

Piotr KRAWIEC

POLITECHNIKA POZNAŃSKA, KATEDRA PODSTAW KONSTRUKCJI MASZYN

Eksperymentalna metoda pomiarów cech geometrycznych i stereometrii powierzchni nieokrągłych kół pasowych

Dr inż. Piotr KRAWIEC

Jest zatrudniony w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Poznańskiej na stanowisku adiunkta. Jego zainteresowania obejmują zagadnienia projektowania, wytwarzania, pomiarów oraz badań eksperymentalnych napędów cięgowych. Jest kierownikiem pracowni Komputerowego Wspomagania Projektowania i Zapisu Konstrukcji. Prowadzi zajęcia z zakresu PKM, CAD, CAM, CAE.



e-mail: piotr.krawiec@put.poznan.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono problematykę pomiarów cech geometrycznych nieokrągłych kół pasowych stosowanych w nierównobieżnych przekładniach cięgowych z pasem zębatym. Charakterystyczną cechą tych przekładni jest możliwość uzyskania okresowo zmiennych cech kinematycznych takich jak prędkość, przełożenie dzięki zastosowaniu w klasycznej przekładni cięgowej z pasem zębatym kół o nieokrągłej obwodni. W pracy zawarto ilustrację przykładowych pasowych kół nieokrągłych, które wykonano różnymi metodami obróbki. Bardzo ważne zagadnienie z uwagi na niestandardowy proces sprzężenia pasa i kół stanowi poprawne wyznaczenie błędów wykonania elementów napędu. Z uwagi na brak standardów określających wymagania odnośnie metodyki pomiaru oraz dopuszczalnych wartości odchyłek cech geometrycznych i stereometrii powierzchni dla nieokrągłych kół pasowych tematyka ta jest bardzo aktualna. Zaprezentowano eksperymentalne podejście do pomiarów cech geometrycznych z zastosowaniem współrzędnościowej techniki pomiarowej i systemów CAD.

Słowa kluczowe: pasowe koła nieokrągłe, pomiary cech geometrycznych, pomiary cech stereometrii, standaryzacja.

Experimental method for measurements of geometrical features and surface stereometry of non-circular belt pulleys

Abstract

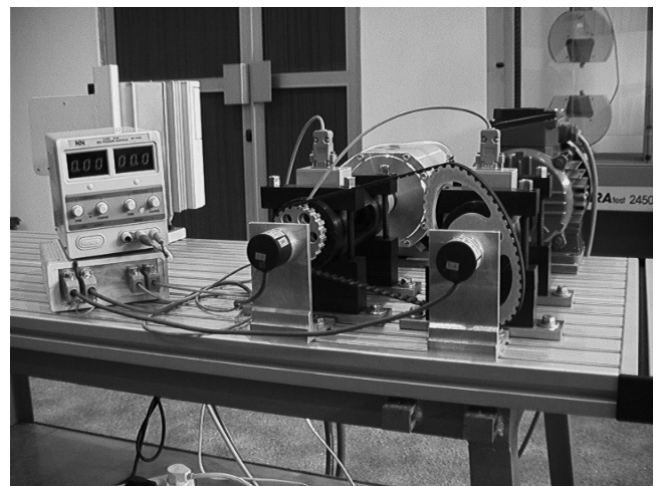
The problem of geometrical features measurements of non-circular belt pulleys used in uneven-running strand transmissions with a cogbelt is presented in the paper. The characteristic feature of these transmissions is possibility of obtaining the periodically variable kinematic features such as velocity or gear ratio thanks to application of belt pulleys with non-circular envelope to a classical strand transmission with the cogbelt. There are presented exemplary non-circular belt pulleys manufactured by different technologies. Proper determination of manufacturing errors of drive elements is a very important problem because of non-classical process of the cogbelt and belt pulley coupling. Due to the lack of standards determining the requirements concerning the measurement methodology and allowable values of geometrical features and surface stereometry for non-circular belt pulleys, this subject matter is very topical. There is presented the experimental approach to geometrical features measurements with coordinate measuring technique and CAD systems.

