

## 6. Opracowanie technologii otrzymywania bazowego materiału z kompozytu proszków metali

### 6.1. Wymagania techniczne dla tulei łożyskowych

W krajach wysoko uprzemysłowionych prowadzone są badania zmierzające do znalezienia **nowych materiałów** o podwyższonych własnościach tribologicznych, w tym odpornych na zużycie i zatarcia, szczególnie dla części pracujących w trudnych warunkach eksploatacyjnych. Współpracujące ze sobą części maszyn oraz elementów różnych urządzeń podlegają zużyciu, przyczyną którego jest przede wszystkim tarcie. Destrukcja struktury warstwy wierzchniej oraz ubytek masy jest naturalną konsekwencją procesów tarcia. Powoduje to zmiany geometrii oraz właściwości eksploatowanych elementów. Niekorzystnych zjawisk wynikających z mechanicznej współpracy powierzchni podlegających tarcia nie można całkowicie uniknąć. Można je jednak znacznie zredukować poprzez odpowiednie przygotowanie samej powierzchni i właściwy dobór materiału warstwy wierzchniej. Stąd też zainteresowanie wielu ośrodków naukowych nowymi sposobami formowania warstwy wierzchniej, która modyfikuje właściwości tribologiczne elementów współpracujących.

Współczesne samoloty wyróżniają się wysokim poziomem niezawodności i bezpieczeństwem. Pomimo tego ciągle poszukuje się nowych materiałów zapewniających większe bezpieczeństwo w procesie eksploatacji. Duże możliwości w zakresie projektowania ich własności znajdują się w technologiach wytwarzania wykorzystujących procesy **metalurgii proszków w połączeniu z procesami obróbki plastycznej**, takimi jak **kucie matrycowe dokładne**. Takie połączenie procesów wytwarzania umożliwia otrzymywanie nie tylko wyrobów z proszków i spieków metali, ale także **kompozytów** na ich podstawie wzmocnionych włóknami lub **umocnionych cząstkami fazy twardej z osnową**. Alternatywą dla ww. procesów jest impregnowanie **porowatych** materiałów proszkowych specjalnymi **mieszkami zawierającymi mikro- i nanocząstki** smarów stałych, np. siarczków [81].

Warunki pracy łożysk ślizgowych wymagają aby materiały łożyskowe odznaczały się:

- małym współczynnikiem tarcia, dużą odpornością na zużycie, szybkim docieraniem się z współpracującym czopem, dobrą smarownością, możliwością wchłaniania produktów zużycia w warstwę wierzchnią,
- dobrą wytrzymałością na ściskanie, wytrzymałością zmęczeniową, odpornością na uderzenia,

- dobrym przewodnictwem cieplnym, odpowiednim współczynnikiem rozszerzalności cieplnej,
- odpornością korozyjną.

Dotychczas w rozpatrywanych układach wentylacyjnych stosuje się łożyska grafitowe. Mimo, iż charakteryzują się one dobrymi właściwościami ślizgowymi (wartość współczynnika tarcia notuje się na ok. 0,1-0,2), również podczas przerw w smarowaniu, wykazują one niską odporność na pękanie i kruszenie pod wpływem siły, która na nią działa, a także nie są odporne na utleniające środowisko kwasowe. W łożyskach smarowanych olejem, przy jego niedostatku może powstać pasta z pyłu węglowego i oleju, która może zaburzyć działanie łożyska przez zwiększenie tarcia i zużycie czopa. Kompozyty grafitu wypełnionego węglikiem krzemu stosowane są przede wszystkim na wysoko obciążone łożyska ślizgowe oraz jako materiał na elementy pracujące w wysokich temperaturach (do temp. 600°C).

Nowe tuleje łożyskowe, wykonane z proszków spiekanych, w porównaniu do stosowanych łożysk grafitowych powinny charakteryzować się:

- zwiększoną odpornością na korozję i utlenianie,
- zwiększoną odpornością na gwałtowne obciążenia,
- mniejszym współczynnikiem tarcia (stałym w całym okresie pracy),
- zwiększoną odpornością na zmienne obciążenia.

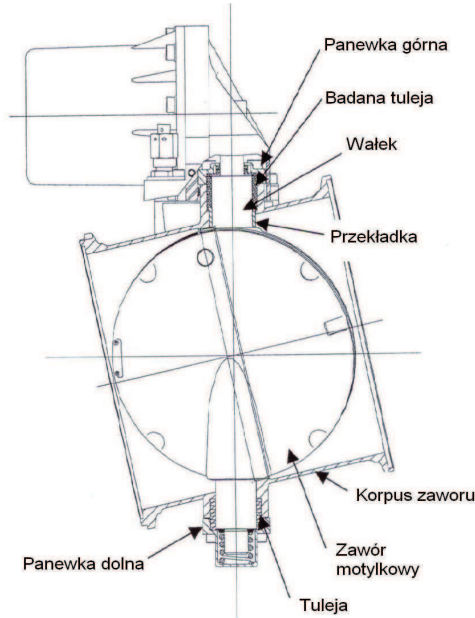
## 6.2. Dobór składu chemicznego mieszanki proszkowej

Rysunek 24 przedstawia węzeł konstrukcyjny układu wentylacyjnego samolotu Airbus, w którym pracuje wybrana do badań tuleja łożyskowa.

