

OCENA LUZÓW TECHNOLOGICZNYCH W MODELOWYM ŁOŻYSKU ŚLIZGOWYM WYKONANYM METODĄ SLS

ASSESSMENT OF TECHNOLOGICAL CLEARANCE IN MODEL OF SLIDING BEARING MADE BY SLS TECHNOLOGY

Czesław KUNDERA¹, Tomasz KOZIOR¹

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki pomiarów luzów technologicznych modelowego łożyska ślizgowego wykonanego technologią przyrostową (RP). Celem przeprowadzonych badań była ocena wpływu parametrów procesu technologicznego selektywnego spiekania laserowego, głównie kierunku nakładania warstw, na pole tolerancji wybranych pasowań normalnych układu wałek-tuleja. Próbki wykonane zostały z proszku poliamidowego PA 2200. Proces „wydruku” próbek przebiegał w płaszczyźnie prostopadłej i równoległej do ich osi. Badania obejmowały pomiar średnicy i wyznaczenie odchyłek walcowości, okrągłości i prostoliniowości. Na podstawie wyników badań określono wpływ parametrów procesu SLS na dokładność elementów mechanizmów typu wałek-tuleja.

Słowa kluczowe: łożysko ślizgowe, selektywne spiekanie laserowe, luz technologiczny

Abstract: The paper presents the results of measurements of technological clearance simple mechanism consisting of a roller and sleeve (sliding bearing type). The aim of the study is to assess the impact of process parameters selective laser sintering, mainly direction the layering sintering on the tolerance of selected normal fit in system roller-sleeve. Samples were made from polyamide powder PA 2200, printing process proceeded in plane perpendicular and parallel to their axis. The study included measurement of diameter, cylindricity, roundness and straightness deviations. Base on the research result, the influence of these parameters of the SLS process on accuracy of the elements of mechanisms type roller-sleeve were determined.

Keywords: sliding bearing, selective laser sintering, technological clearance

1. WPROWADZENIE

Technologie przyrostowe (ang. Rapid Prototyping RP) umożliwiają szybkie wykonanie modeli, prototypów części oraz złożonych mechanizmów. Istotnym problemem tych technologii, a szczególnie technologii selektywnego spiekania laserowego proszków (SLS),

¹ Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Katedra Technologii Mechanicznej i Metrologii, Al. 1000-lecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

jest zjawisko skurczu wykonanych („wydrukowanych”) elementów, który wpływa na dokładność wymiarową. W przypadku elementów współpracujących ze sobą w różnych rodzajach połączeń, skurcz wpływa na założone pole tolerancji danego pasowania.

Otrzymanie założonego luzu w łożysku ślizgowym wykonanym z proszków polimerowych metodą SLS jest ważnym problemem konstrukcyjnym przy ich modelowaniu (prototypowaniu). Wiadomo jest, że poliamidy są często stosowane na rzeczywiste (w pełni funkcjonalne) konstrukcje łożysk ślizgowych. Ogólnie znane jest, że łożyska ślizgowe wykonane z termoplastów typu: fluoroplasty (PTFE), poliacetylu (POM), polietyleny oraz poliamidy, nie wymagają doprowadzenia do łożyska środka smarnego i nazywane są łożyskami bezobsługowymi, np. [5]. Tak więc, ustalenie wpływu parametrów procesu technologicznego SLS na tzw. luz technologiczny w łożyska ślizgowym ma istotne znaczenie praktyczne.

W literaturze można znaleźć wiele pozycji dotyczących badań wpływu parametrów technologii przyrostowych, w tym selektywnego spiekania laserowego, na dokładność wykonywanych elementów.