Keywords: non-circular belt pulleys, measurements of geometrical features, measurements of stereometry features, standards engineering.

1. Wstęp

Nierównobieżność biegu cięgna jest w wielu dziedzinach techniki niepożądana, szczególnie tam gdzie napędy mają zapewnić stałe przełożenia, prędkości i przyspieszenia. Niekiedy jednak zachodzi konieczność realizacji tych wielkości jako zmiennych. Pojawiły się, zatem dwa nurty badawcze. Pierwszy kierunek badań związany jest z ograniczeniem i minimalizacją nierównobieżności biegu pasa (cięgna w przekładni). Drugi polega na

wykorzystaniu tej cechy w praktyce przemysłowej do budowy przekładni nierównobieżnych. W tym celu niezbędne jest opracowanie metod zamierzonego kształtowania nierównobieżności kinematycznej i dynamicznej napędów. Oznacza to potrzebę zaprojektowania odmiennych funkcji i cech konstrukcyjnych przekładni takich jak: wywołania i kontrolowania zmiennego przełożenia, zmiennej prędkości i przyspieszenia pasa w przekładni podczas jednego obiegu. Temu właśnie celowi służą przekładni cięgowo, z kołami których obwody wieńców mają zarys elipsy, owalu, tarcz nieokrągłych (rys. 1). Z uwagi na brak precyzyjnych nazw na określenie obracających się elementów przekładni pasowej współpracujących z pasem zębatym przyjęto nazywać je tradycyjnie kołami, pomimo że zarys obwiedni ich wieńców nie jest okrągły [1-3].

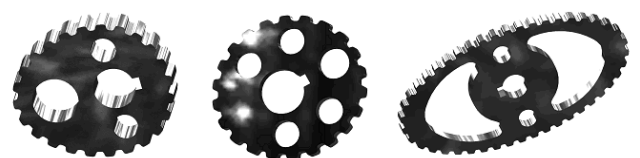


Rys. 1. Nierównobieżna przekładnia cięgowo z pasem zębatym
Fig. 1. Uneven-running strand transmission with cogbelt

2. Metody kształtowania kół nieokrągłych

Problematyka projektowania i kształtowania uzębień nieokrągłych kół zębatych stosowanych np. w obiegach silników hydraulicznych była już prezentowana w pracach [4, 5]. Nieco inne zagadnienie z uwagi na charakter współpracy koła z pasem zębatym stanowi wytwarzanie nieokrągłych kół pasowych. W dostępnym piśmiennictwie niewiele jest informacji o projektowaniu i kształtowaniu takich uzębień.

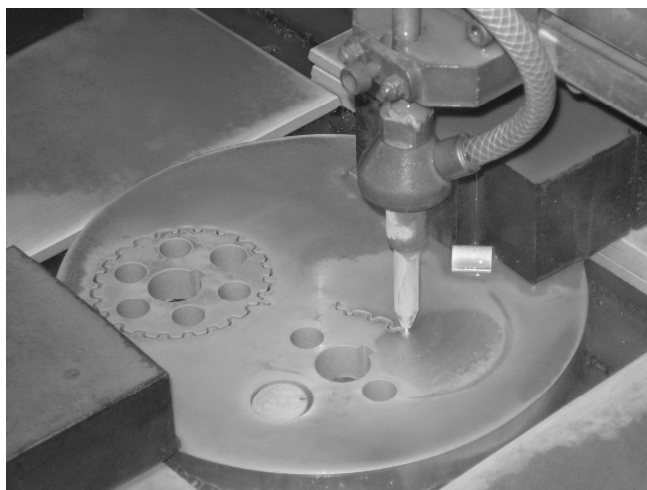
Poszukiwanie dokładnych i tanich metod wytwarzania stało się jednym z zadań, których rozwiązanie umożliwiłoby powszechniejsze stosowanie w technice sterowania i napędu nierównobieżnych przekładni cięgowych.