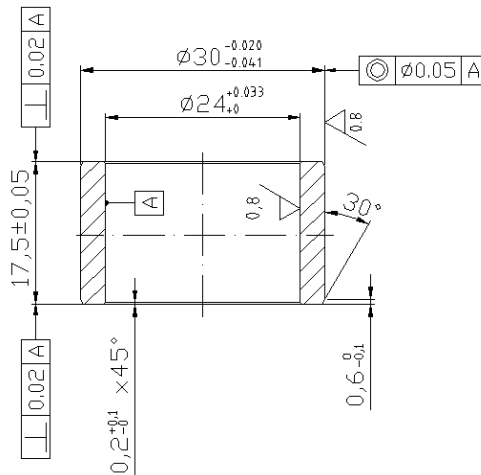
Aby dobrać odpowiedni skład chemiczny mieszanki proszkowej potrzebnej dla wytworzenia tulei spiekanych przeprowadzono badania dylatometryczne materiału wałka, z którym ww. tuleje mają współpracować oraz opracowanych mieszanek proszkowych. Badania te pozwoliły na wytypowanie do dalszych badań mieszanki proszkowej o rozszerzalności cieplnej zbliżonej do rozszerzalności cieplnej wałka w zakresie temperatur pracy zaworu.

Ponieważ jednym z podstawowych wymagań stawianym tulei była jej dobra odporność korozyjna, dlatego też w pierwszym etapie doboru składu chemicznego tulei przygotowano dwa warianty mieszanek. Jeden na bazie proszku stali odpornej na korozję 316L z dodatkiem Ni – mieszanka INOP mix 20 oraz drugi na bazie proszku Ni-Cr – mieszanka INOP mix 21. Z opracowanych mieszanek wykonano próbki poprzez prasowanie, spiekanie i dokuwanie (rys. 25).

Z przygotowanych próbek wycięto próbki do badań dylatometrycznych ( $\phi 2 \times 12$  mm). Celem określenia wpływu procesu dokuwania na własności termiczne tulei, próbki z mieszanki INOP mix 20 wycięto po procesie spiekania oraz po procesie dokuwania. Wyniki badań przedstawiono na rysunkach 26 i 27.