W pracy [7], autorzy analizowali wpływ gęstości dostarczanej energii oraz warunków przepływu ciepła na dokładność modeli. Ustalono, że istnieje optymalna wartość dostarczonej energii ze względu na dokładność modelu. W pracy [4] opisano badania wpływu kierunku wydruku i gęstości energii dostarczanej do spiekanej warstwy proszku na sztywność osiową mieszkań obciążonych wstępnie wewnętrznym ciśnieniem. Porównano również wartości teoretyczny z wynikami badań eksperymentalnych oraz wyznaczono wytrzymałość mieszkań na wewnętrzne ciśnienie rozrywające. Autorzy pracy [6] opisali wpływ poszczególnych parametrów procesu SLS, tzn. mocy lasera, odległości pomiędzy naświetleniami wiązką, grubością warstwy, prędkością oraz rodzajem skanowania, czasu skanowania i temperatury, na wartości skurczu materiału, który ma zasadniczy wpływ na dokładność wymiarową. Stwierdzono iż skurcz w technologii SLS jest funkcja 7 zmiennych, które należy analizować indywidualnie.

W niniejszej pracy omówiono problem wytwarzania elementów połączenia wał-tuleja modelującego łożysko ślizgowe z poliamidu PA 2200 wykorzystując technologię SLS. Przedstawiono technologię wykonywania współpracujących elementów połączenia oraz ich dokładność uzależnioną od kierunku usytuowania modeli na platformie roboczej maszyny. Określono również możliwości technologiczne uzyskania wymaganych pasowań.

2. ZASTOSOWANA TECHNOLOGIA

W opisywanych badaniach zastosowano technologię selektywnego spiekania laserowego realizowaną na maszynie Formiga P100 firmy EOS w Laboratorium Niekonwencjonalnych Technologii Wytwarzania KTMiM.

Technologia selektywnego spiekania laserowego jest jedną z najszybciej rozwijających oraz najdokładniejszych metod szybkiego prototypowania. Model bryłowy zapisany w ogólnie przyjętym formacie (.stl ang. Standard Triangulation Language) jest dzielony na warstwy, a następnie przy wykorzystaniu odpowiedniego układu optycznego i lasera CO₂ spiekana jest geometria danego przekroju. Proces ten powtarzany jest aż do zakończenia budowy modelu. Właściwości oraz dokładność wytwarzanych elementów uzależnione są od wielu parametrów procesu, takich jak: grubość spiekanej warstwy, kierunek wydruku, gęstości energii, temperatury komory wytwarzania oraz odstępy pomiędzy budowanymi modelami, które mają

zasadniczy wpływ na przewodzenie ciepła oraz na proces stygnięcia i towarzyszący temu skurcz. Materiałami stosowanymi w opisywanej technologii SLS były proszki poliamidowe PA 2200. Właściwości mechaniczne poliamidu PA 2200 przedstawiono w tabeli 1 [2].

Tabela 1. Właściwości mechaniczne poliamidu PA 2200 [2]

Właściwości mechaniczne	Wartość	Jednostka	Norma
Moduł Younga	1700	MPa	EN ISO 527
Udarność (23°C)	4.4	kJ/m ²	ISO 180/1A
Twardość Shore'a (15s)	75	-	ISO 868
Gęstość	930	kg/m ³	metoda EOS
Temperatura topnienia	176	°C	ISO 11357-1/-3

Poliamid PA 2200 charakteryzuje się wysoką odpornością na działanie agresywnych środków chemicznych oraz dużą odpornością na uderzenia. Temperatura mięknięcia poliamidów PA 2200 zbudowanych na bazie PA12 wynosi około 140°C, co pozwala na stosowanie tych materiałów na elementy pracujące w temperaturach wynoszących od -60 do około 110°C, stąd możliwość ich zastosowania jako materiał na łożyska ślizgowe.

3. PRÓBKI DO BADAŃ

Mając na uwadze prosty model łożyska ślizgowego, do badań wstępnych przyjęto próbki w postaci wałka i tulei o zadanej średnicy nominalnej ($\varnothing 24$ mm).

Wytypowano dwa rodzaje pasowania luźnego: 1) według stałego otworu H7/e8; 2) według stałego wałka F8/h6.