Rys. 2. Koła nieokrągłe stosowane w nierównobieżnych przekładniach cięgowych
Fig. 2. Non-circular belt pulleys used in uneven-running strand transmissions

Analogicznie jak w przypadku obróbki kół okrągłych, zagadnienia związane z metodami wytwarzania kół nieokrągłych można podzielić na:

- obróbkę skrawaniem w której tradycyjnie można wyróżnić metodę kształtową, obwiedniową oraz punktową zwaną dawniej kopiową. Tradycyjnie metoda kopiowa polegała na przeniesieniu zarysu (profilu) z koła wzorcowego na koło obrabiane z zastosowaniem sprzężenia mechanicznego. Aktualnie w obrabiarkach CNC przeniesienie informacji o cechach geometrycznych koła następuje na drodze mechatronicznej przez zastosowanie do sterowania klasycznym narzędziem sterowania numerycznego. Zasada ta jest zastosowana zarówno w procesie frezowania frezem palcowym, obróbce części na elektrodrażarkach, gdzie rolę narzędzia pełni odpowiednio dobrany drut (WEDM – Wire Electrical Discharge Machining). Pełna analogia do tego procesu zachodzi także na wycinarkach CNC, gdzie narzędziem jest gaz, strumień wodny ze ścierniwem (rys.3) lub plazma.
- obróbkę plastyczną,
- technologię spiekania proszków metali.



Rys. 3. Kształtowanie zarysu koła eliptycznego z zastosowaniem cieciska strumieniem wody ze ścierniwem

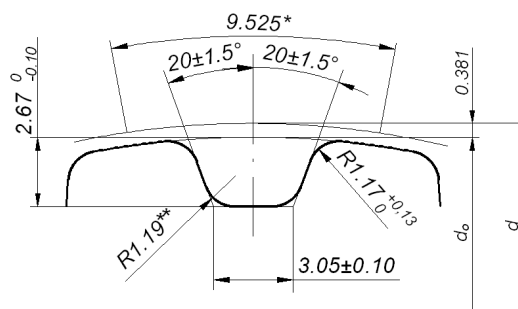
Fig. 3. Profile forming of elliptical pulley with use of water stream and abrasive cutting

3. Pomiary cech geometrycznych i stereometrii powierzchni pasowych kół nieokrągłych

Grubość nieokrągłych kół pasowych zaprojektowano jako równą $15 \pm 0,1$ mm. Wykonane różnymi metodami uzębienia kół nieokrągłych (rys.2) zostały porównane według opracowanych kryteriów na które składają się: poprawność odwzorowania zaprojektowanych cech geometrycznych i stereometrii powierzchni, złożoność przygotowania procesu technologicznego, koszt wytworzenia określonej partii kół. W celu przeprowadzenia tych analiz opracowano między innymi procedury eksperymentalnej weryfikacji poprawności wykonania kół.

Należy wskazać, iż w ogólnie znanym piśmiennictwie technicznym brak jest wymagań dotyczących standaryzacji w zakresie dokładności odwzorowania cech geometrycznych jak i stereometrii powierzchni nieokrągłych kół zębatach i pasowych. Dotychczas opisane są wyłącznie standardy dotyczące dokładności wykonania okrągłych kół pasowych o zarysie trapezowym (rys. 4). Działania w tym zakresie powinny uwzględniać dwa kierunki badań. Pierwszy z nich dotyczący opracowania standardów ujmujących nieopisane postacie uzębienia kół pasowych (zarys ewolwentowy, półokrągły). Drugi kierunek powinien obejmować charakterystykę wymagań w zakresie dokładności wykonania pasowych kół nieokrągłych. Dopuszczalne wartości granicznych odchyłek

średnicy zewnętrznej oraz błędy podziałek dla okrągłych kół pasowych według PN -84/M85211 zawarto w tabelach 1 i 2.