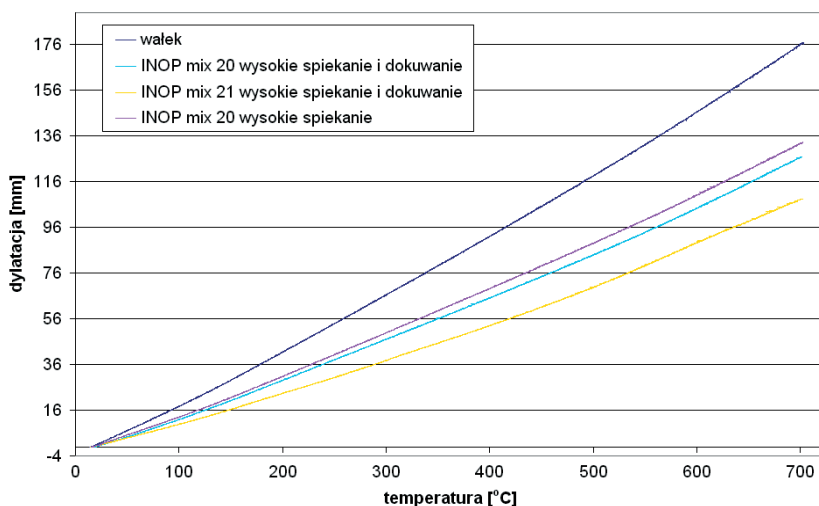


*Rysunek 24. Badana tuleja w węźle konstrukcyjnym [63]*

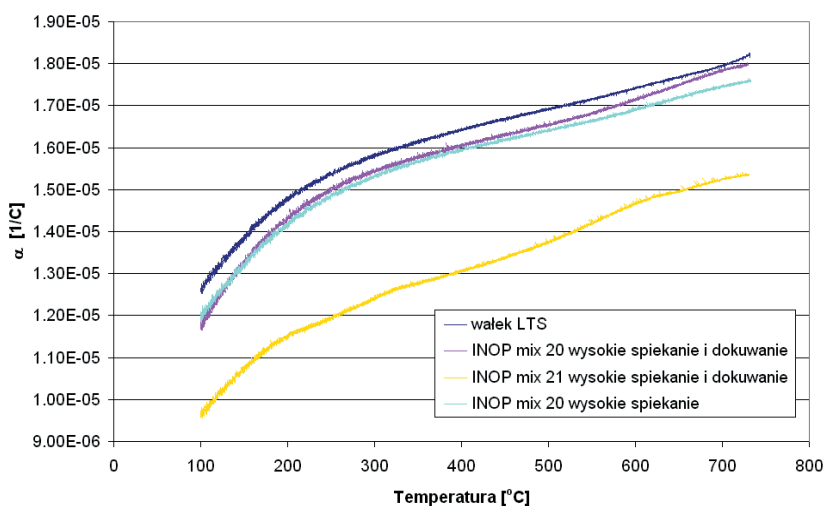


*Rysunek 25. Konstrukcja badanej tulei [badania własne]*

Otrzymane wyniki pokazują, że próbki z mieszanki na bazie stopu niklowo-chromowego (mieszanka INOP mix 21) wykazują znacznie mniejszy współczynnik rozszerzalności termicznej w porównaniu z materiałem wałka. Natomiast dla próbek ze stali nierdzewnej z dodatkiem Ni (INOP mix 20) różnica ta jest mniej znacząca. I tak, jeżeli dla temperatury 250°C współczynnik rozszerzalności termicznej dla wałka stanowi  $1,55 \cdot 10^{-5}$ , to dla mieszanki proszkowej INOP



Rysunek 26. Zależność dylatacji od temperatury dla wybranych materiałów [badania własne]



Rysunek 27. Zależność współczynnika liniowej rozszerzalności cieplnej od temperatury dla wybranych próbek [badania własne]

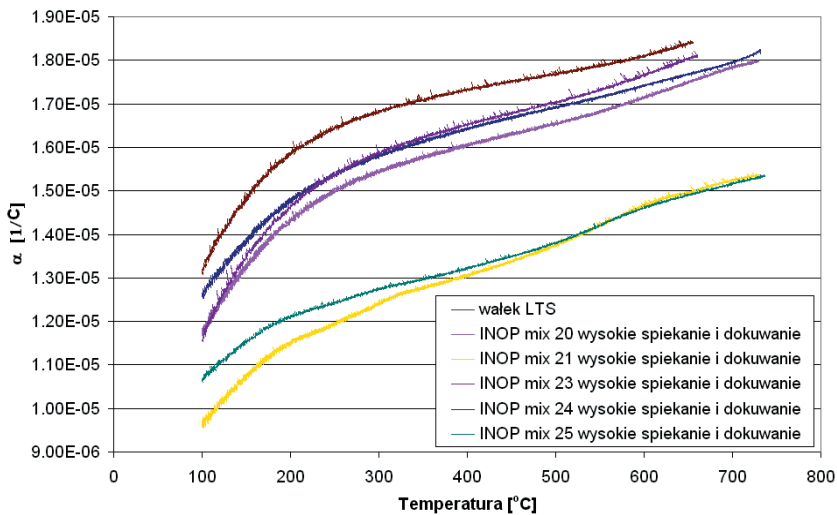
mix 20 oraz INOP mix 21 wynosi on odpowiednio  $1,5 \cdot 10^{-5}$  i  $1,2 \cdot 10^{-5}$ . Dla materiału INOP mix 21 powoduje to znaczną różnicę deformacji materiału wałka i tulejki. Charakter zmiany współczynnika liniowej rozszerzalności termicznej obydwu materiałów przedstawiono na rysunku 27. Widoczny jest na nim również wpływ procesu dokuwania na właściwości termiczne dla tej samej mieszanki proszkowej. Uwzględniając te wyniki próbki do dalszych badań przygotowywano poprzez dokuwanie, aby odwzorować w badaniach dylatometrycznych gęstość opracowywanych tulei proszkowych.

Analiza wyników badań wykazuje, że podczas pracy tulei wykonanych z mieszanki proszkowej nr INOP mix 21 w temperaturze eksploatacji  $500^{\circ}\text{C}$  następuje zmniejszenie się luzu pomiędzy wałkiem a tuleją, co prowadzi do zatarcia się pary. Niezbędna jest więc optymalizacja składu chemicznego mieszanki proszkowej, celem osiągnięcia podobnych współczynników rozszerzalności termicznej współpracujących elementów.

Do dalszej części badań przygotowano próbki z kolejnych trzech mieszanek:

- INOP mix 23 na bazie stali nierdzewnej ze zwiększoną zawartością Ni i Cr,
- INOP mix 24 na bazie stali 316L bez dodatkowych pierwiastków stopowych,
- INOP mix 25 na bazie proszku Ni-Cr z dodatkiem Mo.

Próbki przygotowano poprzez prasowanie, spiekanie i dokuwanie.



**Rysunek 28.** Zależność współczynnika liniowej rozszerzalności cieplnej od temperatur dla badanych próbek

Wyniki badań dylatometrycznych dla wszystkich wariantów składów chemicznych pokazano na rysunku 28.

