

## 8. Badanie własności fizykochemicznych i tribologicznych wytypowanych wyrobów siarczkowymi nanocząstkami grafenopodobnymi

### 8.1. Ogólny opis prototypów elementów

W tabelicy 10 przedstawione są elementy pracujące w warunkach ślizgania, dla których technologia wytwarzania została opracowana pod kierunkiem Autorki, w Instytucie Obróbki Plastycznej w Poznaniu. Można je sklasyfikować w następujący sposób:

1. Łożyska i komponenty ślizgowe, pracujące w granicznych, mieszanych i hydrodynamicznych warunkach smarowania w temperaturze otoczenia:
  - 1.1. Porowate łożyska ślizgowe i inne elementy pracujące w temperaturze otoczenia (tuleje łańcuchowe, (Strakonice, Republika Czeska), części klinowe (TKZ Polna, Republika Czeska),
  - 1.2. Tuleje wysokiej gęstości i pierścienie łożysk kulkowych pracujące w temperaturze otoczenia (pierścienie łożysk kulkowych ZKO, Praga, Republika Czeska),
  - 1.3. Narzędzia do kucia na zimno, pracujące w wysokich naciskach stykowych,
2. Łożyska i komponenty ślizgowe, pracujące w granicznych, mieszanych i quasi-hydrodynamicznych warunkach w podwyższonych i wysokich temperaturach:
  - 2.1. Porowate łożyska ślizgowe dla systemów wentylacyjnych samolotów (LTS, Toulouse, Francja),
  - 2.2. Porowate ślizgowe łożyska dla transporterów stosowanych w piecach tunelowych.

Oczywiste jest, że warunki tarcia, zużycia oraz smarowania, znacznie różnią się dla każdego elementu. Zdefiniujmy procesy tarcia dla poszczególnych powierzchni stykowych, z punktu widzenia tarcia oraz zużycia.

Nacisk na redukcję współczynnika tarcia oraz zużycia w maszynach, staje się coraz bardziej istotny, w celu poprawy ich wydajności, trwałości i niezawodności.

Autorzy [156] podają definicję tarcia ślizgowego i tocznego.

Tarcie ślizgowe jest to taki rodzaj tarcia, przy którym prędkość obu ciał w punktach ich wzajemnego styku są różne.

Tarcie toczne występuje przy toczeniu się ciała o kształtach kulistym, stożkowym i cylindrycznym. W punkcie wzajemnego styku dwóch ciał prędkości są równe, a czas trwania styku w przypadku ciał sztywnych dąży do zera.

**Tablica 10.** Przykłady wyrobów z proszków metali, których technologia wytwarzania opracowana została w Instytucie Obróbki Plastycznej w Poznaniu

Lp.	Nazwa	Odbiorca	Zdjęcie	Gęstość, g/cm <sup>3</sup>
1	2	3	4	5
1.	Tuleja 10B-1Dz	Cz Retezy, s.r.o., Strakonice, Republika Czeska		6,8
2.	Axial	Black&Decker, Trmice, Republika Czeska		6,8
3.	Spacer Blade	Black&Decker, Trmice, Republika Czeska		7,3
4.	Tuleja 6746-10	LTS Tuluza, Francja		6,8
5.	Łożysko G-3561	TKZ Polna, Republika Czeska		7,4
6.	PZL Tłoczek-2	Hydral, Wrocław, Polska		6,8
7.	Pierścień dystansowy	TRW, Częstochowa, Polska		6,8

Lp. 1	Nazwa 2	Odbiorca 3	Zdjęcie 4	Gęstość, g/cm <sup>3</sup> 5
8.	Narzędzie gnące	Producent Urządzeń MAGA, Poznań, Polska		6,8
9.	ZKO-015 ZKO-016 ZKO-018 ZKO-020	ZKL Praha, Republika Czeska		7,65
10.	KLIN-5 KLIN-7 KLIN-5 Expert	TKZ Polna, Republika Czeska		7,6
11.	Pierścień krzywkowy	WSK – Poznań, Polska		6,6
12.	Ramię zaworu 304.159	WSK – Poznań, Polska		6,5
13.	Ramię zaworu 304.159E	WSK – Poznań, Polska		6,5
14.	Ciężarek regulatora	WSK – Poznań, Polska		6,5

Lp.	Nazwa	Odbiorca	Zdjęcie	Gęstość, g/cm <sup>3</sup>
1	2	3	4	5
15.	Koło zębate	BUDEMAC Sp. z o. o, Poznań, Polska		7,0
16.	Tuleja dystansowa	BRANO a.s., Branom Republika Czeska		7,65
17.	Zębatka obrotu taśmy	Odlewnia MR, Kocmyrzów, Polska (Ciśnieniowe Odlewnie Metali)		7,2h

Tarciu tocznemu towarzyszy z różnym udziałem tarcie ślizgowe.

Tarcie ślizgowe jest zjawiskiem powszechnym i występuje zawsze, gdy styk ciał przenosi siłę nacisku, odpowiada ono za wiele zjawisk, występuje w większości urządzeń mechanicznych. Kiedy na wyjątkowo czyste powierzchnie metali działa obciążenie, nierówności tych elementów styecznych mogą spoić się ze sobą, formując wiązania lub spojenia, niekiedy tak silne jak metal osnowy. Kiedy wystąpi nawet niewielki ruch lub jeżeli siła obciążająca się zwiększy, to połączenia adhezyjne lub wiązania wzrastają. Wówczas znacznie zwiększa się siła tarcia [157, 158]. Ten ogólny proces formowania się spojenia oraz jego wzrostu, jest również zwany „lepkim tarcie” lub “zimnym spawaniem” [159]. Nie tylko identyczne stopy, ale wszystkie metale, które są wzajemnie rozpuszczalne mają skłonność do takiego spajania. Proces formowania się spojeń jest mocno przyspieszony w próżni. Tablica 11 przedstawia wartości współczynników tarcia dla różnych materiałów. Należy zauważyć, że większość elementów pracuje w warunkach smarowania granicznego lub smarowania mieszanego.

W warunkach hydrodynamicznego lub quasi-hydrodynamicznego smarowania, tarcie zależy głównie od reologicznych właściwości smaru i w sytuacji idealnej, w zasadzie żadne zużycie nie powinno mieć miejsca dopóty, dopóki jest smar. W mieszanych i granicznych warunkach smarowania, nierówność powierzchni, własności materiału oraz siła rozszczepienia tribochemicznych

**Tablica 11.** Współczynniki tarcia przy stałym smarowaniu dla różnych warunków tarcia [159]



powłok determinuje wynikowe tarcie oraz zużycie. W ostatnich latach nastąpił rozwój technologii modyfikacji powierzchni dla tribologicznych zastosowań.

Powłoki o niskim współczynniku tarcia, wykonane na bazie materiałów o heksagonalnej strukturze, posiadające puste wnętrza i budowę podobną do fullerenów i nanocząstek, takich jak MoS<sub>2</sub> oraz WS<sub>2</sub> są przedmiotem niniejszej pracy. Powłoki z dodatkiem MoS<sub>2</sub> okazały się podwyższać odporność na zużycie, jednocześnie utrzymując niski współczynnik tarcia [4]. Jednak nie wszystkie zjawiska występujące w tych warunkach smarowania zostały zbadane.

Bardzo interesujące wydają się wyniki pracy [161], gdzie tribologiczne zachowanie poszczególnych powłok PVD (głównie DLCs) było badane przez zastosowanie konforemnej konfiguracji (łożysko ślizgowe/rolka) w warunkach tarcia ślizgowego. Głównym celem niniejszego badania była analiza tarcia pary łożysko ślizgowe/rolka przy różnych modyfikacjach powierzchni, zarówno w warunkach smarowania granicznego, jak i mieszanego.

Wyniki pokazały dużą zależność tarcia konforemnych styków w warunkach smarowania granicznego oraz początkowego przejścia (tj. przy niższych prędkościach) do warunków

smarowania mieszanego. Głównymi czynnikami wpływającymi na tarcie i zużywanie elementów współpracujących są struktura i własności powłoki smarującej oraz powierzchnie stykowe (lepkość oleju, nacisk rozszczepienia smaru stałego, twardość oraz nierówność powierzchni).

Całkowita siła tarcia tocznego składa się z następujących składowych:

- międzyfazowego poślizgu występującego pomiędzy elementami obrotowymi,
- strat histerezy elastycznej. Energia absorbowana przez ciała elastyczne nie jest z powrotem uwalniana do systemu, kiedy nacisk zostaje usunięty [162],
- innych czynników, takich jak: (i) brak geometrycznej doskonałości powierzchni; (ii) obecność zanieczyszczeń; (iii) plastyczna deformacja nierówności powierzchniowych [6].

W łożysku rolki, wiele innych czynników składa się na współczynnik tarcia. Są to: (i) ślizganie pomiędzy elementami obrotowymi i kieszeniami separatora; (ii) ślizganie pomiędzy separatorem, a powierzchnią bieżni; (iii) rozszczepianie powłok oleju lub smaru pomiędzy elementami łożyska; oraz (iv) straty spowodowane nadmiernym smarowaniem wewnątrz łożyska. Dlatego też zastosowanie siarczkowych struktur grafenopodobnych w tarcu obrotowym jest bardzo ważne, zarówno z punktu widzenia tarcia, jak i zużywania się powierzchni.

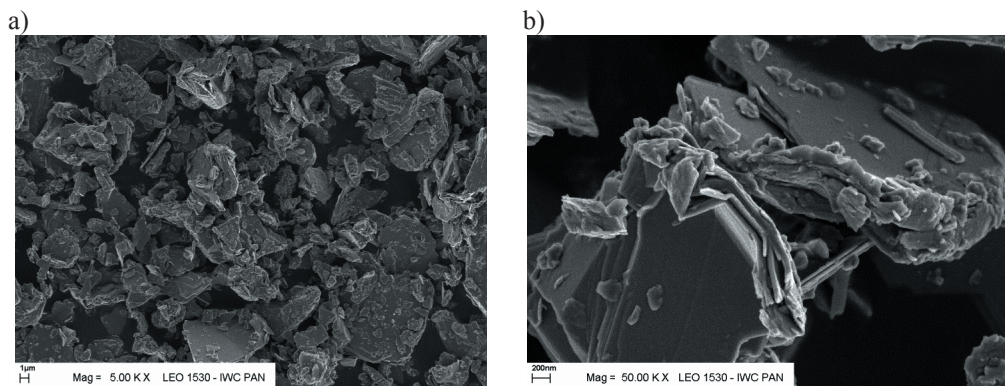
## 8.2. Struktura i własności warstwy wierzchniej nowego kompozytu

Jednym z ważnych czynników definiujących trwałość i efektywność stałej warstwy smarującej, jest kompatybilność związku smarującego z powierzchnią podłoża. Oznacza to tworzenie faz pośrednich, zapewniających dobrą przyczepność stałej warstwy smarującej, wysoki potencjał smarowania oraz redukcję podatności na utlenianie. W ostatniej dekadzie, pojawiły się liczne publikacje wyników badań dotyczące tribologicznych i mechanicznych właściwości dwusiarczku molibdenu ( $\text{MoS}_2$ ) oraz dwuwarstwowej powłoki metal/ $\text{MoS}_2$  [163]. Najbardziej popularnym metalem stosowanym do badań były złoto i tytan. Porównywalne do czystego  $\text{MoS}_2$ , powłoki dwuwarstwowe zawierające te metale wykazały lepsze właściwości smarujące oraz zwiększenie odporności na wilgotne środowisko. Generalnie, uważa się, że dodatki stopowe tych metali zapobiegają penetracji wilgoci i utlenianiu [164]. Dodatkową korzyścią jest zwiększona twardość tych powłok [163, 164]. Zarówno czyste jak i stopowe powłoki modyfikowane  $\text{MoS}_2$  wykazują podobne mechanizmy smarujące. Powszechnie wiadomo, że tworzenie cienkich, stabilnych powłok (filmów) zwłaszcza w kompozycji z  $\text{MoS}_2$ , o grubości

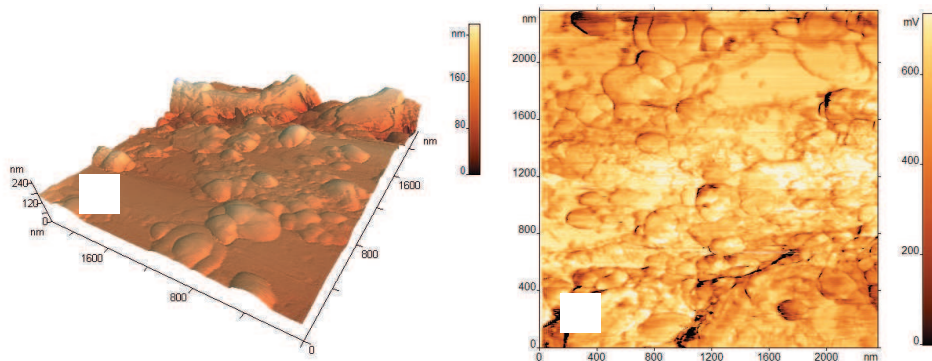
od kilkudziesięciu do kilkuset nanometrów obniża tarcie [164-168]. W publikacji z wyników badań przedstawionych w [169] omówiono: jednowarstwową powłokę ( $\text{MoS}_2$ ) i dwuwarstwową (powłoka metalowa i powłoka  $\text{MoS}_2$ ) dla mikroelektromechanicznych systemów (MEMS), takich jak na przykład przekładnie czy przełączniki.

Celem niniejszej pracy badawczej było zdefiniowanie struktury siarczków  $\text{MoS}_2$  oraz  $\text{WS}_2$  w nano- i mikroskali. Rysunek 80a pokazuje warstwową strukturę grubej na 500-1000 nm cząsteczki  $\text{MoS}_2$ . Grubość każdej warstwy wynosi około 40-60 nm. Rysunek 80b pokazuje jak aglomerat o tym samym wymiarze co monolityczna cząstka, składa się z wielu losowo zorientowanych cząstek.

Dla pomiaru mechanicznych właściwości proszku  $\text{MoS}_2$ , wybrano mniejszy obszar:  $\sim 2,5 \times 2,5$  mikronów z  $\text{MoS}_2\text{BHT}$  (rys. 81).



**Rysunek 80.** Obraz SEM nanocząstek  $\text{MoS}_2$  wytworzonych podczas procesu obrotowego rozwarstwiania [badania własne]



**Rysunek 81.** Obraz nanocząstek  $\text{MoS}_2\text{BHT}$  wykonany za pomocą AFM [badania własne]

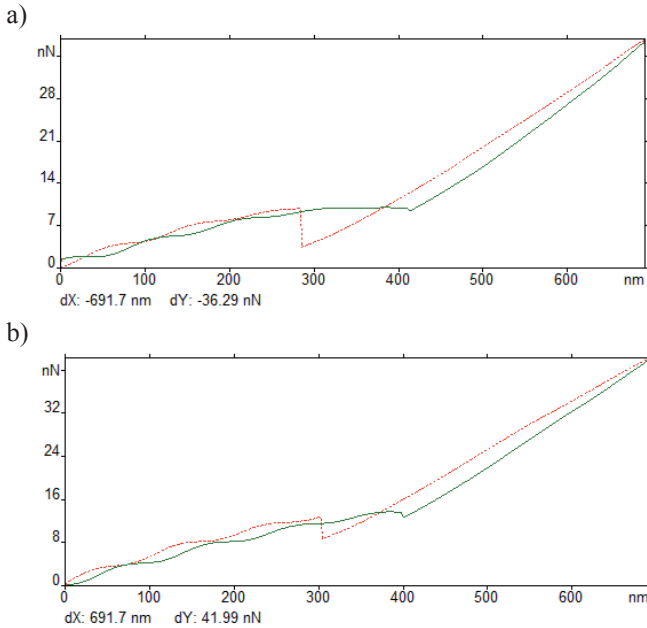
Jeżeli jakieś molekuly (warstwy) materiału są przyczepione do sondy, można zaobserwować obraz odłamywania się poszczególnych molekuł (warstw).

Krzywe rzeczywistej siły odrywania zaobserwowanej dla MoS<sub>2</sub>BHT są przedstawione na rysunku 82. Pomiar wykonano w dwóch punktach (patrz rys. 81). Wyznaczona krzywa siły jasno pokazuje, że MoS<sub>2</sub>BHT cechuje się dobrą przyczepnością do podłoża. Krzywe wykresu siły o ostrych pikach charakteryzuje warstwową strukturę MoS<sub>2</sub>BHT.