Rys. 4. Cechy geometryczne zarysu zęba kół pasowych według [6] (PN -84/M85211) dla podziałki typu L, gdzie: *- wartość według tabeli 2, **- wartość maksymalna

Fig. 4. Geometrical features of tooth profile of belt pulley according to PN -84/M85211 for pitch L - type, where: *- value according to table 2, **- maximal value

Tab. 1. Dopuszczalne odchyłki średnicy zewnętrznej klasycznych kół pasowych według PN-84/M85211

Tab. 1. Limiting deviations of belt pulleys according to PN-84/M85211

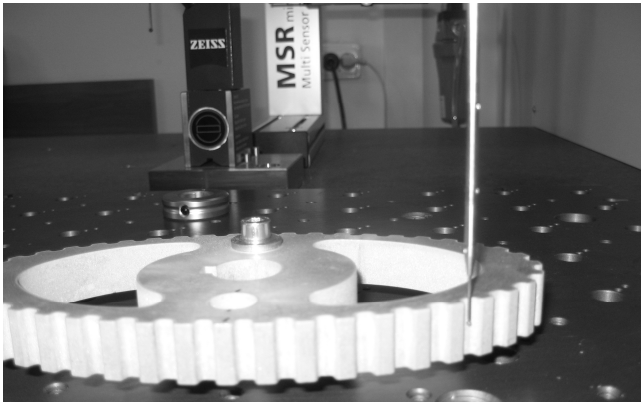
Średnica zewnętrzna koła d_0		Graniczne odchyłki	
powyżej	do	dolna	Górna
-	25,40	0	+0,05
25,40	50,80		+0,08
50,80	101,60		+0,10
101,60	177,80		+0,13
177,80	304,80		+0,15
304,80	508,00		+0,18
508,00	-		+0,20

Błędy podziałki dla kół pasowych określa się dla dwóch sąsiednich zębów oraz dla sumy podziałek objętych łukiem o kącie 90° . Wartości dopuszczalne oraz uzyskane w wyniku pomiarów zebrane w tabeli 2

Tab. 2. Dopuszczalne błędy podziałek dla klasycznych kół pasowych według PN-84/M85211

Tab. 2. Allowable pitch errors for classical belt pulleys according to PN-84/M85211

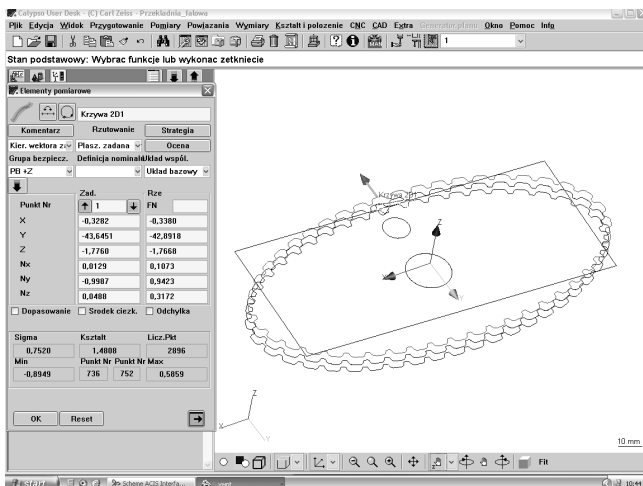
Średnica zewnętrzna koła d_0		Dopuszczalny błąd podziałki między sąsiednimi zębami	Dopuszczalne sumy błędów podziałek objętych 90° łukiem
powyżej	do		
-	25,40	0,03	0,05
25,40	50,80		0,08
50,80	101,60		0,10
101,60	177,80		0,13
177,80	304,80		0,15
304,80	508,00		0,18
508,00	-		0,20



Rys. 5. Pomiar cech geometrycznych koła nieokrągłego o kształcie eliptycznym na współrzędnościowej maszynie Zeiss Contura

Fig. 5. Measurement of geometrical features of non-circular (elliptical) belt pulley with coordinate measuring machine Zeiss Contura