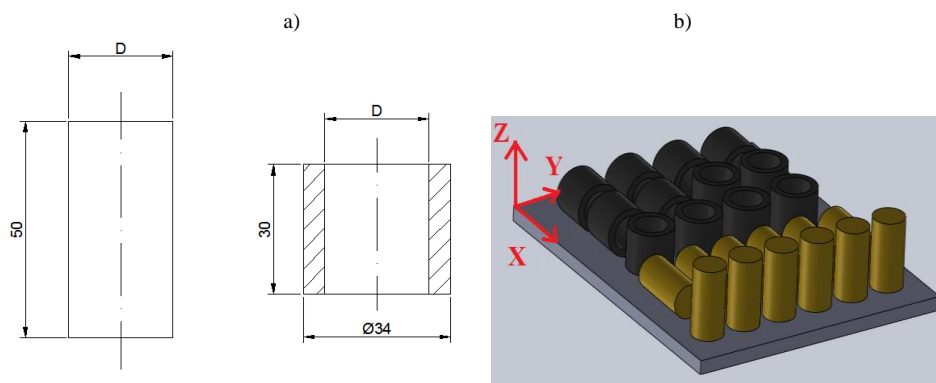
Graniczne wartości wskaźników (luzów) dla przyjętych pasowań, obliczone na podstawie normy PN-84/M-02103 [1] wynoszą odpowiednio: dla pierwszego wariantu

$P_1 = (40 \div 94) \mu\text{m}$, dla drugiego wariantu $P_2 = (20 \div 66) \mu\text{m}$.

Do badań przyjęto ostatecznie takie wymiary próbek (tulei i wałków), aby luz konstrukcyjny ich połączenia ślizgowego wynosił dla pierwszego pasowania 73 μm , oraz dla drugiego pasowania 53 μm .

Wymiary próbek oraz ich usytuowanie na wirtualnej platformie roboczej maszyny przedstawiono w tabeli 2 oraz na rysunku 1.

W procesie wytwarzania, modele cyfrowe próbek (Tabela 2) po triangulacji, tj. aproksymacji siatką trójkątów (pliki stl.), zostały przesłane do maszyny („drukarki”) Formiga P 100 realizującej technologię SLS. Na rysunku 2 pokazano wykonane fizyczne modele próbek do badań. Wykonano po 3 sztuki dla każdego rodzaju próbek opisanych w tabeli 2.



Rys. 1. Próbkki do badań: a) geometria, b) rozmieszczenie próbek na platformie

Tabela 2. Parametry próbek

Numer próbki	Rodzaj próbki	Wymiar "D" CAD [mm]	Usytuowanie na platformie
1	Walek e8	23.927	Równoległe
2	Walek e8	23.927	Prostopadłe
3	Tuleja H7	24.00	Równoległe
4	Tuleja H7	24.00	Prostopadłe
5	Walek h6	24.00	Równoległe
6	Walek h6	24.00	Prostopadłe
7	Tuleja F8	24.053	Równoległe
8	Tuleja F8	24.053	Prostopadłe



Rys. 2. Wykonane próbki do badań

Bardzo często używa się względnego parametru charakteryzującego proces spiekania, tj. gęstości dostarczonej energii. W opisanych badaniach gęstość energii obliczona według zależności (1) [4] wyniosła $E_s = 0.056 \text{ J/mm}^2$.

$$E_s = \frac{P}{vh} x \quad (1)$$

gdzie: E_s - gęstość energii [J/mm^2], P - moc lasera 21 [W], v - prędkość lasera 2500 [mm/s], $h = 0.25$ mm - odległość pomiędzy kolejnymi naświetleniami, $d = 0.42$ mm - średnica wiązki skupionej, $x = 1.68$ - współczynnik nakładania światła.

Jak już wcześniej zaznaczono na dokładność odwzorowania geometrii w technologii SLS wpływa skurcz materiału. W przedstawionych badaniach do oceny skurczu przyjęto współczynnik względny S (2).

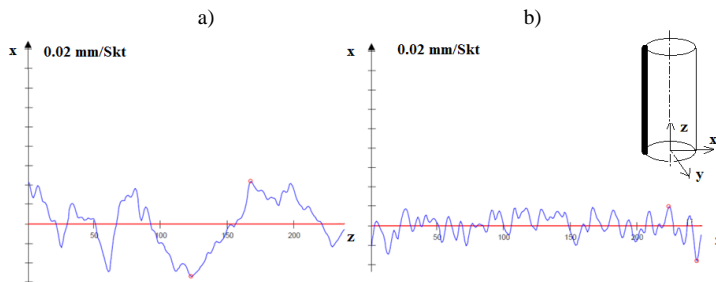
$$S = \left(\frac{D_{CAD} - D_{MEA}}{D_{CAD}} \right) * 100\% \quad (2)$$

gdzie: S - skurcz względny [%], D_{CAD} - wymiar zadany w programie CAD, D_{MEA} - wymiar zmierzony na modelach fizycznych.