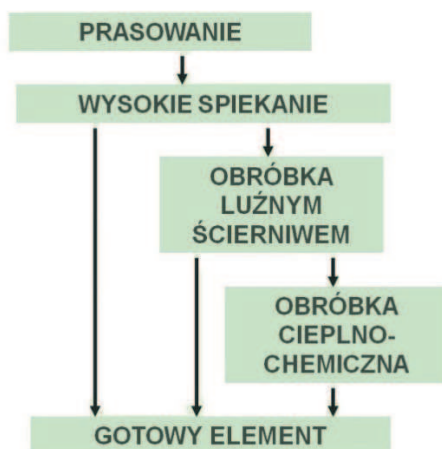
Porównanie krzywych współczynnika rozszerzalności liniowej dla próbek proszkowych i materiału wałka pozwoliło na wytypowanie do dalszych badań mieszanki oznaczonej symbolem **INOP mix 23**. Rozszerzalność liniowa próbek przygotowanych z wybranej mieszanki oraz z wałka w całym zakresie badanych temperatur, a więc w zakresie temperatury eksploatacji, jest najbardziej zbliżona.

### 6.3. Technologie wytwarzania materiału bazowego z proszków metalu

W Instytucie Obróbki Plastycznej opracowano, pod kierunkiem Autorki, **nowy sposób wytwarzania spieków na zimno w dwóch operacjach kształtowania**. Dotychczas stosuje się z reguły technologię wytwarzania w jednej operacji kształtowania [20, 21].

W technologii wytwarzania wyrobów z proszków spiekanych w jednej operacji kształtowania (rys. 29) dany wyrób otrzymuje ostateczny kształt podczas operacji prasowania. Tą metodą wytwarzane są elementy, od których nie jest wymagana wysoka gęstość. Przykłady części oraz ich charakterystykę i zastosowanie przedstawiono w rozdziale 2.

Technologia wytwarzania spieków na zimno w dwóch operacjach kształtowania plastycznego jest innowacyjną technologią opracowaną w Instytucie Obróbki Plastycznej.



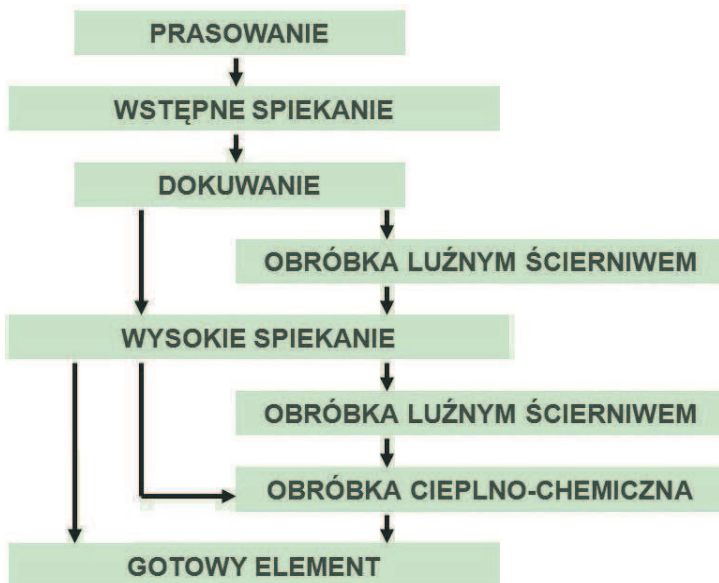
*Rysunek 29. Technologia wytwarzania wyrobów z proszków spiekanych w jednej operacji kształtowania [badania własne]*

Ta unikalna technologia została opracowana podczas realizacji zadań w międzynarodowym projekcie EUREKA [57-59], który koordynowała Autorka i jest chroniona europejskim patentem [28].

Na rysunku 30 przedstawiono przebieg procesu technologicznego wytwarzania materiału bazowego elementów w dwóch operacjach kształtowania plastycznego. Operacja dokuwania pozwala na uzyskanie skomplikowanego kształtu wyrobu z jednoczesnym podwyższeniem gęstości sprasowanych i wstępnie spieczonych półwyrobów. Na tym etapie występują znaczne odkształcenia plastyczne, a stosowane ciśnienia porównywalne są z ciśnieniami przy prasowaniu proszku.

Technologia kształtowania w dwóch operacjach kształtowania plastycznego na zimno pozwala na uzyskanie końcowego wyrobu o gęstości do 98% materiału litego. Taką samą gęstość można uzyskać tylko w procesie kucia wyrobu spiekanego na gorąco, jednak w takim procesie nie uzyskuje się tak dużej dokładności wykonania.