Powszechnie wiadomo, że efektem mielenia twardego smaru jest amorficzna jego struktura. Wyniki badania rentgenowskiego zostały przedstawione na rysunku 83 oraz w tablicy (rys. 84).

Wyniki wskazują, że widma mają ostre szczyty w większości płaszczyzn (patrz tablica rys. 84). Zatem wpływ mechanicznego rozwarstwiania wydaje się być minimalny z punktu widzenia zniekształceń struktury krystalicznej.

Dalsze wyniki badań SPM pojedynczych cząstek MoS<sub>2</sub> przed (MoS<sub>2</sub>BHT) i po wyżarzaniu (MoS<sub>2</sub>AHT) zostały przedstawione na rysunkach 85 oraz 86. Poziom przylegania (MoS<sub>2</sub>BHT) jest względnie wysoki i wynosi ~16 nN. Podobnie jest dla MoS<sub>2</sub>AHT wielkość ta wynosi ~19 nN. Tutaj także można dokładnie zaobserwować krzywą o ostrych pikach.

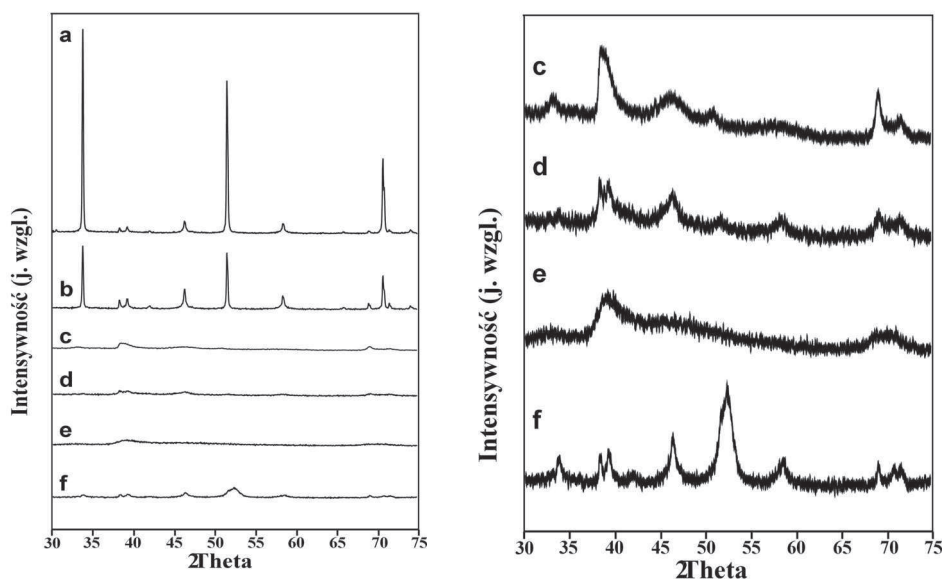


**Rysunek 82.** Krzywe siły odrywania dla obszarów 1(a) oraz 2 (b) z rysunku 81 (kolor zielony – nacisk, kolor czerwony – odrywanie)



Obserwujemy również efekt spadku normalnego obciążenia do zera podczas wgniatania końcówki. Oznacza to, że deformacja przy nacisku rozszczepienia nanocząstek MoS<sub>2</sub>, jest minimalna, co świadczy o wysokich właściwościach smarujących tych nanocząstek. Interesujące są również wykresy krzywych obciążenia. Możemy przyjąć, że ten efekt jest wynikiem działania sił przylegania pomiędzy końcówką, a nanocząstkami MoS<sub>2</sub>.

Porównano zachowanie nanocząstek MoS<sub>2</sub> z wynikami publikacji [170]. Autorzy [170] wykazują, że współczynnik tarcia monolitycznego MoS<sub>2</sub> jest na poziomie 0,08 i jest niewrażliwy na normalne obciążenie w przedziale 0-800 nN. Cząstki MoS<sub>2</sub> składają się ze skupisk (aglomeratów), jednakże wykazują, że współczynnik tarcia wzrasta wraz z normalnym obciążeniem, w obszarze niskiego obciążenia. Może to być spowodowane faktem, że chropowatość skanowanego obszaru znacznie wzrasta przy normalnym obciążeniu. W obszarze wysokiego obciążenia jest wysoki i wynosi ~0,5. Duże tarcie, które można zaobserwować dla aglomeratu, może wynikać z powtarzających się „dotknięć” końcówki sondy z reaktywną płaszczyzną, skupiskami o różnej orientacji, prostopadłej do prostej płaszczyzny krystalitów MoS<sub>2</sub>.



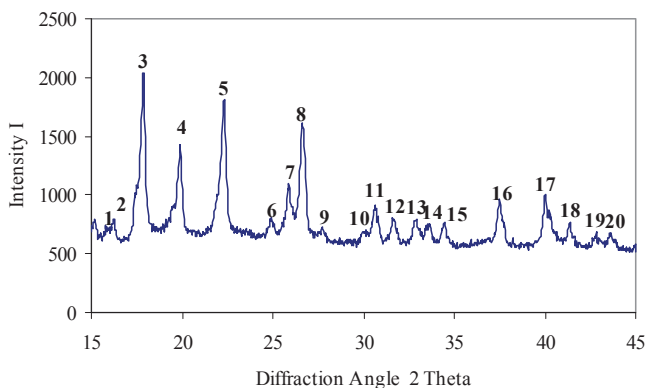
**Rysunek 83.** Dyfraktogramy proszków a) proszek mikro, b) proszek mikro po rozwarstwianiu obrotowym, c) proszek nano komercyjny, d) proszek mikro po 72 h mechanicznej syntezy w alkoholu (wsad 1g), e) proszek mikro po 72 h mechanicznej syntezy (wsad 3 g), f) proszek mikro po 96 h mechanicznej syntezy w alkoholu (wsad 3 g) [badania własne]

Wiązania na tych skupiskach mogą mieć dużą przyczepność oraz możliwą interakcję kapilarną, podobnie jak w naszych eksperymentach.

tablica – rys. 84

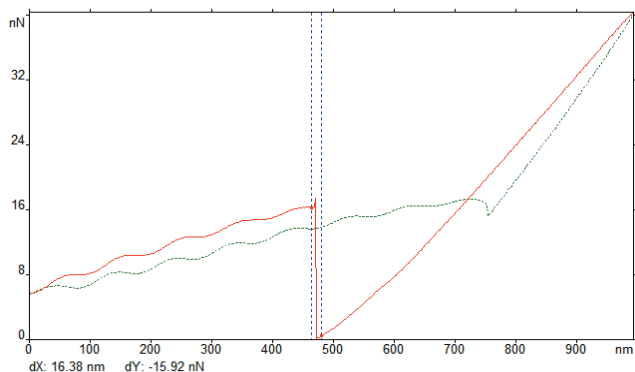
Lp.	d-diff	d-tab	Substancja chemiczna
			wzór
1	2	3	4
1.	2,58227	2,5500	MoS <sub>2</sub>
2.	2,51701	2,5010	MoS <sub>2</sub>
3.	2,28672	2,2770	MoS <sub>2</sub>
4.	2,05736	2,0490	MoS <sub>2</sub>
5.	1,83655	1,8300	MoS <sub>2</sub>
6.	1,64581	1,6410	MoS <sub>2</sub>
7.	1,58538	1,5810	MoS <sub>2</sub>
8.	1,54083	1,5380	MoS <sub>2</sub>
9.	1,48090	1,4784	MoS <sub>2</sub>
10.	1,37209	1,3688	MoS <sub>2</sub>
11.	1,34340	1,3401	MoS <sub>2</sub>
12.	1,30132	1,2983	MoS <sub>2</sub>
13.	1,25616	1,2513	MoS <sub>2</sub>
14.	1,22476	1,2224	MoS <sub>2</sub>
15.	1,19866	1,1960	MoS <sub>2</sub>
16.	1,10373	1,1015	MoS <sub>2</sub>
17.	1,03675	1,0347	MoS <sub>2</sub>
18.	1,00409	1,0029	MoS <sub>2</sub>
19.	0,97002	0,9704	MoS <sub>2</sub>

Powder MoS<sub>2</sub>

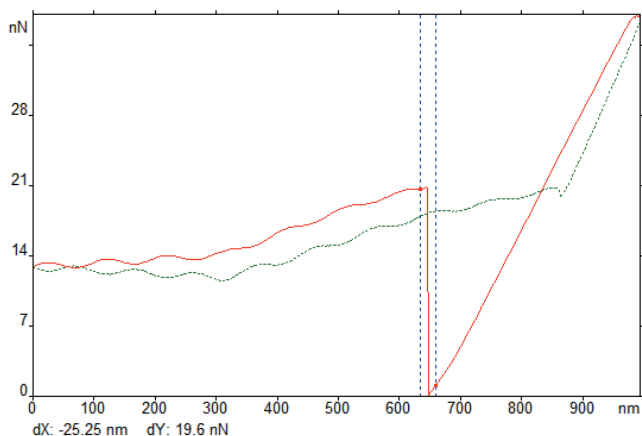


**Rysunek 84.** Diagram rentgenowski proszku MoS<sub>2</sub> po procesie rozwarstwiania obrotowego oraz wyżarzaniu przy 700°C w próżni [badania własne]

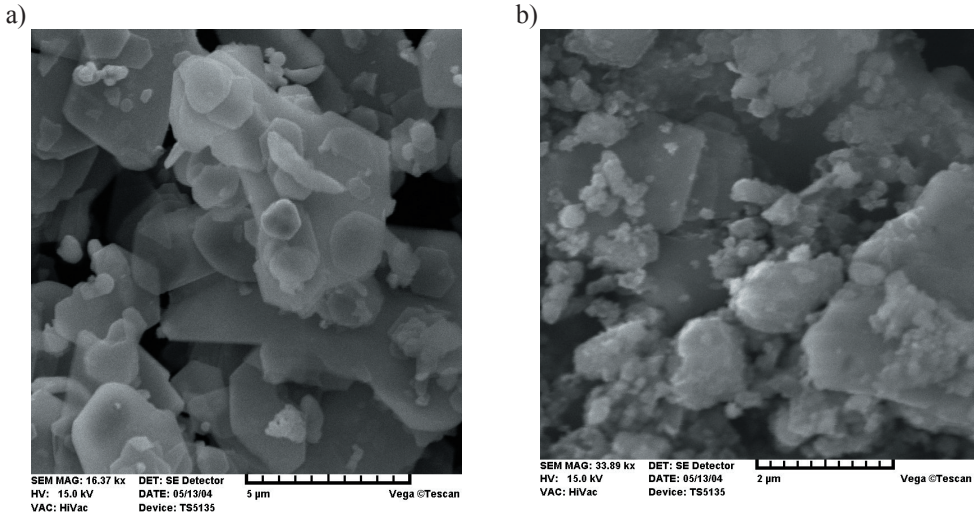
Wyznaczono współczynnik Young'a dla pojedynczych nanocząstek otrzymanych w procesie rozwarstwiania obrotowego o wielkości 15-20 GP. Zarejestrowany współczynnik odpowiada wielkości współczynnika otrzymanego przez innych autorów prac [170]. MoS<sub>2</sub> jest wysoko anizotropowym materiałem. Nacisk rozwarstwiania w płaszczyźnie jest mały, obciążenie normalne początkowo spada do zera, po czym raptownie zwiększa się podczas następującej deformacji nanocząstek (rys. 85, 86). Podobne wyniki SPM zostały uzyskane dla cząstek WS<sub>2</sub> w procesie technologii rozwarstwiania obrotowego. Obrazy SEM nanocząstek WS<sub>2</sub> zostały pokazane na rysunku 87.



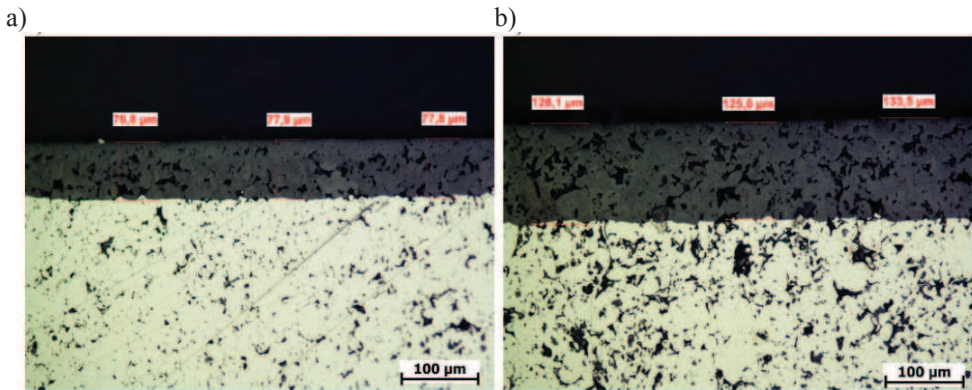
**Rysunek 85.** Krzywe sił dla obszaru 1 (z rys. 81) [badania własne]



**Rysunek 86.** Krzywe sił dla nanocząstek z obszaru 2 (z rys. 81) [badania własne]



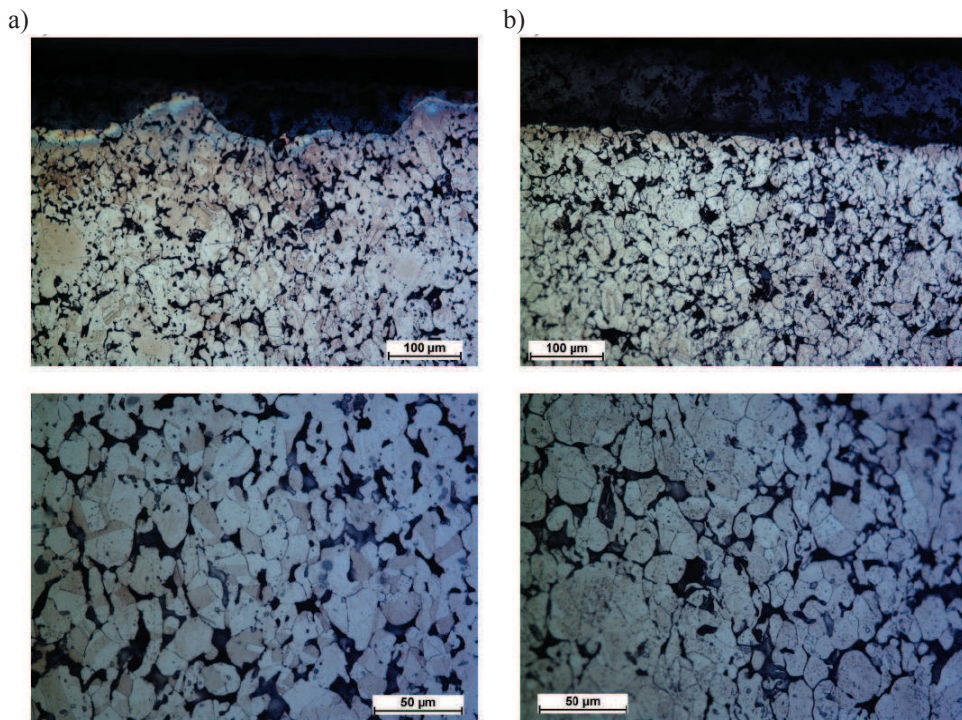
**Rysunek 87.** Obrazy SEM cząstek  $WS_2$ : (a) komercyjny proszek; (b) nanocząstki otrzymane w technologii rozwarstwiania obrotowego w czasie 3 h [badania własne]



**Rysunek 88.** Struktura powierzchni warstwy azotowanej na zglądach tulei LTS: a) azotowanie jonowe w czasie 10 h w temperaturze 550°C, b) azotowanie jonowe w czasie 30 h w temperaturze 580°C [badania własne]

Efektywność oraz trwałość powłoki smarującej zależną od sposobu jej wytworzenia. Przyleganie powłoki smarującej, chropowatość oraz twardość podłoża, definiują wstępne warunki w ocenie tribologicznej współpracującej pary.

W celu uzyskania wysokiej twardości próbek tulei LTS zastosowano technologię azotowania. Technologiczny proces wytwarzania tulei LTS wygląda następująco: i) zagęszczanie; ii) spiekanie; iii) kalibrowanie; iv) azotowanie; v) impregnacja ciśnieniowa, vi) suszenie.



