Jednakże model impregnowany ma widocznie zmniejszone nierówności powierzchni poprzez wprowadzenie impregnatu, który wypełnia wgłębienia zmniejszając ich rozmiar, co obrazuje różnica w wartościach parametru St. Natomiast średnie kwadratowe (Sq) oraz średnie arytmetyczne (Sa) odchylenie rzędnych powierzchni przyjmują wartości zbliżone dla wszystkich badanych elementów, asymetria rozkładu rzędnych powierzchni oscyluje wokół zera czyli rozkład rzędnych nie wykazuje asymetrii. Można zatem stwierdzić, że parametry powierzchni modelu RP w stopniu dobrym odwzorowane są na powierzchni odlewu.

PODSUMOWANIE

Technologia Rapid Prototyping znajduje coraz szersze zastosowanie w przemyśle. Wykorzystanie jej do przygotowania modeli odlewniczych umożliwia uzyskanie zarówno form o prostych jak i bardzo skomplikowanych kształtach. Modele RP stosowane w metodzie wytapianych modeli pozwalają na uzyskiwanie odlewów o dowolnie skomplikowanych kształtach. Analiza parametrów powierzchni modelu RP oraz odlewu wykazała, że technologia ta z powodzeniem może być stosowana.

PIŚMIENNICTWO

1. Ocoś K. E: Rapid Prototyping w procesach odlewniczych. Cz. I i II. Prace Instytutu Odlewnictwa, Kraków, 1997.

2. Karwiński A., Pysz S.: Techniki szybkiego prototypowania w odlewnictwie. Sprawy Nauki, 2008/8-9 (134).
3. Chlebus E.: Innowacyjne technologie rapidprototyping- rapidtooling w rozwoju produktu. Wrocław, Oficyna Wykładowa politechniki Wrocławskiej, 2003.
4. Szreniawski J.: Techniki wytwarzania. Odlewnictwo. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1980.
5. Oczóś K. E., Cena I.: RAPID INSPECTION – metody pomiarowo-kontrolne adekwatne do rapid-technologii. „Mechanik” 3/2008 pp. 165 – 176.
6. Strona internetowa: www.gom.com
7. Oczóś K. E., Liubimov V.: Rozważania nad istotnością parametrów struktury geometrycznej powierzchni w układzie 3D. „Mechanik” 3/2008 pp. 129 – 136.

THE USE OF RAPID PROTOTYPING TECHNIQUES TO THE PRODUCTION OF METAL PARTS

Summary

The metal-processing plant often meet costumers asking about the possibility of one piece production or manufacture of a short series. One of the solution is to apply rapid prototyping techniques to produce cast models. The aim of this paper is to present opportunity of implementation cast models produced with Rapid Prototyping in precision casting. Research concerns the implementation of test castings from zinc alloy melted by models with models made with Rapid Prototyping technique and the quality of the casting obtained on the basis of surface roughness.

Keywords: precision casting, Rapid Prototyping, .casting quality, surface roughness.

Jerzy Józwik¹⁾

MODELOWANIE UGIĘĆ SPRĘŻYSTYCH PRZEDMIOTÓW OBRABIANYCH W PROCESIE SKRAWANIA TOCZENIEM

Streszczenie: W pracy zaprezentowano uproszczony proces modelowania odkształceń sprężystych wałów dla typowych przypadków zamocowania na obrabiarce. Analizie poddano trzy sposoby zamocowania przedmiotu obrabianego na obrabiarce: w szczękach uchwytu tokarskiego, w szczękach uchwytu z podparciem kłem konika oraz zamocowanie przedmiotu w kłach. Wyznaczono równania, na podstawie tych równań w prosty i szybki sposób możliwa jest predykcja wartości ugięcia sprężystego wału przy zadanym sposobie zamocowania na obrabiarce.

Słowa kluczowe: modelowanie, odkształcenia sprężyste, błędy obróbki, proces skrawania, toczenie.

WSTĘP

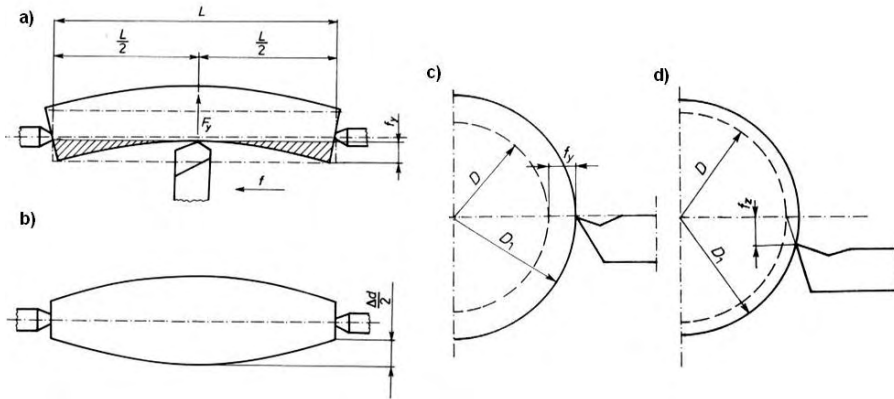
Dążenie do osiągnięcia wysokiej dokładności obróbki towarzyszy technologii ubytkowego kształtowania materiałów od początków powstania pierwszych obrabiarek [1, 8]. Minimalizowanie błędów wykonania przedmiotu obrabianego od dawna zajmowało umysły naukowców, wynalazców i badaczy. Obecnie, postęp jaki jest obserwowany w poznawaniu wzajemnym oddziaływań pomiędzy narzędziem skrawającym, konstrukcją obrabiarki, techniką napędu i techniką sterowania, przekłada się bezpośrednio na wyraźny rozwój i rozszerzanie zakresu oraz efektywności sposobów obróbki ubytkowej [8]. Z analizy literatury wynika jednoznacznie, że wiele problemów pozostaje nie rozwiązanych (np. związanych z cieplnymi i sprężystymi odkształceniami przedmiotów podczas obróbki) [2-7, 9, 10]. Choć postęp w dziedzinie oprzyrządowania stanowiska pracy, sterowania obrabiarek oraz monitorowania przyniósł już wymierne korzyści, nie rozwiązał on jednak w pełni problemu występowania znacznych błędów obróbki [8].

MODELOWANIE UGIĘĆ SPRĘŻYSTYCH WAŁKA

W świetle dynamicznie rozwijających się technologii wytwarzania, oczekiwania dotyczące dokładności wymiarowo-kształtowej przedmiotów obrabianych przez

¹ Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji.

skrawanie również ciągle wzrastają [8]. Odształcenia przedmiotu obrabianego jakie zachodzą podczas procesu skrawania - zarówno w skali makro jak również mikro, zależą od położenia narzędzia wzdłuż jego osi, sił skrawania, parametrów technologicznych obróbki, ilości generowanego ciepła oraz parametrów geometrycznych narzędzia i samego obrabianego elementu [2, 6, 7]. Na rys. 1a i b zaprezentowano wpływ ugięcia sprężystego przedmiotu obrabianego PO - wskutek oddziaływań siłowych w układzie PO-N (przedmiot obrabiany – narzędzie), na końcowy kształt i wymiary gotowej części [1]. Mała sztywność przedmiotu obrabianego oraz duże wartości siły skrawania są przyczyną znacznych, sprężystych odkształceń PO podczas obróbki [2-7,9,10]. Podatność narzędzi skrawających w tym również niepewne ich mocowanie powodują odkształcenia, skutkiem których są błędy wykonania przedmiotów obrabianych (rys. 1c i d). Podatność układu PO-N powoduje przesunięcia narzędzia i przedmiotu obrabianego. W konsekwencji doprowadzają one do zwiększania wartości błędu wykonania części [1].



Rys. 1. Wpływ ugięcia sprężystego na końcowy kształt i wymiary przedmiotu obrabianego: a) wpływ ugięcia sprężystego przedmiotu obrabianego PO, b) błąd kształtu przedmiotu obrabianego, c) wpływ poziomego przemieszczenia sprężystego narzędzia na wartość średnicy obrabianego wałka, d) wpływ pionowego przemieszczenia sprężystego narzędzia na wartość średnicy obrabianego wałka [1]

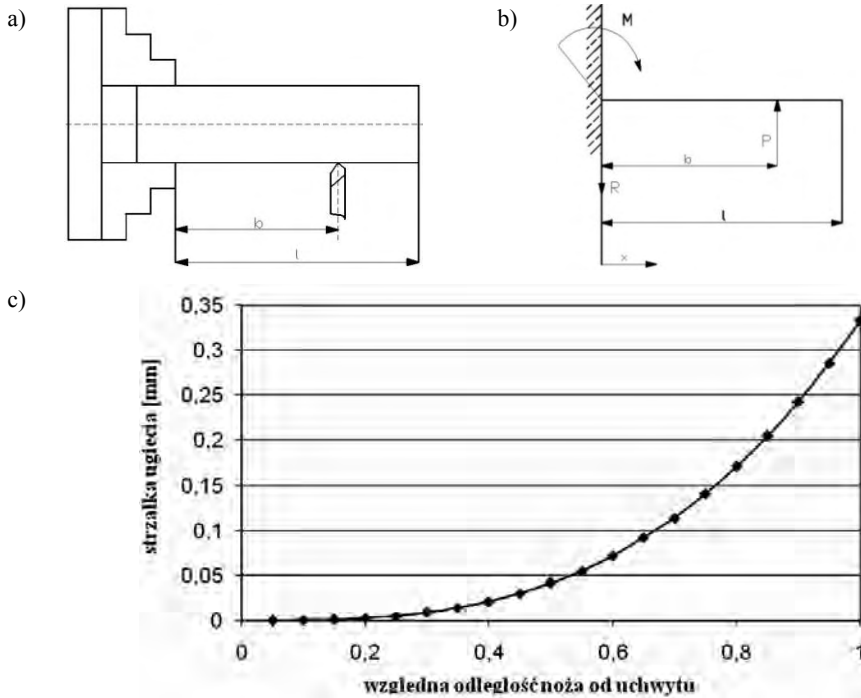
Na rys. 1c przedstawiono wpływ poziomego przemieszczenia sprężystego narzędzia na wartość średnicy przedmiotu obrabianego, zaś rys. 1d wpływ pionowego ugięcia noża na przyrost średnicy toczzonego wałka [1]. W zależności od geometrii obrabianego elementu oraz specyfiki oddziaływań siłowych, wartość powstających odkształceń może kształtować się na wysokim poziomie. Aby móc skutecznie przeciwdziałać powstającym odkształceniom i minimalizować błędy obróbki niezbędne jest poznanie natury związków pomiędzy oddziaływaniami zewnętrznymi i wewnętrznymi procesu skrawania a powstającymi błędami obróbki. Duże nadzieje pokłada się w modelowaniu procesu skrawania oraz zjawisk fizykochemicznych im towarzyszących. Modele umożliwiają wyprzedzające przewidywanie wyników uzyskiwanych podczas procesu skrawania [1-7]. Znane

z literatury modele procesu skrawania różnią się między sobą przyjmowanymi założeniami, sposobami rozumowania jak również dysponowanym narzędziem modelowania (aparatury matematyczny [4], FEM – Finite Element Method [9, 10], BEM – Boundary Element Method, DFM Difference Finite Method [7], ANN Artificial Neural Network [2, 3, 5]). Intensywne prace w obszarze modelowania odkształceń przedmiotu obrabianego podczas skrawania prowadzone są między innymi przez zespół naukowy: Kops L., Gould M., Mizrach M. [4]. Efektem tych prac jest model analityczny ugięć podczas toczenia przedmiotu obrabianego pod wpływem składowej promieniowej siły skrawania. Interesujące wyniki modelowania ugięć sprężystych przedmiotów obrabianych w procesie skrawania toczeniem osiągnięto stosując metodę elementów skończonych. Zaprezentowano je w pracach zespołu Phan A. V., Cloutier G. i Mayer J.R.R. [9, 10]. Niezwykle istotne wyniki modelowania odkształceń przedmiotu obrabianego podczas toczenia przedstawiają naukowcy z uniwersytetu w Kowloon z Hong Kongu oraz Politechniki w Kijowie. Li X., Venuvinod P. K., Djorjevich A. i Liu Z. [5] jako narzędzie numeryczne wykorzystują adaptacyjne, oparte na sztucznych sieciach neuronowych i logice rozmytej systemy wnioskowania prognostycznego (ANFIS - Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System).

Jednak, jak podaje raport: „Modelling of Machining Operations” (sporządzony przez: Luttervelt, C.A.; Childs, T.H.C.; Jawahir, I.S. ; Klocke, F.; Venuvinod, P.K. [8]), dotychczasowe modele nie dostarczają jeszcze w pełni godnych zaufania – uniwersalnych informacji o modelowanym procesie. Publikowany w kilku językach raport donosi, że istnieje deficyt użytecznych modeli zbudowanych w oparciu o sztuczne sieci neuronowe (ANN), logikę zbiorów rozmytych (Fuzzy logic) oraz metody hybrydowe (Neuro-fuzzy).

Modelowanie ugięć sprężystych wałka zamocowanego w szczękach uchwytu tokarskiego

W praktyce inżynierskiej dostępnych jest wiele narzędzi numerycznych wspomagających proces modelowania. W niniejszej pracy przedstawiono matematyczny zapis prostych modeli umożliwiających predykcję odkształceń sprężystych wałka na podstawie informacji o rodzaju materiału obrabianego, jego geometrii i siłowych oddziaływaniach podczas skrawania. Na rys. 2 przedstawiono zamocowanie przedmiotu obrabianego w uchwycie tokarskim trzyszczekowym oraz położenie b składowej promieniowej siły skrawania $F_r=P$ względem szczęk uchwytu. Dla uproszczenia przyjęto, że zmiana przekroju poprzecznego obrabianego wałka jest na tyle niewielka, że nie wpływa w sposób istotny na jego sztywność (średnica przedmiotu obrabianego przed i po obróbce jest taka sama). Założono, że na przedmiot obrabiany działa jedynie jedna składowa wypadkowej siły skrawania prostopadła do jego osi - składowa promieniowa ($F_r=P$). W pracy pominięto zmienną sztywność uchwytu, obrabiarki i narzędzia. Założono, że te elementy systemu obróbkowego pozostają nieodkształcalne.



Rys. 2. Zamocowanie przedmiotu w uchwycie tokarskim trzyszczekowym, a) widok ogólny, b) model geometryczny do obliczeń, c) wyniki obliczeń numerycznych strzałki ugięcia wału

Mocowanie przedmiotu w uchwycie trzyszczekowym zamodelowano jako belkę zamocowaną w ścianie. Na rys. 2b przedstawiono uproszczony model zamocowania przedmiotu wraz z siłami zewnętrznymi i reakcjami podpory. Wyznaczając rozwiązania układów równań równowagi dla belki po wyznaczeniu kąta ugięcia i strzałki ugięcia (stosując metodę Clebscha) oraz stałych całkowania (korzystając z warunków brzegowych – kąt ugięcia i strzałka ugięcia w ścianie wynoszą zero) ostateczną postać równania dla rozważanego przypadku zamocowania (w punkcie przyłożenia siły $x=b$) można przedstawić równaniem (1):

$$f = \frac{1}{3} \cdot \frac{P \cdot b^3}{E \cdot J_z} \quad (1)$$

gdzie: P – składowa promieniowa siły skrawania, b – bieżąca odległość składowej promieniowej siły skrawania od powierzchni czołowej szczęk uchwytu tokarskiego, E – moduł Younga, J_z – moment bezwładności.

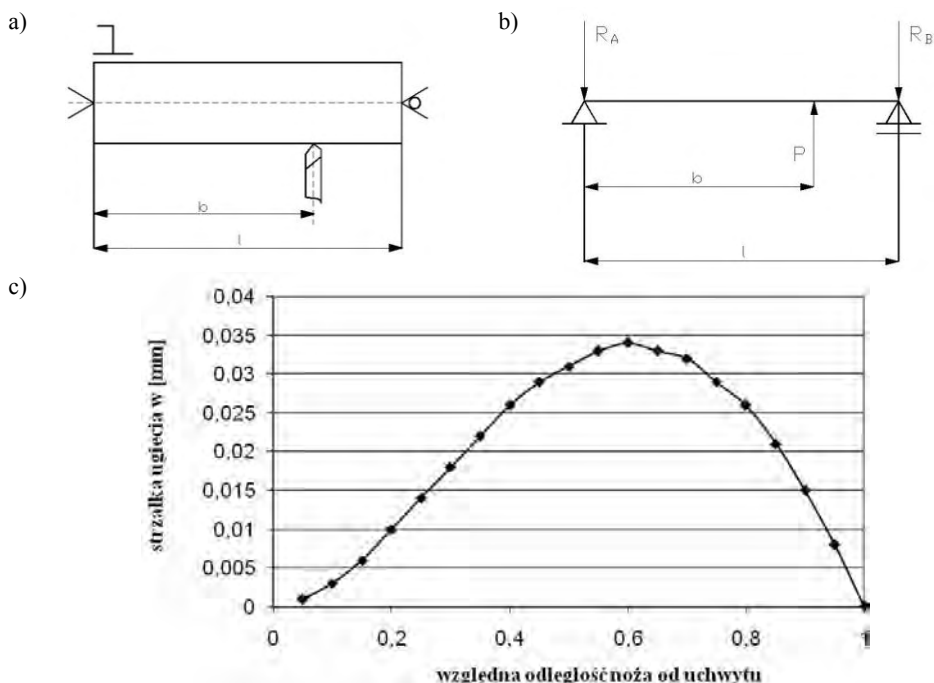
Uwzględniając względną odległość położenia narzędzia od powierzchni czołowej szczęk uchwytu b/l (w stosunku do całkowitej długości wysięgu przedmiotu obrabianego l z uchwytu) otrzymano wyniki ugięć sprężystych f . Wyniki obli-

czeń numerycznych zobrazowano na rys. 2c. Z przedstawionej charakterystyki wynika, że wartość ugięcia sprężystego dla zamocowania w szczękach uchwytu tokarskiego wzrasta w kierunku swobodnego końca przedmiotu obrabianego do poziomu 0,34mm.