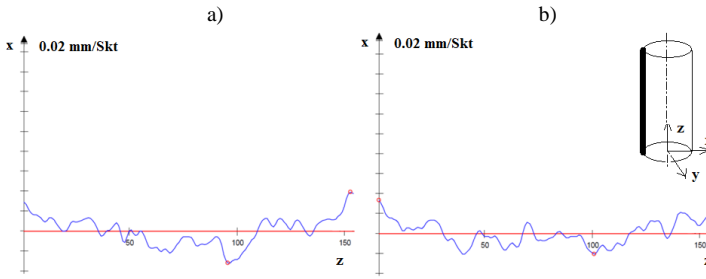
4. WYNIKI BADAŃ

Badania geometryczne obejmowały pomiar średnicy, wyznaczenie odchyłki walcowości, okrągłości i prostoliniowości. Pomiary średnic i odchyłki prostoliniowości wykonane zostały na współrzędnościowej maszynie pomiarowej Prismo Navigator firmy Zeiss o zakresie pomiarowym $X-900$ mm, $Y-1200$ mm i $Z-700$ mm. Maszyna charakteryzuje się wysoką dokładnością pomiarową wynoszącą $\pm (0.9 \mu m + L/350)$, gdzie L oznacza długość pomiarową. W przypadku pomiarów okrągłości oraz walcowości wykorzystano maszynę Talyrond 365 o rozdzielczości głowicy pomiarowej 1.2 nm i błędzie wrzeciona $\pm (0,02 \mu m + 0,0003 \mu m/mm)$. Wymienione pomiary wykonane zostały w Laboratorium Komputerowych Pomiarów Wielkości Geometrycznych KTMiM.

Na rysunkach 3,4 przedstawiono przykładowe wykresy pomiaru prostoliniowości dla próbek „wydrukowanych” równolegle oraz prostopadle do ich osi. Pomiar przebiegał wzdłuż wysokości walca, na rysunku 3 i 4 zaznaczony gruba linią.

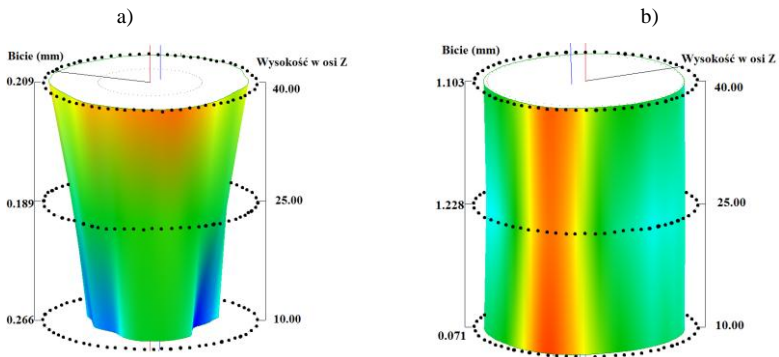


Rys. 3. Wykresy prostoliniowości próbek walcowych $\varnothing 24e8$:
a) próbki równolegle, b) próbki prostopadle

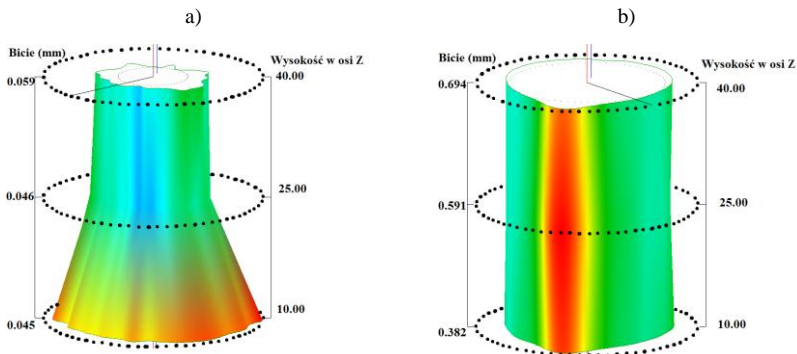


Rys. 4. Wykresy prostoliniowości tulei Ø24H7: a) próbki równoległe, b) próbki prostopadłe