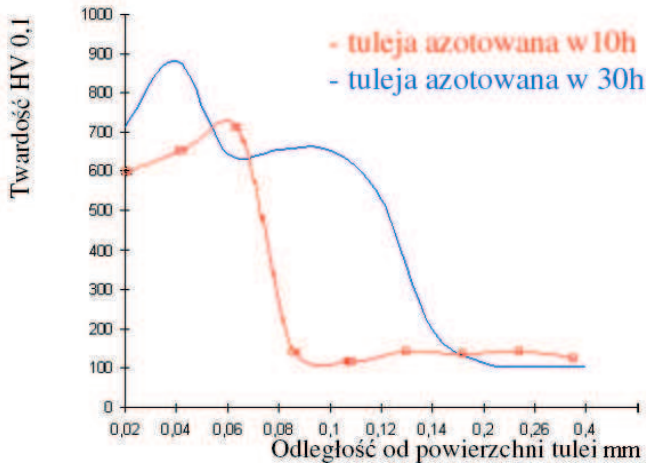
**Rysunek 89.** Struktura wytworzonych tulei LST: a) azotowanych w czasie 10 h w temperaturze 550°C, b) azotowanych w czasie 30 h w temperaturze 580°C [badania własne]

Struktura powierzchni azotku została przedstawiona na rysunku 88.

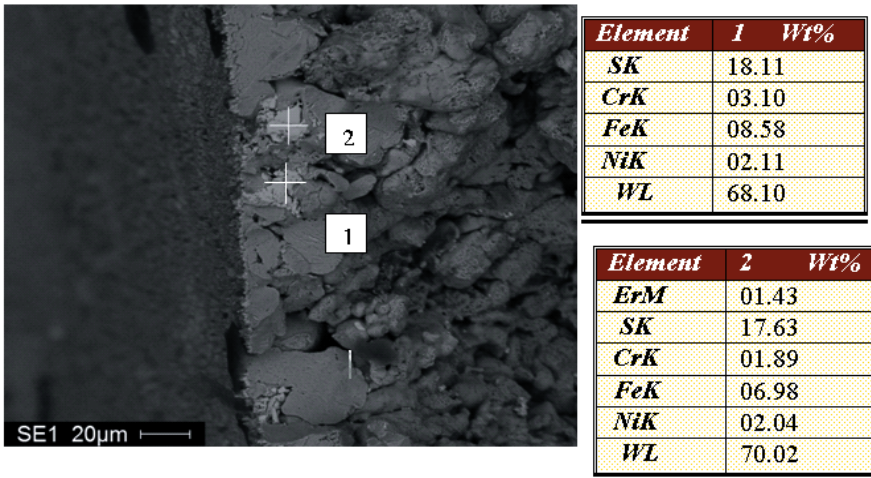
Uzyskano warstwę azotku z jednolitą grubością wynoszącą około 80-140  $\mu\text{m}$ . Porowatość wynosiła około 20-22%. Strukturę osnowy przedstawiono na rysunku 89, natomiast rozkład twardości obrazuje rysunek 90.

Temperatura i czas azotowania są głównymi czynnikami wpływającymi na twardość oraz grubość warstwy. Uzyskiwana jest mikrotwardość wynosząca około 900-1000 MPa.

Porowata struktura tulei zapewnia możliwość impregnacji w całej objętości tulei. W wyniku działania ciśnienia 30 MPa wytworzonego w komorze impregnacyjnej, płyn impregnacyjny infiltruje przez ściankę tulei LST-500, umieszczoną w komorze impregnacyjnej. W czasie tego procesu cząstki proszku  $\text{WS}_2$  przenikają w pory części impregnowanej tworząc jednocześnie ciekłą warstwę z proszku  $\text{WS}_2$  na wewnętrznej powierzchni tulei. Rysunek 91 ilustruje wypełnienie porów nanocząstkami blisko powierzchni  $\text{WS}_2$ , w wewnętrznej powierzchni



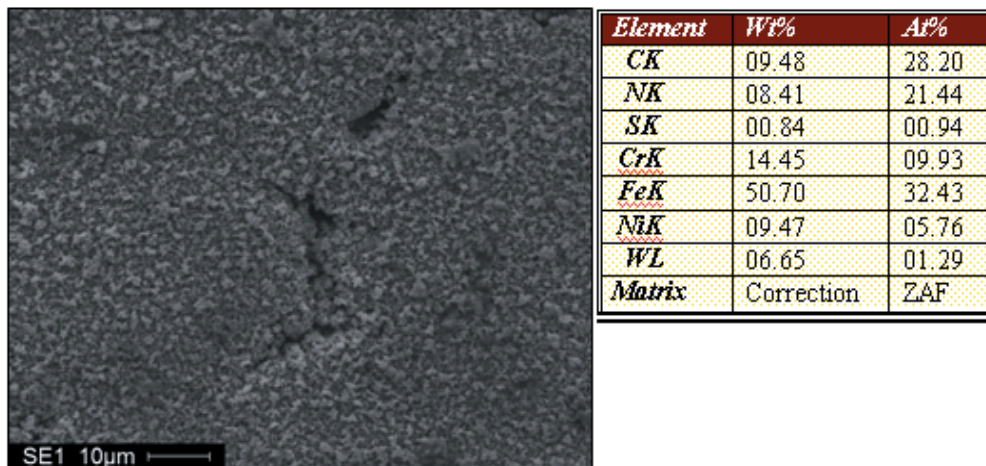
**Rysunek 90.** Rozkład twardości warstwy azotowanej tulei w funkcji odległości od powierzchni [badania własne]



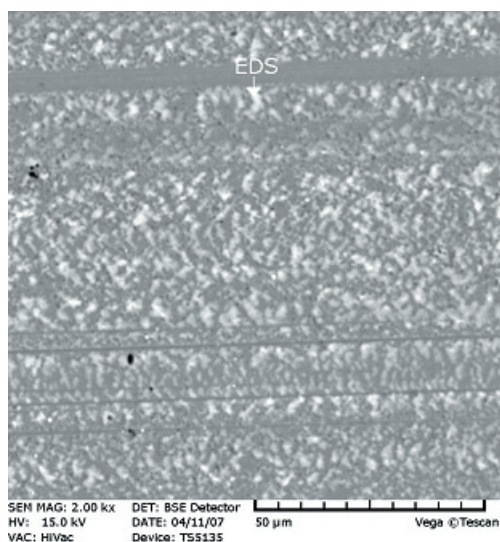
**Rysunek 91.** Przekrój SEM i EDS wewnętrznej powierzchni tulei LTS [badania własne]

tulei. Powstaje cienka warstwa filmu, potwierdzona analizą EDS powierzchni zewnętrznej (rys. 92).

Otrzymanie tego rodzaju warstwy smarnej pozwala na zmianę warunków smarowania z granicznego na quasi-hydrauliczny, ze względu na obecność cząstek smaru stałego przy interfejsie. Wynikiem tego jest powstanie na współpracującym wale, stałej powłoki smarnej (rys. 93).



Rysunek 92. Przekrój SEM i EDS zewnętrznej powierzchni tulei LTS [badania własne]



Element	Linia	Wt%	At%
Fe	KA1	62,58	80,81
Cr	KA1	4,21	5,84
W	MA1	33,04	12,96
S	KA1	0,17	0,38
<b>Suma</b>		<b>100,00</b>	<b>100,00</b>

Rysunek 93. Obraz SEB oraz EDS powłoki smarującej na wale łożyska LTS [badania własne]

### 8.3. Wpływ chropowatości powierzchni oraz siarczkowych nanocząstek grafenopodobnych na procesy tarcia

Jak wykazano w rozdziale 8.1 większość elementów maszyn najczęściej pracuje w warunkach tarcia mieszanego i granicznego. Przygotowanie powierzchni ma znaczący wpływ na

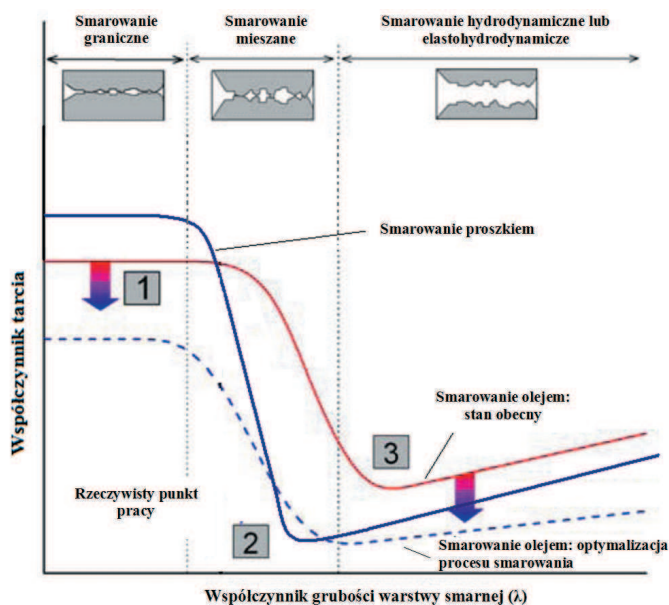
uszkodzenia powierzchni, jej zużycie i korozję [171-173]. Dlatego też, informacje o wpływie chropowatości i topografii powierzchni na grubość powłoki smarnej oraz ciśnienia kontaktowego cieszą się coraz większym zainteresowaniem badaczy. Wczesne analizy skupiały się na badaniu zachowania pojedynczej nieregularności powierzchni, przechodzącej przez idealnie gładką elastyczno-hydrodynamiczną (EHD) powierzchnię kontaktu [174]. Stwierdzono, że nieregularności na ruchomej powierzchni, nie są całkowicie spłaszczone jak w przypadku tarcia obrotowego oraz że zmiany w grubości powłoki następują w wyniku zmiany prędkości. Autorzy [175] stwierdzili, że sinusoidalna chropowatość powierzchni podczas krótkotrwałego kontaktu jest tylko lekko zdeformowana, natomiast przy dłuższym działaniu następuje jej całkowite spłaszczenie. W ciągu ostatniej dekady, rozwiązania numeryczne uwzględniające rzeczywistą topografię powierzchni, umożliwiły badania nad zjawiskami tarcia i smarowania. Uwzględniały lokalne ciśnienie kontaktu oraz wahania grubości powłoki, dla każdego poszczególnego przypadku bezpośrednio opierając się na danych warunkach oddziaływania oraz danych pomiaru powierzchni. Przeprowadzono kilka eksperymentów dla zbadania wpływu chropowatości powierzchni na warstwy smarujące. Większość eksperymentalnych badań skupiało się na sztucznie wytworzonych nieregularnościach, takich jak guzki, progi, wgniecenia i rowki [175]. Złożoność topografii powierzchni w przypadku rzeczywistych powierzchni strukturalnych sprawiają, że pomiary są bardzo trudne.

W celu zmniejszenia tarcia w krytycznych komponentach tribologicznych dla poszczególnych zastosowań, zasadne jest zaprojektowanie właściwych powłok uwzględniających rzeczywiste warunki pracy. Przykładami wyrobów pracujących w eksploatacyjnie trudnych i krytycznych warunkach tarcia są wysokotemperaturowe łożyska ślizgowe oraz narzędzia do kucia [176]. W tych przypadkach badania doświadczalne są bardzo kosztowne. Dlatego też wyniki badań numerycznych są dla badaczy w tej dziedzinie bardzo cenne dla projektowania powłoki i określenia korzystnych warunków smarowania. Jak wcześniej wspomniano przemysł motoryzacyjny oraz lotniczy poszukuje korzystnych rozwiązań dla elementów napędowych (silnik, przekładnia oraz takie części jak: koła zębate, łożyska, tłoki, pierścienie, krzywki oraz człony napędzane itd.), które będą pracowały w systemie mieszanego smarowania. W warunkach tarcia mieszanego występuje zarówno smarowanie hydrodynamiczne w niektórych obszarach oraz smarowanie graniczne. W praktyce inżynierskiej, istnieją trzy podstawowe sposoby zmniejszania tarcia w tego typu przypadkach:



- 1) zmniejszanie kontaktowego tarcia ślizgowego poprzez poprawę właściwości powłoki granicznej w obszarach kontaktowych,
- 2) zmniejszanie powierzchni kontaktowej przez optymalizację warunków eksploatacyjnych oraz topografii powierzchni,
- 3) zmniejszanie hydrodynamicznego tarcia poprzez poprawę reologicznych właściwości smaru oraz optymalizację konstrukcji wyrobu.

Współczynnik tarcia może zostać przedstawiony poprzez określenie dla każdego przypadku krzywej Stribeck jako funkcji współczynnika tarcia i proporcji grubości powłoki smarowania,  $\lambda$ , jak to przedstawiono na rysunku 94. Tarcie może zostać zredukowane poprzez zastosowanie materiałów o niskim współczynniku tarcia, poprawę powierzchni kontaktowej oraz dodatków smarnych. Modelowanie systemu smarowania przy tarcu mieszanym nie jest łatwym zadaniem, ponieważ zarówno równania opisujące hydrodynamikę jak i powierzchnię kontaktową muszą być rozwiązywane jednocześnie [177, 178]. Złożoność ta wpływa również na przewidywany przebieg procesu tarcia. Całkowite tarcie jest połączeniem (lub sumą) tarcia kontaktowego oraz tarcia hydrodynamicznego [179]. Tarcie kontaktowe jest determinowane przez wydajność powłoki granicznej, podczas gdy tarcie hydrodynamiczne jest powiązane z zachowaniem



Rysunek 94. Krzywe Stribeck

reologicznym smaru. Trafna ocena tarcia mieszanego wymaga zatem szczegółowych informacji zachowań przejściowych [180]. W trakcie modelowania smarowania w układzie tarcia mieszanego w trudnych warunkach eksploatacyjnych, należy szczegółowo określić chropowatość powierzchni w obszarze kontaktu, jak i również precyzyjnie określić procent kontaktu oraz hydrodynamiczne ciśnienie/grubość powłoki w oparciu o rzeczywistą topografię chropowatej powierzchni.

Rysunek 94 pokazuje poprawę tarcia poprzez (1) redukcję tarcia kontaktowego w wyniku optymalizacji smarowania granicznego, (2) zmniejszenie powierzchni kontaktowej oraz poprawę topografii powierzchni, jak też (3) zmniejszenie tarcia hydrodynamicznego poprzez poprawę wydajności smaru [181]. Uważa się, że zastosowanie nanocząstkowych smarów stałych (linia niebieska) skraca etap tarcia mieszanego i można uzyskać współczynniki tarcia porównywalne ze smarowaniem olejowym. Analiza [181] wskazuje potencjał smarowania nanoproszkami smarów stałych.

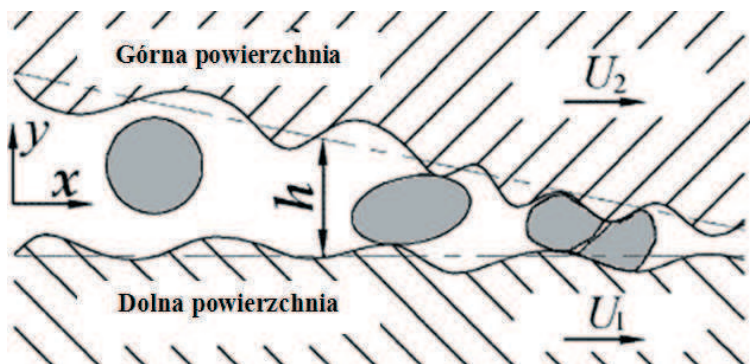
Powszechnie wiadomo, że procesowi tarcia towarzyszą produkty zużycia jak również inne zanieczyszczenia typu rdza czy też kurz [182]. W wielu sytuacjach, większe i twardsze stałe cząstki, które zazwyczaj powstają w wyniku zużycia i pyłu środowiskowego są szkodliwe dla „tribopar”. W kontakcie ślizgowym, twarde cząstki uszkadzają powierzchnię przez rysowanie i bruzdowanie. Khonsari [183] zaprezentował model służący do określania temperatury zapłonu pomiędzy cząstką osadzoną w górnej warstwie łożyska w trakcie kontaktu z bieżnią. Wniosek, że cząstki większe niż grubość powłoki oleju oraz bardziej miękkie niż oddziałujące powierzchnie, także uszkodziłyby powierzchnię oraz zredukowały żywotność tribopary, został przedstawiony w [184]. Miękkie zanieczyszczenia (30  $\mu\text{m}$ ) mogą rzeczywiście być bardzo destrukcyjne w trakcie plastycznej deformacji cząstek [185]. Poprawę charakterystyk smarowania uzyskano poprzez wymieszanie miękkiego  $\text{MoS}_2$  oraz cząstek grafitu z czystym olejem [186, 187]. Zastosowanie mieszanki z nanodiamentowymi cząstkami zredukowało siłę tarcia oraz zwiększyło grubość powłoki oleju [188]. Eksperymenty przeprowadzone przez Tenne i innych, wykazały, że współczynnik tarcia zmniejszył się o 50% dzięki obecności nanowymiarowych cząstek  $\text{WS}_2$  [189]. Wszystkie wspomniane badania wykazały, że charakterystyki smarowania są znacząco zależne od wymiaru cząstek, koncentracji masy, granicy plastyczności materiału itd. Ze względu na swoją złożoność, wpływ względnie małych i miękkich cząstek stałych nadal pozostaje niewiadomą. Kiedy średnica cząstek, chropowatość powierzchni ślizgowej oraz średnia grubość powłoki olejowej są w tym samym rzędzie wymia-

rowym, wówczas zarówno cząstki stałe [184, 185] jak i nierówności powierzchni par trących [190, 191] będą ulegały odkształcaniu w strefie kontaktu. W publikacji [182] został zaprezentowany mieszany model płynno-stałego smarowania, który łączy równanie Reynoldsa, równania przenoszenia obciążenia sferycznej cząstki oraz kontaktowe równania nieregularności. Następnie, wykorzystując matematyczne symulacje, wspomniana publikacja porównuje wyniki, które zostały uzyskane przy innych warunkach. Przeanalizujemy nasze eksperymentalne dane w oparciu o wyniki modelowania [182].