Znajomość krzywej ugięcia dla tak przyjętego modelu geometrycznego (rys. 2b) oraz możliwość kompensacji on-line ugięcia sprężystego spowoduje poprawę dokładności wymiarowo-kształtowej obrabianych części.

Modelowanie ugięć sprężystych wałka zamocowanego w kłach

Na rys. 3a przedstawiono model geometryczny zamocowania przedmiotu obrabianego w kłach oraz położenie narzędzia skrawającego względem kła stałego b . Moment obrotowy przekazywany jest przez zabierak. Podobnie jak w rozdz. 2.1, również w tym przypadku, dla uproszczenia rozważań założono, że przedmiot przed i po obróbce ma taki sam przekrój poprzeczny. Rys. 3b przedstawia uproszczony model zamocowania przedmiotu w kłach wraz z siłami zewnętrznymi i reakcjami podpór. Kieł stały został przedstawiony jako podpora stała a kieł obrotowy, jako podpora ruchoma.



Rys. 3. Zamocowanie przedmiotu w kłach, a) widok ogólny, b) model geometryczny do obliczeń, c) wyniki obliczeń numerycznych strzałki ugięcia wału

Wyznaczając rozwiązania układów równań równowagi dla belki po wyznaczeniu kąta ugięcia i strzałki ugięcia (stosując metodę Clebscha) oraz stałych całkowania (korzystając z warunków brzegowych – strzałki ugięcia w na końcach belki wynoszą zero) ostateczną postać równania dla rozważanego przypadku zamocowania (w punkcie przyłożenia siły $x=b$) przedstawiono wzorem (2):

$$f = \frac{Pb^2}{EJ_z} \left(\frac{b}{6l} - \frac{b}{2} + \frac{l}{3} \right) \quad (2)$$

gdzie: P - składowa promieniowa siły skrawania, b – bieżąca odległość składowej promieniowej siły skrawania od powierzchni czołowej wałka, l – długość całkowita wałka, E – moduł Younga, J_z – moment bezwładności.

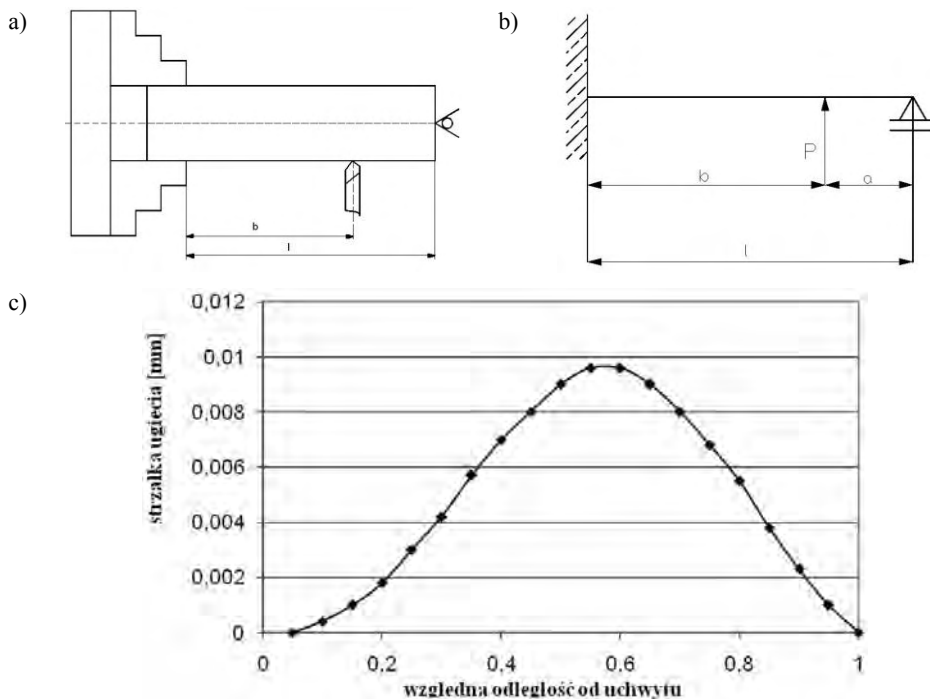
Modelowanie ugięć sprężystych wałka zamocowanego w szczękach uchwytu tokarskiego z podparciem kłem

Na rys. 4 przedstawiono w sposób graficzny zamocowanie przedmiotu w uchwycie trzyszczekowym z podparciem kłem obrotowym konika tokarskiego. W budowanym modelu pominięto zmianę przekroju poprzecznego przedmiotu obrabianego. Mocowanie przedmiotu w uchwycie i w kłach, zamodelowano jako belkę zamocowaną w ścianie i podparto podporą ruchomą. Uchwyt trzyszczekowym został przedstawiony jako ściana, zaś kiel obrotowy - jako podpora ruchoma. Układ ten jest statycznie niewyznaczalny. Aby go wyznaczyć, zastosowano metodę Maxwella-Mohra, która oparta jest na całce Wereszczagina. Zamiast reakcji w podporze ruchomej wprowadzono siłę czynną, którą wyliczono metodą Maxwella-Mohra. Wyznaczając rozwiązania układów równań równowagi dla belki, po wyznaczeniu kąta ugięcia i strzałki ugięcia oraz stałych całkowania (korzystając z warunków brzegowych - kąt ugięcia i strzałka ugięcia w ścianie wynoszą 0), ostateczna postać równania dla rozważanego przypadku zamocowania (w punkcie przyłożenia siły $x=b$) wyrażono wzorem (3):

$$f = \frac{Pb^3}{2EJ_z} \left[\left(1 - \frac{3\left(\frac{b}{l}\right) - \left(\frac{b}{l}\right)^2}{2} \right) - \left(\frac{1 - \frac{3\left(\frac{b}{l}\right)^2 - \left(\frac{b}{l}\right)^3}{2}}{3} \right) \right] \quad (3)$$

gdzie: P - składowa promieniowa siły skrawania, b – bieżąca odległość składowej promieniowej siły skrawania od powierzchni czołowej wałka, l – długość całkowita wałka, E – moduł Younga, J_z – moment bezwładności.

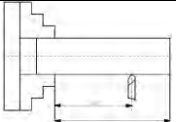
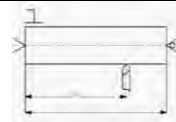
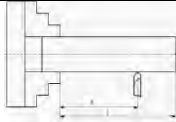
W tabeli 1 zaprezentowano wyniki obliczeń numerycznych na podstawie zbudowanych modeli (1), (2), (3). Z przeprowadzonej analizy porównawczej strzałki ugięcia (dla trzech różnych sposobów zamocowania) wynika, że najbardziej niekorzystnym przypadkiem zamocowania przedmiotu obrabianego podczas obróbki jest zamocowanie w uchwycie bez podparcia kłem. Ugięcie swobodnego końca obrabianego elementu jest na tyle duże, że ten sposób zamocowania może być jedynie stosowany dla małej wartości wysięgu przedmiotu z uchwytu ($b/l < 0,3$ wówczas $f < 0,009\text{mm}$).



Rys. 4. Zamocowanie przedmiotu w uchwycie tokarskim trójszczekowym z podparciem kłem, a) widok ogólny, b) model geometryczny do obliczeń, c) wyniki obliczeń numerycznych strzałki ugięcia wału.

Drugim co do wartości ugięcia sprężystego jest zamocowanie przedmiotu w kłach. Ten sposób zamocowania implikuje o rząd wielkości mniejsze wartości maksymalne ugięcie sprężystego przedmiotu obrabianego, wskutek działania składowe promieniowej siły skrawania. Nie mniej jednak wartości te są trzykrotnie wyższe w stosunku do zamocowania w szczękach uchwytu z podparciem kłem obrotowym. Z przeprowadzonej symulacji numerycznej na podstawie modelu opisanego równaniem (3) wynika, że maksymalna wartość ugięcia sprężystego wynosi 0,009 mm.

Tabela 1. Wyniki obliczeń numerycznych na podstawie zbudowanych modeli

Względna odległość noża tokarskiego od uchwytu b/l	Strzałka ugięcia przedmiotu w punkcie przyłożenia siły $x=b$		
			
0,05	0,0001	0,001	0
0,1	0,0004	0,003	0,001
0,15	0,001	0,006	0,002
0,2	0,003	0,01	0,003
0,25	0,005	0,014	0,004
0,3	0,009	0,018	0,005
0,35	0,014	0,022	0,006
0,4	0,021	0,026	0,007
0,45	0,030	0,029	0,008
0,5	0,042	0,031	0,009
0,55	0,055	0,033	0,010
0,6	0,072	0,034	0,010
0,65	0,092	0,033	0,009
0,7	0,114	0,032	0,008
0,75	0,141	0,029	0,007
0,8	0,171	0,026	0,005
0,85	0,205	0,021	0,004
0,9	0,243	0,015	0,002
0,95	0,260	0,008	0,001
1	0,333	0,000	0,000

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Efektorem przeprowadzonych analiz są modele ugięć sprężystych przedmiotu obrabianego w procesie skrawania toczeniem pod wpływem składowej promieniowej siły skrawania, przy zadanym sposobie zamocowania. Zbudowane modele umożliwiają wyprzedzające przewidywanie wyników ugięć sprężystych przedmiotu obrabianego podczas obróbki. W pracy założono, że elementy systemu obróbkowego takie jak uchwyt, obrabiarka, narzędzie pozostają nieodkształcalne. W rzeczywistości jednak odkształca się cały układ OUPN. Odkształcenia sumują się a ostateczny błąd gotowego wyrobu jest składową wszystkich czynników mających wpływ na ugięcie sprężyste podczas obróbki.

PIŚMIENNICTWO

1. Feld M.: Technologia Budowy Maszyn. PWN. Warszawa 2000.
2. Józwiak J., Flisiak J., Lipski J.: Numeryczna ocena odkształceń sprężystych przedmiotów cienkościennych kształtowanych w procesie skrawania toczeniem. Scientific Bulletins of Rzeszów University of Technology No 209, Mechanics 62. 2004.

3. Jóźwik J., Lipski J.: Application of neural network to modeling of workpiece deformations during turning process. *Maintenance and Reliability*, nr 4 /2002.
4. Kops L., Gould M., Mizrach M.: A search for equilibrium between workpiece deflection and depth of cut: key to predictive compensation for deflection in turning, 2, *Manuf. Sci. Eng., ASME PED*, 68 (2) 1994, 819-825.
5. Li X., Venuvinod P. K., Djorjevich A., Liu Z.: Predicting Machining Errors in Turning Using Hybrid Learning. *Int J Adv Manuf Technol.* 18 (2001), 863–872.
6. Li X.: Real -Time Prediction of Workpiece Errors for a CNC Turning Centre, Part 4. Cutting-Force-Induced Errors. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 17 (2001), 665–669.
7. Liu Z. Q.: Finite difference calculations of the deformations of multi-diameter workpieces during turning. *Journal of Materials Processing Technology.* 98 (2000), 310-316.
8. Luttermelt C. A., Childs T. H. C., Klocke F., Venuvinod P. K.: Present situation and future trends in modelling of machining operations. Progress Report of the CIRP working group „Modelling of Machining Operations”. *Annals of the CIRP*, 47 (2), 1998, 587–626.
9. Mayer J.R.R., Phan A.V., Cloutier G.: Prediction of diameter errors in bar turning: a computationally effective model. *Applied Mathematical Modeling* 24 (2000), 943-956.
10. Phan A.V., Cloutier G., Mayer J.R.R.: A finite element model for predicting tapered workpiece deflections in turning, *Computer Modeling and Simulation in Engineering*, 4 (1999), 138-142.
11. Phan A.V., Cloutier G., Mayer J.R.R.: A finite element model with closed-form solutions to workpiece deflections in turning. *International Journal of Production Research* , vol. 37, no. 17 (1999), 4039-4051.
12. Shiraishi M.: In-process control of workpiece dimension in turning. *Annals of the CIRP.* 28 (1), 1979, 333-337.

MODELING OF WORKPIECES DEFLECTIONS IN TURNING PROCESS

Summary:

This work presents the results of workpiece deflection modeling for typical cases of mounting to the machine. Three ways to mount the workpiece on the machine was analyzed: in the chuck jaws, in the jaws grip with support and a tailstock retaining claw. Mathematical equations were determined. On the basis of these equations in a simple and fast way it is possible prediction of workpiece deflection values for typical cases of mounting to the machine.

Keywords: modeling, workpiece deflection, machining errors, cutting process, turning.

Tomasz Klepka ¹⁾, Przemysław Zgierski ²⁾

CHARAKTERYSTYKA METOD WTRYSKIWANIA DO ZASTOSOWAŃ MEDYCZNYCH

Streszczenie: W artykule przedstawiono charakterystykę i możliwości wykorzystania metody przetwórstwa tworzyw polimerowych do zastosowań medycznych. Dokonano porównań różnych sposobów uplastyczniania na przykładzie wtryskiwania, ilustrując wady i zalety każdego z nich. Przedstawiono wpływ rodzaju materiału formy wtryskowej na jakość wypraski oraz przykłady maszyn przetwórczych do wytwarzania wyprasek stosowanych w protetyce.

Słowa kluczowe: przetwórstwo tworzyw sztucznych, wtryskiwanie, układ uplastyczniający, medycyna.

WSTĘP

Wtryskiwanie należy do najstarszych metod wytwarzania wytworów z tworzyw polimerowych. Jest to proces polegający na cyklicznym uplastycznianiu tworzywa w układzie uplastyczniającym, przeprowadzaniu tworzywa w stan ciekły i następnie wtryskiwaniu go do zamkniętego gniazda formy wtryskowej. W formie następuje zestalenia lub utwardzenia tworzywa, a ostateczny kształt wypraska otrzymuje po wyjęciu z gniazda [1, 2]. Wytwarzanie wytworów z tworzyw polimerowych metodą wtryskiwania ma obecnie największe znaczenie m.in. ze względu na to, iż metoda ta jest najbardziej poznana teoretycznie i umożliwia wytwarzanie przedmiotów o różnych kształtach i wymiarach, niekiedy niemożliwych do otrzymania innymi sposobami.

Istnieje wiele metod uplastycznienia tworzywa polimerowego. Konstrukcje układów uplastyczniających są ciągle udoskonalane. Ogólnie możemy podzielić je ze względu na sposób uplastycznienia tworzywa. Przyjmując taką klasyfikację wyróżnia się układy uplastyczniające tłokowe, układy uplastyczniające ślimakowe oraz układy uplastyczniające hybrydowe (mieszane) [1].

Metodą wtryskiwania konwencjonalnego wykorzystującego ślimakowy układ uplastyczniający wytwarza się części, od których wymaga się powtarzalności kształtów i wymiarów, między innymi korpusów przyrządów do przetaczania krwi, podawania leków, strzykawek, łączników do przewodów doprowadzających płyny itp. Natomiast układy uplastyczniające tłokowe stosuje się do wtryskiwania wyprasek w małych seriach lub wytworów prototypowych, czyli takich, które

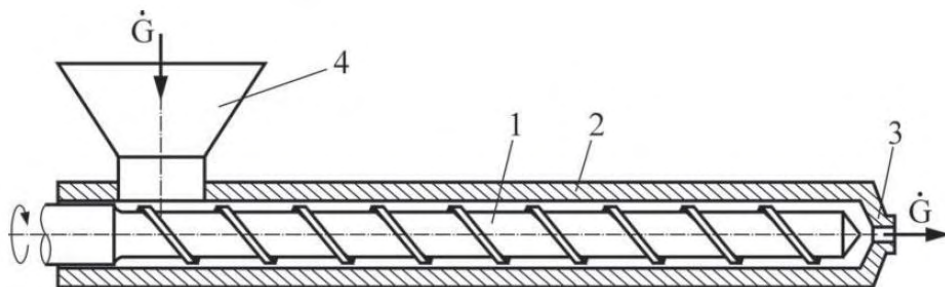
¹ Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Procesów Polimerowych.

² Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Studenckie Koło Naukowe Procesów Polimerowych.

każdorazowo wymagają wykonania nowej formy. Do tego typu wytworów należą na przykład protezy stomatologiczne oraz drobne elementy o niestandardowych wymiarach do zastosowań medycznych.

UKŁADY UPLASTYCZNIAJĄCE WTRYSKAREK

Najczęściej stosowanym sposobem uplastyczniania jest układ z obracającym się ślimakiem. Jest on stosowany do wytworów o objętości powyżej 20cm³. Tworzywo w układzie jest uplastyczniane przy pomocy obracającego się w walcowym cylindrze ślimaka. Faza wtrysku odbywa się w wyniku przesuwu ślimaka wzdłuż jego osi przez siłownik hydrauliczny.



