

mgr inż. Łukasz KĘDZIA, dr inż. Hanna WIŚNIEWSKA-WEINERT,
mgr inż. Justyna OZWONIAREK
Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań

Samosmarna tuleja łożyskowa z proszków spiekanych dla przemysłu lotniczego

Sintered powder self-lubricating bearing sleeve for the aviation industry

Streszczenie

W Instytucie Obróbki Plastycznej w Poznaniu przeprowadzone zostały badania w celu zamiany grafitowych łożysk ślizgowych na tuleje ślizgowe wytwarzane z materiałów proszkowych. Zgodnie z projektem V Programu Ramowego o akronimie TRIBO, wytworzona została partia próbna tulei ślizgowych i przesłana na testy eksploatacyjne. Próbkę została poddana badaniom na specjalnym wysokotemperaturowym stanowisku badawczym w LTS-Tuluza, Francja. Badania wykonane w Instytucie Obróbki Plastycznej zawierały: określenie składu chemicznego powierzchni tulei ślizgowych oraz wałka, celem określenia charakteru zużycia podczas pracy w wysokiej temperaturze, określenie chropowatości powierzchni pary trącej po testach eksploatacyjnych w LTS-Tuluza, Francja, obserwacje mikrostruktury oraz mikrotwardości pary trącej po testach eksploatacyjnych w LTS-Tuluza, Francja.

Abstract

The Metal Forming Institute in Poznań has performed investigation aiming at substitution of graphite bearing sleeves with bearing sleeves made of powder materials. Within the TRIBO project of Framework Program V, a pilot batch of bearing sleeves has been made and sent for exploitation tests. The samples have been examined on a special high temperature test stand in LTS – Toulouse, France. The examination performed by the Metal Forming Institute included :determination of the chemical composition of the surface layer of the sleeve and the shaft in order to define the character of wear during high temperature operation, determination of the roughness of the friction couple surfaces after the exploitation tests performed by LTS – Toulouse, France. examination of the microstructure and microhardness of the friction couple after the exploitation tests in LTS – Toulouse, France.

Słowa kluczowe: materiał proszkowy, dylatacja, rozszerzalność cieplna, tuleja ślizgowa

Key words: powder material, dilatation, thermal expansion, bearing sleeve

1. WSTĘP

W Instytucie Obróbki Plastycznej prowadzone są badania dotyczące optymalizacji parametrów procesów wytwarzania oraz właściwości użytkowych spiekanych części proszkowych. Prowadzone są badania procesów wytwarzania części z materiałów proszkowych na bazie żelaza, na bazie proszków stali nierdzewnej oraz proszków metali nieżelaznych. Potencjalne możliwości zastosowania materiałów na

bazie proszku stali nierdzewnej istnieją przede wszystkim w przemyśle spożywczym, motoryzacyjnym oraz lotniczym.

Główne problemy wynikające ze zmiany dotychczas stosowanych wyrobów z materiałów litych na części z proszków spiekanych dotyczą problemu zapewnienia wysokiej dokładności wykonania tych części przy minimalnej ilości operacji oraz zapewnieniu wysokiej wytrzymałości i trwałości. Wysoką wytrzymałość i trwałość wyrobów z proszków

spiekanych uzyskuje się głównie dzięki wysokiej gęstości materiału oraz optymalizacji jego struktury i nanostruktury.

Specjalne wymagania stawiane są wyrobom stosowanym w przemyśle lotniczym pracującym w trudnych warunkach: w wysokiej temperaturze i wilgotności. Tuleje łożyskowe oraz łożyska toczne w przemyśle lotniczym wymagają stosowania specjalnych smarów twardych, nadających się do pracy w wysokich temperaturach i odpornych na utlenianie. Najczęściej w węzłach tarcia w warunkach wysokotemperaturowych stosowane są ślizgowe łożyska grafitowe. Jednak ich niska odporność na zużycie i kruchość ogranicza eksploatację takich łożysk.

Jednym z kierunków prac wykonywanych w Instytucie Obróbki Plastycznej w Centrum Doskonałości są badania związane ze zmianą grafitowych tulei łożyskowych na tuleje ślizgowe wykonane z materiałów spiekanych impregnowanych nanocząstkami smaru twardego.

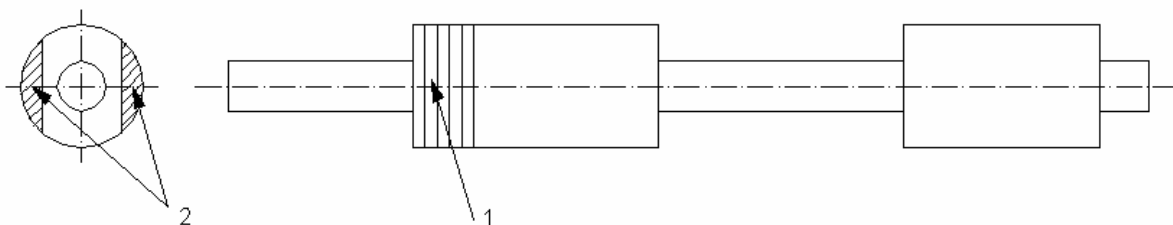
W Instytucie, w ramach V Programu Ramowego o akronimie TRIBO, wykonano partię pilotażową tulei ślizgowych układów wentylacyjnych do samolotów AIRBUS 380 i przekazano je do badań eksploatacyjnych producentowi – LTS-Tuluza we Francji. Łożyska badano w LTS-Tuluza na specjalnym wysokotemperaturowym stanowisku przeznaczonym do badań eksploatacyjnych.