Ostateczne podwyższenie twardości następuje po obróbce cieplno-chemicznej. Uzyskiwane twardości zależne są od gęstości wyrobu i składu chemicznego użytej mieszanki oraz parametrów

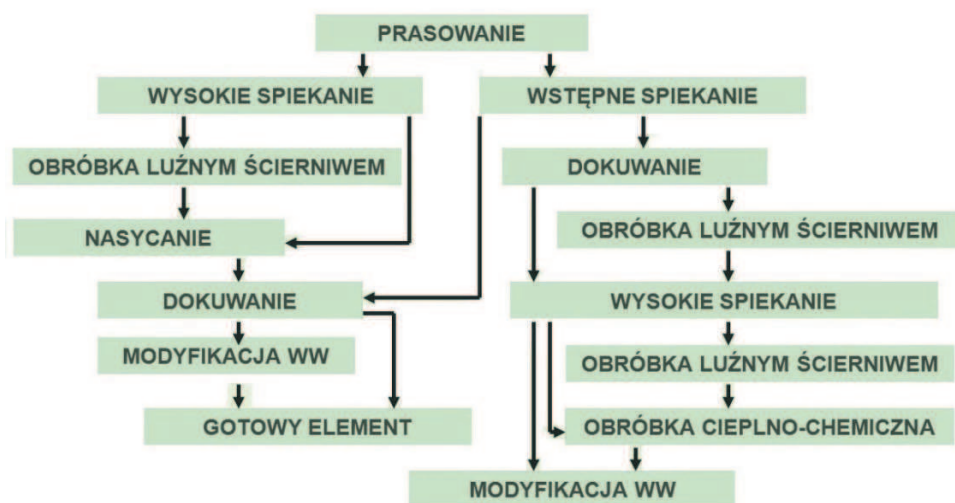


**Rysunek 30.** Przebieg procesu technologicznego wytwarzania wyrobów z proszków spiekanych w dwóch operacjach kształtowania plastycznego [badania własne]

obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej. Technologia ta chroniona jest patentem europejskim [28]. Elementy wykonane tą technologią przedstawiono w rozdziale 2.

Tak otrzymany proszkowy materiał bazowy można modyfikować nano i mikrocząstkami. Przebieg procesu technologicznego kształtowania wyrobów z nowego kompozytu na bazie materiału proszkowego (rys. 31) stosowany jest dla tych części, od których wymagane są zarówno wysokie właściwości wytrzymałościowe i tribologiczne. Odpowiedni dobór parametrów procesów pozwala uzyskać części konstrukcyjne w szerokim zakresie gęstości, twardości, a także o niskim współczynniku tarcia.

Technika modyfikowania materiałów proszkowych siarczkowymi nanocząstkami grafenopodobnymi otwiera nowy kierunek wykorzystania tych materiałów. Pierwsze badania nad tym materiałem kompozytowym wykonano w projekcie zamawianym koordynowanym przez Instytut Odlewnictwa w latach 2006-2008. Głównym Wykonawcą zadań INOP była Autorka tego opracowania [82-85]. Otrzymano kompozyt o podwyższonej odporności na zużycie cierne, którego zastosowanie może obniżyć koszty eksploatacji w wyniku eliminacji smarowania elementów w czasie pracy. Jest to szczególnie ważne dla części konstrukcyjnych pracujących w specjalnych warunkach np. pod wodą lub w próżni, gdzie doprowadzenie smaru podczas pracy jest bardzo trudne.



**Rysunek 31.** Przebieg procesu technologicznego kształtowania wyrobów z kompozytu z siarczkowymi nanocząstkami grafenopodobnymi [badania własne]

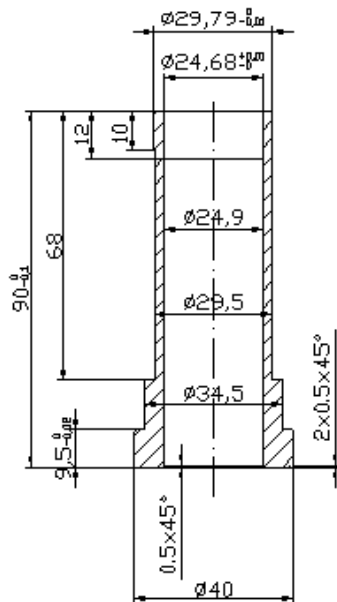


## 6.4. Dobór parametrów technologii

W ramach badań wykonanych w INOP w dwóch międzynarodowych projektach badawczych w VI Programie Ramowym [67-73], których koordynatorem była Autorka, opracowano dokumentację konstrukcyjną i wykonano narzędzia doświadczalne do prasowania tulei łożyskowej. Komplet narzędzi do prasowania składa się z: matrycy, trzpienia, stempla górnego i stempla dolnego. Narzędzia doświadczalne wykonano ze stali narzędziowej do pracy na zimno gatunku NC10. Stemple górny i dolny obrobiono cieplnie do twardości 56-58 HRC, a trzpień i matrycę obrobiono cieplnie do twardości 62-64 HRC.

Konstrukcję narzędzi doświadczalnych do prasowania tulei przedstawiono na rysunkach 32-34.