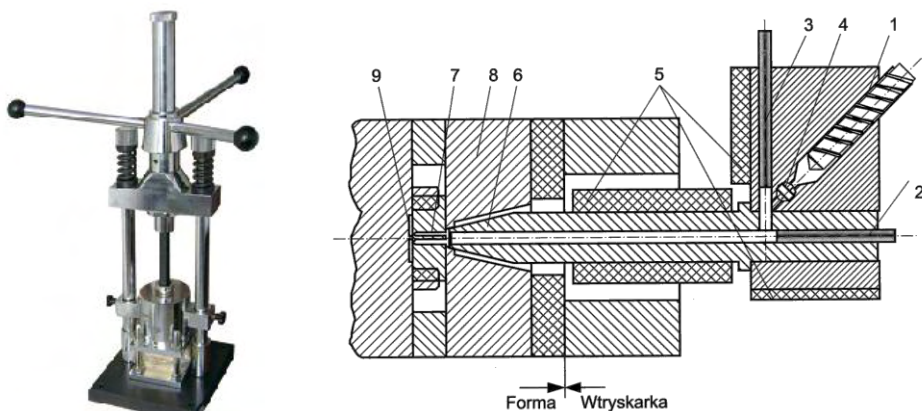
Rys. 1. Schemat układu uplastyczniającego jednośliskowego: 1 - ślimak, 2 - cylinder, 3 - korpus dyszy, 4 - zasobnik tworzywa, \dot{G} - masowe natężenie przepływu tworzywa przez układ uplastyczniający [1]

Konstrukcja ślimaka pozwala na dobrą homogenizację tworzywa, wymieszanie i uplastycznienie w cylindrze, jak również zapobiega cofaniu się tworzywa wzdłuż zwojów podczas fazy wtrysku i docisku.

Kolejnym rozwiązaniem jest układ tłokowy, który charakteryzuje się tym, że tworzywo jest nagrzewane i uplastyczniane, a następnie sprężane w cylindrze pomiędzy czołem wewnętrznego tłoka a rozdzielaczem. Sterowanie ruchami tłoka wtryskowego oraz wartości ciśnienia są realizowane przy pomocy układów sterowania, pozwalających także na bardzo dokładne dozowanie wymaganej ilości tworzywa. W zaawansowanych konstrukcyjnie maszynach instaluje się dodatkowe czujniki i podzespoły sterujące, co pozwala na dokładne ustalenie warunków prowadzenia procesu przetwórstwa.

Dzięki tym udoskonaleniom tłokowy układ uplastyczniający przy zastosowaniu zintegrowanego systemu sterowania, pozwala na wytwarzanie wytworów o zadawalających właściwościach. Tłokowy układ wtryskarki może działać w układzie pionowym (rys. 2) lub poziomym (rys. 6). Po wypełnieniu cylindra wtryskowego tworzywo jest poddawane nagrzewaniu oraz uplastycznieniu. Tłok naciskając na tworzywo w cylindrze zagęszcza je oraz spręża. Pod wpływem nacisku cały zespół cylindra wraz z płytą przesuwają się po prowadnicach kolumno-

wych, a przez otwór wykonany w płycie stykającej się z korpusem formy tworzywo zostaje wtrysnięte do gniazda formującego. Przed otwarciem formy i wyjęciem z niej wypraski, siłownik hydrauliczny za pośrednictwem zespołu cięgien oraz ruchomych płyt przesuwają tłok wtryskowy w kierunku od zespołu cylindra. W tym czasie zwolniony zostaje nacisk tłoka wtryskowego na zespół cylindra, który pod wpływem sprężyn powrotnych odsunięty zostaje od formy. Po uzupełnieniu tworzywa wtryskarka jest gotowa do wykonania kolejnego cyklu.



Rys. 2. Po lewej - schemat wtryskarki tłokowej w układzie pionowym do wytwarzania protez stomatologicznych [4]; po prawej: schemat budowy układu uplastyczniającego wtryskarki ze wstępnym uplastycznieniem; 1 - układ uplastyczniający ślimakowy, 2 – tłokowy układ wtryskowy, 3 - tłok dozujący, 4 - zawór odcinający, 5 – grzejniki, 6 - dysza wtryskowa, 7 - tuleja wtryskowa, 8 - forma wtryskowa, 9 - wypraska [2]

Innym rozwiązaniem łączącym zalety układu ślimakowego i tłokowego jest układ uplastyczniający hybrydowy (mieszany), ze wstępnym uplastycznieniem (rys. 2). W tym przypadku tworzywo jest wstępnie uplastyczniane przy użyciu układu ślimakowego umieszczonego w mniejszym cylindrze, który jest połączony rozdzielaczem z głównym cylindrem wtryskowym. Uplastycznione tworzywo jest następnie wtryskiwane za pomocą tłoka do formy. Taka konstrukcja wtryskarki pozwala uzyskać bardzo duże wartości ciśnienia przy zachowaniu dużej szybkości wtryskiwania.

Podczas wytwarzania elementów z tworzyw polimerowych konieczne jest wcześniejsze właściwe zaprojektowanie kształtów i wymiarów wypraski. Ważne jest także uwzględnienie wszystkich parametrów mających wpływ na proces formowania, zestalania lub utwardzania wypraski w gnieździe formującym, jak również tych, które zachodzą po wyjęciu z formy. Ważnymi czynnikami jest także określenie wielkości skurczu, udarności, odkształcalności oraz innych cech wytworu, jakie chcemy uzyskać. Przy wytwarzaniu nowych konstrukcji wyprasek ważnym etapem jest także dobór odpowiedniego tworzywa do określonej metody przetwórstwa, a także ustalenie warunków i parametrów przetwórstwa, które po-

zwolą na uzyskanie wyprasek o żądanych kształtach, wymiarach i właściwościach użytkowych [3].

Tabela 1. Charakterystyka różnych rodzajów układów uplastyczniających

Rodzaj układu uplastyczniającego	Zalety	Wady
Tłokowy	<ul style="list-style-type: none"> – prosta budowa, – możliwość przetwarzania tworzyw polimerowych o dużej lepkości, – stosowany w małych wtryskarkach, – prosta konstrukcja, 	<ul style="list-style-type: none"> – długi czas uplastycznienia, który rośnie wraz ze średnicą tłoka, – słaba homogenizacja materiału, – mała masa wtrysku, – słabe wymieszanie tworzywa,
Ślimakowy	<ul style="list-style-type: none"> – krótki czas uplastycznienia, – dobra homogenizacja, – dobra efektywność, 	<ul style="list-style-type: none"> – ograniczony skok ślimaka i objętość wtrysku, – skomplikowana budowa, – nie można przetwarzać polimerów o dużej lepkości lub kompozytów z długim włóknem,
Hybrydowy (mieszany)	<ul style="list-style-type: none"> – bardzo dobra homogenizacja, – duża objętość wtrysku, 	<ul style="list-style-type: none"> – skomplikowana budowa składająca się z dwóch jednostek połączonych funkcjonalnie, – wysoki koszt maszyny,

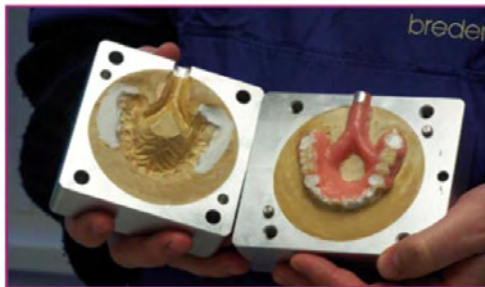
RODZAJE I BUDOWA FORM WTRYSKOWYCH

Proces wtryskiwania tworzywa jest bardzo złożony. Tworzywo polimerowe jest poddawane operacjom mającym na celu doprowadzeniu go do stanu umożliwiającego jego wtrysk do gniazda formującego przy zachowaniu jak najlepszych właściwości. Największy wpływ na ostateczną strukturę właściwość otrzymanej wypraski mają jednak warunki panujące w gnieździe formy wtryskowej bezpośrednio podczas wytwarzania wypraski.

Formy wtryskowe można klasyfikować z uwagi na kilka kryteriów. Ze względu na rozwiązania konstrukcyjne układu przepływowego formy dzielą się na formy z kanałami przepływowymi zimnymi oraz gorącymi, ze względu na liczbę gniazd formujących wyróżnia się formy jedno- bądź wielogniazdowe, natomiast z uwagi na umiejscowienie doprowadzenia tworzywa formy wtryskowe dzielą się na liniowe i kątowe [1]. Innym kryterium jest także rodzaj materiału, z którego wykonano korpus gniazda formującego (rys. 3) oraz dokładność jego wykonania. Dotychczas z uwagi na dużą trwałość formy wtryskowe wykonywane są ze stali narzędziowej. Koszt takiej formy jest bardzo duży i opłacalny jedynie przy produkcji wielkoseryjnej. Do produkcji małoseryjnej, prototypów lub prac laboratoryjnych formy wykonuje się z gipsu lub drewna [2, 4].

Materiał, z jakiego wykonana jest forma, ma bezpośredni wpływ na warunki, w jakich tworzywo ulega zestaleniu w formie. Znaczącym parametrem jest więc w tym procesie temperatura, która ma bezpośredni wpływ na wartość skurczu. Im wyższa temperatura formy, tym proces krystalizacji tworzywa przebiega wolniej,

co ma bardzo duży wpływ na strukturę i cechy ścianek wypraski. Cechy charakterystyczne, zalety oraz wady form wtryskowych z różnych materiałów zamieszczono w tabeli 2.



Rys. 3. Po lewej - wygląd stalowej formy wtryskowa do małych wyprasek [8]; po prawej - forma gipsowa umieszczona w ramie stalowej do wtryskiwania protez stomatologicznych [5]

Tabela 2. Cechy charakterystyczne, zalety oraz wady form wtryskowych z różnych materiałów

	Materiał formy wtryskowej	
Materiał	Stal	Gips
Zalety	<ul style="list-style-type: none"> – duża trwałość, – możliwość regulacji temperatury formy (zmienna temperatura formy), – prosta i skomplikowana konstrukcja w tym formy wielogniazdowe i dzielone, – możliwość wtrysku wytworów o różnej masie i grubości ścianek, 	<ul style="list-style-type: none"> – niski koszt wytwarzania formy, – krótki czas realizacji, – prosta budowa, – małe wartości skurczu wtrysniętego tworzywa kompensowane przy zastosowaniu „gipsu rozprężonego”,
Wady	<ul style="list-style-type: none"> – duży koszt produkcji/zakupu formy, – duża dokładność wykonywania powierzchni - polerowanie, – potrzeba układu termostatowania, 	<ul style="list-style-type: none"> – produkcja jednostkowa o małych wymiarach i do prototypów, – mała trwałość formy, – mała dokładność wykonania powierzchni,

TWORZYWA POLIMEROWE DO ZASTOSOWAŃ MEDYCZNYCH

Duży stopień zawansowania produkcji tworzyw polimerowych sprawił, że coraz częściej są one stosowane w medycynie i dziedzinach do niej pokrewnych. Tworzywa polimerowe do zastosowań medycznych w dużej części przetwarzane są metodą wtryskiwania, a także wytłaczania. W przypadku zastosowań medycznych wymagane jest, aby tworzywo było biologicznie obojętne. Na przykład protezy stomatologiczne (rys. 4) wytwarza się z takich tworzyw jak: akryl, acetal, poliamid oraz polimetakrylan metylu [4]. Tworzywa te są biokompatybilne i charakteryzują się długookresową trwałością oraz dużą wytrzymałością na pękanie. Spełniają również wysokie wymagania estetyczne i mają właściwości biologicznie obojętne.



Rys. 4. Po lewej: przykład protezy z acetalu [4], po prawej: tuleje zawierające granulat z tworzywem do produkcji protez [5, 7]

Inna grupą tworzyw stosowanych do wyrobu wyprasek o zastosowaniu medycznym są akrylany zmodyfikowane przez zastosowanie kopolimerów uzyskanych przez połączenie monomerów hydroksymetakrylanowych z metakrylanem metylu oraz przez dodanie elastomeru butadienowo-styrenowego w celu polepszenia odporności na kruche pękanie [4].

Tabela 3. Właściwości akrylanów modyfikowanych [4]

Cecha	Typowy akrylan	Akrylan z dodatkiem elastomeru
Moduł podczas zginania	2000MPa	1780MPa
Wytrzymałość na uderzenia (Charpy)	0,26kJ/m ²	0,48kJ/m ²
Sorpcja wody (po nasyceniu)	0,6%	0,55%
Skala dopasowania do tkanek (najłabsza=0, najlepsza=4)	3	2
Trwałość barwy (24-godzinne naświetlanie światłem ultrafioletowym)	bez zmian	nieznaczne zmiany
Wytrzymałość na rozciąganie	55MPa	50MPa
Wytrzymałość na ściskanie	76MPa	70MPa
Skurecz polimerazycyjny (objętościowy)*	6%	5%

* Uwzględniając proporcje polimer : monomer jak 3:1

PRZYKŁADY KONSTRUKCJI WTRYSKAREK TŁOKOWYCH

Przykładem nowoczesnych rozwiązań konstrukcyjnych układu tłokowego wtryskarek stosowanych w laboratorium do produkcji elementów medycznych są urządzenia przedstawione na rys. 5, posiadające wbudowany układ chłodzący. Ma to duży wpływ na uzyskanie wypraski o jak najlepszych właściwościach. Układ sterowania wtryskarki pozwala na ustalenie wymaganej wartości ciśnienia, temperatury oraz czasu wtryskiwania.

Następną z wtryskarek tłokowych do przetwórstwa tworzyw termoplastycznych jest urządzenie firmy Bredent GmbH typu Thermopress 400, które różni się od poprzednio przedstawionych maszyn tym, że układ uplastyczniający jest usy-

tuowany poziomo (rys. 6). Wtryskarka ta umożliwia wtryskiwanie tworzyw termoplastycznych w temperaturze do 400°C. Proces podgrzewania ulega przyspieszeniu dzięki wysoko wydajnym elementom grzejnym. Natomiast mechanizm prowadzenia tłoka i mocowania formy zabezpiecza gniazdo gipsowe przed uszkodzeniem [8].



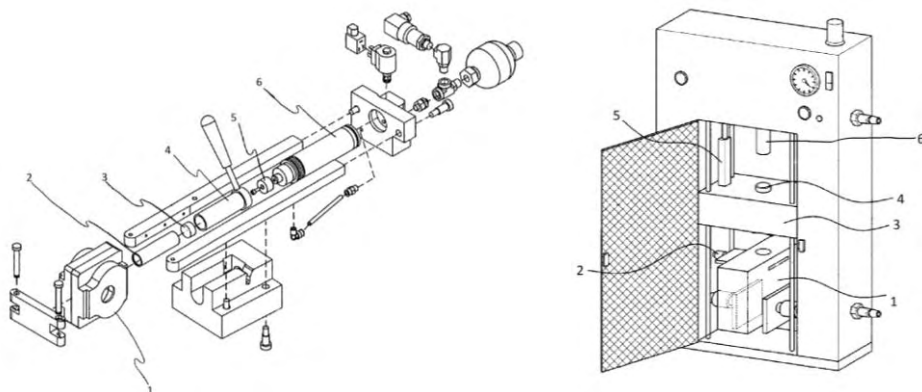
Rys. 5. Wygląd wtryskarki tłokowej Multipress (po lewej) oraz wtryskarki J 100 Evolution (po prawej) [6, 7]



Rys. 6. Wtryskarka pozioma do tworzyw termoplastycznych model Thermopress 400. Powyżej - widok ogólny, po prawej - miejsce umieszczenia metalowej formy przed i po zamocowaniu w maszynie [6]

Tworzywo umieszczane jest we wtryskarce bezpośrednio w specjalnych tulejach, które zostają szczelnie zamknięte przed włożeniem do komory grzewczej urządzenia. Proces wtryskiwania przebiega następująco: najpierw przygotowaną porcję tworzywa umieszcza się bezpośrednio w zimnej komorze przed urucho-

mieniem urządzenia. Następnie po nagraniu tworzywa do odpowiedniej temperatury układ sterujący włącza ruch tłoka, który pod ciśnieniem wtryskuje tworzywo do gipsowej formy umieszczonej w stalowej ramie. Po określonym czasie gipsową formę otwiera się, a otrzymana wypraskę poddaje się obróbce wykańczającej.



Rys. 7. Schemat wtryskarki tłokowej: po lewej - poziomej: 1 - rama formy gipsowej, 2 - cylinder, 3 - tabletka tworzywa, 4 - zasobnik, 5 i 6 - elementy tłoka; po prawej - pionowej: 1 - rama formy gipsowej, 2 - mocowanie ramy formy, 3 - cylinder, 4 - tworzywo, 5 - układ napędowy, 6 - tłok [9, 10]

PODSUMOWANIE

Maszyny do przetwórstwa tworzyw z układem uplastyczniającym tłokowym powstały jako jedne z pierwszych wtryskarek. Ich bardzo szerokie początkowo wykorzystanie wraz z rozwojem technologii uplastyczniania ślimakowego zaczęło stopniowo maleć, co spowodowało, iż obecnie są one wykorzystywane zwykle do wytwarzania części z tworzyw w produkcji o charakterze małoseryjnym lub do prac laboratoryjnych. W przypadku zastosowań medycznych bardziej przydatne wydają się być metody wtryskiwania ciśnieniowego za pomocą tłoka. Ponadto tworzywa polimerowe z uwagi na dobre właściwości wytrzymałościowe, brak oddziaływania i reakcji z organizmem ludzkim i wysoką estetykę otrzymywanych części mają coraz szersze zastosowanie w medycynie. Za pomocą wymienionych wtryskarek z tłokowym układem uplastyczniającym można wytwarzać ze specjalnych tworzyw części o nietypowych kształtach i jednostkowym charakterze, przeznaczone do wprowadzenia do ludzkiego organizmu, w tym między innymi elementy protez, czego przykładem są protezy stomatologiczne.