Kolejne rysunki 5,6 przedstawiają przykładowe wykresy pomiaru walcowości dla próbek „wydrukowanych” równoległe oraz prostopadłe do ich osi. Wyznaczenie odchyłki walcowości [3] polegało na wykonaniu pomiarów w trzech przekrojach (co 15 mm) i obliczeniu wartości średniej.

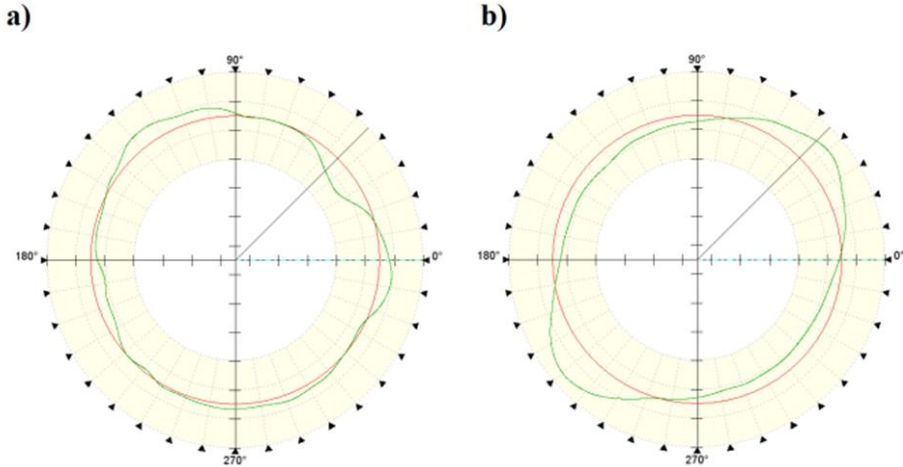


Rys. 5. Wykresy walcowości próbek walcowych Ø24e8: a) próbki równoległe, b) próbki prostopadłe

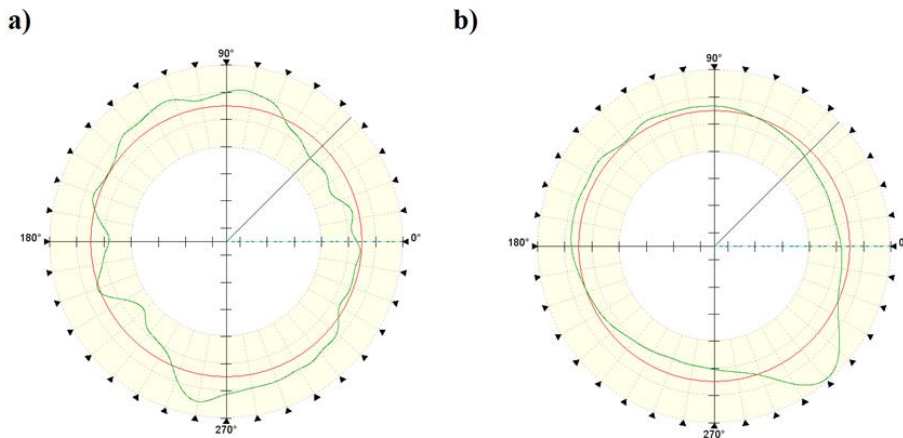


Rys. 6. Wykresy walcowości tulei Ø24H7: a) próbki równoległe, b) próbki prostopadłe

Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono przykładowe wykresy okrągłości na przekrojach środkowych próbek walcowych oraz tulei „wydrukowanych” równoległe oraz prostopadłe do ich osi dla pasowania e8/H7.