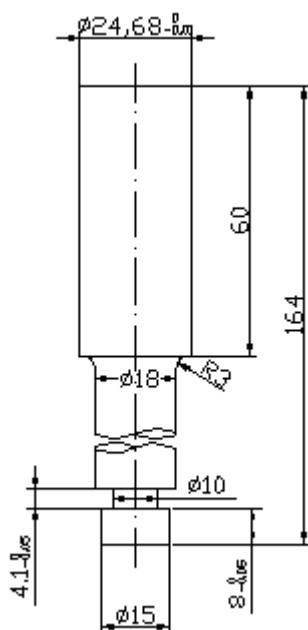
Znając wymagania wymiarowe i gęstość tulei po prasowaniu określono wstępne warunki prasowania. Stosunkowo niską gęstość 6,0-6,1 g/cm<sup>3</sup> i wysokość 22,7 mm wypraski uzyskano przy naciskach 400 N/mm<sup>2</sup> (10 t) i masie naważki 29,9 g. Partia próbna tulei ST500 została wykonana z mieszanki proszkowej INOP mix 23 opracowanej na bazie proszku stali nierdzewnej 316L.



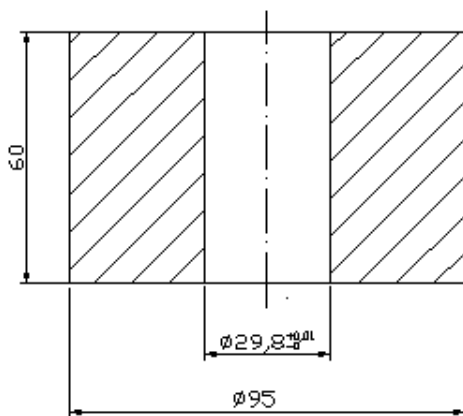
*Rysunek 32. Narzędzia doświadczalne do prasowania tulei – stempel górny i stempel dolny [badania własne]*

Próby prasowania na narzędziach doświadczalnych przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej ZD-30 w Zakładzie Badania Metali.

Po prasowaniu wykonano pomiary metrologiczne wypraski tulei. Wyniki zostały przedstawione w tablicy 5.



*Rysunek 33. Narzędzia doświadczalne do prasowania tulei – trzczeń [badania własne]*

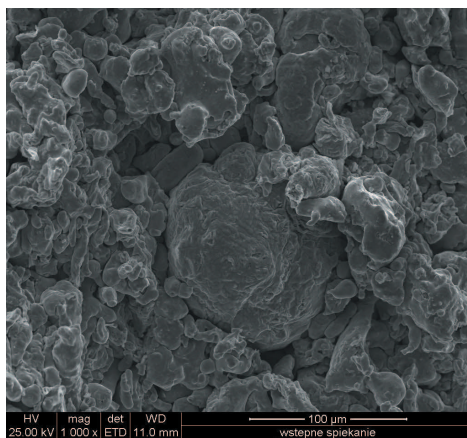
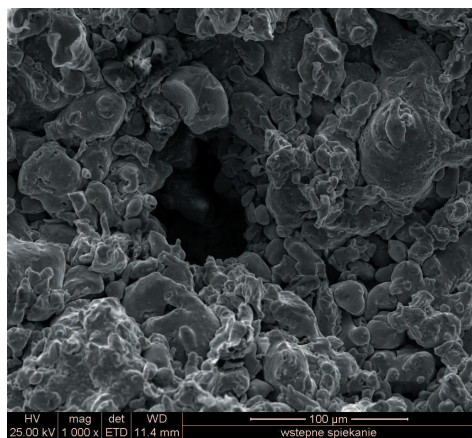
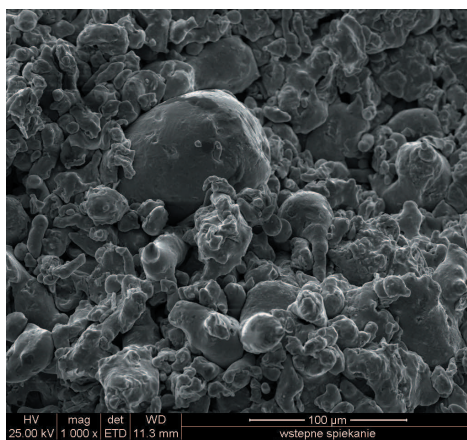
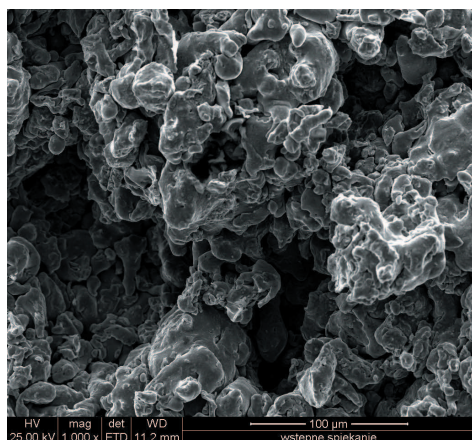


*Rysunek 34. Narzędzia doświadczalne do prasowania tulei – matryca [badania własne]*

Po procesie prasowania, wypraski tulei poddane zostały spiekaniu wstępnemu w atmosferze zdysocjowanego amoniaku ( $75\% \text{H}_2 + 25\% \text{N}_2$ ) w temperaturze zgodnie z patentem [28], a następnie spiekaniu wysokiemu w piecu próżniowym w temperaturze  $1200^\circ\text{C}/1 \text{ h}$ .