Oprócz wykonania partii pilotażowej tulei z proszków spiekanych przeprowadzono w Instytucie Obróbki Plastycznej w Poznaniu badania, które obejmowały:

- określenie składu chemicznego warstwy wierzchniej tulei i współpracującego z nią wału w celu wyjaśnienia charakteru zużycia podczas pracy w wysokiej temperaturze,
- określenie chropowatości powierzchni ślizgowych pary trącej po testach eksploatacyjnych w LTS-Tuluza,,
- badania mikrostruktury oraz mikrotwardości materiałów pary trącej po testach eksploatacyjnych w LTS-Tuluza.

2. METODYKA BADAŃ

Celem przeprowadzenia badań wałka po testach eksploatacyjnych w LTS-Tuluza, wycięto próbki zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 1. Wycięte próbki poddane zostały badaniom chropowatości, mikrotwardości oraz mikrostruktury warstwy wierzchniej. Przeprowadzono także badania mające na celu ocenę rozkładu mikrotwardości w przekroju wałka. Tuleje, podobnie jak wałek, poddane zostały badaniom chropowatości, mikrotwardości. Przeprowadzono także obserwację mikrostruktury warstwy wierzchniej tulei.



Rys. 1. Schemat pobrania próbek z wałka: 1 – warstwa odkształcona w trakcie eksploatacji, 2 – miejsce pobrania próbek do badań

Fig. 1. Shaft sampling scheme: 1 – layer deformed in service, 2 – test sampling location

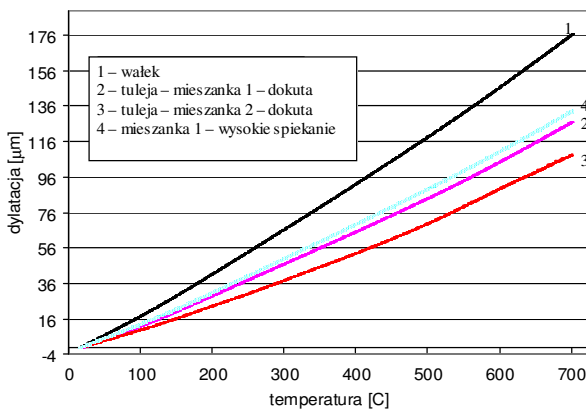
3. WYNIKI BADAŃ

3.1. Badania dylatometryczne

Dla wykonania badań dylatometrycznych pobrane zostały próbki z wałka oraz dwu tulei :

- tulei wykonanej z mieszanki proszkowej na bazie proszku stali nierdzewnej 316L, oznaczonej jako mieszanka 1,
- tulei wykonanej z materiału proszkowego na bazie mieszanki proszkowej Ni 80%- Cr 20%, oznaczonej jako mieszanka 2.

Otrzymane wyniki w postaci zależności dylatacji od temperatury przedstawione są na rys. 2.

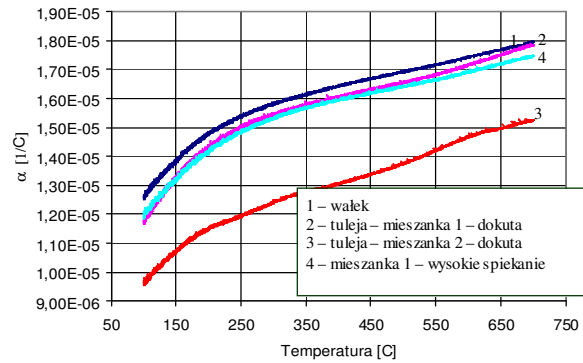


Rys. 2. Zależność dylatacji od temperatury materiałów wałka i tulei

Fig. 2. Dependence of dilatation on the temperature of the shaft and sleeve materials

Wyniki świadczą, że tuleja ze stopu niklowo-chromowego (mieszanka nr 2) ma mniejszy współczynnik rozszerzalności termicznej w porównaniu z materiałem wałka. W temperaturze 250 °C współczynnik rozszerzalności termicznej dla wałka wynosi $1,5 \cdot 10^{-5}$, dla mieszanki proszkowej nr 2 wynosi $1,2 \cdot 10^{-5}$. Spowodowało to, że deformacja materiału wałka i tulei różniła się znacznie: wydłużenie wałka wynosiło 0,004 mm w porównaniu z wydłużeniem tulei 0,003 mm.