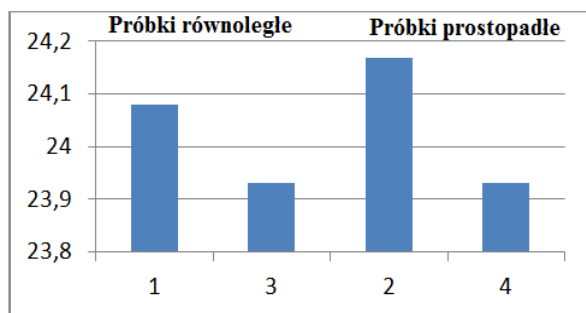


Rys. 7. Wykresy okrągłości próbek walcowych $\varnothing 24e8$: a) próbki równoległe, b) próbki prostopadłe

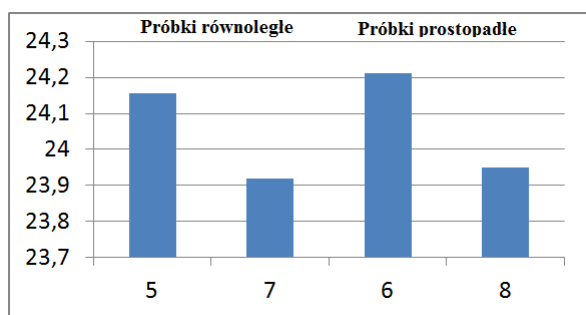


Rys. 8. Wykresy okrągłości tulei $\varnothing 24H7$: a) próbki równoległe, b) próbki prostopadłe

Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono wyniki pomiarów średnic próbek dla dwóch założonych pasowań. Zestawienie wyników pomiarów geometrycznych tj. średnic, procentowego skurczu, odchyłki walcowości, prostoliniowości oraz okrągłości zamieszczono w tabeli 3.



Rys. 9. Wymiary średnic dla pasowania H7/e8 1, 2, 3, 4 - numery próbek



Rys. 10. Wymiary średnic dla pasowania F8/h6 5, 6, 7, 8 - numery próbek

Tabela 3. Wyniki pomiarów próbek

Lp.	Wymiar D CAD [mm]	Wymiar D rzeczywisty [mm]	Odchyłka ΔD [mm]	Względny współczynnik skurczu	Odchyłka walcowości [mm]	Odchyłka prostoliniowości [mm]	Odchyłka okrągłości [mm]
1	23,927	24,083	-0,156	- 0,65	0,360	0,155	0,119
2	23,927	24,169	-0,242	- 1,01	0,332	0,061	0,278
3	24,00	23,926	0,073	0,31	0,095	0,056	0,039
4	24,00	23,932	0,067	0,28	0,409	0,056	0,373
5	24,00	24,155	-0,155	- 0,646	0,350	0,144	0,09
6	24,00	24,211	-0,211	- 0,881	0,451	0,057	0,360
7	24,053	23,917	0,136	0,565	0,066	0,053	0,038
8	24,053	23,954	0,099	0,412	0,365	0,049	0,333

W tabeli 4 zestawiono porównanie luzu konstrukcyjnego zadanego w modelu cyfrowym CAD z luzem technologicznym modeli fizycznych.

Tabela 4. Wskaźnik pasowania w zależności od kierunku budowy modelu

Rodzaj pasowania	Sposób budowy modelu	Wskaźnik pasowania	
		Konstrukcyjne [mm]	Technologiczne (po „wydruku” [mm])
Ø24 H7/e8	równoległe	0,073	-0,156
	prostopadłe	0,073	-0,237
Ø24 F8/h6	równoległe	0,053	-0,102
	prostopadłe	0,053	-0,158

Na podstawie wyników pomiaru i obliczonych luzów technologicznych (Tabela 4) można stwierdzić, że występują istotne różnice pomiędzy wymiarami zadanymi w modelach cyfrowych CAD, a wymiarami zmierzonymi na modelach fizycznych. Ostatecznie w modelach fizycznych badanego połączenia wałek-tuleja dla wszystkich układów nie otrzymano pasowania luźnego. W przypadku modeli fizycznych wałków, wymiary średnic były większe średnio o 0,2 mm dla pasowania e8 i 0,25 mm dla h6 w porównaniu do zadanych wartości. Średnie wymiary średnic otworów tulei były mniejsze o 0,07 mm dla pasowania H7 i 0,11 mm dla pasowania F8 w porównaniu do zadanych wymiarów CAD. Ostatecznie wskaźnik pasowania H7/e8 wyniósł -0,156 mm dla wydruku równoległego i -0,237 mm dla „wydruku” prostopadłego oraz odpowiednio dla pasowania F8/h6 -0,102 mm i -0,158 mm.