Stosowane w tej metodzie wtryskiwania formy wtryskowe wykonane ze stalowej obudowy i wkładek formujących zbudowanych z gipsu nie są tak trwałe jak konwencjonalne formy wtryskowe, ale pozwalają na skuteczne wytwarzanie małych serii wyprasek o zadowalających właściwościach, przy nieporównywalnie niższym koszcie wykonania takiej formy.

PIŚMIENNICTWO

1. Praca zbiorowa pod red. R. Sikory: „Przetwórstwo tworzyw polimerowych, podstawy logiczne, formalne i terminologiczne”. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2006.
2. Bociąga E.: „Specjalne metody wtryskiwania tworzyw polimerowych”. Wydawnictwa Naukowo - Techniczne, Warszawa 2008.
3. Klepka T.: “Konstrukcje osiowo-symetrycznych wytworów o kształtach złożonych”. Polimery 2008, 53, 5.
4. Craig R. G., Powers J. M., Wataha J. C. (wydanie polskie pod red. H. Limanowskiej-Shaw): „Materiały stomatologiczne”. Wydawnictwo Medyczne Urban & Partner, Wrocław 2000.
5. Materiały katalogowe ze strony internetowej <http://www.bredent.pl>
6. Materiały katalogowe ze strony internetowej <http://www.holtrade.pl/sys3.html>
7. Materiały katalogowe ze strony internetowej <http://www.rokodont.pl>
8. Patent amerykański US 2001/6287490
9. Zgłoszenia patentowe amerykańskie US 2007/0194474 A1
10. Zgłoszenia patentowe amerykańskie US 2010/0028477 A1

CHARACTERISTIC OF INJECTION MOLDING METHOD IN MEDICAL APPLICATIONS

Summary

The article presents the characteristics and possibilities of using polymer processing methods for medical applications. There have been comparisons of different ways of plasticization on the example of the injection, illustrating the advantages and disadvantages of each. Shows the effect of the type of mold material on the molded part quality, and examples of processing machinery for the manufacture of molded parts used in dental systems.

Keywords: polymer processing, injection molding, plasticizing system, medicine.

Tomasz Jachowicz ¹⁾, **Volodymyr Krasinskyi** ²⁾

ETYKIETOWANIE - METODA WYTWARZANIA ELEMENTÓW Z TWORZYW O SPECJALNYCH CECHACH POWIERZCHNI

Streszczenie: W artykule przedstawiono informacje na temat jednej ze specjalnych metod wtryskiwania, jakim jest wtryskiwanie z etykietowaniem w formie. Scharakteryzowano podstawy tej metody przetwórstwa i omówiono jej odmiany, uwzględniające różne sposoby pobierania i pozycjonowania etykiet w gnieździe formującym formy wtryskowej. Przedstawiono budowę stanowiska technologicznego do wtryskiwania z etykietowaniem w formie i wymieniono maszyny i urządzenia wchodzące w jego skład. Omówiono najważniejsze zalety i wady tej metody wtryskiwania oraz najważniejsze obszary zastosowania otrzymywanych przy jej pomocy wyprasek..

Słowa kluczowe: przetwórstwo tworzyw, wtryskiwanie, etykietowanie w formie.

WSTĘP

Wtryskiwanie jest jedną z pierwszych i podstawowych technologii przetwórstwa tworzyw sztucznych i na przestrzeni dziesięcioleci wykształciło wiele odmian i modyfikacji, związanych z rozwojem technologii wtryskiwania, pojawianiem się nowych tworzyw oraz nowych rozwiązań konstrukcyjnych maszyn przetwórczych. Wtryskiwanie połączone z jednoczesnym etykietowaniem umieszcza się w grupie metod umożliwiających wprowadzanie do formy wtryskowej dodatkowego materiału, o innych cechach użytkowych niż wtryskiwane tworzywo [1, 6]. W tej grupie występują następujące specjalne metody wtryskiwania, takie jak otryskiwanie folii, tkanin i laminatów, wśród których wyróżnia się wtryskiwanie z dekorowaniem w formie oraz wtryskiwanie z laminowaniem w formie. Odmiany wtryskiwania z dekorowaniem w formie są następujące [1, 9]: wtryskiwanie z dekorowaniem folią (IMD – In-Mold Decorating), wtryskiwanie z etykietowaniem w formie (IML – In-Mold Labeling), wtryskiwanie z wykorzystaniem elementów dekoracyjnych kształtowanych podciśnieniowo (INM – Insert Molding) oraz wtryskiwanie folii ze wstępnym kształtowaniem podciśnieniowo (FIM – Film Insert). W oparciu o te odmiany wtryskiwania otrzymuje się złożone elementy z tworzyw, które mają na fragmencie swej powierzchni powłokę z materiału o innych właściwościach i cechach użytkowych, niż pozostała część wypraski.

¹ Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Procesów Polimerowych.

² Lviv Polytechnic National University, Institute of Chemistry and Chemical Technologies, Department of Chemical Technology of Plastics Processing.

Technologia wprowadzania elementów dekoracyjnych w postaci etykiet znalazła zastosowanie nie tylko w procesie wtryskiwania, ale występuje także podczas wytłaczania z rozdmuchiwaniami oraz formowania próżniowego [6, 7]. Przykłady części z tworzyw, na których znajdują się etykiety, integralnie z nimi związane w trakcie wytwarzania zostały przedstawione na rys. 1.



Rys. 1. Typowe przykłady opakowań wykonanych metodą IML [8]

PODSTAWY PROCESU

Proces wtryskiwania z etykietowaniem w formie jest znany od kilkudziesięciu lat. Został opracowany w Stanach Zjednoczonych we wczesnych latach siedemdziesiątych XX w., jako rezultat poszukiwania metody wytwarzania części z tworzyw, głównie opakowań, posiadających na powierzchni trwałe, czytelne i odporne na uszkodzenia znaki graficzne [5]. Wykorzystanie etykietowania w formie rozpowszechniło się na szeroką skalę dopiero w ostatnich latach, przede wszystkim z powodu zwiększenia się możliwości współczesnych robotów przemysłowych oraz wydajności układów sterowania i regulacji wtryskarek [1, 3, 13].



Rys. 2. Schemat wtryskiwania z etykietowaniem w formie [5]

Wtryskiwanie z etykietowaniem polega na wprowadzeniu odpowiednio ukształtowanej folii z tworzywa do gniazda formy wtryskowej (rys. 2). Folia do etykietowania może być jedno- lub wielowarstwowa, z naniesionym wzorem graficznym i może zawierać elementy nie będące tworzywem, na przykład folię metalową. Następnie do zamkniętej formy z etykietą znajdującą się w gnieździe formującym następuje wtrysnięcie tworzywa w celu uzyskania wypraski wtryskowej. Folia, która jest utrzymywana przy ściankach gniazda formującego, w wyniku działania ciśnienia i wysokiej temperatury tworzywa, zostaje trwale połączona z wypraską wtryskową, tworząc po jej ochłodzeniu jednorodny element.

Podstawowym warunkiem, niezbędnym do prawidłowego przeprowadzenia procesu wtryskiwania z etykietowaniem w formie jest trwale utrzymywanie etykiety w odpowiednim obszarze powierzchni gniazda formującego, tak aby nie nastąpiło przemieszczenie się jej zarówno podczas zamykania formy wtryskowej, jak i w samej fazie wtrysku, kiedy na folię będzie oddziaływać strumień tworzywa wypełniającego gniazdo formujące [1, 6]. Utrzymywanie folii w odpowiednim położeniu jest realizowane dwiema metodami: przy pomocy podciśnienia lub ładunku elektrostatycznego. Dodatkowy wpływ na prawidłowe pozycjonowanie foliowej etykiety i jej zachowanie podczas fazy wtrysku ma kształt, grubość i właściwości mechaniczne folii [1,2, 5].

Pozycjonowanie etykiety metodą podciśnieniową

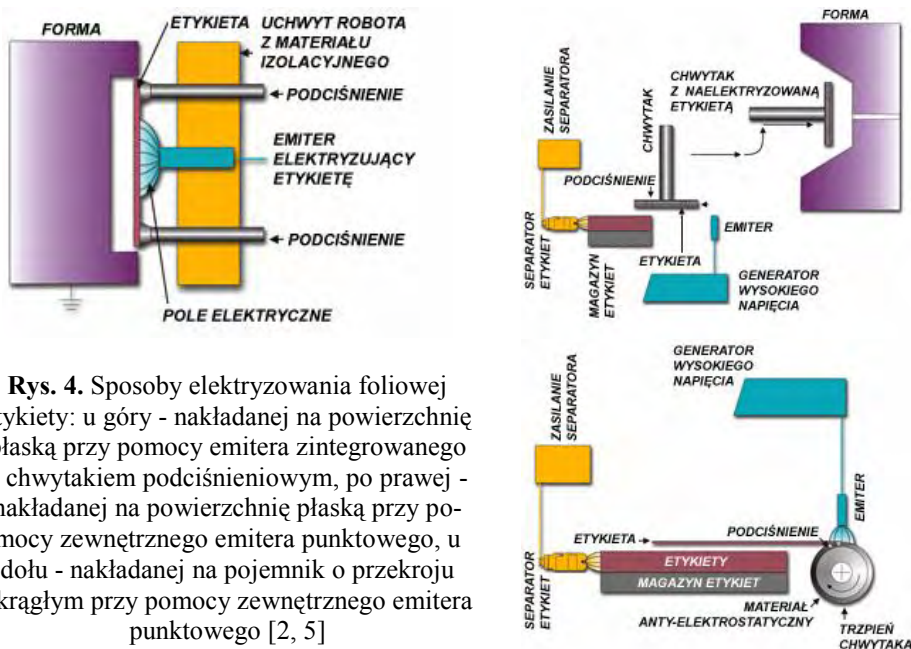
W metodzie podciśnieniowej etykieta zostaje pobrana z magazynu etykiet i wprowadzona do gniazda formującego przy pomocy współpracującego z wtryskarką robota, wyposażonego w odpowiedni uchwyt, najczęściej z przyssawkami podciśnieniowymi (rys. 3) lub igłowy. Aby utrzymać etykietę w formie i nie dopuścić do jej przemieszczania się podczas zamykania formy i w fazie wtrysku, na styku powierzchni folii i gniazda formującego wytwarza się podciśnienie, korzystając z odpowiednio zaprojektowanych kanałów podciśnieniowych, prowadzących do gniazda formującego i współpracujących z dodatkowym oprzyrządowaniem stanowiska wtryskowego. Podciśnieniowy sposób utrzymywania etykiety w formie jest stosowany w przypadku gniazd formujących o skomplikowanej kształcie, ponadto wówczas, gdy wstępnie ukształtowana etykieta nie jest płaska oraz w sytuacji, kiedy w miejscu występowania etykiety znajduje się powierzchnia teksturowana [1, 5].



Rys. 3. Chwytak podciśnieniowy robota oraz forma wtryskowa z osadzonymi etykietami [7]

Pozycjonowanie etykiety metodą elektrostatyczną

W metodzie elektrostatycznej folia jest utrzymywana we właściwym miejscu w gnieździe formującym przy pomocy sił elektrostatycznych (rys. 4). Wymaga to wytworzenia odpowiedniej różnicy potencjału elektrycznego między etykietą a powierzchnią formy wtryskowej. Elektryczne naładowanie etykiet odbywa się przy pomocy generatora wysokiego napięcia prądu stałego (rzędu 30kV). Urządzenia uzupełniające niezbędne do pozycjonowania etykiety tą metodą są tańsze i prostsze w konstrukcji niż w metodzie próżniowej, jednak konieczne jest zachowanie szeregu warunków dodatkowych, gwarantujących poprawny przebieg całego procesu wtryskiwania z etykietowaniem w formie [1, 2, 5].



Rys. 4. Sposoby elektryzowania foliowej etykiety: u góry - nakładanej na powierzchnię płaską przy pomocy emitera zintegrowanego z chwytakiem podciśnieniowym, po prawej - nakładanej na powierzchnię płaską przy pomocy zewnętrznego emitera punktowego, u dołu - nakładanej na pojemnik o przekroju okrągłym przy pomocy zewnętrznego emitera punktowego [2, 5]

Podstawowe warunki to odpowiednie właściwości izolacyjne materiału etykiety (m.in. opór właściwy), umożliwiające utrzymanie ładunku elektrostatycznego przez wystarczająco długi okres czasu oraz konieczność zapewnienia właściwej izolacji elementów formy, maszyny i oprzyrządowania dodatkowego (między innymi robota podającego etykiety) przed wpływem nanoszonego i rozchodzącego się ładunku elektrostatycznego. Może on powodować między innymi zakłócenia w działaniu szeregu czujników, znajdujących się w formie wtryskowej, monitorujących przebieg procesu wtryskiwania. Etykieta zostaje pobrana z magazynku etykiet przez robota, wyposażonego w specjalny chwytak podciśnieniowy w kształcie trzpienia dopasowanego do kształtu etykiety, a następnie zostaje naelektryzowana przez końcówkę roboczą urządzenia generującego ładunek elektrycz-

ny. Utrzymywanie etykiety na trzpieniu chwytaka podczas przekazywania jej ładunku elektrycznego odbywa się przy pomocy podciśnienia, bowiem trzpień chwytaka posiada specjalne kanały podciśnieniowe, a jednocześnie jest pokryty warstwą porowatego materiału o właściwościach antystatycznych [10]. Po wprowadzeniu chwytaka do gniazda formującego następuje redukcja podciśnienia, a różnica potencjału elektrycznego między naelektryzowaną etykietą a uziemioną formą wtryskową powoduje powstanie siły elektrostatycznej stabilnie utrzymującej etykietę w gnieździe formującym w czasie wystarczającym do przeprowadzenia wtrysku tworzywa do formy [1, 5, 9]. Elektrostatyczną metodę utrzymywania stosuje się w przypadku etykiet o małej grubości, nakładanych na powierzchnie płaskie, nie posiadające tekstury [1, 5, 12].

Istnieją dwa sposoby elektryzowania folii. W pierwszym z nich, określanym niekiedy jako standardowa metoda ładowania, element przekazujący ładunek elektryczny jest konstrukcyjnie związany z chwytakiem robota. Drugi sposób polega na tym, że ładunek elektryczny jest przekazywany na etykietę osadzoną na trzpieniu chwytaka z zewnętrznego emitera, w postaci pręta lub belki, w stosunku do której przemieszcza się ramię robota, unoszące etykietę przy pomocy podciśnienia wytwarzanego w trzpieniu chwytaka [2, 5, 12].

Materiały na etykiety

Materiałem na etykiety jest folia o grubości od 15 do 80 μm , najczęściej z polipropylenu lub polistyrenu (rys. 5). Uzasadnione jest stosowanie na etykietę tego samego tworzywa, z którego jest wykonana wypraska, co jest korzystne z uwagi na możliwość późniejszego wtórnego przetwórstwa. W celu zwiększenia wytrzymałości połączenia między etykietą a wypraską folia powinna mieć chropowatą powierzchnię od strony styku z tworzywem wtryskiwanym. Niekiedy, jeśli materiał etykiety oraz wypraski jest inny, stosuje się dodatkową warstwę klejową, która jest aktywowana ciepłnie. W sytuacji, w której etykieta nie jest jednorodna i może zawierać elementy przewodzące prąd elektryczny (specjalne rodzaje tuszów i farb drukarskich, folie metalowe itp.), muszą one znajdować się po stronie styku etykiety z wypraską, a więc przeciwnej do tej strony, na którą oddziałuje emiter ładunku elektrostatycznego [1, 5, 9].



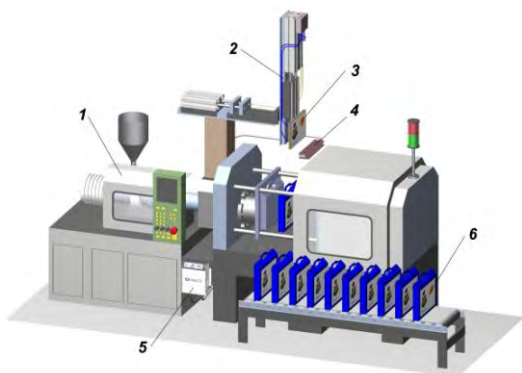
Rys. 5. Przykłady etykiet łączonych z wypraskami metodą In-Mould Labeling [8]



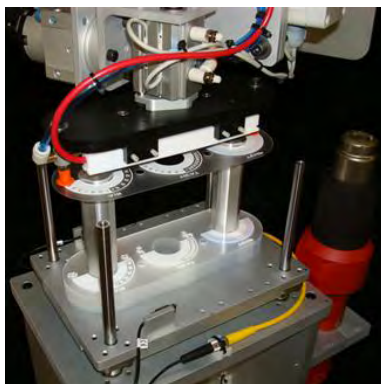
STANOWISKO DO WTRYSKIWANIA Z ETYKIETOWANIEM W FORMIE

Do wtryskiwania z etykietowaniem w formie wykorzystywane są wtryskarki uniwersalne [3, 6], wyposażone w typowy układ narzędziowy (rys. 6), natomiast w celu zwiększenia wydajności często są to maszyny z układem narzędziowym typu tandem. Niezależnie od rozwiązania konstrukcyjnego wtryskarki przeznaczone do etykietowania w formie muszą posiadać wyposażenie dodatkowe, w skład którego, w zależności od sposobu utrzymywania etykiety w formie, wchodzi: generator wysokiego napięcia wraz z emiterym zewnętrznym lub emiterym zintegrowanym z chwytakiem podciśnieniowym robota, urządzenie do wytwarzania podciśnienia wraz z niezbędną instalacją, a stanowisko magazynowania etykiet z oprzyrządowaniem dodatkowym (na przykład dyszami separującymi, które przeciwdziałają sklepaniu się etykiet) oraz zestaw robotów służących do umieszczania etykiet w formie wtryskowej i usuwania gotowych wyprasek [2, 5, 12].