*Tablica 5. Wymiary wypraski tulei po prasowaniu [badania własne]*

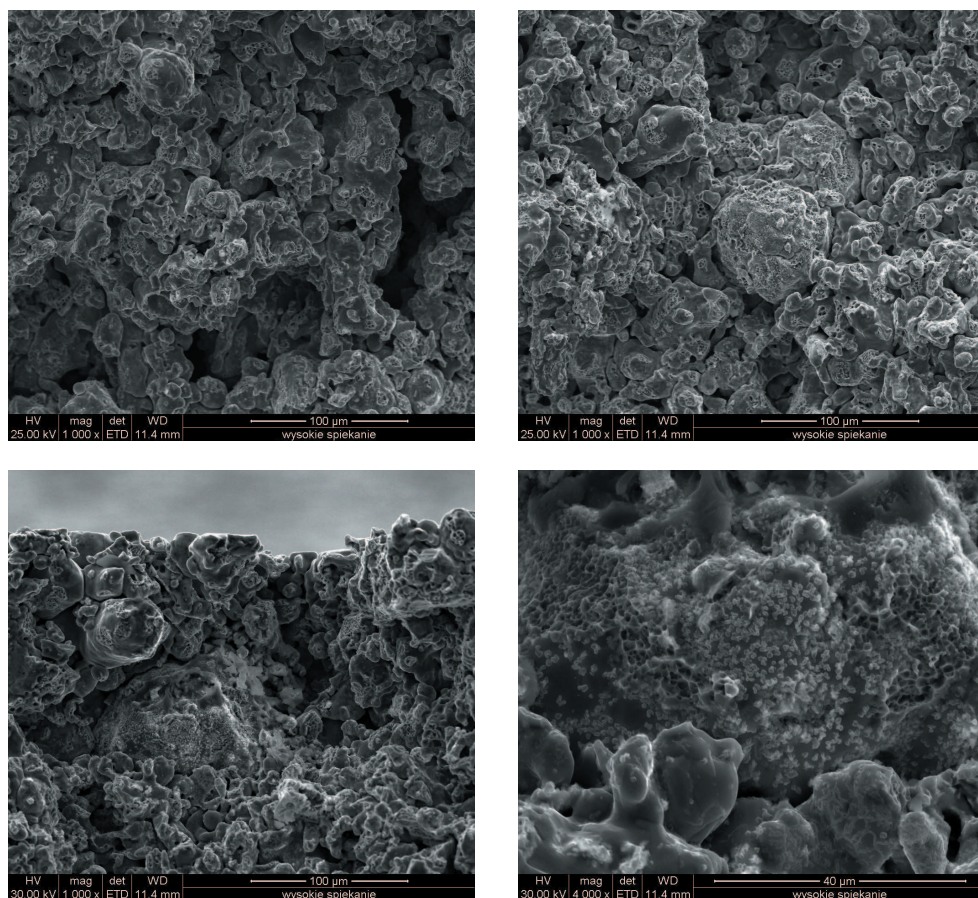
Wypraska nr	Średnica wew. $\phi\text{D1}$ , mm	Średnica zew. $\phi\text{D2}$ , mm	Wysokość H, mm	Masa, g
1	24,71	29,90	22,710	29,80
2	24,69	29,90	22,746	29,80
3	24,71	29,89	22,747	29,83
4	24,70	29,91	22,745	29,85
5	24,71	29,91	22,733	29,84



*Rysunek 35. Obrazy SEM tulei po spiekaniu wstępnym [badania własne]*

Na podstawie obserwacji przełomów próbek po spiekaniu wstępnym (rys. 35), przeprowadzonych na elektronowym mikroskopie skaningowym (SEM) można stwierdzić, że nastąpiło tylko częściowe połączenie cząstek proszku. Widoczne duże cząstki nie uległy spiekaniu, tylko mniejsze cząstki skonsolidowały się. Przełom ma charakter kruchy, powierzchnie cząstek są w większości gładkie.

Inny charakter powierzchni widoczny jest na przełomie tulejek po wysokim spiekaniu w próżni w temperaturze 1200°C/1h (rys. 36). Wyraźne wyrwania na powierzchni cząstek świadczą o połączeniu cząstek proszku po procesie wysokiego spiekania. Można zauważyć dużo mniej przestrzeni pomiędzy cząstkami proszku.



*Rysunek 36. Obrazy SEM tulei po spiekaniu wysokim [badania własne]*

Po spiekaniu wysokim przeprowadzono pomiary metrologiczne i masy tulei. Wyniki tych pomiarów przedstawiono w tabelicy 7. Porównując masy tulejek z tabelicy 6 i 7, możemy stwierdzić że masa części po spiekaniu wysokim jest niższa od masy wyprasek po prasowaniu. Jest to wynikiem wypalenia środka poślizgowego (stearynianu cynku).