Fizyczny model kontaktu ślizgowego z zawiesiny (olej + siarczkowe struktury grafenopodobne), który został przedstawiony na rysunku 95 ukazuje konfigurację mieszanego, płynno-stałego kontaktu pomiędzy dwiema powierzchniami. Jak to przedstawiono na rysunku 95, rozmiar cząstki jest tego samego rzędu wielkości, co przerwy i nieregularności powierzchni. W strefie kontaktu, istotna jest zarówno deformacja cząstek, jak i nierówności powierzchni. Aby odpowiednio przeanalizować wydajność mieszanego, płynno-stałego smarowania, wszelkie płyny, sferyczne cząstki stałe oraz nieregularności powierzchni par trących muszą być wzięte pod uwagę [182].

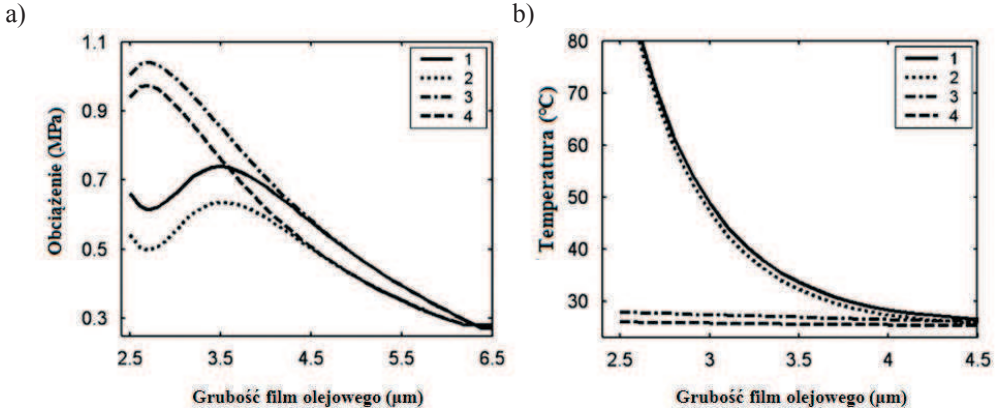
W celu przedstawienia wpływu płynno-stałego smarowania, chropowatości powierzchni oraz obciążenia, średnie temperatury są obliczane w czterech różnych warunkach (rys. 96). Warunki te są następujące:

- 1) chropowata powierzchnia oraz płynno-stałe smarowanie ( $d = 5 \mu\text{m}$ ,  $\lambda = 5\%$ ,  $R_a = 1,5 \mu\text{m}$ ),
- 2) chropowata powierzchnia i czysty olej ( $R_a = 1,5 \mu\text{m}$ ),
- 3) gładka powierzchnia i płynno-stałe smarowanie ( $d = 5 \mu\text{m}$ ,  $\lambda = 5\%$ ),
- 4) gładka powierzchnia i czysty olej.

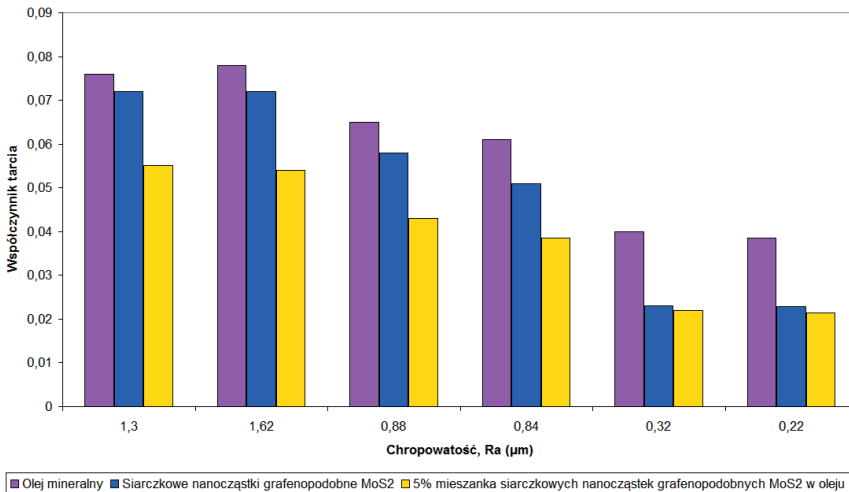


Rysunek 95. Para trąca z płynno-stalym smarowaniem [182]

Jak to przedstawiono na rysunku 96a, zastosowanie gładkiej powierzchni prowadzi do wyższych obciążeń, natomiast czysty olej do niższych obciążeń. Wynik jest zgodny z eksperymentalnymi i teoretycznymi badaniami w przedstawionych w literaturze [192, 193]. Jeżeli średnia grubość powłoki jest większa niż  $6,3 \mu\text{m}$ , wpływ nierówności i wielkość cząstek jest



**Rysunek 96.** Wyniki modelowania obciążenia nośnego (a) oraz temperatury (b) w systemach ślizgowych 1-4 [182]: (1) Chropowata powierzchnia oraz płynno-stałe smarowanie ( $d = 5 \mu\text{m}$ ,  $\lambda = 5\%$ ,  $R_a = 1.5 \mu\text{m}$ ); (2) Chropowata powierzchnia oraz czysty olej ( $R_a = 1,5 \mu\text{m}$ ); (3) Gładka powierzchnia oraz płynno-stałe smarowanie ( $d = 5 \mu\text{m}$ ,  $\lambda = 5\%$ ); (4) Gładka powierzchnia oraz czysty olej



**Rysunek 97.** Współczynnik tarcia w zależności od chropowatości pierścienia (patrz rozdział 7.1.2) [badania własne]

tak mały, że można go pominąć. Jeżeli jednak grubość jest względnie mała, wpływy gładkiej powierzchni i cząstek są dość oczywiste. Podobny wpływ na temperaturę wywołany przez chropowatość powierzchni oraz czystość oleju można zauważyć na rysunku 96b. Jedną z konkluzji z [182] jest to, że wyłącznie, kiedy brana jest pod uwagę nierówność, charakterystyka obciążenia może być symulowana bardziej precyzyjnie, szczególnie kiedy grubość powłoki jest tego samego rzędu wielkości, co chropowatość powierzchni oraz średnica cząstki.

Wpływ chropowatości na współczynnik tarcia jest przedstawiony na rysunku 97 na podstawie testów przeprowadzonych w INOP i opisanych w rozdziale 7.1.2. Chropowatość tarczy różniła się w zakresie 0,22-1,3  $\mu\text{m}$  (szlifowanie-polerowanie). Wyniki są zgodne z wynikami modelowania przedstawionymi w [182]. Smarowanie, w przypadku dużej chropowatości powierzchni, odgrywa kluczową rolę. Powstaje wówczas względnie gruba powłoka smarująca, o niskiej trwałości, ze względu na wysokie lokalne naciski. Najbardziej efektywne jest wówczas smarowanie mieszane (zgodnie z rys. 95) z zastosowaniem siarczkowych struktur grafenopodobnych.

#### **8.4. Rola mikrokanalów w hydrodynamicznym i quasi-hydrodynamicznym smarowaniu**

Zastosowanie mikrokanalów w celu optymalizacji warunków tarcia podczas smarowania olejowego, jest obecnie przedmiotem badań dla różnych łożysk i innych par trących. W pracy [194] badano charakterystykę tarcia łożyska czopowego z wgłębieniami, wytworzonymi mechanicznie lub poprzez trawienie chemiczne. Wykazano, że optymalizacja wymiarów tych wgłębień ma istotny wpływ na poprawę warunków tarcia w szczególności dla lekkich olei. Wyniki wykazują, że w systemie smarowania mieszanego, tak zwany efekt smarowania wtórnego w obszarze wgłębień, jest głównym mechanizmem odpowiedzialnym za poprawę wydajności pracy łożyska. Szereg doświadczeń zostało przeprowadzonych w celu sprawdzenia wpływu tych wgłębień na krzywą Stribeck łożyska czopowego. Obciążenie, typ oleju, wymiar wgłębień, głębokość i kształt były przedmiotem badań wpływu tych parametrów na charakterystyki tarcia. Wykazano, że kształt oraz głębokość wgłębień są kluczowe dla poprawy współczynnika tarcia. Staje się to bardziej widoczne, w przypadku zastosowania oleju o niższej lepkości. W systemie smarowania mieszanego, efekt smarowania wtórnego dominuje w przypadku łożysk czopowych z wgłębieniami. W systemie smarowania hydrodynamicznego, asyme-

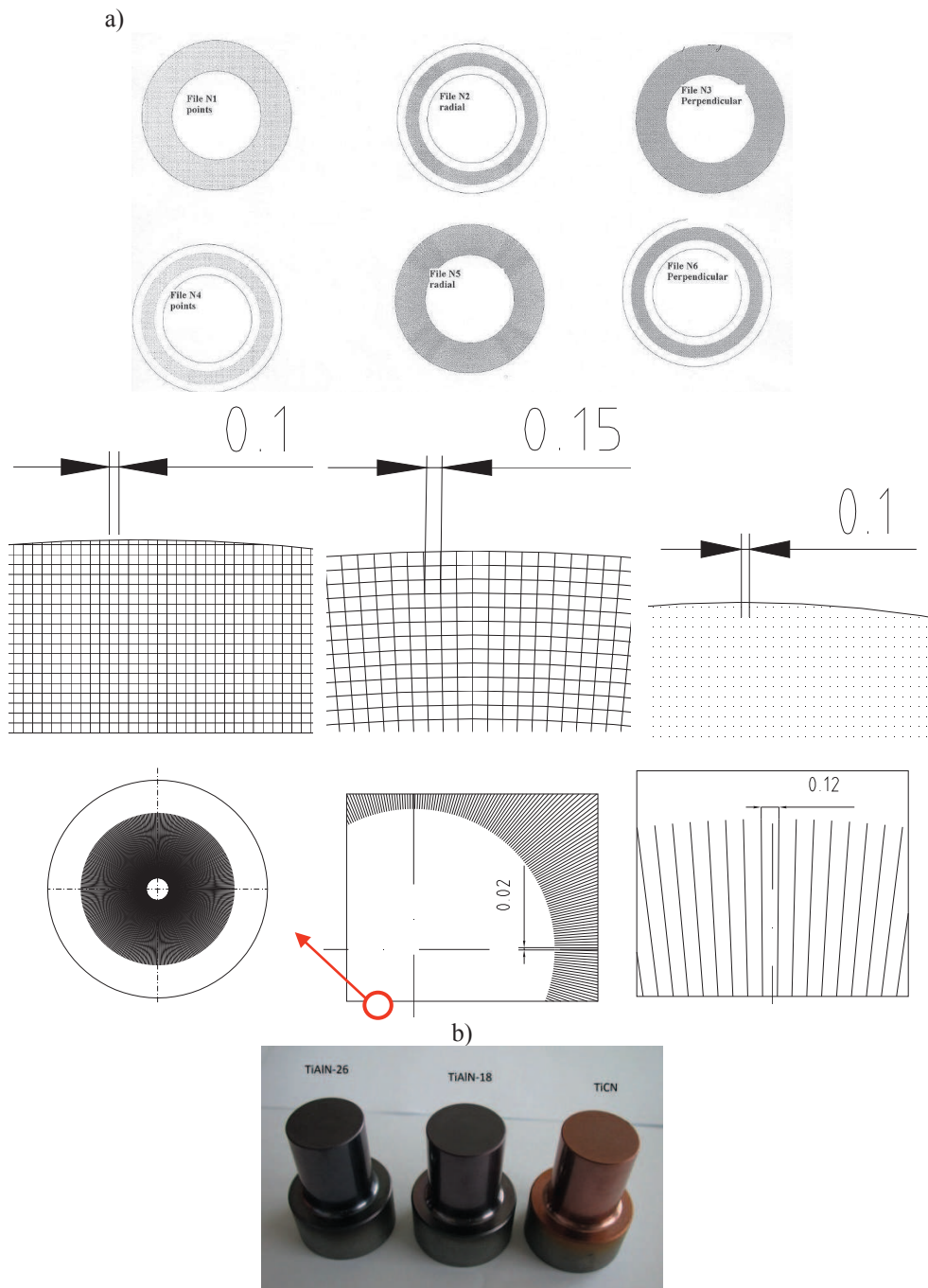
tryczne rozłożenie ciśnienia w obszarze wgłębień, wytwarza dodatkowe ciśnienie hydrodynamiczne, które rozdziela powierzchnie i skutkuje niższym współczynnikiem tarcia. W systemie mieszanego smarowania, pełen obszar wytrawionej tulei (z wgłębieniami na całej długości obwodu,  $360^\circ$ ) funkcjonuje lepiej, niż w przypadku tulei z tylko połową wgłębień wzdłuż strefy aktywnej (na połowie długości obwodu  $180^\circ$ ), ze względu na efekt smarowania wtórnego; w przypadku systemu smarowania hydrodynamicznego, ich wydajność jest prawie taka sama.

W przypadku smarowania proszkowego, ciągłe podawanie nanocząstek smaru stałego na powierzchnię pary ślizgowej, uwarunkowane jest optymalizacją wgłębień i mikrokanałów w testach doświadczalnych, adekwatnych do warunków pracy. Jak przedstawiono w [195] wymagania w stosunku do narzędzi do kucia stale rosną, a badania zmierzają do poprawy twardości, odporności na zużycie i wytrzymałości na zmęczenie cieplne. Dla większości narzędzi stosuje się na powierzchni powłokę osadzoną metodą CVD/PVD [196].

Generalnie, narzędzia do kucia muszą być odporne na zużycie i posiadać odpowiednią twardość [197]. W celu poprawy odporności na zużycie zwiększa się grubość powłoki, co często skutkuje obniżeniem przyczepności.

Dobór właściwego smarowania narzędzi do kucia na zimno zależy od wielu parametrów, takich jak materiał narzędzia, warunki jego pracy, chropowatość powierzchni, temperatura, ciśnienie kontaktu oraz prędkość ślizgania. Głównym zadaniem procesu smarowania jest zapobieganie zatarciu i zachowanie tak długo jak to możliwe, trwałości narzędzi, poprzez redukcję oporów tarcia. Zastosowanie stearynianu fosforanowego oraz smarowania olejowego są stosowane jednocześnie w celu obniżenia współczynnika tarcia i zachowania wyżej wspomnianej integralności. Jednakże, wysokie normalne i ścinające naciski występujące podczas pracy powodują, iż dotychczasowe metody smarowania nie są skuteczne. Zatem poszukiwanie lepszych smarów stałych ma ogromne znaczenie.