Charakter zmiany współczynnika liniowej rozszerzalności termicznej zależy od rodzaju materiału tulei i wałka (rys. 3).



Rys. 3. Zależność współczynnika liniowej rozszerzalności cieplnej od temperatury materiałów wałka i tulei

Fig. 3. Dependence of the coefficient of linear thermal expansion on the temperature of the shaft and sleeve materials

Analiza wyników badań wykazuje, że podczas pracy tulei wykonanych z mieszanki proszkowej nr 2 w temperaturze eksploatacji 500 °C następuje zmniejszenie się luzu między wałkiem a tuleją, powodując zatarcie się pary. Niezbędna jest więc optymalizacja składu chemicznego składu mieszanki proszkowej dla osiągnięcia podobnych współczynników rozszerzalności termicznej współpracujących elementów wałka i tulei. Dla mieszanki proszkowej nr 1 (rys. 3) zaobserwowano najbardziej zbliżone współczynniki rozszerzalności termicznej obu elementów.

3.2. Badania chropowatości i mikrostruktury

3.2.1. Badania wałka

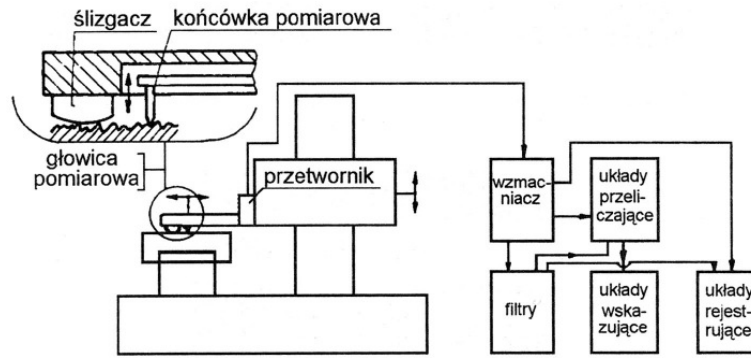
A. Badania chropowatości

Przeprowadzono pięć pomiarów chropowatości Ra wzdłuż tworzącej wałka.

Długość odcinka pomiarowego $0,8 \times 5 = 4$ mm. Schemat profilografometru SURTRONIC 3+ przedstawiono na rys. 4.

Wyniki badań przedstawiono w tablicy 1, natomiast otrzymane profilogramy na wykresach – rys. 5.

Na rys. 6 przedstawiono profilogram chropowatości wzorca chropowatości $Ra = 6 \mu\text{m}$.



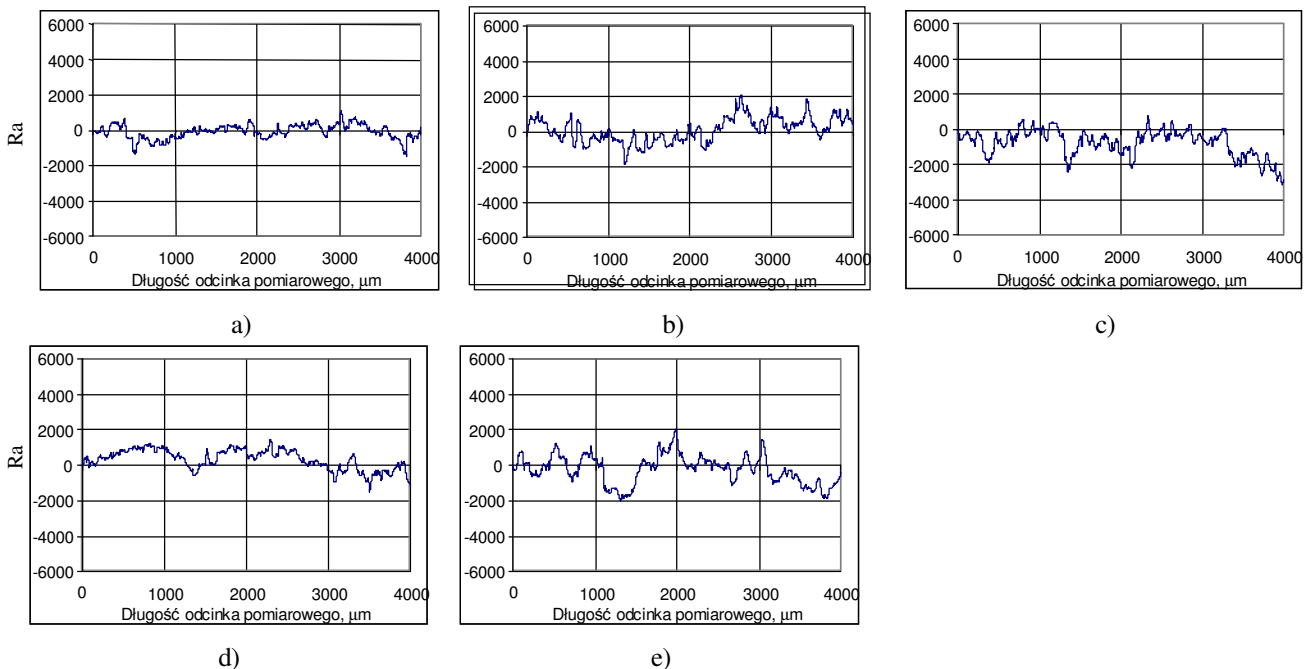
Rys. 4. Schemat profilografometru SURTRONIC 3+