W przypadku podciśnieniowego mocowania etykiet w gnieździe formy niezbędna jest forma wtryskowa o specjalnej konstrukcji, posiadająca kanały umożliwiające wytworzenie podciśnienia między powierzchnią etykiety a ścianką gniazda formującego. Przy elektrostatycznym mocowaniu etykiet foliowych można stosować klasyczne formy wtryskowe, należy je jednak prawidłowo uziemić [2, 5, 10]. Na rys. 7 przedstawiono jeden z typów magazynów na etykiety.



Rys. 6. Schemat stanowiska do wtryskiwania z etykietowaniem w formie: 1 – wtryskarka, 2 – robot podający etykiety, 3 – etykieta, 4 – zewnętrzny emitery listwowy, 5 – generator wysokiego napięcia, 6 – gotowa wypraska z etykietą [12]



Rys. 7. Magazyn z precyzyjnym pozycjonowaniem etykiety na trzpieniach prowadzących współpracujący z chwytakiem podciśnieniowym zintegrowanym z emiterym listwowym [11]

ZALETY I WADY

Wtryskiwanie z etykietowaniem w formie cechuje szereg zalet, wśród których za najważniejsze uważa się trwałość uzyskanego zdobienia oraz skrócenie czasu

wytwarzania i związane z tym wyraźne obniżenie kosztów produkcji (rzędu 40%) [1, 4, 14]. Umieszczenie folii bezpośrednio w gnieździe formującym wypraskę i trwałe związanie się z nią w procesie wtryskiwania eliminuje konieczność kolejnych operacji technologicznych, jakie są konieczne przy etykietowaniu metodami tradycyjnymi. Pozwala to na skrócenie czasu wytwarzania i obniża jego koszty, a w przypadku opakowań umożliwia także zachowanie większej czystości i sterylności produkcji [1, 4, 5, 14].

Przygotowywana folia może mieć naniesiony wielokolorowy wzór graficzny o jakości porównywalnej do fotograficznej wraz z bardzo czytelnym liternictwem, co jest niemożliwe do osiągnięcia innymi metodami. Nadruk na folię do etykietowania jest наносzony na jej wewnętrzną stronę przy pomocy typowych metod drukowania, w związku z czym po wtrysnięciu tworzywa do formy wtryskowej powierzchnia zadrukowana styka się bezpośrednio z materiałem tworzącym wypraskę wtryskową. Dzięki temu wzrasta trwałość naniesionego wzoru, bowiem folia zabezpiecza warstwę graficzną przed zarysowaniem lub otarciem, zmniejsza efekty starzenia, jednocześnie będąc zdecydowanie mniej podatną na odklejanie się od pojemnika. Oprócz zachowania atrakcyjności wizualnej ma to szczególne znaczenie przy utrzymaniu trwałości nanoszonych treści informacyjnych, takich jak kody paskowe, instrukcje obsługi, warunki bezpiecznego użytkowania, znaki ostrzegawcze, symbole czy logo, nazwy własne lub znaki firmowe [1, 2, 5, 9].

Wykorzystując tę metodę można pokrywać folią całą powierzchnię pojemnika, co jest utrudnione podczas nanoszenia wzorów graficznych przy pomocy drukowania, na przykład metodą druku tamponowego tworzyw. Ponadto istnieje możliwość umieszczania różnych etykiet, odmiennych na poszczególnych ściankach pojemnika. Metoda wtryskiwania z etykietowaniem jest także szczególnie przydatna przy konieczności zachowania narzucanej przez wymogi rynkowe elastyczności produkcji i wynikającej z niej dużej zmienności wzornictwa oraz przy krótkich seriach produkcyjnych [2, 5, 9]. W metodzie wtryskiwania z etykietowaniem wskazane jest, żeby folia była z tego samego tworzywa, z jakiego wykonywana jest wypraska wtryskowa, wówczas taki element jest zdecydowanie bardziej podatny na recykulację. W początkowym okresie rozwoju tej metody wtryskiwania etykiety były wykonywane także z papieru, jednak z punktu widzenia możliwości recykulacji takiej wypraski było to bardzo niekorzystne. Bardzo duże znaczenie ma także fakt braku substancji wiążących etykietę z wypraską (na przykład klejów), których usunięcie jest procesem ponoszącym czasochłonność i koszty wtórnego przetwórstwa [1, 4, 14].

Najczęściej wymieniane wady wtryskiwania z etykietowaniem w formie to konieczność modyfikacji konstrukcji formy wtryskowej oraz stosowania kosztownych urządzeń pomocniczych. W podciśnieniowej odmianie wtryskiwania z etykietowaniem wzrasta koszt wykonania formy wtryskowej, która musi posiadać sieć kanałów współpracujących z dodatkowymi urządzeniami pomocniczymi, wytwarzającymi podciśnienie niezbędne do stabilnego utrzymania etykiety w gnieździe formy wtryskowej. Kanały mogą powodować nierównomierność tem-

peratury formy i ścianek gniazda formującego, ponadto muszą mieć ściśle zdefiniowane wymiary, aby nie doprowadzać do zniekształcenia powierzchni folii tworzącej etykietę. Z drugiej strony – folia tworząca etykietę musi mieć odpowiednią grubość i wytrzymałość, aby nie dochodziło do jej odkształcenia w momencie wprowadzenia do gniazda formującego i wytworzenia podciśnienia. Mając na uwadze zapewnienie prawidłowego przebiegu procesu konieczne jest występowanie w formie wtryskowej czujnika reagującego na brak etykiety w formie, mającego za zadanie zatrzymać maszynę przed rozpoczęciem fazy wtrysku tworzywa do gniazda formującego. W przeciwnym wypadku grozi to zalaniem kanałów podciśnieniowych ciekłym tworzywem, skutkując koniecznością demontażu formy i długiego, kosztownego czyszczenia [1, 5, 6].

W elektrostatycznej odmianie wtryskiwania z etykietowaniem pojawia się konieczność odpowiedniego izolowania elementów formy i mechanizmów wprowadzających folię do gniazda formującego, ponadto istnieje ryzyko przeskoku łuku elektrycznego, mogącego przebić folię oraz doprowadzić do uszkodzenia powierzchni gniazda formującego na skutek przypałów. Ponadto impulsy elektromagnetyczne powstające w momencie wyładowań mogą zakłócać pracę układów komputerowych sterujących wtryskarką oraz współpracującym z nią robotem [9, 11, 13]. Należy zwracać uwagę na wilgotność powietrza w pomieszczeniu, w którym jest wykonywany proces wtryskiwania z etykietowaniem w formie, ponieważ zmiana wilgotności powietrza ma wpływ na wartość ładunku elektrostatycznego przenoszonego przez etykiety. Inny z wymogów to cechy materiału etykiety, bowiem folia stosowana do etykietowania musi mieć odpowiednie właściwości dielektryczne. Kolejnym z utrudnień jest konieczność unikania w konstrukcji gniazda formującego, elementów formy i oprzyrządowania dodatkowego części o ostrych krawędziach lub wystających fragmentach, na których mogą nadmiernie gromadzić się ładunki elektryczne. Następne z wymagań to gładka powierzchnia gniazda formującego, bez tekstury, bowiem jej występowanie wyraźnie pogarsza możliwości stabilnego utrzymania folii do etykietowania przy pomocy ładunków elektrostatycznych [5, 10, 12].

PODSUMOWANIE

Wtryskiwanie z etykietowaniem w formie jest obecnie podstawową metodą wytwarzania opakowań na produkty żywnościowe, chemię użytkową i lekarstwa. Jest szczególnie przydatne do nanoszenia etykiet na przedmioty o nieskomplikowanych kształtach i płaskich powierzchniach, dla których nie stawia się wysokich wymagań odnośnie precyzji umieszczenia etykiety na właściwej powierzchni pojemnika. Tą metodą można nakładać etykiety na wypraskach o przekroju owalnym na całym obwodzie, natomiast na wypraskach o przekroju w kształcie wieloboku etykiety mogą być nakładane na każdym z boków oraz dnie.

Folie nakładane przy pomocy wtryskiwania z etykietowaniem w formie są związane bardzo trwale z pojemnikiem, tworząc z nim praktycznie jednorodną

powierzchnię, bez możliwości rozwarstwienia i usunięcia etykiety. Nanoszony wcześniej na folię wzór graficzny ma jakość nieporównywalnie lepszą niż nadruk na tworzywie wykonywany innymi metodami, na przykład drukiem tamponowym lub drukiem termicznym, jest także odporniejszy na uszkodzenia mechaniczne i starzenie. W chwili obecnej ponad 80% opakowań, które są wykonywane w procesie wtryskiwania, od razu jest etykietowanych w formie.

Połączenie w jeden proces wytworzenia wypraski i złączenia z nią uprzednio przygotowanej etykiety, oprócz wymienionego wcześniej wyraźnego poprawienia właściwości użytkowych gotowego wytworu, wyraźnie skróciło czas trwania procesu produkcyjnego i pozwoliło na zwiększenie stopnia jego automatyzacji i robotyzacji. Zmniejszenie ilości poszczególnych stanowisk technologicznych skutkuje także obniżeniem zużycia energii oraz przestrzeni roboczej zajmowanej przez kompletną linię technologiczną wytwarzania pojemników.

Wymienione wyżej czynniki wpływają znacząco na wciąż postępujący rozwój technologii łączenia etykiet bezpośrednio na etapie wykonywania pojemnika, czego przykładem są metody wytwarzania pojemników w postaci butelek i kanistrów takie jak wytłaczanie z rozdmuchiowaniem i wtryskiwanie z rozdmuchiowaniem, w których stosuje się również etykietowanie w formie.

PIŚMIENNICTWO

1. Bociąga E.: Specjalne metody wtryskiwania tworzyw polimerowych. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008.
2. Chawick A.: Elektryczność statyczna – korzyści dotyczące etykietowania w formie (In-Mould Labelling). Wersja elektroniczna z portalu Opakowania.Biz (www.opakowania.biz).
3. Johannaber F.: Injection Molding Machines. A User's Guide 4th Edition. Hanser Publications, Cincinnati 2007.
4. Makely W.: Popularity grows for in-mold labels: in a world where pressure-sensitive labels dominate, technical advancements offer growth opportunities for IML. Food & Drug Packaging, 10, 2002. Wersja elektroniczna z portalu Bnet (www.findarticles.com).
5. Shelton S. E.: In-Mold Labeling. Electrostatics Are the Way to Go. Plastics Technology 2004, 4. Wersja elektroniczna z portalu Simco Ion (www.simco-ion.com).
6. Sikora R.: Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych. Wydawnictwo Edukacyjne, Warszawa 1993.
7. Strona internetowa Dopak (www.dopak.pl).
8. Strona internetowa Google. Biblioteka grafik dla hasła: In-Mould Labeling (www.google.com).
9. Strona internetowa IML Technologies (www.iml.se).
10. Strona internetowa Meech (www.meech.com).
11. Strona internetowa Robotic Automation Systems (www.roboticautomation-systems.com).
12. Strona internetowa Simco (www.simco-static.com).
13. Strona internetowa Wittmann (www.wittmann-robot.com).

14. Toensmeier P. A.: In-Mold Labeling Looks to High-Output Molds for Growth. Wersja elektroniczna z portalu Moldmaking Technology (www.moldmakingtechnology.com).

LABELING - METHOD OF PRODUCTION OF PLASTIC PARTS WITH SPECIAL SURFACE PROPERTIES

Summary

General information about one of special methods of injection molding, such as In-Mold Labeling have been presented in this article. Principles of this polymer processing method have been characterized. Also different ways of taking and positioning the labels into the mold have been described. Construction's details of injection station using In-Mold Labeling method have been presented also necessary machines and devices have been showed. Most important advantages and disadvantages of In-Mold Labeling method have been described as well with most important areas of application of plastic parts manufactured by this special method of injection molding.

Keywords: polymer processing, injection molding, In-Mold Labeling.

Przemysław Filipek¹⁾

ROBOT INSPEKCYJNO-CZYSZCZĄCY INSPEKTOR 1

Streszczenie: Artykuł przedstawia konstrukcję i funkcje mobilnego, bezprzewodowego robota do inspekcji i czyszczenia kanałów wentylacyjnych. Dzięki wymiennym końcówkom robot może szybko przeistoczyć się z inspektora w maszynę czyszczącą. Wspomagające pionowe koło dociskowe jest innowacją wprowadzoną do konstrukcji robota „Inspektor 1” w celu zwiększenia docisku kół do podłoża. W artykule przedstawiono zamodelowane elementy konstrukcyjne robota.

Słowa kluczowe: mobilny robot inspekcyjny, kanał wentylacyjny, konstrukcja układu jezdnego, ruchome ramię robota, wspomagające pionowe koło dociskowe, pozycjoner kamery.

WSTĘP

Utrzymanie sprawnej wentylacji pomieszczeń ma kluczowe znaczenie w zapewnieniu dobrego samopoczucia, koncentracji a nawet zdrowia dla osób w nich przebywających. Niewielkie rozmiary szybów wentylacyjnych znacznie utrudniają ich nadzór i czyszczenie. Z powodzeniem może je przeprowadzić niewielki, zdalnie sterowany robot inspekcyjno-czyszczący – „Inspektor 1”.

BUDOWA I ZASADA DZIAŁANIA ROBOTA

Robot mobilny „Inspektor 1” jest konstrukcją złożoną, gdyż występują w nim zarówno elementy mechaniczne, elektroniczne oraz informatyczne. Układ jezdny bazuje na postawie czterokołowej gdzie dwa silniki napędowe służą do zmiany kierunków ruchu i napędu w obie strony. Robot jest zasilany z ogniwa akumulatorowego 12V/5Ah. Całością zarządza 32-bitowy mikrokontroler rodziny AT91SAM7S firmy Atmel. Mikroprocesor znajduje się w wymiennym module, stąd łatwo jest przeprogramować robota. Możliwość ta stwarza warunki do wykorzystania urządzenia w procesie dydaktycznym. Robot wyposażony w kolorową kamerę przekazuje obraz bezprzewodowo. W ten sam sposób realizowane jest sterowanie urządzeniem. Operator ma do dyspozycji zamontowane z przodu ruchome ramię z wymiennymi końcówkami: szufelką, chwytakiem bądź obrotowymi szczotkami. Robot wyposażony jest w źródło światła LED i halogen do-

¹ Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn.

świetlający, wspomagające koło pionowe, ułatwiające jazdę robota w kanałach o przekroju kołowym oraz szereg czujników kontrolujących pracę robota i warunki panujące w kanale. Rola „Inspektora 1” nie ogranicza się tylko do biernej obserwacji kanałów wentylacyjnych. Za pomocą chwytaka można usuwać z kanału większe przeszkody i śmieci (min. woreczki foliowe, gałązki, ogryzki itp.), szufelka może nabierać materiały sypanne (piasek, ziemia) a szczotki czyszczące skutecznie usuną drobniejsze zanieczyszczenia (np. osadzony kurz). Rejestrator obrotów kół, wyznaczając przejechaną drogę, umożliwia maszynie (po zaniku transmisji) samodzielny powrót do pozycji początkowej bądź wjazd w zasięg transmisji radiowej. Robot wzbogacony o różne czujniki (min. przepływu i kierunku powietrza, gazu, wilgotności i temperatury) może dokładnie zdiagnozować kanał pod kątem sprawności oraz obecności gazu lub ognia. Te „umiejętności” poszerzają jego zastosowanie np. w ratownictwie czy straży pożarnej (penetracja trudno dostępnych miejsc, lokalizacja pożaru lub gazu, dostarczanie środków pomocy osobom uwięzionym pod gruzami itd.). W celu uzyskania wytrzymałej konstrukcji o możliwie małym ciężarze, większość z jej komponentów składowych wykonana jest z aluminium. W tabeli 1 zawarto podstawowe funkcje podzespołów robota „Inspektor 1”.