W rozdziale 7 przedstawiono, że nanocząstki  $\text{MoS}_2$  oraz  $\text{WS}_2$  posiadają unikalne tribologiczne właściwości: niski współczynnik tarcia ( $< 0,03$ ) oraz niski współczynnik zużycia. Po raz pierwszy zastosowano w narzędziach do kucia na zimno modyfikację ich powierzchni nano i mikrocząstkami smarów stałych. Ciągłe podawanie w obszar kontaktu narzędzia i wytwarzanego wyrobu poprzez specjalne mikrokanały nanocząstek ( $\text{MoS}_2/\text{WS}_2$ ) i ich powolne uwalnianie do powierzchni, pozwoli uzyskać zmniejszenie zarówno współczynnika tarcia jak i zużycia, jednocześnie zapewniając mechaniczną integralność nanokompozytowych powłok



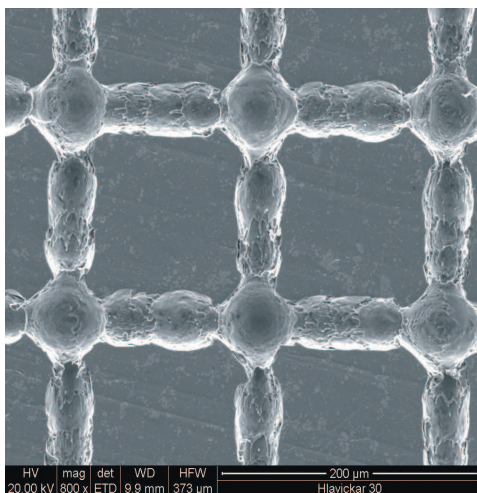
**Rysunek 98.** Rozmieszczenie, ścieżka przebiegu wiązki lasera na próbkach do testów tribologicznych (a); na stemplach do spęczania na zimno (b) [badania własne]

w dłuższym okresie czasu. Są to unikalne badania przeprowadzone podczas realizacji międzynarodowego projektu [74-80].

Do wytwarzania mikrokanalików, będących swoistym zbiornikiem nano i mikrocząstek siarczków grafenopodobnych na powierzchni narzędzia, stosuje się odpowiedni laser, który kształtuje właściwą geometrię mikrowgłębień oraz mikrokanalów (głębokość, średnica, i kształt, patrz rys. 98).

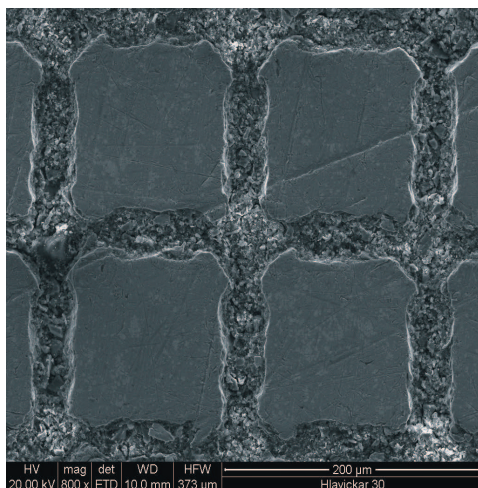
Stosuje się wysokoenergetyczne, impulsowe, lasery światłowodowe, które mają następujące parametry: długość fal – 1,06 mikronów; średnia moc – 10-50 W; częstotliwość impulsu – 20-200 kHz; energia impulsu – 2 mJ; trwałość impulsu – 80-500 ns; punkt ogniskowy – 20 mikronów. Niniejsze parametry pozwalają na formowanie precyzyjnej sieci mikrokanalów z następującymi, typowymi wymiarami mikrowgłębień: średnica 20-50 mikronów oraz głębokość 5-10 mikronów (rys. 99). Mieszanka nanocząstek  $\text{MoS}_2$  znajduje się w mikro-zbiornikach na powierzchni narzędzia (rys. 100).

Przeanalizowano cztery warianty kształtowania sieci mikrokanalów, aby zdefiniować optymalną geometrię mikrokanalów (rys. 101) i optymalną konfigurację sieci mikrokanalów (promieniowe i prostokątne struktury) zapewniające powolne uwalnianie siarczkowych nanocząstek grafenopodobnych do powierzchni, generując samosmarującą powłokę (tablica 12).

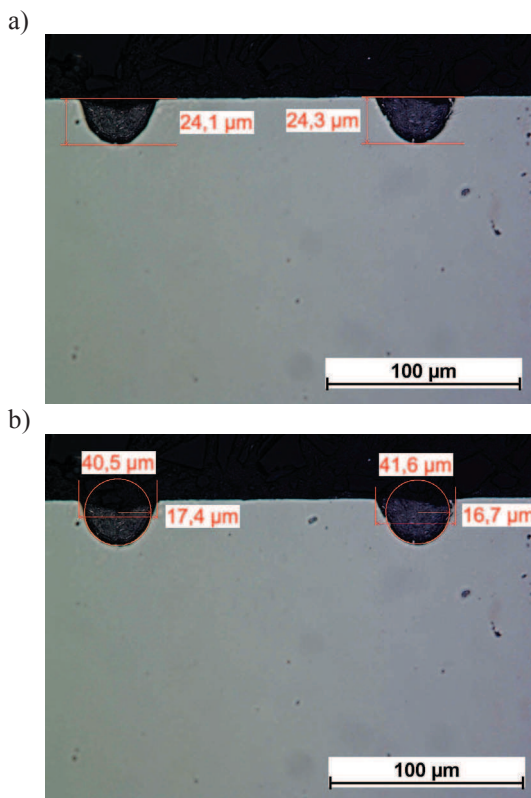


*Rysunek 99. Struktura laserowych mikrokanalów*





*Rysunek 100. Laserowe mikrokanaly wypełnione nano i mikrocząstkami siarczków grafenopodobnych [badania własne]*

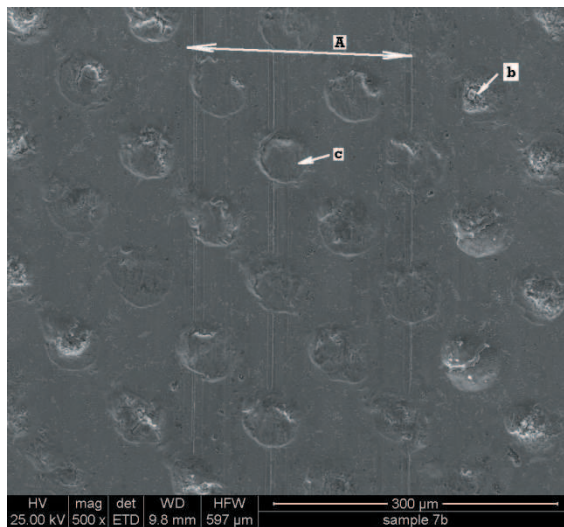


*Rysunek 101. Przekrój poprzeczny powierzchni z mikrokanalikami [badania własne]*

Wpływ siarczkowych nanocząstek grafenopodobnych MoS<sub>2</sub> był badany na testerze komercyjnym T-10 przy normalnych obciążeniach 6-10 N oraz prędkości obrotowej 200 rpm. Próbki dysku o średnicy 40 mm oraz kulki o średnicy 10 mm były wykonane ze stali SW7 o twardości 62-63 HRC. Współczynnik tarcia oraz parametr zużycia zostały zdefiniowane na podstawie pomiarów siły tarcia i wagi kulki. Efekt samosmarującego narzędzia z nanocząstkowym smarem stałym jest widoczny na obrazie SEM testowanego dysku z mikrowgłębieniami wypełnionymi mieszanką nano- i mikrocząstek MoS<sub>2</sub> (rysunek 102, strzałka b). Test kula-na-dysku został wykonany bez oleju. Smarowanie stałe zostało wykonane poprzez wygenerowanie powłoki smaru stałego, ze względu na obecność nanocząstek smaru stałego w mikrozbiornikach [177, 178]. Na ścieżce pracy na ok. 300 mikronów szerokości, widoczne są pierwsze, małe ślady zużycia (zadrapań) (zużycie po 10 000 cykliów).

**Tablica 12.** Przebadane warianty sieci mikrowgłębień na próbkach tarczowych

N	Typ wzoru	Średnica, $\mu\text{m}$	Odległość, $\mu\text{m}$	Głębokość, $\mu\text{m}$	Szerokość, $\mu\text{m}$
1	Bez wgłębienia	-	-	-	-
2	Wzór wgłębienia – 2	50	300	5	
3	Wzór wgłębienia – 3	50	150	10	
4	Sieć promieniowa – 4		150	5	50
5	Sieć prostokątna – 5		150	7	50

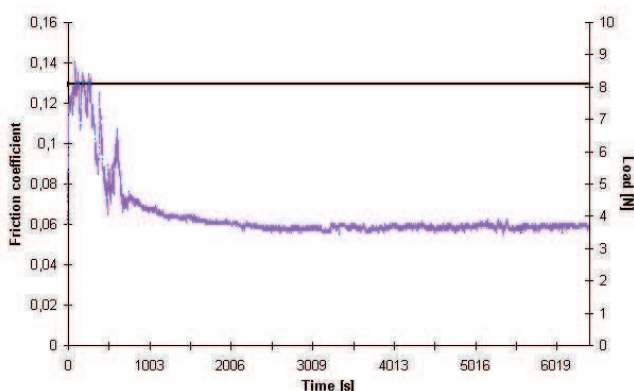


**Rysunek 102.** Obraz SEM mikrowgłębień typu 3 oraz ścieżka zużycia (strzałka A) [badania własne]

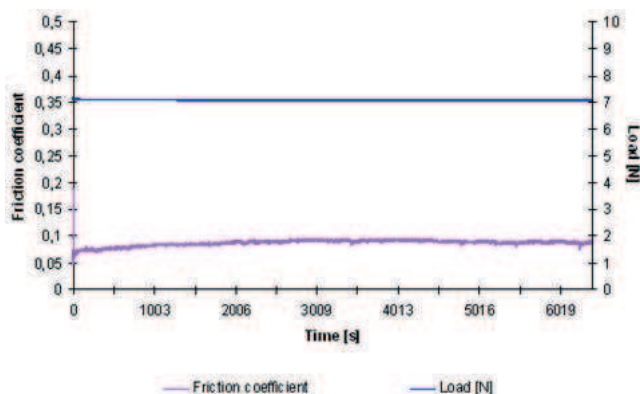
Podczas testu zostały zebrane produkty zużycia pochodzące z kulki, do mikroziorników (strzałka c) oraz wymieszane z cząstkami smaru stałego. Ta samosmarująca, nanostrukturalna mieszanka proszkowa wydaje się łagodzić zarówno tarcie, jak i zużycie.

Współczynnik tarcia dla dysku z mikrowgłębieniami typu 2 (tablica 12) został pokazany na rysunku 103. Etap eksploatacji dla tego testu wynosi ok. 1500 cykli następujących po stabilizacji współczynnika tarcia przy wartości ok. 0,06.

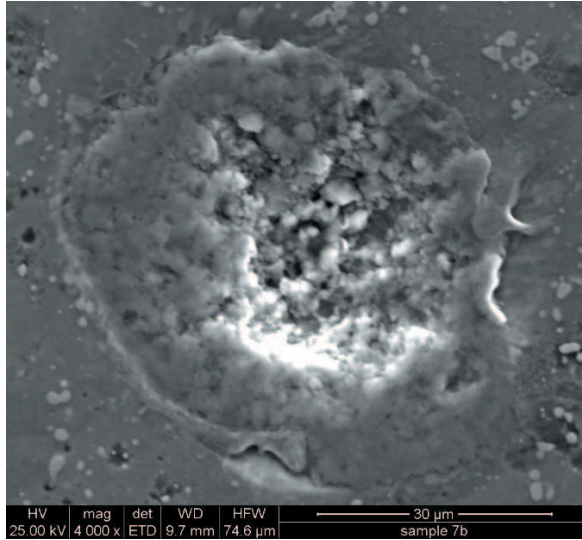
Wyniki testu tarcia powierzchni zmodyfikowanej nanocząstkami  $\text{MoS}_2$  z mikrokanalami (konfiguracja sieci mikrokanalów typ 4) wykazały stabilny współczynnik tarcia wynoszący 0,05-0,08, który można zaobserwować już od pierwszych cykli (rys. 104). Świadczy to o tym,



**Rysunek 103.** Współczynnik tarcia próbek testu kula-na-dysku z mikrokanalami typu 2 (tablica 12) wypełnionymi siarczkowymi nanocząstkami grafenopodobnymi [badania własne]



**Rysunek 104.** Współczynnik tarcia powierzchni, zmodyfikowanej nanocząstkami  $\text{MoS}_2$  osadzonymi w mikrokanalach (konfiguracja sieci mikro-kanalów typu 4) [badania własne]



*Rysunek 105. Obraz SEM mikro-wgłębień wypełnionych siarczkowymi mikrocząstkami grafenopodobnymi*

że stosowanie sieci mikrokanalów jest bardziej korzystne, ze względu na stałe podawanie nanocząstkami smaru stałego w obszar pracy [178]. Konfiguracja sieci mikrokanalów typu 4 oraz 5 wydaje się najbardziej optymalna w aspekcie stałego wytwarzania powłoki z siarczkowymi strukturami grafenopodobnymi. Wpływ wypełnienia mikrowgłębień nanocząstkami oraz cząstkami produktu zużycia można zaobserwować na obrazie SEM przedstawionym na rysunku 105.

Zagęszczony obszar, który można zaobserwować na peryferiach wgłębienia wydaje się zawierać mniej cząstek smaru stałego (szary kontrast), niż obszar rdzeniowy, który zawiera więcej nano i mikrocząstek MoS<sub>2</sub>.

## 8.5. Wyniki badań tarciovo-żużyciowych

Materiały o porowatej przepuszczalnej strukturze wykonane ze spieku żelaza, stali nierdzewnej i brązu są często stosowane w smarowanych układach tribologicznych, takich jak sprzęgła, hamulce, łożyska samosmarujące i elementy synchronizowane w ręcznych skrzyniach biegów. Odbiorcy oczekują od producentów ww. elementów dobrze określonych i stabilnych własności ciernych podczas ich pracy w warunkach ograniczonego smarowania. Wyroby

wykonane ze spieków mogą być stosowane również w warunkach ograniczonego smarowania gdzie niewielka ilość smaru dostarczonego na etapie produkcji musi wystarczyć na cały okres jego eksploatacji. Porowata przepuszczalna struktura materiału łożyska ma działać jako zbiornik smaru. Dlatego przedmiotem badań wielu ośrodków naukowych jest określenie wpływu przepuszczalności osnowy materiału na tarcie ze smarowaniem granicznym w układzie, kiedy materiał spiekany impregnowany zawiesiną nanocząstek MoS<sub>2</sub> w oleju przesuwają się po gładkiej powierzchni stali. Badania przepuszczalności materiałów spiekanych opisane zostały w rozdziale 7. Zgodnie z wiedzą Autorki nie istnieją wcześniejsze badania dotyczące wpływu przepuszczalności materiału wykonanego z brązu na tarcie ze smarowaniem granicznym. Samą przepuszczalność bierze się jednak często pod uwagę w modelach symulacyjnych badania sprzęgieł [198-204], gdzie jest ona czynnikiem wpływającym na czas włączenia sprzęgła, lecz ewentualna zależność pomiędzy przepuszczalnością i tarcieniem ze smarowaniem granicznym nie jest uwzględniana. Przepuszczalność jest także ważnym parametrem w modelach symulacyjnych porowatych łożysk [205-207]. W publikacjach naukowych podkreśla się znaczenie porów w materiale dla zapewnienia pełnego filmu smarnego, a tym samym prawidłowego działania łożysk. Jednak wpływ nanocząstek MoS<sub>2</sub> na właściwości ciernie podczas pracy w warunkach smarowania granicznego nie jest szczegółowo opisany w literaturze. Wyniki badań własnych właściwości ciernych porowatych tulei ślizgowych impregnowanych zawiesiną siarczkowych nanocząstek grafenopodobnych w oleju zostały przedstawione poniżej. Główny mechanizm smarowania granicznego za pomocą nanocząstek jako dodatków do smaru bazowego (np. oleju) jest wyraźnie inny od tego, gdy jako dodatki stosowane są organiczne środki powierzchniowo czynne. Gdy dodatkiem jest nanocząstka, ciecz transportuje je, losowo rozproszone w cieczy, do obszaru styku współpracujących powierzchni [208]. Jak omówiono w rozdziale 7, powierzchnie cząstek stałych przylegają do mikronierówności tych powierzchni po czym są eksfoliowane na powierzchnie ślizgowe. Cienkie filmy smarne zwiększają swoją grubość w trakcie przylegania powierzchni, ponieważ materiał jest przenoszony i zabierany z powrotem tworząc stabilne warunki pracy pary trącej przy niskim współczynniku tarcia. Mechanizm ten jest szczególnie widoczny, gdy cieczą jest woda [209-212]. Głównym problemem we wdrożeniu powyższego mechanizmu do praktycznego zastosowania jest uzyskanie równomiernego rozkładu nanocząstek w oleju impregnacynym. Małe cząstki z powodu dużego stosunku pola powierzchni do objętości łatwo przyciągają się do siebie tworząc aglomeraty. Wówczas korzystny wpływ struktury warstwowej może zostać utracony.