Fig. 4. Diagram of the SURTRONIC 3+ profilographometer

Tablica 1. Parametry chropowatości Ra powierzchni wałka (ścieżka 1)

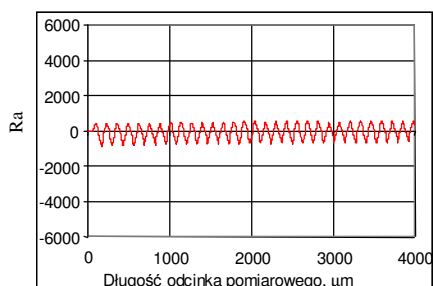
Table 1. Parameters of Ra roughness of the shaft surface (path 1)

część	pomiar	Ra	Rq	Rz	Rt	Ry	Sm
Wałek	1	3,6	4,6	21	28	28	185
	2	5,6	7,4	28	42	35	215
	3	3,4	4,4	21	30	27	146
	4	4	5,2	21	30	28	173
	5	2,8	3,6	16	22	22	144
	średnia		3,88	5,04	21,4	30,4	28



Rys. 5. Profilogramy chropowatości Ra powierzchni wałka: a) ścieżka 1, b) ścieżka 2, c) ścieżka 3, d) ścieżka 4, e) ścieżka 5 (pomiar 1)

Fig. 5. Ra roughness profilograms: a) path 1, b) path 2, c) path 3, d) path 4, e) path 5 (measurement 1)



Rys. 6. Profilogram chropowatości wzorca chropowatości $R_a = 6 \mu\text{m}$

Fig. 6. Roughness profilogram of the roughness model, $R_a = 6 \mu\text{m}$

B. Obserwacje mikroskopowe i badania mikrotwardości

Na rys. 7÷9 przedstawiono struktury obszarów przypowierzchniowych wałka współpracujące z tuleją ślizgową. Widoczne jest wymieszanie się materiału i odkształcenie powierzchni wskutek czego twardość badanych obszarów jest dużo wyższa niż twardość rdzenia badanego wałka. Mikrotwardość HV0,01 rdzenia i obszarów przypowierzchniowych tulei nr 1 i 2 odkształconych podczas eksploatacji przedstawiono na rys. 10÷11 i w tabelicy 2.

Badany wałek został wykonany ze stali austenitycznej. Świadczą o tym granice bliźniacze widoczne na trawionym zglądzie metalograficznym (rys. 9c). W wyniku eksploatacji warstwy przypowierzchniowe uległy silnemu odkształceniu - rys. 9 a, b. Mikrotwardość w tych obszarach jest dużo wyższa niż w rdzeniu badanego wałka.

Tablica 2. Mikrotwardość na zglądzie wzdłużnym wałka

Table 2. Microhardness on a longitudinal microsection of the shaft

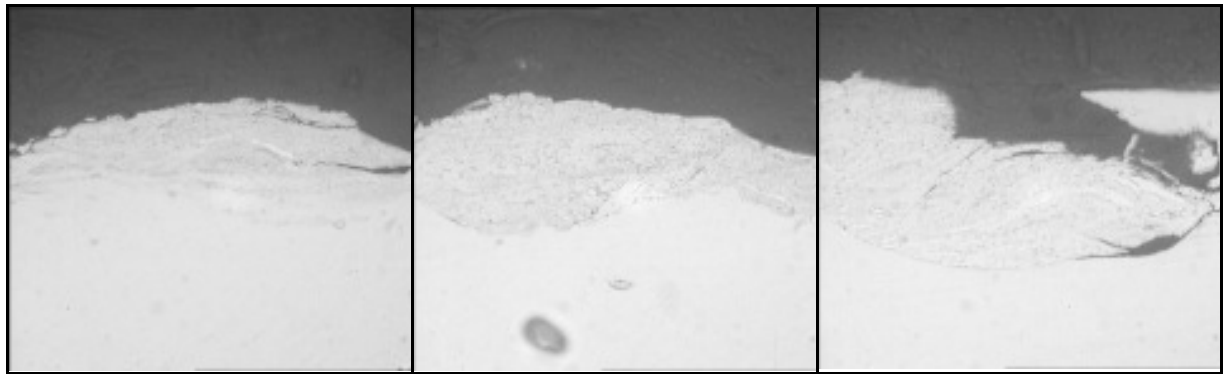
Lp.	Rdzeń HV 0,01	Obszary przypowierzchniowe HV 0,01
1	551	916
2	591	876
3	533	876
4	467	1050
5	467	1159
6	521	915
średnia	522	965