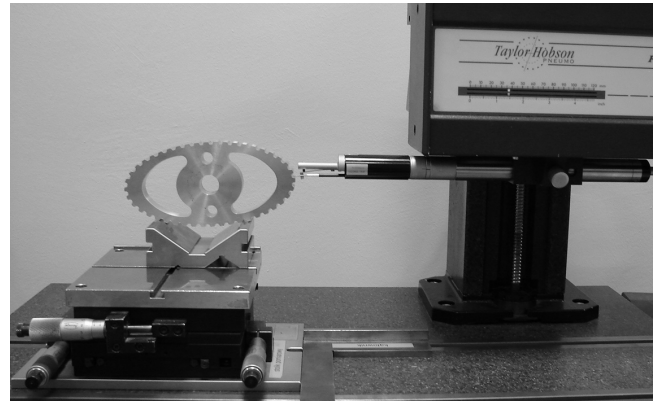
Polska Norma PN - 84/M85211 wskazuje, że tolerancja równoległości zębów względem osi koła wynosi 0,001 mm na każdy milimetr szerokości wieńca koła. Tolerancja stożkowości koła nie powinna przekraczać 0,001 mm na każdy milimetr szerokości wieńca koła. Pomiaru zarysu zewnętrznych przykładowych kół pasowych (rys. 5) wykonanych z zastosowaniem zestawu frezów palcowych, freza kształtowego, cięcia wodą ze ścierniwem, cięcia laserem gazowym, wycinania elektroerozyjnego (WEDM), oraz selektywnego spiekania laserem dokonano w trzech równoległych płaszczyznach prostopadłych do osi obrotu koła (rys. 6). Wspólną cechą zastosowanym metod wytwarzania było to, że nieokrągłe koła pasowe wykonano na uniwersalnych maszynach technologicznych sterowanych numerycznie. Do pomiarów cech geometrycznych zastosowano współrzędnościową maszynę pomiarową firmy Zeiss Contura. Proces pomiaru cech geometrycznych polegał na metodzie tzw. poszukiwania konturu. Natomiast pomiarów struktury stereometrii wykonanych kół (rys. 2) dokonano z zastosowaniem profilografometru firmy Taylor Hobson (rys. 7). Przykładowe wyniki tych pomiarów pokazano na rys. 8.



Rys. 6. Zarys koła eliptycznego uzyskany w wyniku pomiaru na współrzędnościowej maszynie pomiarowej

Fig. 6. Elliptical belt pulley profile obtained as a result of measurement with coordinate measuring machine

Wyniki pomiarów zapisano w pliku tekstowym (we współrzędnych biegunowych) zawierającym informacje o wartości promienia wodzącego oraz kąta skierowanego względem początku układu współrzędnych. Dla koła eliptycznego liczba zarejestrowanych punktów wynosiła 3000. Pliki z wynikami zostały przetworzone na zapis wymagany przez systemy CAD za pomocą programu opracowanego przez autora w środowisku Visual Basic.



Rys. 7. Pomiar cech chropowatości na profilografometrze Taylor Hobson

Fig. 7. Measurement of roughness features with profilograph from Taylor Hobson

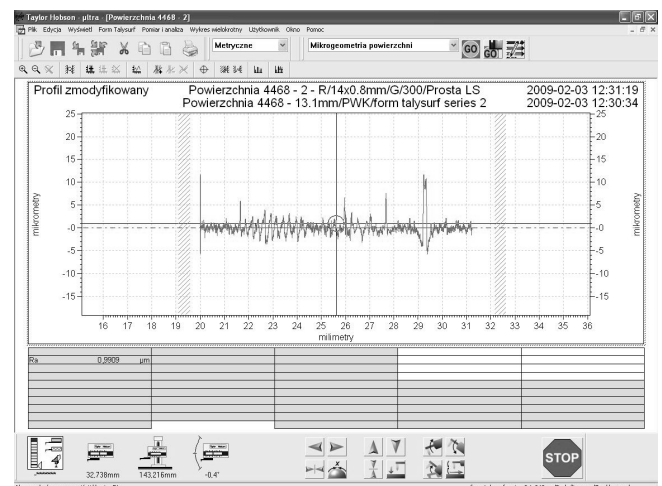
Przykładową postać modelu „wzorcowego” CAD na podstawie, którego opracowano program sterujący maszynami CNC zastosowanymi w procesie obróbki kształtującej kół oraz wyniki uzyskane z pomiaru na WMP ilustruje rysunek 9. Jedną z możliwości usprawnienia procesu weryfikacji uzyskanych tą metodą wyników może być wyznaczenie pola tolerancji dla „wzorcowego” zarysu z zastosowaniem krzywych offsetowych (równoodległych). Wiele współczesnych systemów CAD ma zaimplementowane procedury wyznaczania takich krzywych. Procedury te oparte są na równaniu parametrycznym krzywej:

$$P(t) = (x(t), y(t)) \quad (1)$$

Krzywą offsetową Ω o wartości odsunięcia (promienia) ρ można wyznaczyć z zależności:

$$\Omega(\rho, P(t)) = P(t) + \rho \frac{(y'(t), -x'(t))}{\sqrt{x'^2(t) + y'^2(t)}} \quad (2)$$

Bardzo ważne zagadnienie w przypadku wszystkich pomiarów realizowanych z zastosowaniem współrzędnościowej techniki pomiarowej stanowi dokładność maszyn. Zagadnienia te były szeroko opisywane w pracach [7, 8, 9]. W wyniku prowadzonych badań w różnych ośrodkach akademickich i badawczych powstało wiele metod weryfikacji pomiarów na WMP. Szereg z nich stanowi wewnętrzne procedury projekcyjne firm.



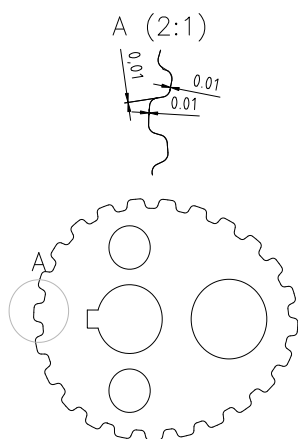
Rys. 8. Ilustracja wyników pomiaru chropowatości nieokrągłego koła pasowego z zastosowaniem urządzenia Taylor-Hobson

Fig. 8. Illustration of results of roughness measurement of non-circular belt pulley with device from Taylor-Hobson

Tab. 3. Zestawienie cech geometrycznych i stereometrii powierzchni kół nieokrągłych wykonanych różnymi metodami kształtowania

Tab. 3. A list of geometrical features and surface stereometry of non-circular belt pulleys manufactured by different forming methods

Cechy geometryczne i stereometrii powierzchni	Metody obróbki		
	Cięcie laserem gazowym	Cięcie Wodą ze ścierniwem	Selective Laser Sintering
R_a [μm]	6,861	2,676	4,533
Tolerancja zarysu zewnętrznego koła [mm]	$\pm 1,2$	$\pm 0,08$	$\pm 0,05$
Tolerancja równoległości zębów względem osi koła [mm]	$\pm 1,1$	$\pm 0,03$	$\pm 0,01$
Tolerancja stożkowości koła (dla szerokości 0,5") [mm]	$\pm 1,3$	$\pm 0,03$	$\pm 0,01$
Błędy podziałki dla kół pasowych (dwóch sąsiednich zębów) [mm]	1,5	0,04	0,05
Błędy podziałki dla kół pasowych (dla sumy podziałek objętych łukiem o kącie 90°) [mm]	5,3	0,10	0,10

Rys. 9. Zarys zaprojektowany oraz uzyskany w wyniku pomiaru na WMP
Fig. 9. Profile designed and obtained from measurement with CMM

Tab. 4. Zestawienie cech geometrycznych i stereometrii powierzchni kół nieokrągłych wykonanych różnymi metodami kształtowania

Tab. 4. List of geometrical features and surface stereometry of non-circular belt pulleys manufactured by different forming methods

Cechy geometryczne i stereometrii powierzchni	Metody obróbki		
	Frez kształtowy	Frez palcowy	WEDM
R_a [μm]	0,348	0,356	0,534
Tolerancja zarysu zewnętrznego koła [mm]	$\pm 0,1$	$\pm 0,02$	$\pm 0,02$
Tolerancja równoległości zębów względem osi koła [mm]	$\pm 0,01$	$\pm 0,02$	$\pm 0,02$
Tolerancja stożkowości koła (dla szerokości 0,5") [mm]	$\pm 0,01$	$\pm 0,02$	$\pm 0,02$
Błędy podziałki dla kół pasowych (dwóch sąsiednich zębów) [mm]	0,01	0,02	0,03
Błędy podziałki dla kół pasowych (dla sumy podziałek objętych łukiem o kącie 90°) [mm]	0,10	0,10	0,11

W tabelach 3 i 4 zestawiono podstawowe wyniki badań cech geometrycznych i struktury powierzchni nieokrągłych kół pasowych wykonanych różnymi metodami.