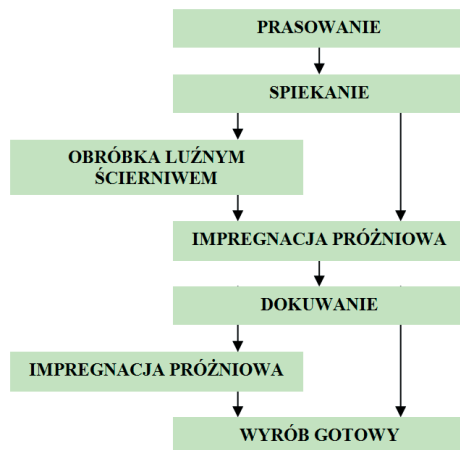
Wykazano [213-216], że aglomeraty mają słabe właściwości tribologiczne. Jeśli można je przenieść do strefy styku, wpływ rozwarstwienia nanocząstek będzie korzystny. Proces powolnego uwalniania nanocząstek odgrywa zatem główną rolę w mechanizmie smarowania, w którym nanocząstki są stosowane jako dodatki. Wyniki prób tarcia porowatej tulei ślizgowej impregnowanej zawiesiną nanocząstek  $\text{MoS}_2$  w oleju, przewidzianej dla układu odpowietrzającego Aerobus są przedstawione poniżej.

### 8.5.1. Badania doświadczalne właściwości ciernych tulei ślizgowych wykonanych z nowego kompozytu

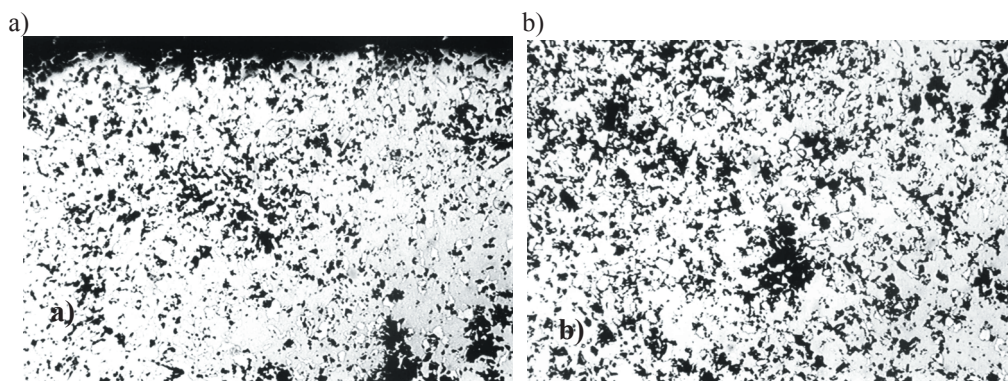
Przedmiotem badań jest tuleja łożyskowa stosowana w zaworach nadciśnieniowych przewodów wentylacyjnych w samolotach AIRBUS. Układy wentylacyjne zostały opracowywane i są produkowane przez Liebherr-Aerospace Toulouse SA. Wytworzone i następnie badane serie próbne tulei łożyskowych miały średnicę  $\sim 31$  mm i wysokość  $\sim 18$  mm. Z uwagi na klauzule tajności dokumentów konstrukcyjnych otrzymanych z zakładów samolotowych LTS, nie możemy przedstawić dokładnych parametrów geometrycznych. Na rysunku 106 schematycznie przedstawiono opracowaną w Instytucie Obróbki Plastycznej w Poznaniu pod kierunkiem Autorki rozprawy, technologię kształtowania omawianej tulei. Opracowano 5 mieszanek proszkowych na bazie proszku stali nierdzewnej, które oznaczono następująco:

- INOP 11, na bazie proszku stali nierdzewnej Ni-Cr + Cu,
- INOP 12, na bazie proszku Astalloy Cr-M + Ni,
- INOP 13, na bazie proszku Ni-Cr,
- INOP 14, na bazie proszku stali nierdzewnej 316L,
- INOP 17, na bazie proszku stali nierdzewnej 430L.

Po zasypaniu przestrzeni matrycy odpowiednią mieszanką proszkową, następuje proces wstępnego zagęszczania (prasowanie) proszku. Otrzymane wypraski poddane zostały operacji spiekania w próżni. Następnie próbki z porowatego materiału impregnowano próżniowo mieszanekami opracowanymi w INOP, również pod kierunkiem Autorki, zawierającymi siarczkowe nanocząstki grafenopodobne  $\text{MoS}_2$ , następnie dokuwano i powtórnie impregnowano. Operacja dokuwania, poza poprawą geometrii kształtu elementu, zamyka w porach siarczkowe nanocząstki. Ciśnienie prasowania wynosiło  $50 \text{ kg/mm}^2$ , natomiast ciśnienie dokuwania  $90 \text{ kg/mm}^2$ . Impregnację przeprowadzono w komorze próżniowej (ciśnienie  $10^{-3}$  hPa) w czasie 15 minut.



*Rysunek 106. Schemat technologii kształtowania tulei [badania własne]*

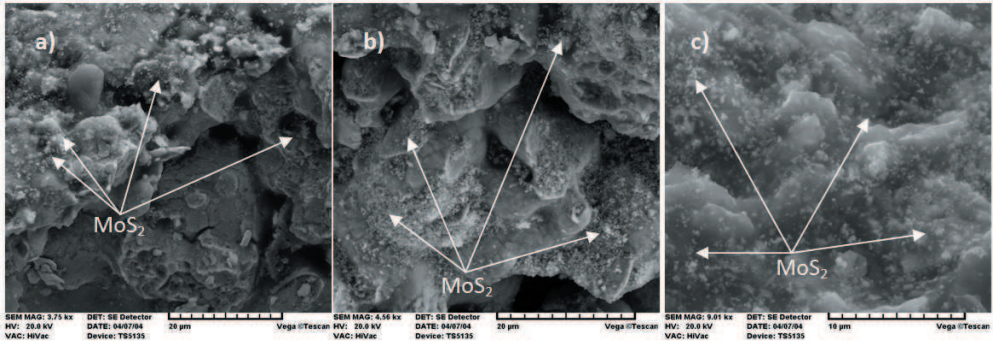


*Rysunek 107. Obserwacja struktury próbek przed procesem impregnacji; powiększenie 100x: a) mieszanka INOP 13, b) mieszanka INOP 11 [badania własne]*

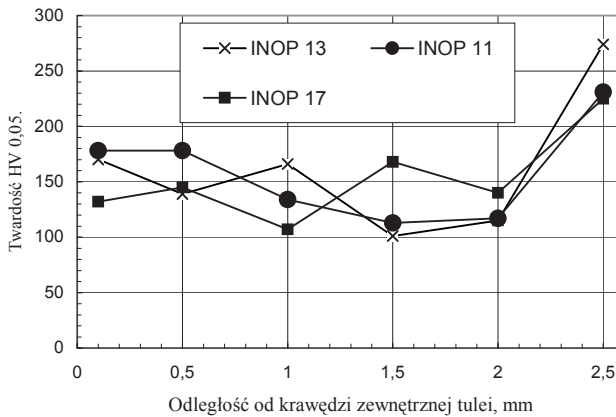
W początkowej fazie procesu impregnacji w komorze próżniowej następuje wzrost objętości mieszanki impregnacyjnej oraz spadek temperatury.

Najlepszą prasowalnością charakteryzowały się mieszanki oznaczone symbolem INOP 11, INOP 13 oraz INOP 17, dlatego też dalszym badaniom laboratoryjnym poddano próbki wytworzone tylko z tych mieszanek.

Na rysunku 107 przedstawione są wyniki badań obserwacji struktury próbek tulei łożyskowych wykonane w mikroskopie Neophot 2 dla dwóch typów mieszanek proszkowych oznaczonych symbolem INOP 11 i INOP 13. Wykonano zgłady metalograficzne wzdłuż osi próbki, a następnie obserwacje struktury przeprowadzono przy powiększeniu obrazu 100x.



**Rysunek 108.** Obraz SEM próbki tulei po impregnacji siarczkowymi nanocząstkami grafenopodobnymi  $\text{MoS}_2$ : a) na powierzchni średnicy zewnętrznej, b) na części środkowej przekroju ścianki, c) na powierzchni wewnętrznej ścianki



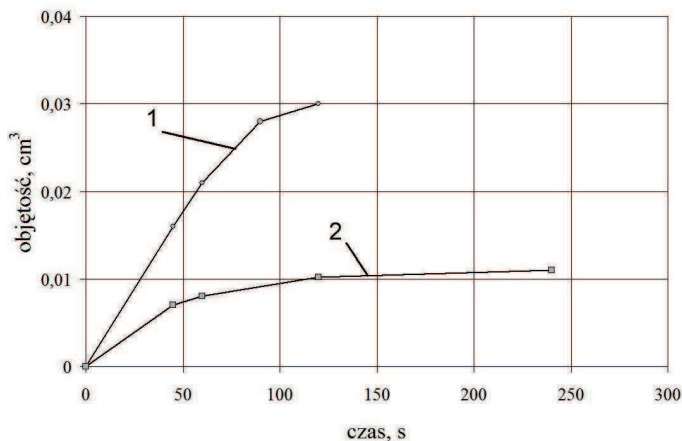
**Rysunek 109.** Wyniki pomiarów mikrotwardości HV 0,05 dla próbek wykonanych z trzech typów mieszanek [badania własne]

Próbki impregnowano w próżni  $10^{-3}$  hPa przez 15 minut, a następnie poddano obserwacji na mikroskopie skaningowym. Obraz SEM przedstawiony na rysunku 108 potwierdza wypełnienie porów siarczkowymi nanocząstkami grafenopodobnymi w całej objętości materiału.

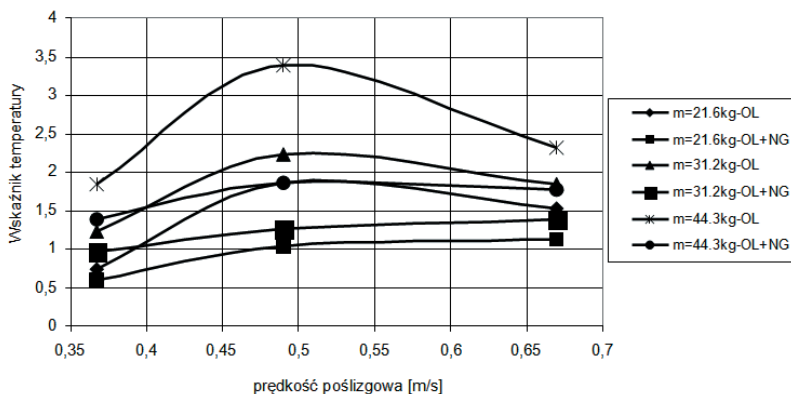
Badania mikrotwardości przedstawione na rysunku 109, przeprowadzono dla próbek tulei łożyskowych wykonanych z mieszanek INOP 11, INOP 13 oraz INOP 17. Pomiary wykonano na zgładach metodą Vickersa HV 0,05, przy sile obciążającej 0,49 N. Rozkład twardości jest podobny do rozkładu gęstości w próbce.

Zaobserwowano różne objętości nanocząstek  $\text{MoS}_2$  w porach próbki. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 110. Objętość siarczkowych nanocząstek wprowadzonych do materiału porowatego podczas procesu impregnacji jest zależna od wielkości cząstek i czasu procesu.





**Rysunek 110.** Objętość nanocząstek MoS<sub>2</sub> w materiale porowatym w funkcji czasu: 1) mikrocząstki MoS<sub>2</sub>, 2) nanocząstki MoS<sub>2</sub> [badania własne]



**Rysunek 111.** Zależność wskaźnika temperatury od prędkości poślizgowej tulei wyznaczone w testach typu block-on-ring [badania własne]

Próbki tulei łożyskowych poddane zostały badaniom tarciovym typu block-on-ring. Wyznaczono współczynnik tarcia, wskaźnik temperatury w funkcji prędkości poślizgu próbki oraz obciążenia i wskaźnik temperatury w funkcji parametru Sommerfelda. Wskaźnik temperatury w funkcji prędkości poślizgu wyznaczono dla trzech obciążeń: 21,6 kg, 31,2 kg i 44,3 kg. Badania przeprowadzono na próbach impregnowanym czystym olejem (OL) oraz mieszanką olej z dodatkiem siarczkowych nanocząstek grafenopodobnych MoS<sub>2</sub> (OL+NG).

Wyniki badań przedstawiono na rysunku 111.

Dla wszystkich wartości obciążeń zaobserwowano niższy wskaźnik temperatury próbek tulei łożyskowych impregnowanych mieszanką zawierającą siarczkowe nanocząstki grafenopodobne MoS<sub>2</sub>:

- przy obciążeniu 21,6 kg wskaźnik ten był niższy o 15% do 45% (odpowiednio dla prędkości poślizgowej 0,67 m/s i 0,49 m/s),
- przy obciążeniu 31,2 kg wskaźnik był niższy o 20% do 45%,
- przy obciążeniu 44,3 kg był niższy o 23% do 45%.

Na rysunku 112 przedstawione są zależności współczynnika tarcia oraz wskaźnika temperatury w funkcji parametru Sommerfelda. Parametr Sommerfelda wyznaczono z równania:

$$\Delta = \eta \frac{U}{P/L} (R/c)^2 \quad (26)$$

gdzie:

$\eta$  – współczynnik lepkości dynamicznej smaru,

$U$  – prędkość poślizgu, m/sec,

$P$  – siła normalna, N,

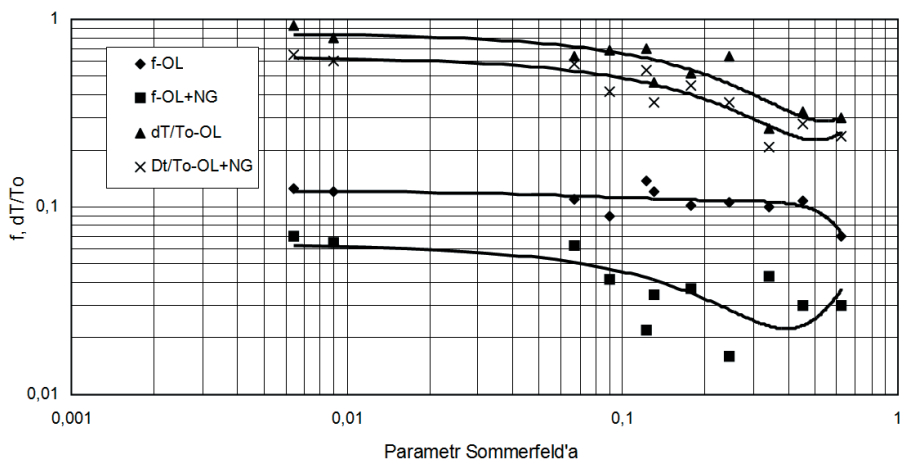
$L$  – długość tulei, mm,

$R$  – średnica, mm,

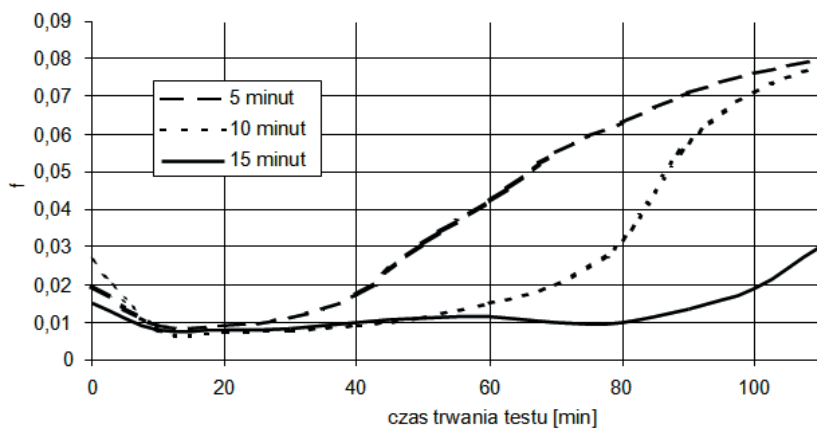
$c$  – luz poprzeczny, mm.