Z analizy wykresów (rys. 5, 6) oraz zglądów metalograficznych (rys. 7, 8, 9) wynika, że zużycie wysokotemperaturowe wałka jest wynikiem zmiany struktury konglomeratów zgromadzonych cząstek zużycia w procesie tarcia ślizgowego. Porównanie mikrotwardości sworznia (część środkowa wałka) z mikrotwardością warstwy wierzchniej w strefie obecności konglomeratów cząstek zużycia (tablica 2) wskazuje na znaczne umocnienie w warstwie powierzchniowej. Charakterystyczne jest, że pomimo wysokiej temperatury w lokalnych obszarach kontaktowych współpracujących ze sobą powierzchni ślizgowych, nie zauważa się efektu rekrytalizacji i odprężania cząsteczek zużycia. Zauważa się znaczne umocnienie materiału (anomalnie wysokie wartości mikrotwardości) charakterystyczne dla martenzytycznych i różnego rodzaju dyspersyjnych faz (800-1000 HV). W konglomeratach cząstek zużycia praktycznie nie istnieje porowatość w rejonach ich styku z powierzchnią wałka, przy czym adhezyjna wytrzymałość z materiałem wałka jest duża. Analiza struktury przekrojów warstw powierzchniowych wałka po trawieniu (rys. 9) wykazuje warstwową strukturę konglomeratów cząstek zużycia. Prawdopodobnie, podczas pracy łożyska ślizgowego w wysokiej temperaturze następuje stabilny w czasie proces gromadzenia się cząstek zużycia w odpowiednich mikroplaszczynach, które są jakby zbiornikiem dla tych cząstek. Analiza składu chemicznego konglomeratów cząstek zużycia materiału wałka wykazała, że głównym produktem zużycia są cząstki metalowe, oddzielone właśnie od wałka a nie od tulei.

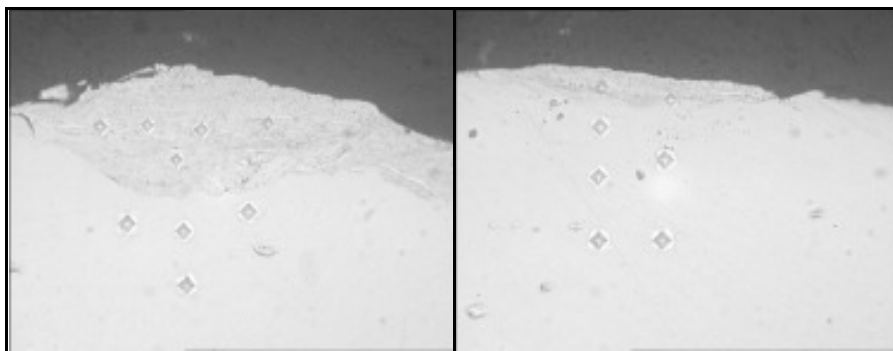
3.2.2. Badania tulei

A. Badania chropowatości

Badaniom poddano tuleje oznaczone nr 1 i nr 2. Pomiar chropowatości R_a przeprowadzono na powierzchni wewnętrznej tulei. Wyniki badań przedstawiono w tabelicy 3, natomiast profilogramy chropowatości R_a powierzchni wewnętrznej tulei nr 1 i nr 2 na wykresach (rys. 10 i 11). Podczas pomiaru zachowano te same ustawienia jak podczas pomiarów na wałku.

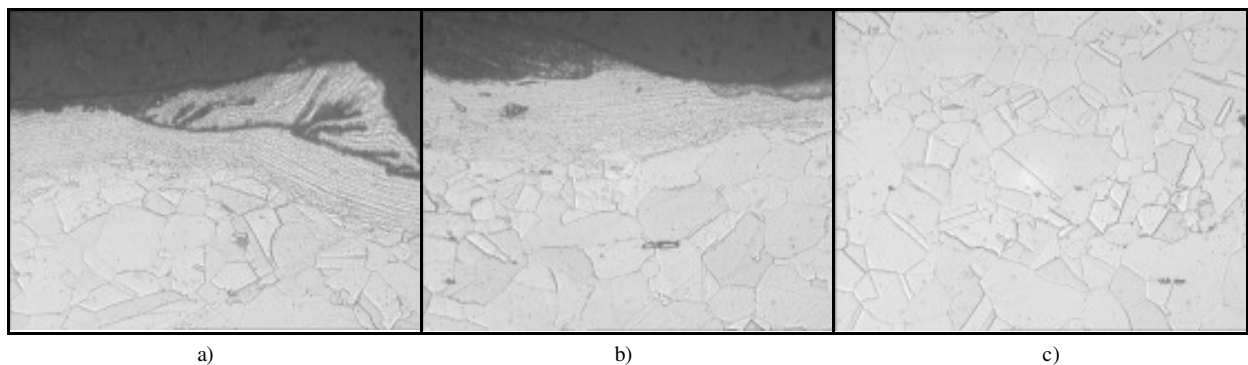


Rys. 7. Struktura obszarów przypowierzchniowych wałka – zgląd metalograficzny nietrawiony; pow. 500x
 Fig. 7. The structure of the shaft surface layers – unetched metallographic microsection; magnification 500x