Tabela 1. Funkcje poszczególnych elementów robota [1]

Table 1. The functions of individual elements of robot [1]

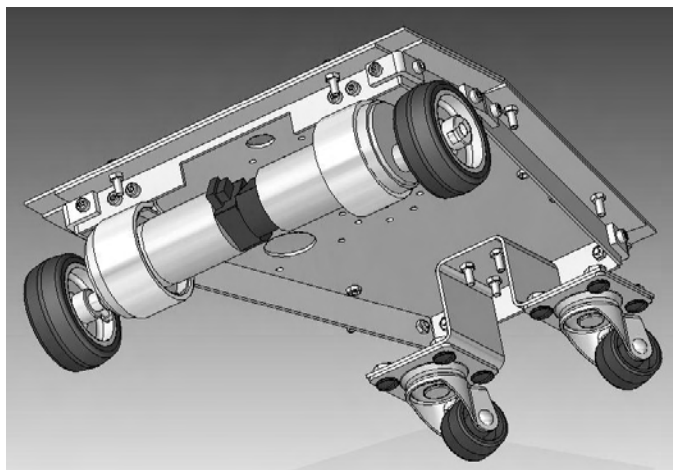
Lp	Element robota	Wykonywana funkcja
1	Gumowe koła z napędem	Jazda z małym kątem skrętu
2	Pozycjoner kamery wraz z podstawą obrotową	Funkcja rozglądania się, możliwość obserwacji na przód i tył robota
3	Wspomagające, wysuwane koło pionowe	Wspomaganie jazdy – zmniejszanie poślizgu kół (w kanałach o przekroju kołowym możliwość jazdy w pionie)
4	Ramię z wymiennymi końcówkami: szufelka, chwytak lub czyszczące szczotki obrotowe	Usuwanie większych śmieci (worki, gałązki, piach gruz), oczyszczanie ścianek kanału z kurzu
5	Kamera bezprzewodowa	Obserwacja stanu zanieczyszczeń w kanale
6	Mikrofon	Rejestracja dźwięków (np. szum ciekącej wody lub syk ulatniającego się gazu)
7	Reflektor LED	Oświetlenie normalne
8	Halogen	Doświetlenie silnym światłem
9	Radiomodem	Komunikacja i sterowanie bezprzewodowe
10	Buzzer	Dźwiękowa sygnalizacja pozycji i alarmy
11	Czujnik gazów	Sygnalizacja obecności gazów w kanale wentylacyjnym
12	Czujnik przepływu powietrza	Określenie siły ciągu w kanale
13	Czujnik kierunku powietrza	Określenie kierunku ciągu
14	Czujnik nacisku	Określenie siły docisku pionowego koła wspomagającego
15	Ultradźwiękowy czujnik odległości	Pomiar długości kanału wentylacyjnego
16	Czujnik temperatury i wilgotności	Określenie temperatury i wilgotności panujących w kanale
17	Programowalny 32 bitowy procesor AT91SAM7S256	„Silna” jednostka sterująca
18	Akumulator 12V/ 5Ah	Podstawowe źródło zasilania robota
19	Rejestrator obrotów kół napędowych	Zapamiętanie drogi – powrót do początku trasy (lub do wznowienia transmisji) po jej zaniku
20	Panel operatora	Panel sterujący robotem

MODELOWANIE PODZESPOŁÓW

Poszczególne podzespoły robota „Inspektor 1” zostały zamodelowane w programie graficznym 3D Solid Edg ST2 (wersja edukacyjna). Pozwoliło to na szybką modyfikację każdego elementu oraz wirtualne złożenie całej konstrukcji. Dokonano sprawdzenia wystąpienia ewentualnych kolizji podzespołów robota oraz sporządzono wydruki rysunków wykonawczych wszystkich jego części.

Podwozie

Na rys. 1 pokazano zamodelowane podwozie robota składające się ze stalowej blachy wzmacnianej aluminiumowymi profilami oraz zamocowanych silników z kołami przednimi. Koła tylne – luźno obrotowe ułatwiają skręty podwozia.



Rys. 1. Model podwozia robota „Inspektor 1” [2]

Fig. 1. Model of the robot “Inspector 1” chassis [2]

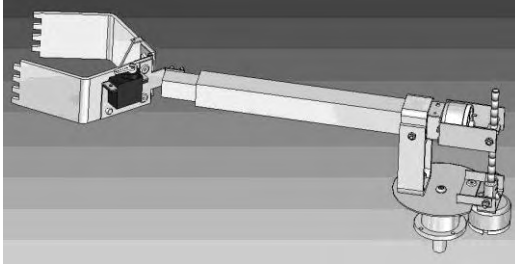
Ramię

Ramię robota, przedstawione na rys. 2 składa się z aluminiumowych profili i umożliwia ruch w trzech osiach: lewo-prawo, góra-dół, wsuw-wysuw. Na końcu ramienia zamontowana jest jedna z końcówek roboczych – chwytak. Ruchy ramienia zapewniają trzy silniczki DC z przekładniami ślimakowymi a zacisk chwytaka - modelarski serwomechanizm.

Wspomagające koło pionowe i pozycjoner kamery

Wspomagające koło pionowe (rys. 3) jest innowacją wprowadzoną do konstrukcji robota „Inspektor 1” w celu zwiększenia przyczepności kół do podłoża – dzięki zwiększeniu docisku koła pionowego do górnej ścianki kanału wentylacyj-

nego. Siłę wyporu można regulować zdalnie dzięki wmontowanemu w konstrukcję - czujnikowi nacisku. Wysuw koła pionowego realizowany jest za pomocą silnika krokowego i dwóch przekładni: pasowej oraz ślimakowej. Koło obraca się luźno.

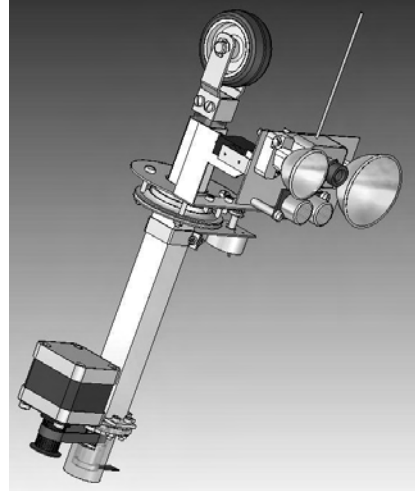


Rys. 2. Model ramienia robota [2]

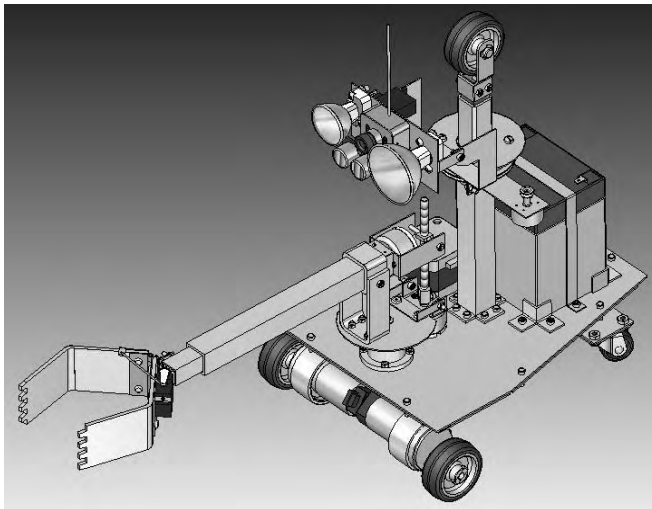
Fig. 2. Model of robot arm [2]

Rys. 3. Model wspomagającego koła pionowego i pozycjonera kamery [2]

Fig. 3. Model vertical supporting wheels and the camera positioner [2]



Na pionowym odcinku konstrukcji umocowano ruchomy pozycjoner kamery. Zawiera on oprócz kolorowej kamery również oświetlenie (LED i halogen) oraz ultradźwiękowy czujnik odległości. Ruch pozycjonera może odbywać się wokół płaszczyzny poziomej i w kierunku góra-dół. Rysunek 4 przedstawia model robota w pełnym złożeniu.

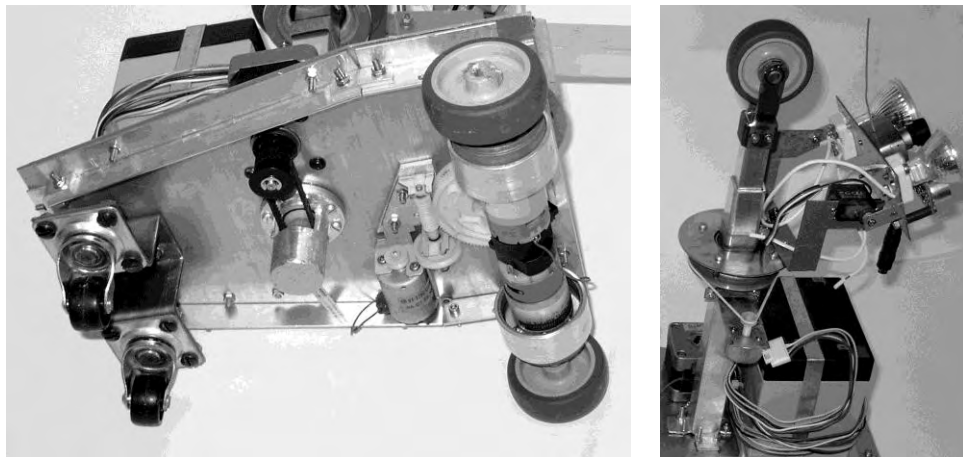


Rys. 4. Wirtualny model robota „Inspektor 1”

Fig. 4. Virtual model of the robot “Inspector 1”

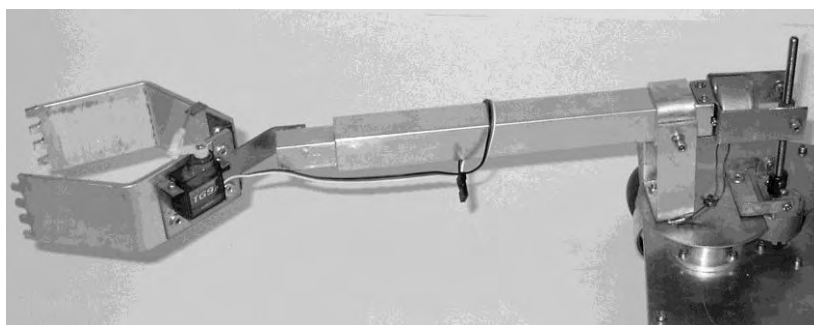
KONSTRUKCJA RZECZYWISTA

Na rysunkach 5 i 6 pokazano rzeczywistą konstrukcję robota „Inspektor 1”: podwozie, ramię z chwytakiem oraz wspomagające koło pionowe z pozycjonerem kamery. Wszystkie podzespoły wykonano w warsztacie mechanicznym laboratorium Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej. W większości podzespołów użyto profili aluminiowych, zgodnie z dokumentacją techniczną zamodelowanych części.



Rys. 5. Po lewej - rzeczywiste wykonanie podwozia robota, po prawej - wspomagające koło pionowe z pozycjonerem kamery [2]

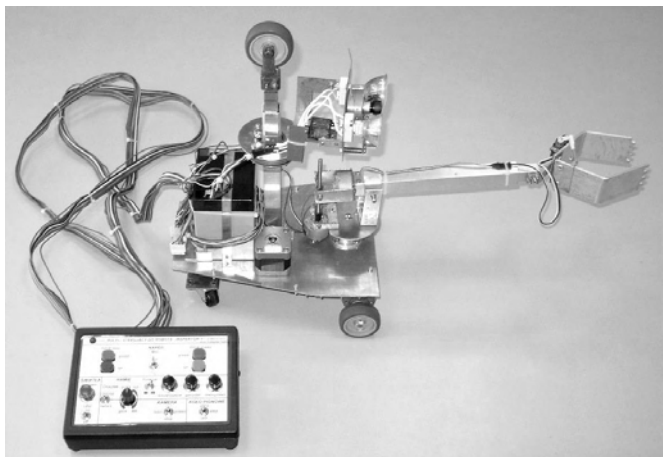
Fig. 5. Left - the final realization of the robot chassis, Right - supporting the vertical circle with the camera positioner [2]



Rys. 6. Wykonane ramię robota z chwytakiem [2]

Fig. 6. Made a robot arm with gripper [2]

Robot „Inspektor 1” jest obecnie sterowany przewodowo za pomocą pulpitu, co zostało przedstawione na rys. 8.



Rys. 8. Widok na robota „Inspektor 1” z przewodowym pulpitem sterowniczym
Fig. 8. View of the robot "Inspektor 1" with wired control console

WNIOSKI

Robot spełnia stawiane mu wymagania pod względem funkcjonalności, mobilności i zwrotności.

„Inspektor 1” jest sprawnym urządzeniem inspekcyjnym. Dzięki ruchomej, kolorowej kamerze, lampie halogenowej i LED, operator robota może oglądać wyraźny, rzeczywisty obraz na monitorze.

Zastosowanie w konstrukcji profili aluminiowych zapewnia uzyskanie wymaganej sztywności ramienia przy małej jego masie.

Robot może pracować w miejscach dla człowieka niedostępnych, w warunkach zagrożenia życia (np. powietrze przesycone niebezpieczną zawartością gazu łatwopalnego, czadu, dwutlenku węgla) lub uciążliwych dla zdrowia (odór, owaady, gryzonie).

Urządzenie wyróżnia się od innych tego rodzaju robotów - powrót autonomiczny, wymienne końcówki, bogactwo czujników parametrów środowiskowych, oraz innowacyjne, wspomagające koło pionowe.

PIŚMIENNICTWO

1. Filipek P.: Konstrukcja robota inspekcyjnego do kanałów wentylacyjnych na tle rozwiązań przemysłowych. Wybrane problemy konstruowania i badań maszyn i mechanizmów. Monografia pod redakcją J. Jonaka. LTN, Lublin 2009, 80 - 97.
2. Bańcerowski B., Cyranowski W., Duda K., Stachowski R., Filipek P.: Robot inspekcyjno-czyszczący do kanałów wentylacyjnych. II Lubelski Kongres Studenckich Kół Naukowych Tygiel 2010 pod redakcją J. Cabana i M. Szali. Politechnika Lubelska, Lublin 2010, 285 – 296.

ROBOT TO THE INSPECTION AND CLEANING CALLED INSPECTOR 1

Summary:

This article show construction and functions of mobile, wireless inspection-cleaning robot of ventilating pipes. Thanks to changeable endings robot can fast become inspector from a cleaning machine. Helping vertical tighten wheel is a innovation introduced to the robot construction, in result it increases wheels tighten to the ground. This article show modeling construction elements of the robot.

Keywords: mobile inspecting robot, ventilation pipe, driving system construction, mobile robot arm, helping vertical tighten wheel, camera tripod.

Marcin Korulczyk ¹⁾

FUNKCJONOWANIE CZŁOWIEKA W ŚRODOWISKU PRACY WYBRANE ASPEKTY

Streszczenie: W ramach wykonywanych zadań człowiek narażony jest na szereg negatywnych czynników fizycznego środowiska pracy. Do najbardziej powszechnych należy nieodpowiednie oświetlenie pomieszczeń pracy. Oświetlenie wpływa na samopoczucie i zadowolenie z pracy. Kolejnym czynnikiem jest hałas. Jego długotrwałe oddziaływanie na człowieka prowadzi do zmęczenia, czy nawet głuchoty. Konsekwencją długotrwałego wpływu drgań na ciało człowieka mogą być uszkodzenie kończyn. Ważną funkcją organizmu człowieka są zdolności termoregulacyjne, wynikające z konieczności przystosowania się organizmu do warunków klimatycznych. Istnieje obecnie wiele stanowisk pracy narażonych na oddziaływanie szkodliwych substancji. Do najbardziej niebezpiecznych należą neurotoksyny oddziałujące na centralny układ nerwowy. Przyczyną większości wypadków w miejscu pracy jest niedostosowanie środowiska pracy do określonych dyspozycji człowieka. Taylor starał się zastosować naukę w pracy robotników, opracowując system zarządzania, który nazwał „naukowym kierowaniem”. Atzler na podstawie swoich badaniach zaproponował modyfikacje, krytykowanego systemu Taylora. Zmiany dotyczyły konieczności badań ciała ludzkiego i jego realnych możliwości.

Słowa kluczowe: ergonomia, zarządzanie.

ERGONOMIA

Starając się przybliżyć do problematyki funkcjonowania człowieka w miejscu pracy warto wspomnieć o czynnikach bezpośrednio determinujących jej charakter. Należą do nich z pewnością czynniki fizycznego środowiska pracy w ujęciu ergonomii, czyli dostosowanie warunków pracy do właściwości psychicznych i fizjologicznych człowieka. Kolejnym niezwykle istotnym czynnikiem determinującym charakter wykonywanej pracy jest odpowiednie zarządzanie. Poniższy artykuł wybierając określone aspekty postara się przybliżyć opisane determinanty pracy ludzkiej.

Realizując zadania związane z pracą, człowiek w dużej mierze uzależniony jest od czynników fizycznego środowiska pracy [3]. Do najistotniejszych należą, natężenie światła, hałas, drgania, warunki klimatyczne, czy szkodliwe substancje.

Warunki optyczne w miejscu pracy odgrywają istotną rolę, gdyż właśnie wzrok dostarcza największej ilości informacji. "Odpowiednie oświetlenie jest

¹ Katolicki Uniwersytet Lubelski Jana Pawła II, Katedra Psychologii Organizacji i Zarządzania.

podstawowym wyznacznikiem zdrowia, samopoczucia i zdolności człowieka do pracy (...), niedostateczne oświetlenie jest powodem, oprócz złej widoczności, frustracji emocjonalnej, a nawet lęku (gdy dotyczy przejść, korytarzy itd.) oraz złego samopoczucia" [3]. Warto podkreślić konieczność odpowiedniego dopasowania warunków świetlnych do wykonywanych czynności. Najniebezpieczniejszym okresem oświetlenia jest półmrok, czas zanikanie światła słonecznego, jeszcze przed włączeniem sztucznego oświetlenia. W tym okresie odnotowuje się największą ilość wypadków [4]. Przyczyną pogorszenia samopoczucia i innych dolegliwości, jak również zmniejszeniem widoczności, może być również nadmiar światła, który nazywany jest olśnieniem. O olśnieniu możemy mówić wówczas, gdy w obrębie stożka rozproszonego światła dostanie się oślepiające odbicie źródła tego światła.