Odchyłka walcowości otworów tulei wykazuje znaczne różnice w zależności od kierunku „wydruku”. Najmniejsze odchyłki walcowości uzyskano dla tulei wykonanych („wydrukowanych”) równoległe do ich osi. Odchyłka walcowości dla wałków nie wykazuje znaczących różnic w zależności od kierunku „wydruku”.

Modele „wydrukowane” prostopadłe do ich osi wykazują znacznie większe odchyłki okrągłości, pomimo bardziej regularnych kształtów.

Odchyłka prostoliniowości w przypadku wałków jest ponad dwukrotnie mniejsza dla modeli „wydrukowanych” prostopadłe do ich osi, w porównaniu do modeli „wydrukowanych” równoległe do osi. W przypadku tulei brak jest wpływu kierunku „wydruku” na odchyłkę prostopadłości.

5. PODSUMOWANIE

Przedstawione wyniki badań pokazują, że kierunek „wydruku” ma istotny wpływ na dokładność odwzorowania zapewniającą wymagane pasowanie. „Wydruk” modeli bez odpowiednich korekt geometrii nie pozwala na uzyskanie wymaganego pasowania.

Efekt schodkowy charakterystyczny dla technologii przyrostowych jest bardzo wyraźnie zauważalny przy „wydruku” prostopadłym do osi próbek, co niekorzystnie wpływa na jakość warstwy wierzchniej współpracujących mechanizmów i może powodować ich podwyższone zużycie.

W przypadku zbyt niskiego pola tolerancji, w modelu 3D należy wprowadzić odpowiednią korektę gwarantującą uzyskanie wymaganego pola tolerancji. Korekta ta powinna być większa dla wałków, gdzie błąd odwzorowania geometrii jest większy, a mniejsza dla otworów.

Proces projektowania powinien również uwzględnić odchyłki prostopadłości i walcowości, a także okrągłości, których wielkość również uzależniona jest od kierunku „wydruku”.

Przedstawione wyniki badań wstępnych świadczą, że skurczu materiału w procesie technologicznym SLS istotnie wpływa na dokładność wykonywanych modeli.

Badania opisane w pracy przeprowadzono przy użyciu aparatury zakupionej w ramach projektu pt. "LABIN - Wsparcie dla innowacyjnych badań na Politechnice Świętokrzyskiej w Kielcach". Program Operacyjny Rozwój Polski Wschodniej w latach 2007-2013. Priorytet 1 - Innowacyjna Gospodarka, Działanie 1.3 - wsparcie dla projektów badawczo-rozwojowych.

LITERATURA

- [1] ADAMCZAK S, MAKIEŁA W., *Metrologia w budowie maszyn*, Warszawa, WNT, 2004.
- [2] EOS COMPANY., *Formiga P100 - User Manual*, Monachium, 2008.
- [3] JANECKI D, ADAMCZAK S, STĘPIEŃ K., *Problem of profile matching in sphericity measurements by the radial method*, Metrology and Measurement Systems, No 4, pp. 703-714, 2012.
- [4] KUNDERA CZ, KOZIOR T., *Elastic bellows prepared by selective laser sintering*, Applied Mechanics and Materials, Vol. 630, pp. 318-325, 2014.
- [5] LAWROWSKI Z., *Bezobsługowe łożyska ślizgowe*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2001.
- [6] WANG R, WANG L, ZHAO L, LIU Z., *Influence of process parameters on part shrinkage in SLS*, Vol. 33, pp. 498-504, 2014.
- [7] WILLIAMS JD, DECARD CR., *Advance in modeling the effects of selected parameters on the SLS process*, Rapid Prototyping Journal, 4(2), pp. 90-96, 1998.