Rys. 8. Struktura obszarów przypowierzchniowych wałka z widocznymi odciskami twardości HV0,01 – zgląd metalograficzny nietrawiony; pow. 500x

Fig. 8. Structure of the surface areas of the shaft with visible HV0,01 hardness indentations – unetched metallographic microsection; magnification 500x



Rys. 9. Struktura obszarów przypowierzchniowych (a, b) i rdzenia (c) wałka – zgląd metalograficzny trawiony, pow. 500x

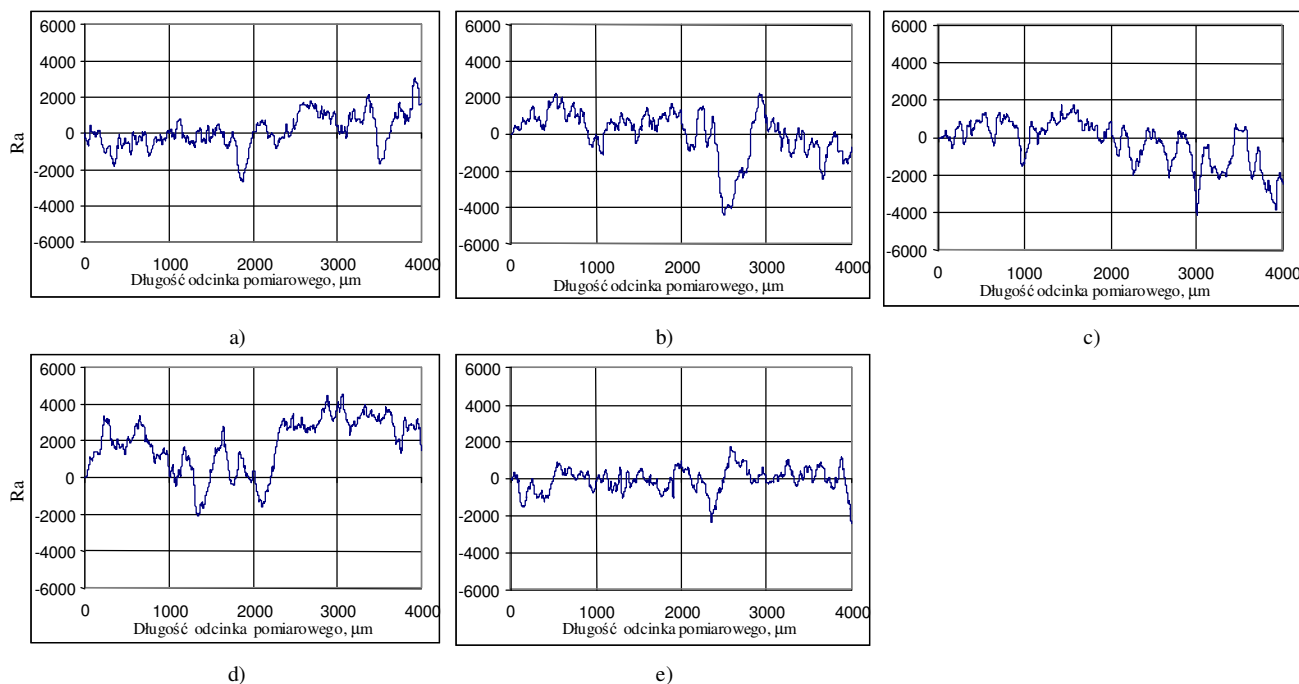
Fig. 9. Structure of the shaft surface areas (a, b) and core (c) - unetched metallographic microsection, magnification 500x

Tablica 3. Parametry chropowatości Ra powierzchni wewnętrznej tulei nr 1 i nr 2
 Table 3. Ra roughness parameters of the inner surface of sleeve no. 1 and no. 2

oznaczenie	pomiar	Ra	Rq	Rz	Rt	Ry	Sm
Tuleja Nr 1	1	3,6	4,8	21	28	27	148
	2	5,2	6,4	25	30	29	218
	3	3,6	4,6	21	29	25	157
	4	6,6	8,6	33	52	52	179
	5	7,8	10,2	39	56	52	180
	średnia		5,36	6,92	27,8	39	37