Współczynnik tarcia wyznaczony dla próbek impregnowanych czystym olejem wynosił od 0,125 do 0,07, natomiast dla próbek impregnowanych próżniowo z dodatkami siarczkowych nanocząstek grafenopodobnych (OL+ NG) współczynnik tarcia kształtował się w przedziale od 0,07 do 0,016. Dla każdej wartości parametru Sommerfelda współczynnik tarcia dla próbek impregnowanych mieszaniną OL +NG jest więc co najmniej czterokrotnie niższy.

Wyznaczono współczynnik tarcia dla próbek impregnowanych w trzech przedziałach czasowych: 5 minut, 10 minut oraz 15 minut. Najniższy współczynnik tarcia uzyskano dla próbek nasycanych przez 15 minut, który po 110 minutach testu wyniósł 0,03. Przy impregnacji przez 5 i 10 minut uzyskano współczynnik tarcia wyższy ponad dwukrotnie o wartości odpowiednio 0,078 oraz 0,08. Wielkość współczynnika tarcia w czasie trwania testu block-on-ring dla próbek tulei łożyskowej impregnowanych mieszanką OL+GP MoS<sub>2</sub> w określonym przedziale czasowym przedstawiono na rysunku 113.



**Rysunek 112.** Zależność współczynnika tarcia oraz wskaźnika temperatury w funkcji parametru Sommerfelda [badania własne]



**Rysunek 113.** Wielkość współczynnika tarcia w czasie trwania testu block-on-ring dla próbek tulei łożyskowej impregnowanych siarczkowymi nanocząstkami z grafenopodobnymi  $MoS_2$  w określonym przedziale [badania własne]

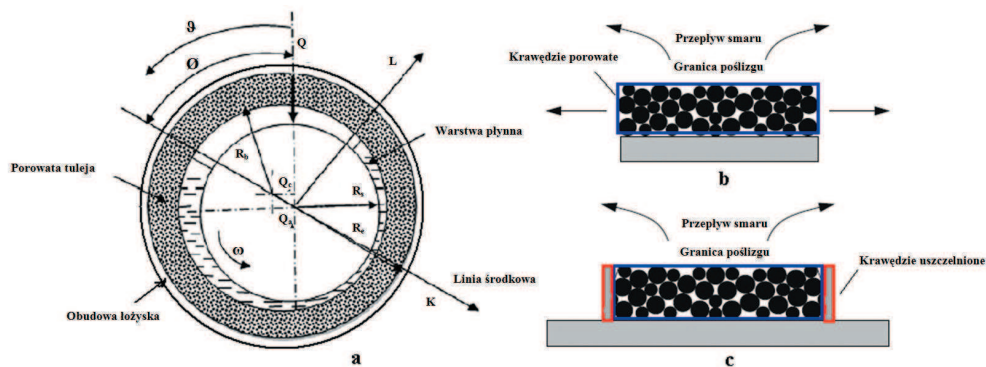
Analiza krzywych Striebecka przedstawionych na rysunku 112 potwierdza obecność trzech regularnych mechanizmów smarowania, podobnych do tych przedstawionych na rysunku 113, dotyczących tylko impregnowania mieszanką olej i siarczkowe nanocząstki grafenopodobne. Oznacza to, że ewentualne rozwarstwienie nanocząstek  $MoS_2$  powoduje uzyskanie warunków smarowania hydrodynamicznego przy niższych prędkościach ślizgania w porównaniu do smarowania czystym olejem. Istotne jest, aby niższa przepuszczalność sieci porów kompozytu

nie pogorszyła właściwości ciernych łożyska. Wpływ zmian przepuszczalności i zawartości nanocząstek  $\text{MoS}_2$  w porach na współczynnik tarcia ilustruje rysunek 113. Wyniki wyraźnie wskazują, że wzrost czasu impregnacji prowadzi do zwiększenia drogi tarcia w łożysku potrzebnej do utraty przepuszczalności sieci porów. Dwa przypadki przepływu oleju w łożyskach porowatych pokazano na rysunku 114.

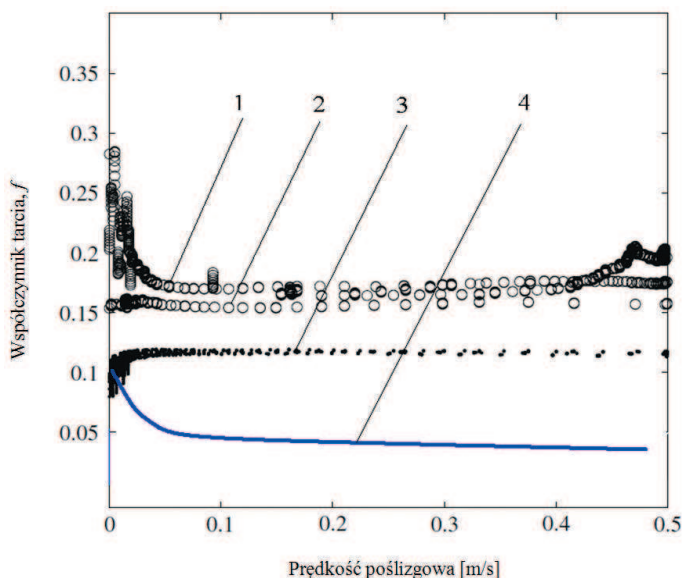
Przedstawione schematy pokazują intensywny przepływ oleju przez krawędzie łożyska podczas obrotu i wysokie naciski na powierzchnię ślizgową. Tak więc uszczelnienie krawędzi łożyska uważa się za przyczynę wydłużenia żywotności łożyska. Przy uszczelnionych krawędziach, zdolność do zatrzymywania smaru w materiale przepuszczalnym wzrasta. Smar wydostając się z materiału przez pory w górnej powierzchni, która jest w kontakcie ślizgowym z pierścieniem, smaruje obszar styku, natomiast gdy wydostaje się z materiału przez ściany boczne, jest „tracony”, ponieważ nie smaruje obszaru styku. Przy porowatych krawędziach, jak na rysunku 114c, smar nie może wypływać z materiału przez ściany boczne i wystarczy na dłużej w kontakcie ślizgowym.

Wyniki przedstawione na rysunku 115 ilustrują wpływ stosowania środka smarującego z nanocząstkami  $\text{MoS}_2$  na warunki smarowania granicznego i mieszanego. Wzrost prędkości ślizgania jest prawdopodobnie spowodowany tworzeniem się cienkiego filmu z nanocząstek  $\text{MoS}_2$ .

W literaturze [217, 218] opisano badania dotyczące poprawy odporności na zużycie materiałów stosowanych na łożyska. W celu poprawy właściwości mechanicznych i wyrównania współczynników rozszerzalności cieplnej łożyska i wału stosuje się różne gatunki stali (stale węglowe, stale nierdzewne, itp.) na łożyska z proszków metali. Technika wytwarzania stopu, charakterystyka proszku i metody prasowania wpływają na smarowanie, zużycie i mikrostrukturę materiału łożyska [219]. Wielkość i rozkład porów są najważniejszymi parametrami mającymi wpływ na właściwości mechaniczne, zwłaszcza na wytrzymałość zmęczeniową łożyska i optymalizację procesu jego smarowania. Parametry technologiczne, takie jak ciśnienie prasowania i temperatura spiekania również mają wpływ na właściwości mechaniczne łożysk otrzymywanych metodami metalurgii proszków. W celu poprawy tych właściwości należy zwiększyć gęstość materiału, natomiast wraz ze wzrostem ciśnienia prasowania i gęstości, maleje porowatość łożysk, co skutkuje mniejszą zdolnością do ich impregnacji. Uzyskanie zarówno wysokiej wytrzymałości, wysokiej odporności na zużycie i niskiego współczynnika tarcia wymaga optymalizacji struktury porowatych łożysk.

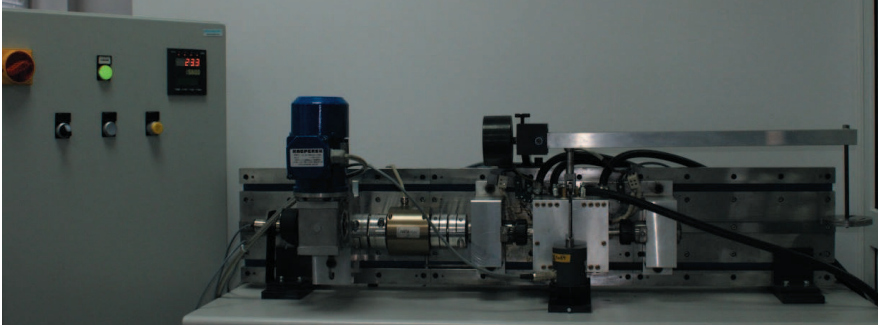


**Rysunek 114.** Schemat łożyska porowatego (a) i przekroje poprzeczne łożyska o porowatych i uszczelnionych krawędziach

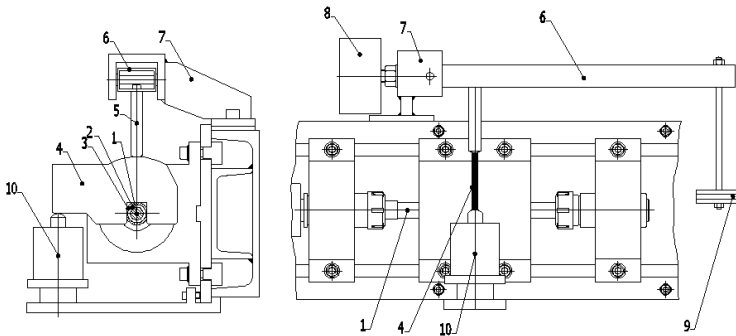


**Rysunek 115.** Wpływ prędkości ślizgania na współczynnik tarcia w obszarach smarowania granicznego i mieszanego łożysk litych smarowanych olejem (krzywe 1, 2), łożyska porowatego impregnowanego olejem (krzywa 3) i łożyska porowatego impregnowanego mieszanką OL+ NG (krzywa 4)

Badania tribologiczne typu tuleja-wałek zostały przeprowadzone w Laboratorium Inżynierii Powierzchni i Tribologii INOP w Poznaniu na testerze TWT-500N (rys. 116), pod kierunkiem Autorki. Jest to tester własnej konstrukcji, na którym można przeprowadzać badania tarcio-uzużytkowe w zakresie temperatur od temperatury otoczenia do 600°C, przy obciążeniu do 500 N z możliwością regulacji obrotów wałka do 120 obr/min.



**Rysunek 116.** Tester TWT-500N [badania własne]



**Rysunek 117.** Schemat Testera TWT-500N: 1 – wałek napędzający, 2 – wałek (przeciwpróbka), 3 – tuleja (próbka), 4 – mocowanie próbki, 5 – docisk, 6 – ramię dźwigni, 7 – wspornik dźwigni, 8 – przeciwwaga, 9 – obciążenie, 10 – siłomierz [badania własne]

Schemat urządzenia TWT-500N przedstawiono na rysunku 117.

Testy zostały przeprowadzone przy stałych obrotach wałka 60 obr/min i zmiennym obciążeniu w zakresie od 25 do 500 N, zmiana obciążenia pary trącej następowała co 7200 cykli (obrotów).

W trakcie testów mierzona jest temperatura w węzle tarcia i wielkość momentu siły, z którego wyznacza się współczynnik tarcia ze wzoru:

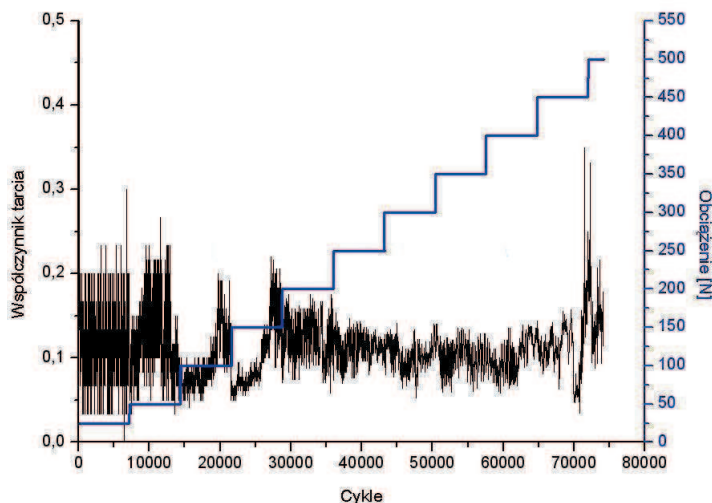
$$\mu = \frac{M}{P \cdot r} \quad (27)$$

gdzie:

$M$  – moment siły, Nm,

$P$  – siła nacisku, N,

$r$  – promień wewnętrzny tulei, m.



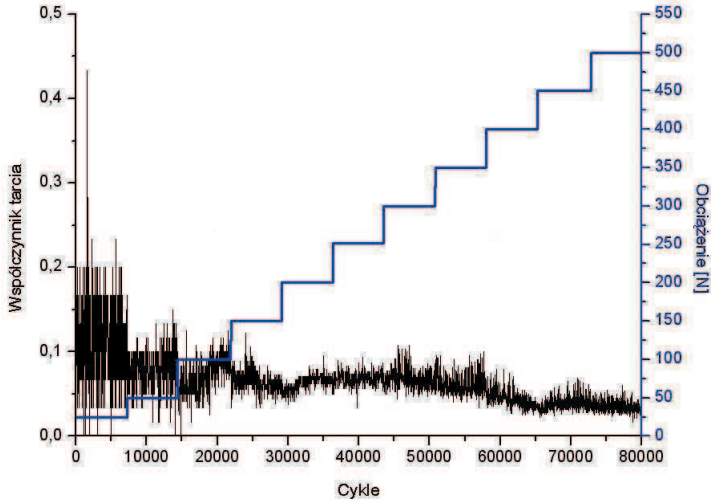
**Rysunek 118.** Tuleja wykonana z nowego kompozytu na bazie porowatego materiału badana w temperaturze otoczenia [badania własne]

Badaniom tribologicznym zostały poddane impregnowane tuleje ST-500 współpracujące z wałkiem o wymiarach  $\varnothing 24 \times 35$  mm, wykonanym z importowanej francuskiej stali odpornej na korozję i przeznaczonej do pracy w podwyższonych temperaturach E-Z6NCT25 (XN26TW) (nie mającej odpowiednika wg PN-EN).

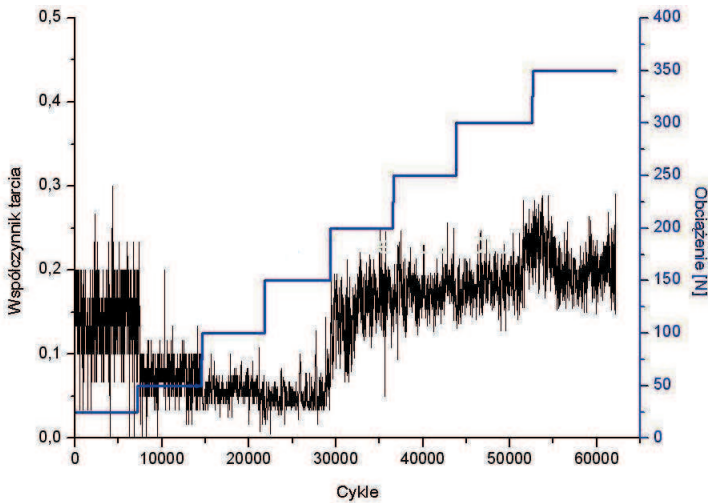
Badano współczynnik tarcia i zużycie na podstawie zmiany masy wałka i tulei (ubytek wagowy).

Wartość współczynnika tarcia  $\mu$  badanej obracającej się pary wałek-tuleja określono przy temperaturach: otoczenia,  $300^{\circ}\text{C}$  i  $500^{\circ}\text{C}$ . Wyniki tych badań przedstawiono na wykresach (rys. 118-120).

Współczynnik tarcia dla testu przeprowadzonego w temperaturze otoczenia wynosi 0,12 (rys. 118), a dla testu przeprowadzonego w temperaturze  $300^{\circ}\text{C}$  współczynnik tarcia wynosi 0,05 (rys. 119) w zakresie od 30000-80000 cykli. Dla testu w temperaturze  $500^{\circ}\text{C}$  współczynnik tarcia jest najwyższy i utrzymuje się na poziomie 0,2 (rys. 120). Podwyższenie temperatury testu z temperatury otoczenia do  $300^{\circ}\text{C}$  powoduje zmniejszenie współczynnika tarcia. Zwiększanie temperatury testu do  $500^{\circ}\text{C}$  powoduje wzrost współczynnika tarcia, który może być spowodowany utratą własności smarnych przy badaniu w atmosferze powietrza.