Kolejnym czynnikiem fizycznego środowiska pracy jest hałas, rozumiany, jako zjawisko o charakterze akustycznym, interpretowane przez jednostkę, jako przeszkadzające, nieprzyjemne, czy zakłócające. Kluczową rolę w ocenie hałasu, może ogrywać kontekst sytuacyjny, czy nastawienie do określonych dźwięków. Ewentualna adaptacja do hałasu, nie występuje, możemy mówić jedynie o wyłączeniu danego bodźca ze świadomości za pomocą mechanizmu uwagi. Nie oznacza to jednak, że dany bodziec nie wpływa na człowieka. Jego pomijanie prowadzi do zmęczenia, a w sytuacji stałego oddziaływania hałasu na człowieka, może doprowadzić do głuchoty. Największe osłabienie słuchu spowodowane jest przez hałas o częstotliwościach środkowych 0,5 kHz, 1 kHz, oraz 2 kHz [8].

Obniżenie efektywności pracy ludzkiej, jak również utratę zdrowia mogą powodować drgania. Poziom tolerowanej przez ludzi wibracji w większym stopniu zależy od wielkości przyspieszenia, niż od amplitudy. Drgania o częstotliwości do 350 kHz odczuwa się, jako wibrację. Organizm posiada naturalną zdolność tłumienia drgań w wielu częstotliwościach [8]. Zdolność tę wyznacza częstotliwość drgań własnych ciała ludzkiego, wynoszącą 5 Hz. Jednak, gdy częstotliwość drgań otoczenia równa się częstotliwości drgań własnych ciała ludzkiego (lub jego część), wtedy amplituda częstotliwości drgań organizmu człowieka rośnie [3]. Przykładowym skutkiem oddziaływania drgań na ciało człowieka jest zamazane widzenie. Narażenie ciała na wibracje przez kilka lat może doprowadzić do stałego drżenia rąk i braku odporności na zimno, co stanowi najgroźniejszy zespół zwany chorobą Raynauda.

W sytuacji, gdy człowiek zmuszony jest do funkcjonowania w niesprzyjających warunkach klimatycznych, uruchamia szereg wewnętrznych mechanizmów starających się zapewnić organizmowi optymalne funkcjonowanie. Do najistotniejszych mechanizmów regulujących należy odprowadzanie ciepła. Obciążenie związane z termoregulacją dotyczą nie tylko wysiłku fizycznego, lecz również promieniowania słonecznego i promieniowania świetlnego. Bilans wymiany ciepła ciała ludzkiego z otoczeniem warunkuje subiektywne odczucie ciepła i gorąca oraz chłodu i zimna.

Wiele stanowisk pracy w przemyśle narażonych jest na działanie szkodliwych substancji. Do najpowszechniejszych należą zanieczyszczenia CO₂, SO₂, siarkowodorem (H₂S), benzenem (C₆H₆), czteroehtylenem ołowiu, parami rtęci oraz różnego rodzaju pyłami organicznymi i nieorganicznymi [3]. Najczęstszymi skutkami tych zanieczyszczeń są zatrucia, jak również oddziaływania rakotwórcze. Do najbardziej niebezpiecznych substancji szkodliwych należą neurotoksyny. Atakują one centralny układ nerwowy i nawet w niewielkich dawkach powodują różnorodne skutki emocjonalne i zachowaniowe, takie jak: halucynacje, zaniki pamięci, depresje i psychozy [1].

Kolejnym niezwykle ważnym aspektem jest bezpieczeństwo pracy. Choć z pozoru ten problem wydaje się być marginalny w istocie dotyczy każdego pracownika i każdego miejsca pracy. Przyczyną większości wypadków jest niezharmonizowanie otoczenia i dyspozycji człowieka [3], dlatego tak ważna jest odpowiednia edukacja personelu zasad BHP. Częstotliwość i powaga wypadków zależy od charakteru wykonywanej pracy. Największa liczba wypadków zdarza się w przemyśle budowlanym i malarskim. Osoby spożywające alkohol i narkotyki w pracy znacznie częściej powodują wypadki niż pozostałe osoby [4]. Warto również podkreślić rolę zmęczenia w bezpieczeństwie pracy. Większości wypadków w dziesięciogodzinnym dniu pracy wypada w dwóch ostatnich godzinach pracy, przyczyną tych wypadków określa się właśnie zmęczenie.

Do działań związanych z zapobieganiem wypadkom należą inicjatywy związane ze szkoleniem pracowników w zakresie bezpieczeństwa pracy, rzetelne prowadzenie rejestru wypadków, koncentracja na odpowiednim zaprojektowaniu miejsca pracy oraz kampanie poświęcone bezpiecznym procedurom wykonywania pracy [4].

ZARZĄDZANIE

Aby zrozumieć istotę pracy człowieka, niezwykle istotne jest poznanie systemów koordynowania pracy człowieka. Rozwiązania te bezpośrednio wpływały, na jakość życia pracowników, ich zadowolenie z wykonywanej pracy jak również efektywność wykorzystywania maszyn na konkretnych stanowiskach.

Pierwszą naukową próbą organizacji pracy człowieka w przemyśle była inicjatywa F.W. Taylora. Określała „najlepsze i jedyne” sposoby wykonywania każdej czynności, jak również proponowała metody powiększania wydajności ze zmienionym systemem prac. Całość tych zmian miała przyczynić się do zmiany dotychczasowej relacji, na linii pracodawca – pracownik. Bez wątpienia do najlepszych osiągnięć Tayloryzmu (ruchu zmian w przemyśle, powstałego na skutek wprowadzenia proponowanych przez Taylora zasad) należała analiza ruchów, jak również pomiar czasu. Celem analizy ruchów wykonywanych w pracy było wyeliminowanie niepotrzebnych elementów ruchu wykonywanego na danych stanowisku. Natomiast analiza czasu miała na celu wyznaczenie realnego zapotrzebowania czasowego do wykonania konkretnej czynności. Celem wszystkich tych

inicjatyw, było osiągnięcie najwyższej efektywności zarówno w obsłudze maszyn jak i w pracach ręcznych.

Szereg sukcesów związanych z wprowadzeniem Taylorowskich zasad, takich jak dobór odpowiedniej jakości stali, form i wyboru narzędzi, określenia szybkości i głębokości skrawania, uregulowania przenośników i pasów transmisyjnych pozwoliły na znaczne zwiększenie sprawności i precyzji pracy (5). Wdrożenie opisanych zasad organizacji pracy umożliwiło poprawę efektywności pracy ludzkiej i lepsze wykorzystanie urządzeń przemysłowych, pozwoliło to również na dalszy rozwój i postęp badań z tego zakresu. Warto również wspomnieć o zaproponowanym „systemem różnicowych stawek akordowych”, którego istota polegała na płaceniu wyższych stawek wydajniejszym pracownikom.

Pierwsza zasada filozofii Taylora dotyczyła opracowania prawdziwej nauki zarządzania, aby można było ustalić najlepszą metodę wykonania każdego zadania. Drugi postulat dotyczył naukowego doboru robotników, aby można było każdemu z nich przydzielić pracę, do której najbardziej się nadaje. Po odpowiedniej selekcji Taylor akcentował konieczność naukowego wyszkolenia i doskonalenia robotnika. Ostatni postulat dotyczył bezpośredniej, przyjaznej współpracy między kierownictwem i robotnikami.

Choć celem wrodzenia Taylorowskich zasad było zwiększenie zysków i poprawa relacji na linii kierownictwo – pracownicy, z czasem zaproponowane rozwiązania doprowadziły do zupełnie odwrotnego efektu. Nieustanna tendencja do przyspieszania produkcji, bezpośrednio związana ze zwiększeniem zysków doprowadziła do nadużyć kierownictwa w postaci nadmiernego wykorzystywania pracowników. W konsekwencji spowodowało coraz liczniejsze wstępowanie robotników do związków zawodowych, umacniając w ten sposób na wiele lat wzajemną podejrzliwość pomiędzy kierownictwem i robotnikami. Wrogie nastawienie do Taylorowskich zasad zarówno ze strony kierownictwa fabryk, jak również związków zawodowych doprowadziło do zainicjowania w 1915 r. tzw. Ankiety Hoxie'go – profesora uniwersytetu w Chicago. Badanie objęło 35 fabryk wyznaczonych przez samego Taylora, wyniki ankiety były mocno krytyczne. Poddano w wątpliwość wartość naukową chronometrażu, jak również negatywne aspekty moralne, społeczne i psychologiczne selekcji według wydajności.

W świetle opisanych informacji, pomimo niezaprzeczalnego wkładu w rozwój badań z tego zakresu rodzi się szereg pytań dotyczących przyczyn braku końcowego sukcesu rozwiązań Taylora. Jedną z tych przyczyn z pewnością jest brak uwzględnienia fizjologicznego aspektu funkcjonowania człowieka na określonym stanowisku pracy. Przeprowadzając badania wypadków zmęczenia, obejmujące tylko pewne grupy mięśni, uczeń i współpracownik Taylora, Edgar Atzler wypracował istotne rozróżnienie między zmęczeniem centralnym (nerwowym) i zmęczeniem obwodowym, dla którego charakterystyczne są reakcję krwioobiegu i dróg oddechowych. Gdy pewna grupa mięśni naszego organizmu jest przez dłuższy czas stymulowana, występuje wówczas zmęczenie przede wszystkim peryferyjne (obwodowe). Kiedy jednak pole anatomiczne zwęża się, wówczas występują ob-

jawy zmęczenia centralnego (nerwowego) i przybiera na sile w miarę zmniejszania się zmęczenia peryferyjnego (obwodowego) [2]. Jeśli wysiłek pewnej ograniczonej grupy mięśni powtarza się i przedłuża, np. wkręcania co minutę śrubki do silnika samochodowego, występują wówczas dwa oddzielne lub połączone działania fizjologiczne. Po pierwsze robotnik musi wyężyć wolę i powiększyć intensywność swoich wysiłków. Po drugie w jego organizmie inne ośrodki nerwowe (B) muszą dojść do działania i zastąpić ośrodek (A) dotychczas czynny, co pociąga za sobą niekorzystne skutki fizjologiczne. Ponieważ struktura anatomiczna ośrodków zastępczych nie jest tak dobrze dopasowana do tej czynności, jak ośrodek (A), następuje również opóźnienie regeneracji ich substancji energetycznych. W miarę przedłużania się pracy robotnika, angażowane są kolejne zastępcze ośrodki nerwowe, które wspomagają w realizacji określonych zadań [2]. Na podstawie swoich badań Atzler sformułował szereg reguł. Najważniejsza w kontekście oceny propozycji Taylora głosi, aby ruchów pośrednich bezwzględnie i w każdej okoliczności nie usuwać, gdyż mięśnie odpoczywają podczas wykonywania tych ruchów. Gdy udział tych ruchów w całości pracy jest zbyt mały, mięsień przeciążony pracuje w sposób nieekonomiczny i męczy się prędko [2].

Zagłębiając się w próbę organizacji pracy robotników przez Taylora możemy dostrzec szereg błędów. Podstawowy błędem była próba narzucenia określonej normy, tempa pracy w oparciu na obliczeniach wydajności pracy, często najlepszych robotników. Celem było nakreślenie wzoru wykonywania konkretnych czynności, by pozostali mogli w podobny sposób przyspieszyć produkcję. Spowodowało to narzucenie tempa pracy i wykonywania konkretnych ruchów, nienaturalnych dla konkretnego pracownika. W swoich badaniach Taylor nie uwzględnił różnic indywidualnych, zarówno psychicznych, jak i fizjologicznych. Wyeliminował również „niepotrzebne” ruchy z punktu widzenia osiągnięcia możliwie jak najszybszego tempa pracy, nie badając, jaką rolę te ruchy pełniły. Stanowiły one chwile koniecznego rozluźnienia mięśni w celu ich chwilowej regeneracji. Warto zaznaczyć, że dla każdej osoby mogły one pełnić odmienne funkcje, wynikały jednak z określonej budowy ciała, jak również różnych możliwości ośrodków nerwowych.

Już w XVII wieku La Mettrie [7] podkreślał konieczność analizy ludzkiego ciała, przedkładając to nad nawet najbardziej dociekliwe rozprawy filozoficzne pisząc: Człowiek jest maszyną tak złożoną, że nie podobna od razu utworzyć sobie jasnego pojęcia i co za tym idzie – dać jej definicji. Dlatego też próżnymi okazały się te wszystkie dociekania, które najwięksi nawet filozofowie przeprowadzali a priori, tj. pragnąc niejako posługiwać się skrzydłami ducha. Tylko, więc a posteriori, tj. usiłując odkryć duszę jak gdyby poprzez narządy ciała, można osiągnąć niekoniecznie oczywiste prawdy dotyczące samej natury człowieka, lecz na pewno możliwie najwyższy w tej dziedzinie stopień prawdopodobieństwa.

Szereg badań Atzlera umożliwił koncentrację twórcom systemów zarządzania na czynnikach fizjologicznych człowieka i jego realnych możliwościach. Nie jest to jednak całościowe i kompletne ujmowanie potrzeb i możliwości człowieka w

pracy. Konieczne bowiem staje się uwzględnienie czynników osobistych, czyli psychologii indywidualnej, każdego człowieka.

W 1908 roku Henry Ford założył Ford Motor, Co, rozpoczynając masową produkcję samochodu Modelu T. W ówczesnych czasach posiadaniem samochodów mogli cieszyć się jedynie zamożni obywatele Stanów Zjednoczonych. Model T skierowany był do powszechnej grupy odbiorców, przez co jego cena musiała być względnie niska, musiały również zostać zmniejszone koszty produkcji. Ford skupił uwagę na wydajności, mechanizacji wszystkiego, co możliwe i rozłożeniu każdego zadania na możliwie najdrobniejsze elementy. W celu skonstruowania takiego systemu pracy, Ford zatrudnił znanego teoretyka zarządzania F. W. Taylora. Robotnik w fabryce Forda wykonywał nieustannie jedno konkretne zadanie, każdy robotnik produkował inną część, w ten sposób tworząc kompletną część samochodu. Produkcja pierwszego Forda Model T trwała 12/5 h, po 12 latach w 1920 nowy samochód pojawiał się co minutę, a u szczytu zainteresowania Model T schodził z linii produkcyjnej co 5 sekund [6]. Stale zwiększane wymagania co do tempa pracy równomiernie zwiększały niezadowolenie pracowników, a ilość zatrudnionych pracowników trzykrotnie przewyższała realne zapotrzebowanie. Jednak Ford poradził sobie z problemem, z którym nie poradziło sobie większość zakładów pracy. Rozpoczęto nową rekrutację, płace robotników zostały podwojone, w celu przyciągnięcia najlepszych pracowników.

Zainteresowanie pracą dla zakładów Forda przeszło najśmielsze oczekiwania, często w celu zachowania porządku rekrutacji wzywana była policja. Rozwiązanie to spotkało się z niebywale korzystnymi rezultatami, w chwili śmierci Forda w 1945 roku jego majątek wynosił 600 mln USD. Pomimo zastosowania metody Taylora, budzącej powszechny sprzeciw pracowników, organizacja Forda odniosła sukces. Warto zastanowić się nad przyczynami tego sukcesu.

Aby odnieść przyczyny, należy zagłębić się w rozwiązanie zaproponowane przez Forda. Stała tendencja do podwyższania tempa pracy spotkała się jak w pozostałych fabrykach z niezadowoleniem pracowników. Jedną z opisywanych wad systemu Taylora, była próba dopasowania norm pracy najwydajniejszych pracowników do możliwości przeciętnych robotników. W sytuacji szczytowego niezadowolenia pracowników, Ford zwolnił cały personel zapraszając jedynie najwydajniejszych, czyli najlepiej przystosowanych zarówno psychicznie jak i fizjologicznie pracowników. Pomimo takiego rozwiązania pozostawał jeszcze problem niewielkiego niedopasowania do wygórowanej normy, problem ten mógł w miarę upływu czasu narastać doprowadzając do sytuacji globalnego niezadowolenia. Kluczowe w rozwiązaniu tego problemu okazało się podwojenie płac robotników. Doprowadziło to nie tylko do załagodzenia nieprzyjemności, lecz również do wzbudzania silnej motywacji wewnętrznej każdego pracownika, stanowiącej jedną z najsilniejszych i najtrwalszych rodzajów motywacji.

PODSUMOWANIE

Działania związane z kształtowaniem fizycznych warunków pracy, jak również odpowiedniego zarządzania powinno jak centralny podmiot tych działań umiejscawiać człowieka [9]. Ważne by praca ludzka umożliwiła człowiekowi nie tylko przerywanie bez zagrożenia zdrowia, lecz szanse na realny rozwój zarówno umysłowy, osobowościowy jak i duchowy. Badania z zakresu szkodliwości nieodpowiedniego oświetlenia, hałasu, szkodliwych substancji, czy bezpieczeństwa pracy dają nam wyraźny obraz kierunku działań zapobiegających tym zagrożeniom. Szereg rozbudowanych systemów zarządzania, dostosowanych do charakteru organizacji pozwala na skuteczne zarządzanie, bez konieczności nadmiernego wykorzystywania człowieka w pracy. Jeśli z jakichś względów fizjologiczny i psychiczny dobrostan człowieka nie będzie stanowił celu podejmowanych organizacyjnych działań, napotkany sytuację kolejnych zagrożeń zdrowia i życia człowieka. W celu uniknięcia takich sytuacji konieczne jest działanie psychologów pracy, którzy powinni rzetelnie diagnozować rodzące się potrzeby człowieka by starać się je realizować.