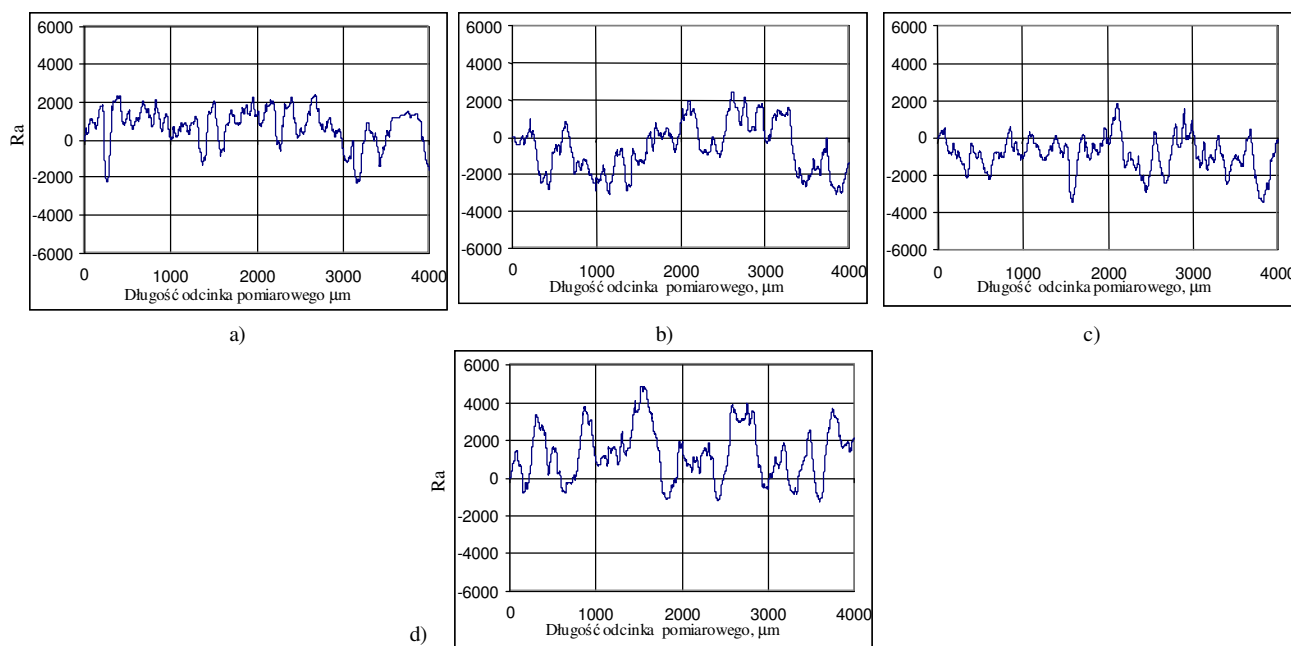
cd. tablicy 3

oznaczenie	pomiar	Ra	Rq	Rz	Rt	Ry	Sm
Tuleja Nr 2	1	6,6	8,4	34	50	43	177
	2	6	8,2	32	46	40	225
	3	5,8	8,2	35	51	51	226
	4	6,2	8,2	34	46	46	172
	5	3,6	5,4	23	48	30	152
	średnia	5,64	7,68	31,6	48,2	42	190,4



Rys. 10. Profilogramy chropowatości Ra powierzchni wewnętrznej (bieżni wew.) – tuleja nr 1: a) ścieżka 1, b) ścieżka 2, c) ścieżka 3, d) ścieżka 4, e) ścieżka 5 (pomiar 1)

Fig. 10. Ra roughness profilograms of the inner surface - sleeve no. 1: a) path 1, b) path 2, c) path 3, d) path 4 (measurement 1)



Rys. 11. Profilogramy chropowatości Ra powierzchni wewnętrznej (bieżni wew.) – tuleja nr 2: a) ścieżka 1, b) ścieżka 2, c) ścieżka 3, d) ścieżka 4 (pomiar 1)

Fig. 11. Ra roughness profilograms of the inner surface - sleeve no. 2 : a) path 1, b) path 2, c) path 3, d) path 4 (measurement 1)

B. Obserwacje mikroskopowe i badania mikrotwardości

Struktura badanych tulei jest dwufazowa: jedna faza jest fazą miękką (średnia twardość ok. 221HV_{0,01}) a druga fazą twardą (średnia twardość ok. 742HV_{0,01}). Wyniki pomiarów twardości przedstawiono w tablicy 4. Na rys. 12 przedstawiono struktury z wybranych obszarów tulei nr 1.