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono problematykę pomiarów cech geometrycznych nieokrągłych kół pasowych stosowanych w nierównobieżnych przekładniach cięgnowych z pasem z zębątem. Charakterystyczną cechą tych przekładni jest możliwość uzyskania okresowo zmiennych cech kinematycznych takich jak prędkość, przełożenie dzięki zastosowaniu w klasycznej przekładni cięgnowej z pasem zębątem kół o nieokrągłej obwiedni. Zaprezentowano stanowisko badawcze przekładni wykorzystane do weryfikacji zaprojektowanych cech geometrycznych napędu. W pracy zawarto ilustrację przykładowych pasowych kół nieokrągłych które wykonano różnymi technologiami. Bardzo ważne zagadnienia z powodu nieklasycznego przebiegu procesu sprzężenia pasa i kół stanowi poprawne wyznaczenie błędów wykonania elementów napędu [10]. Z uwagi na brak standardów określających wymagania odnośnie metodyki pomiaru oraz dopuszczalnych wartości odchyłek cech geometrycznych i stereometrii powierzchni dla nieokrągłych kół pasowych tematyka ta jest bardzo aktualna. Zaprezentowano eksperymentalne podejście do pomiarów cech geometrycznych z zastosowaniem współrzędnościowej techniki pomiarowej i systemów CAD. Przedstawione wyniki analiz wskazują, że w zakresie cech geometrycznych i stereometrii powierzchni niewskazane jest wykonywanie nieokrągłych kół pasowych metodą wycinania laserowego. Pozostałe metody cechują się dużym podobieństwem uzyskanych wyników. Wrażym kryterium decydującym o powszechnym przyjęciu metody kształtowania uzębień nieokrągłych kół pasowych będą koszty. Należy pamiętać, że poza zilustrowanym w pracy zarysem trapezowym coraz powszechniej stosuje się w technice sterowania i napędu koła pasowe z zarysami półokrągłymi oraz ewolwentowymi. W Polsce brak jest standardów opisujących te zarysy i dlatego niezbędne jest ich opracowanie. Przyjęta technologia wykonania oraz metoda pomiaru powinna uwzględnić te nowe wymagania.

Zarówno metoda jak i wyniki badań mogą posłużyć do opracowanie wytycznych dla projektantów oraz technológów zajmujących się projektowaniem i wytwarzaniem nietypowych uzębień, jakie są stosowane w nieokrągłych kołach pasowych.

5. Literatura

- [1] M. Dudziak: Przekładnie cięgnowe, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1997.
- [2] Przegląd Mechaniczny, Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego, nr 4, 2005.
- [3] Przegląd Mechaniczny, Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego, nr 6, 2006.
- [4] Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, Komisja Budowy Maszyn Polskiej Akademii Nauk Oddział w Poznaniu, nr 2, 2006.
- [5] M. Kujawski: Mechanizmy obiegowe z nieokrągłymi kołami zębątemi. Podstawy projektowania i wykonania, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1992.
- [6] PN-84/M85211 Przekładnie pasowe zębąte. Koła pasowe zębąte. Wymiary.
- [7] Przegląd Mechaniczny, Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego, nr 9 (spec), 2005.
- [8] E Ratajczyk: Współrzędnościowa technika pomiarowa. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2000.
- [9] Pomiary Automatyka Kontrola, nr 9, 2007.
- [10] [Machine Dynamics Problems, Institute of Machine Design Fundamentals Warsaw University of Technology, nr 1, 2008.

Artykuł recenzowany