PIŚMIENNICTWO

1. Anderson A.: Neurotoxic follies, *Psychology today*, July 1982, 7, vol.16, str. 30-42.
2. Atzler E.: *Körper und Arbeit*. Wyd., *Psychologische Arbeitsrationalisierung* 1927 Berlin. Str. 409, 485-486.
3. Bańka A.: *U źródeł psychopatologii pracy*. Wyd. Politechniki Poznańskiej. Poznań 1990, str. 25-30, 42.
4. Schultz D. P., Schultz S. E.: *Psychologia a wyzwania dzisiejszej pracy*. Wyd. Naukowe PWN. Warszawa 2002, str. 388-393, 398-400.
5. Friedman G.: *Maszyna i człowiek, problem człowieka w cywilizacji maszynowej*. Wyd. Książka i Wiedza. Warszawa 1966, str. 14-94.
6. Stoner J. A. F., Freeman R. E., Gilbert D. R. Jr: *Kierowanie*. Wyd. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne 1988, str. 42-43, 48-52.
7. La Mettrie J. O.: *Człowiek – maszyna*. Wyd. PWN, Kraków 1953, str. 17.
8. Osborne D. W., Grueneberg M. M.: *Work and physical environment*. Wiley, Chichester 1983, str. 151, 179-180.
9. Szajnar S. W.: *Czynnik ludzki w obsłudze urządzeń technicznych*. Wyd. Wojskowej Akademii Technicznej, Warszawa 2010, str. 10-11.
10. Tomaszewski T.: *Pedagogika na usługach szkoły*. Wyd. PWSZ, Warszawa 1964, str. 110-113.

FUNCTIONING OF THE MAN IN THE ENVIRONMENT OF THE WORK - CHOSEN ASPECTS

Summary:

In so doing the person is subjected to several negative factors of physical work environment. The most common is inadequate room lighting work. Lighting affects the well-being and job satisfaction. Another factor is noise. His long-term effects on humans lead to fatigue, or even deafness. The consequence of long-term impact of vibration on the human body can be damaged extremities. An important feature is the thermostatic ability of the human body a result of having a body adapted to the climatic conditions. There are now many jobs exposed to the influence harmful substances. The most dangerous is neurotoxin affecting the central nervous system. The reason of most accidents in the workplace is incompatibility to specific work environment at man's disposal. Taylor tried to apply science in the work of laborers, developing a management system that he called „scientific management”. Atzler on the basis of their research suggested modifications, the Taylor's system. The changes related having to research the human body and its real capabilities.

Keywords: ergonomics, management.

Rafał Rumin ¹⁾

OPRACOWANIE MATEMATYCZNYCH I FIZYCZNYCH ZALEŻNOŚCI DO BUDOWY MODELU MATEMATYCZNEGO UKŁADU WYWAŻANIA WIRNIKÓW

Streszczenie: W referacie omówiono zagadnienia dotyczące powstawania drgań w wirnikach na skutek ich niewyważenia. W celu zaprojektowania układu automatycznego wyważania przy użyciu płynu jako masy korekcyjnej, opracowano model matematyczny wirnika oraz układu wyważającego. Zaproponowany system wyważania wykorzystuje tarcze korekcyjne, które umieszczone są na wale. Każda tarcza korekcyjna ma wewnątrz odpowiednio połączone ze sobą komory wypełniane płynem. Na skutek przepływu płynu (wykorzystywanego jako masa korekcyjna) do poszczególnych komór, następuje wyważenie wirnika i redukcja niepożądanych drgań mechanicznych. Przedstawiono możliwości wykorzystania układu wyważania do istniejących maszyn w przemyśle.

Słowa kluczowe: wyważanie wirników, redukcja drgań, aktywne metody wyważania, dynamika wirników.

WSTĘP

W przemyśle wykorzystuje się bardzo wiele urządzeń obrotowych wykorzystujących wirniki i wały. Niestety urządzenia wirnikowe narażone są na drgania wywołane przez głównie niewyważenie. W trakcie pracy drgania wirnika mogą spowodować dodatkowe ugięcie lub uszkodzenie wału, łożysk [3]. Aby zredukować ryzyko powstawania tego typu uszkodzeń, zaproponowano technologię ograniczającą niewyważenie. Działanie układu wyróżnia się możliwością wyważania podczas pracy wirnika bez konieczności zatrzymywania urządzenia. Pozwoli to na zwiększenie żywotności urządzenia i ograniczy koszty związane z przestojami serwisowymi.

IDEA I CEL BADAŃ

Celem badań jest opracowanie metody wyważania wirników z wykorzystaniem ciągłej zmiany masy korekcyjnej. Koncepcja wyrównowywania opiera się o zasadę zmiany położenia masy korekcyjnej poprzez dostarczanie płynu jako do odpowiednio zaprojektowanych komór. Komory te znajdują się w dodatkowej

¹⁾ Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Katedra Robotyki i Mechatroniki.

tarczy umieszczonej na obwodzie wirującego wału, a przepływ płynu jest kontrolowany przez odpowiedni układ sterowania zaworami wlotowymi i wylotowymi.

NIEWYWAŻANIE WIRNIKÓW

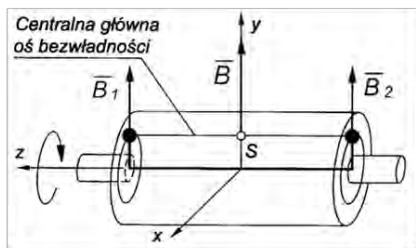
Powstawanie drgań w układach wirujących

Każdy poruszający się obrotowo mechanizm posiada określone przyspieszenia liniowe i kątowe. Obciążenia okresowo zmienne wywołują wiele niekorzystnych zjawisk [4, 6]: drgania elementów i naprężenia zmęczeniowe, nadmierne zużywanie się łożysk, drgania korpusów, fundamentów i otoczenia maszyny oraz związany z tymi zjawiskami hałas. Aby wyeliminować niepożądane zjawiska stosuje się korekcję rozkładu mas elementów maszyn zwaną wyważaniem.

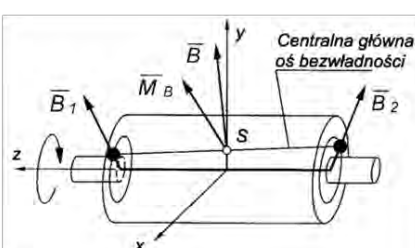
Wyważanie

Wyważanie realizowane jest poprzez zmianę (przez dodanie lub ujęcie) masy z tarczy wirnika na odpowiedniej płaszczyźnie, w taki sposób, aby środek ciężkości znajdował się na osi obrotu która jest główną, centralną osią bezwładności. W wielu przypadkach niezbędne jest wykonanie wyważenia statycznego i dynamicznego.

Wirnik niewyrównoważony statycznie



Wirnik niewyrównoważony dynamicznie



Rys. 1. Wektor główny sił bezwładności i moment główny sił bezwładności w wirniku statycznie i dynamicznie niewyważonym [3].

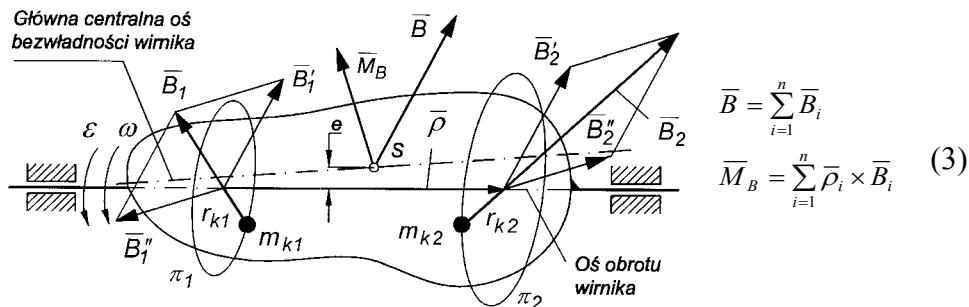
Wektor główny sił bezwładności jest równy zero, gdy spełnione są warunki:

$$Mx_S = \sum_{i=1}^n m_i x_i = 0, \quad My_S = \sum_{i=1}^n m_i y_i = 0, \quad (1)$$

Powyższe równanie oznaczają, że środek masy wirnika znajduje się na osi obrotu i wirnik jest wyrównoważony statycznie [3, 5]. Moment główny sił bezwładności jest równy zero, jeśli spełnione są warunki:

$$D_{xz} = \sum_{i=1}^n m_i x_i z_i = 0 \quad \text{oraz} \quad D_{yz} = \sum_{i=1}^n m_i y_i z_i = 0 \quad (2)$$

Spełnienie przez układ mas dyskretnych warunku (2) oznacza, że oś obrotu jest główną osią bezwładności. Jeśli spełnione są równocześnie oba warunki (1) i (2) wówczas oś obrotu jest główną centralną osią bezwładności i wirnik jest wyrównowany dynamicznie (zupełnie). W wyniku redukcji sił i momentów otrzymujemy wektor główny sił bezwładności \bar{B} oraz moment główny sił bezwładności \bar{M}_B przyłożone w środku masy wirnika S.



Rys. 2. Wektor główny sił bezwładności i moment główny sił bezwładności oraz równoważny układ sił bezwładności w płaszczyznach korekcyjnych [3]

Aby wirnik wyrównować dynamicznie, należy w płaszczyznach π_1 i π_2 zwanych płaszczyznami korekcyjnymi (lub płaszczyznami wyważania) umieścić masy korekcyjne m_{k1} i m_{k2} na promieniach korekcyjnych r_{k1} i r_{k2} obróconych o kąt 180 stopni w stosunku do sił bezwładności \bar{B}_1 i \bar{B}_2 . Przy obrocie wału z prędkością kątową $\bar{\omega}$ masy korekcyjne wywołują siły bezwładności równoważące siły \bar{B}_1 i \bar{B}_2 , takie że muszą być spełnione równania:

$$B_1 = m_{k1} r_{k1} \omega^2 \quad \text{oraz} \quad B_2 = m_{k2} r_{k2} \omega^2 \quad (4)$$

OGÓLNY MODEL MATEMATYCZNY

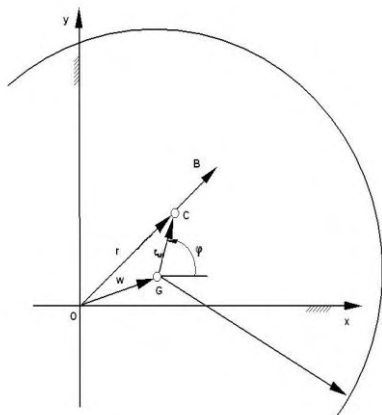
W celu opisanie ruchu całego układu zastosowane zostaną równania różniczkowe wzajemnie ze sobą sprzężone. Ogólne równanie ruchu zawierać będzie macierze: mas M, tłumienia D i sztywności K.

Powyższe macierze są reprezentacją odpowiednich podukładów maszyny obrotowej oznaczającej element: bezwładny (masa tarczy), sprężysty (wyginający się wał), oraz tłumiący (liniowo-wiskotyczny opór tarcia zewnętrznego). Wektor P oznacza uogólniony wektor wymuszeń zewnętrznych, natomiast uogólnione wektory przemieszczeń, prędkości i przyspieszeń określone są przez x, a czas przez t.

$$M\ddot{x} + D(x, \dot{x})\dot{x} + K(x, \dot{x})x = P(t) \quad (5)$$

władności tarczy $\sqrt{I_G/m}$ jest dużo większy od mimośrodów oraz $\Omega = \text{const}$, $\varphi = \Omega t$, to:

$$\begin{aligned} m\ddot{\omega}_x + c\dot{\omega}_x + k\omega_x &= m\varepsilon\Omega^2 \cos \Omega t \\ m\ddot{\omega}_y + c\dot{\omega}_y + k\omega_y &= m\varepsilon\Omega^2 \sin \Omega t + mg \end{aligned} \quad (10)$$



Rys. 4. Wektor główny sił bezwładności i moment główny sił bezwładności oraz równoważny układ sił bezwładności w płaszczyznach korekcyjnych [4]

I – to masowy moment bezwładności tarczy względem osi geometrycznej.

Stacjonarny ruch płaski niewyważonej tarczy wirującej można interpretować jako superpozycję drgań wymuszonych, zachodzących w dwóch płaszczyznach, wzajemnie prostopadłych, więc otrzymujemy:

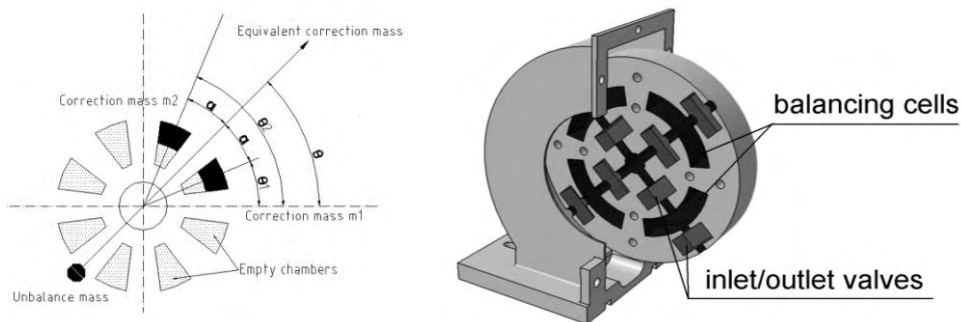
$$\ddot{\omega} + \gamma\omega\dot{\omega} + \omega^2\omega = \Omega^2 \varepsilon e^{i\Omega t} + ig \quad (11)$$

MODEL TARCZY Z MASĄ KOREKCYJNĄ

Zredukowany wektor główny sił bezwładności oraz moment główny sił bezwładności przyłożony w środku masy wirnika S może być zniesiony przez działanie masy korekcyjnej. Można określać kierunek działania wypadkowej siły bezwładności pochodzącej od dwóch mas korekcyjnych, tak aby stanowił przeciwwagę dowolnego wektora siły niewyważającej – co widać na lewej części rysunku poniżej.

Projekt tarczy korekcyjnej zakłada, że w metalowej tarczy wydrążone zostaną cztery komory korekcyjne. W nich gromadzić będzie się będzie płyn zwiększający wypadkową masę tej części tarczy i tym samym korygując niewyważenie. Przepływ płynu do każdej komory będzie realizowane przez parę zaworów wlotowych/wylotowych. W tym celu wykorzystane zostaną specjalistyczne zawory do mikrod dozowania płynu. Zapewniają one dużą szybkość, dokładność i powtarzalności dozowania cieczy do urządzenia. Czas otwarcia i zamknięcia zaworu piezoelektrycznego będzie mierzony i w ten sposób określona będzie ilość płynu

jaka ma być dostarczona do komory. Zmiana wypełnienia komór płynem (tj. objętość mas korekcyjnych) będzie mogła się odbywać w obu kierunkach, poprzez iteracyjne dodawanie lub odrzucanie części masy. Dzięki takiemu rozwiązaniu masy korekcyjne wirują wraz z wałem urządzenia wyważanego, a ich sterowanie odbywa się poprzez zespół zaworów umieszczonych w tarczy korekcyjnej. Schemat zastępczy oraz model tarczy korekcyjnej ukazane są poniżej.



Rys. 5. Schemat rozłożenia komór wypełnianych płynem (masą korekcyjną) oraz projekt tarczy korekcyjnej

WNIOSKI

Przyjęte założenia modelu matematycznego oparte są o podstawowe założenia modelu Flöppla-Jefcotta. W celu opracowania układu sterowania model ten będzie wymagał rozbudowania o człony związane z detekcją oraz korekcją niewyważenia. Zrealizowane to może być dopiero po dobraniu podzespołów (np. zawory) o odpowiednich parametrach.

W związku z tym iż w skład systemu wtryskiwaczy wchodzi - mikro zawory dozujące bardzo dużych prędkości, należy obliczyć parametry pracy dla każdego z zaworów. Istotnym problemem jest powstałe przy wysokich obrotach ciśnienie działające na zawór wylotowy. Wynika ono z siły odśrodkowej wirnika uzależnionej od prędkości obrotowej całego układu. Właśnie ten parametr jest największą barierą dla wykorzystania szybkodziałających zaworów hydraulicznych w wirnikach wysokoobrotowych, gdyż zawory te nie są odporne na wysokie ciśnienia.

PIŚMIENNICTWO

1. Darlow M. S., Balancing of High-Speed Machinery, New York: Springer, 1989.
2. Föppl A., "Das Problem der Lavalschen Turbinenwelle," Der Civilingenieur, vol. 41, pp. 335-342, 1895.
3. Felis J., H. Jaworowski, J. Cieślík, Teoria maszyn i mechanizmów. Cz 1: Analiza mechanizmów, Kraków: Publishing House AGH, 2008.

4. Gryboś R., „Dynamika maszyn wirnikowych”, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 1994.
5. Kiciński J., „Dynamika wirników i łożysk ślizgowych”, Wyd. IMP, PAN, 2005.
6. Nelson F. C., Tufts University, Medford, Massachusetts; “A Brief History of Early Rotor Dynamics”; Sound Vib 37 no. 6, The H. W. Wilson Company, 2003.

MATHEMATICAL MODELS OF BALANCING ROTORS BASED ON MATHEMATICAL AND PHYSICAL RELATIONSHIPS

Summary:

This paper presents the problem of the rotor vibration due to unbalance. In this research shows the propositions of design of the active balancing system for rotors by using fluid as the correction mass. This system uses a balancing corrective discs, which are placed on the shaft. It has been described a mathematical model of the equivalent correction mass allocation. The rotor-balancing system help to reduction unwanted mechanical vibrations. There are possibilities of using this technology for the existing machines in the industry.

Keywords: rotor balancing, unbalance, reduction of vibration, active methods of balancing, rotor dynamics.