Jeżeli struktura wałka jest jednofazowa (austenit), to struktura tulei jest dwufazowa. Faza na bazie niklu jest miękka i mikrotwardość wynosi 21-221 HV, natomiast faza na bazie chromu jest twarda - mikrotwardość

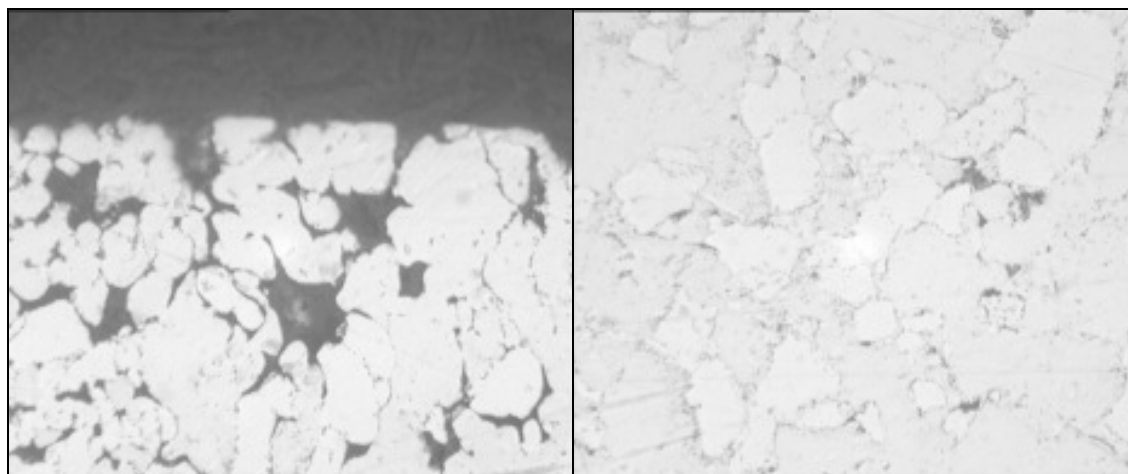
734-742 HV. Dlatego procesy zużycia komasują się na powierzchni wałka, prawdopodobnie na drodze mikroskręcania austenitu wałka kryształkami twardej fazy tulei. Wynikiem tego bardzo prawdopodobnego mechanizmu zużycia powstaje tak znaczna ilość produktów zużycia, które doprowadzają do zacierania się powierzchni ślizgowych.

Zaobserwowano aktywne utlenianie się cząstek smaru twardego pod wpływem dużej wilgotności. Należy zaznaczyć, że w procesie zużycia nie zauważono wypełniania się porami cząstkami zużycia (rys. 12), być może spowodowane jest to zbyt krótkim czasem eksploatacji badanej pary.

Tablica 4. Mikrotwardość na zglądzie z pierścieni – tuleja nr 1 i nr 2

Table 4. Microhardness on a microsection from rings – sleeve no. 1 and no. 2

Lp.	Tuleja Nr 1		Tuleja Nr 2	
	Miękka faza HV 0,01	Twarda faza HV 0,01	Miękka faza HV 0,01	Twarda faza HV 0,01
1	339	713	198	876
2	182	745	191	523
3	162	839	265	876
4	183	660	258	736
5	197	715	194	698
średnia	213	734	221	742



a)

b)

Rys. 12. Struktura obszarów przypowierzchniowych (a) i rdzenia (b) tulei nr 1; pow. 500x
Fig. 12. Structure of the surface areas (a) and core (b) of sleeve no. 1; magnification 500x

4. PODSUMOWANIE

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują na możliwość zastosowania tulei ślizgowych wykonanych z materiałów proszkowych w zamian za grafitowe tuleje łożyskowe. Przy zastosowania tulei proszkowych w układzie trącym istotnymi czynnikami wpływającymi na żywotność układu jest rozszerzalność cieplna pary trącej oraz twardość powierzchni. Badania wykazały wysoką zgodność rozszerzalności cieplnej materiału tulei z proszków oznaczonej jako mieszanka 1 z materiałem współpracującym z nią wałka.

Wyniki pomiarów twardości wskazują na niższą wartość twardości tulei proszkowych w stosunku do wałka. Różnicę tą można zminimalizować poprzez zastosowanie odpowiedniej obróbki cieplno-chemicznej tulei z proszków.

Obecnie prowadzone są badania mające na celu opracowanie parametrów obróbki cieplno-chemicznej pozwalającej na uzyskanie twardości materiału tulei zbliżonej do twardości wałka. Ponadto prowadzone są badania impregnacji próżniowej części spiekanych nanoczą-

steczkami smarów stałych w celu dalszej optymalizacji właściwości tribologicznych tulei łożyskowych z proszków spiekanych.

Pracę zrealizowano w ramach działalności statutowej finansowanej przez Ministerstwo Edukacji i Nauki: NM 901 70 000 – Doskonalenie technologii kształtowania metodami metalurgii proszków części o podwyższonych własnościach eksploatacyjnych.

LITERATURA

- [1] *Kędzia Ł., Leszczyński V., Wiśniewska-Weinert H. (i in.): Doskonalenie technologii kształtowania metodami metalurgii proszków części o podwyższonych własnościach eksploatacyjnych. (praca niepubl.)*
- [2] *Kędzia Ł., Leszczyński V., Wiśniewska-Weinert H. (i in.): Opracowanie technologii wytwarzania części proszkowych dla przemysłu lotniczego na bazie proszku stali nierdzewnej z przesycaniem próżniowym nanocząsteczkami smarów stałych. (praca niepubl.)*