**Tablica 6. Wymiary tulei po spiekaniu wysokim [badania własne]**

Tuleja nr	Średnica wew. $\phi D_1$ , mm	Średnica zew. $\phi D_2$ , mm	Wysokość H, mm	Masa, g
1	24,52	29,81	22,438	29,58
2	24,40	29,75	22,447	29,59
3	24,46	29,70	22,547	29,58
4	24,44	29,71	22,575	29,60
5	24,45	29,69	22,542	29,59

**Tablica 7. Gęstość tulei po spiekaniu wysokim [badania własne]**

Tuleja nr	$m_1$ , g	$m_3$ , g	$m_4$ , g	$g_w$ , g/cm <sup>3</sup>	$\rho$ , g/cm <sup>3</sup>
1	29,5952	29,8128	24,9281	0,997	6,04
2	29,5603	29,7796	24,8412	0,997	5,97
3	29,5613	29,7721	24,8867	0,997	6,03
4	29,5814	29,7921	24,9090	0,997	6,04
5	29,5705	29,7981	24,8625	0,997	5,97
				średnia	6,01

Przeprowadzono również badania gęstości pięciu losowo wybranych tulejek, zgodnie z PN-EN ISO 2738:2001, według zależności:

$$\rho = \frac{m_1 \cdot g_w}{m_3 - m_4} \quad (2)$$

gdzie:

$m_1$  – masa próbki suchej przed parafinowaniem,

$m_3$  – masa próbki po parafinowaniu ważona nad wodą,

$m_4$  – masa próbki po parafinowaniu ważona w wodzie,

$g_w$  – gęstość wody zależna od temperatury otoczenia.

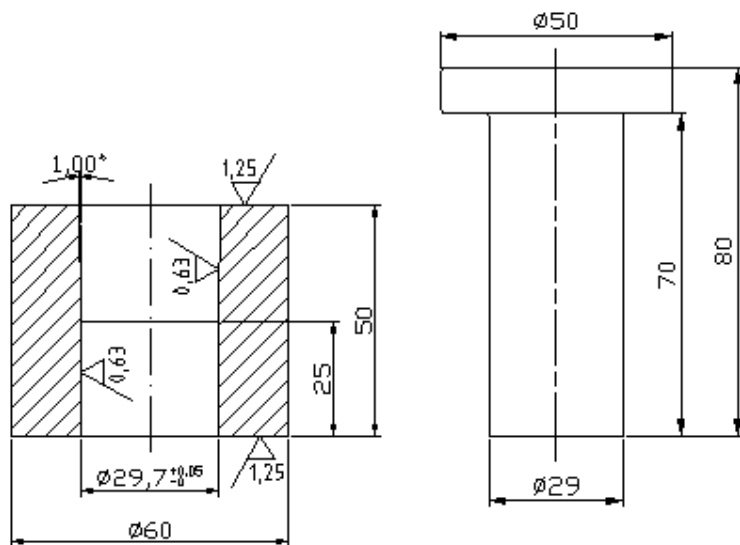
Wyniki tych pomiarów przedstawiono w tabelicy 7.

Gęstość badanych tulei po spiekaniu wysokim mieści się w granicach 5,97-6,04 g/cm<sup>3</sup> i zapewnia przeprowadzenie procesu impregnowania aby uzyskać warstwę środka poślizgowego.

Po spiekaniu wysokim próbki tulei zostały poddane procesowi kalibrowania celem dopasowania średnicy zewnętrznej  $D_2$  do gniazda impregnacyjnego w przyrządzie ciśnieniowym. Kalibrowanie przeprowadzono narzędziami badawczymi (rys. 37), przy użyciu prasy o nacisku max. 30 kN (3 t) w Zakładzie Zaawansowanych Technologii Kształtowania.

Narzędzia badawcze do kalibrowania tulei ST500 składają się z matrycy i stempla. Wykonano je ze stali narzędziowej do pracy na zimno gatunku NC10 i obrobiono cieplnie do twardości 56-58 HRC.

Wyniki kalibrowania wymiaru średnicy zewnętrznej tulei podano w tablicy 8. Wymiar ten mieści się w przedziale 29,59-29,79 mm i jest odpowiedni do umieszczenia w przyrządzie do impregnacji ciśnieniowej. Jest to materiał bazowy do wytwarzania kompozytowej tulei łożyskowej.



Rysunek 37. Narzędzia badawcze do kalibrowania tulei [badania własne]

Tablica 8. Porównanie wymiaru  $D_2$  [badania własne]

Tuleja nr	Średnica zewnętrzna $D_2$ , mm	
	po spiekaniu wysokim	po kalibrowaniu
1.1	29,81	29,79
2.1	29,75	29,68
3.1	29,70	29,62
4.1	29,71	29,67
5.1	29,69	29,59