**Rysunek 119.** Tuleja nowego kompozytu na bazie porowatego materiału badana w temperaturze 300°C [badania własne]

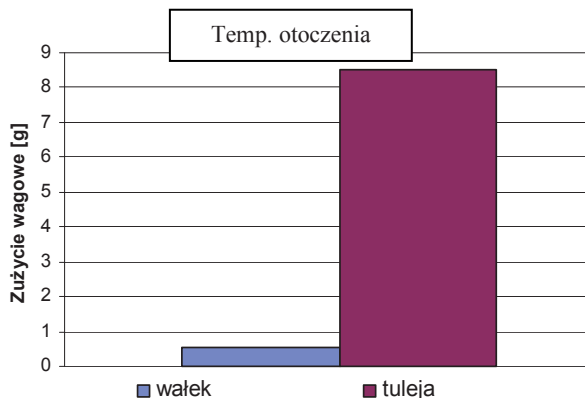


**Rysunek 120.** Tuleja nowego kompozytu na bazie porowatego materiału badana w temperaturze 500°C [badania własne]

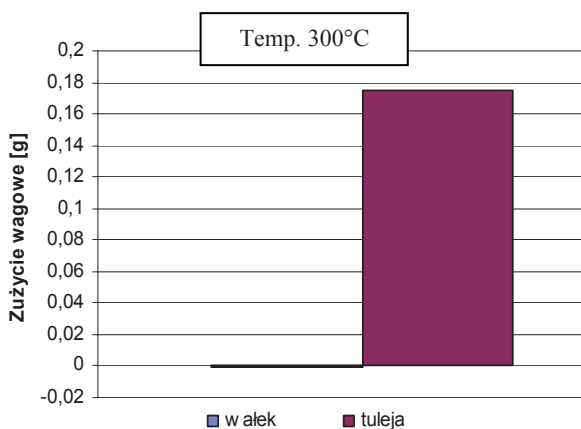
Według danych literaturowych zakresy temperatur stosowania MoS<sub>2</sub> jako środka poślizgowego o wysokiej odporności na naciski i utlenianie: w powietrzu -185 do +450, w atmosferze wodoru +700, w próżni +1100, w atmosferze gazów obojętnych +1300°C [203].

Wyniki badań ubytku masy (zużycie wagowe) przedstawiono na wykresach słupkowych (rys. 121-123).

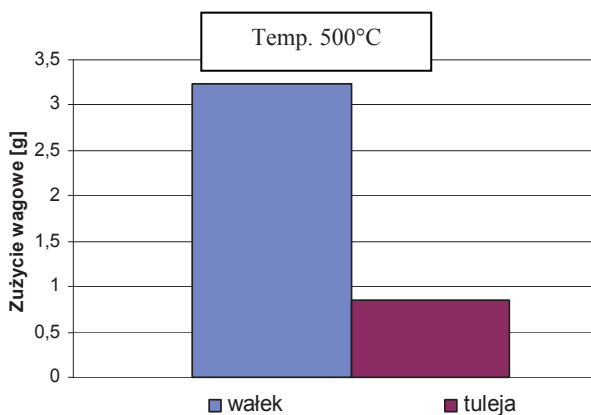




Rysunek 121. Wykres zużycia wagowego pary trącej w temperaturze otoczenia [badania własne]



Rysunek 122. Wykres zużycia wagowego pary trącej w temperaturze 300°C [badania własne]



Rysunek 123. Wykres zużycia wagowego pary trącej w temperaturze 500°C [badania własne]

Zużycie wagowe tulei wykonanej z kompozytu na bazie materiału porowatego podczas testu w temperaturze otoczenia jest dziesięciokrotnie większe w porównaniu do wałka (rys. 121). Wyniki testów przeprowadzonych w temperaturze 300°C wykazują, że tuleja i wałek mają mniejsze zużycie wagowe w porównaniu do testów w temperaturze otoczenia (rys. 122). Podczas testów przeprowadzonych w temperaturze 500°C zwiększa się zużycie masowe wałka (rys. 123), wywołane utratą własności MoS<sub>2</sub> w tej temperaturze. Najmniejsze zużycie masowe i najniższy współczynnik tarcia wykazuje para trąca przy badaniach przeprowadzonych w temperaturze 300°C.

### 8.5.2. Badania doświadczalne narzędzi do kucia na zimno wykonanych z kompozytu z mikrokanalikami

Technologia obróbki plastycznej, ze względu na korzystny rozkład włókien, szczególnie istotnej cechy dla części odpowiedzialnych **stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym i lotniczym**, jest coraz częściej stosowana do kształtowania wyrobów dokładnych o złożonych kształtach. Główna trudność w uzyskaniu części o wysokiej dokładności wymiarowej obróbką plastyczną polega na dużym zużyciu i niskiej trwałości niektórych obszarów roboczych narzędzi do kucia. Dotyczy to szczególnie narzędzi o ostrej zmianie promienia, kształtu i geometrii powierzchni roboczych. Problemy te związane są z mechanizmami mechanicznego zmęczenia i tarcia, obecnymi w procesach kucia na zimno na styku narzędzi i formowanych materiałów, spowodowane wysokimi naprężeniami oraz umocnieniu części roboczej materiału, a więc kombinacją wysokich naprężeń kontaktowych i skumulowanej drogi poślizgu.

Dopuszczalne zmiany wymiarowe narzędzi zależą od klasy dokładności formowanych przedmiotów, a w przypadku kucia precyzyjnego oscylują w zakresie od kilku setnych do kilku dziesiątych części milimetra. Szczególne wymagania stawiane są narzędziom przeznaczonym do kształtowania części ze stali wysokostopowych i stopów specjalnych.

W literaturze technicznej [220] rozróżnia się:

- kucie dokładne na gorąco i na zimno;
- kucie precyzyjne na zimno.

Po kuciu dokładnym można uzyskać wzrost dokładności wymiarowej wyższej o trzy lub cztery klasy w porównaniu z kuciem tradycyjnym. Przy zastosowaniu technologii kucia precyzyjnego, można uzyskać dokładność wymiarów i chropowatości powierzchni, porównywalną

z wysokiej klasy obróbką skrawania. Jednym z celów stosowania technologii kucia na zimno jest możliwość uzyskania wyrobów (odkuwek) o dużej dokładności kształtowo-wymiarowej, bez naddatków na obróbkę skrawaniem w wyniku, czego można uzyskać: i) znaczne oszczędności materiału (większy uzysk kuźniczy); ii) zmniejszenie ilości operacji (czaso- chłonność); iii) lepszą jakość wyrobu.

Ponieważ **koszt narzędzi stanowi około 30% ceny wyrobu**, ich trwałość jest jednym ze sposobów zmniejszania kosztów produkcji. Obecnie dla podwyższenia trwałości narzędzi stosuje się: i) wysokostopowe stale narzędziowe, odporne na zużycie i zmęczenie cieplno-mechaniczne; ii) właściwą obróbkę cieplno-chemiczną (np. azotowanie jonowe lub gazowe), iii) poduszki robocze ze specjalnych materiałów; iv) różnego rodzaju powłoki, v) optymalizację warunków pracy narzędzi. Dla większości narzędzi technologicznych stosowane są technologie zwiększania ich trwałości przez zastosowanie powłok przeciwzużyciowych typu PVD/CVD [221]. W tym obszarze zastosowań wiodący wytwórcy powłok to Balzers, Planit, Sandvik Coromant.

Opracowano takie amorficzne powłoki węglowe [222-225] oraz warstwowe powłoki twardo- miękkie ( $\text{TiAlN/MoS}_2$ ), które łączą dobre właściwości zużyciowe z niskim tarciem, i tylko niewielką tendencją do zgrzewania obrabianego elementu [226]. W ciągu ostatnich dziesięcioleci, twarde powłoki PVD i CVD zaczęły skutecznie konkurować z tradycyjnymi termo-chemi- cznymi zabiegami, zwłaszcza w zakresie odporności na ścieranie [227]. Jednakże, tradycyjne twarde powłoki takie jak TiN, TiC oraz CrN nie mogą sprostać wymaganiom stawianym narzędziom kuźniczym, włączając w to dobrą adhezję, wysoką twardość i mały współczynnik tarcia obrabianym materiałem.

Ostatnie publikacje podają, że w ciągu ostatnich lat nastąpił ogromny postęp w dziedzinie projektowania i nakładania powłok, co skutkuje poprawą właściwości tribologicznych [228, 229].

Niezwykle istotną cechą rozwijanych obecnie technologii osadzania powłok jest możliwość ich nanoszenia w temperaturze poniżej  $200^\circ\text{C}$ , co zapobiega przemianom fazowym w materiale bazowym (stali) i do tej pory było jedną z podstawowych przyczyn ograniczonego zastosowania powłok. Czynnikiem decyzyjnym, gdy w grę wchodzi trwałość narzędzi, jest ich warstwa wierzchnia, której grubość może wahać się od  $1\ \mu\text{m}$  do kilku milimetrów, zależnie od stosowanego procesu technologicznego. Stan powierzchni wpływa na właściwości tribologiczne. Gdy dochodzi do obciążeń mechanicznych (zwłaszcza zmiennych), podłoże odgrywa znaczącą rolę: jego stan, własności i interakcje między warstwą wierzchnią i podłożem. Zatem omawiając trwałość narzędzi należy wziąć pod uwagę układ podłoże-warstwa wierzchnia: jego grubość

względem wymiaru przekroju poprzecznego elementu, stosunek grubości warstwy wierzchniej do twardości podłoża i naprężenia własne.

Pomimo tego większości **znanych powłok narzędziowych nie można zastosować do nowoczesnych technologii kucia na zimno** ze względu na lokalne uszkodzenia warstw wierzchnich.

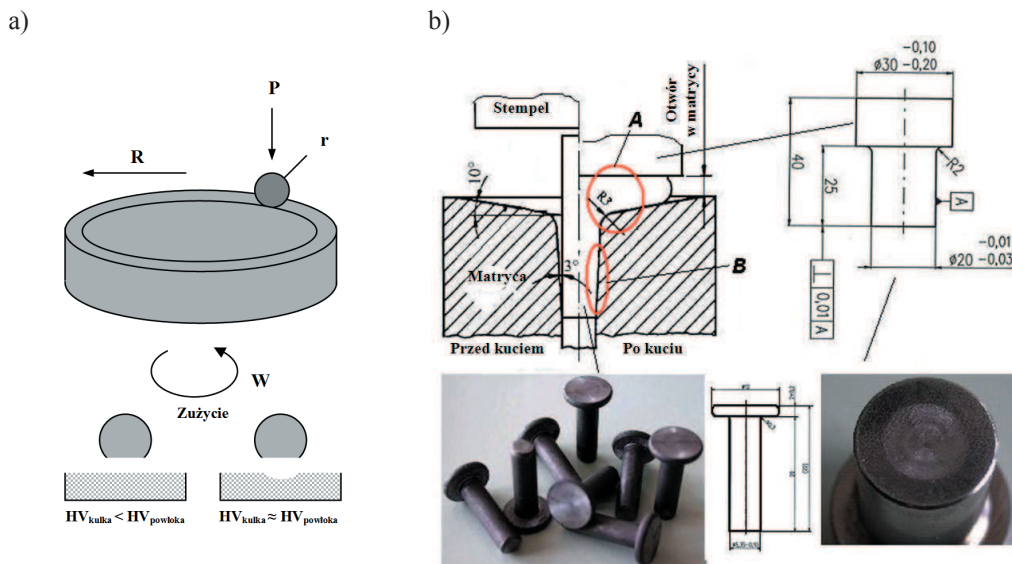
Istotnym zagadnieniem jest podawanie smaru do strefy kształtowania elementu, a także zatrzymanie wystarczającej ilości smaru podczas procesu kucia, (hydrostatyczne i hydrodynamiczne smarowanie). Zatem współpracujące powierzchnie powinna cechować odpowiednia mikrogeometria, w których może zostać uwieczniony smar, uwalniany podczas procesu kucia. Czasami stosuje się piaskowanie w celu utworzenia odpowiedniej tekstury powierzchni. Jednak metoda ta posiada dwie główne wady: po pierwsze, konieczne jest czasochłonne obrabianie każdego elementu, a po drugie efekt właściwego smarowania utrzymuje się wyłącznie na samym początku procesu – zagłębienia ze smarem zanikają po krótkim okresie czasu.

W projekcie EUROSTARS [77-80] pod kierunkiem Autorki, przeprowadzono badania wpływu laserowego teksturowania powierzchni narzędzi, w tym również z twardymi powłokami, na ich zachowanie tribologiczne w procesie kucia na zimno. W efekcie opracowano na bazie materiału litego nowy kompozyt z siarczkowymi strukturami grafenopodobnymi osadzonymi w mikrokanalikach materiału bazowego. Zatem postęp w zakresie nowych technologii jest na tyle znaczący, że stosując procesy inżynierii materiałowej można otrzymać nowy kompozyt na osnowie metalu, który dla danej grupy narzędzi do obróbki plastycznej na zimno będzie optymalnym materiałem, zapewniając mniejsze zużycie i wyższą trwałość narzędzi.

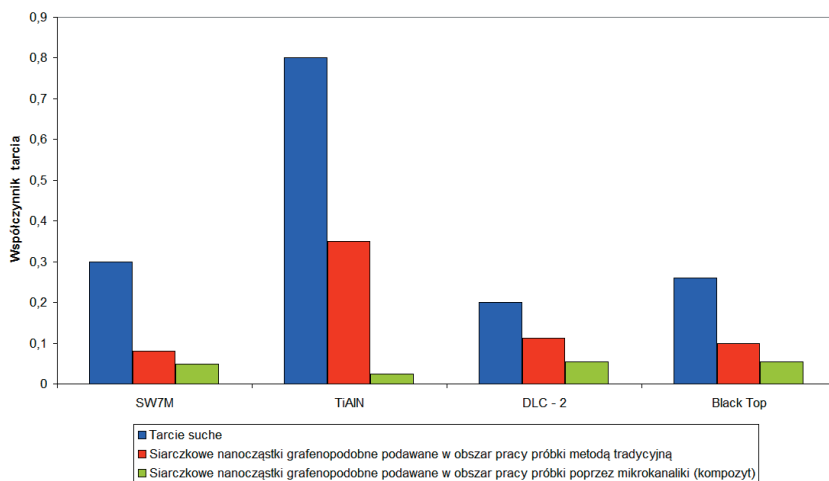
Badania tribologiczne kompozytu na osnowie metalowej przeprowadzono na testerze tarciowo-zużyciowym T-10. Próbkę dysku o średnicy 40 mm i kulek średnicy 10 mm wykonano ze stali narzędziowej SW7 (HS6-5-2) o twardości 62-63 HRC (rys. 124a). Na dyskach wykonano powłokę twardą metodą PVD i PECVD, a następnie obróbką laserową mikrokanaliki, w które wprowadzono siarczkowe nanocząstki grafenopodobne. Tak otrzymane próbki dysków z kompozytu poddano badaniom tarciowo-zużyciowym przy normalnym obciążeniu 6-8 N oraz prędkości obrotowej 200 obrotów na minutę. Współczynnik tarcia oraz zużycie zostały zdefiniowane w oparciu o pomiar siły tarcia i wagi kulki.

Podobnie wykonano narzędzia do wyciskania przeciwbieżnego wyrobów stalowych dla prób przemysłowych, które przedstawiono na rysunku 124b. Narzędzia zamontowano na prasie mechanicznej o prędkości 80 uderzeń/min. Testy wykonano dla trzech typów powłok twardych

(Black Top, TiAlN i DLC-2). Efekty mikro-teksturowania twardo-powlekanych narzędzi na ich żywotność zostały zbadane metodą testu tarcia i serią testów przemysłowych w warunkach produkcji pilotażowej.



**Rysunek 124.** Schemat badań tribologicznych: a) test „kulka-dysk” dla dwóch parametrów twardości kulki; b) schemat narzędzi przemysłowych z zaznaczonymi obszarami zużycia [badania własne]



**Rysunek 125.** Współczynniki tarcia twardych powłok ze stałym smarem z nanocząstek oraz z nanocząstkami w mikrokanalach [badania własne]

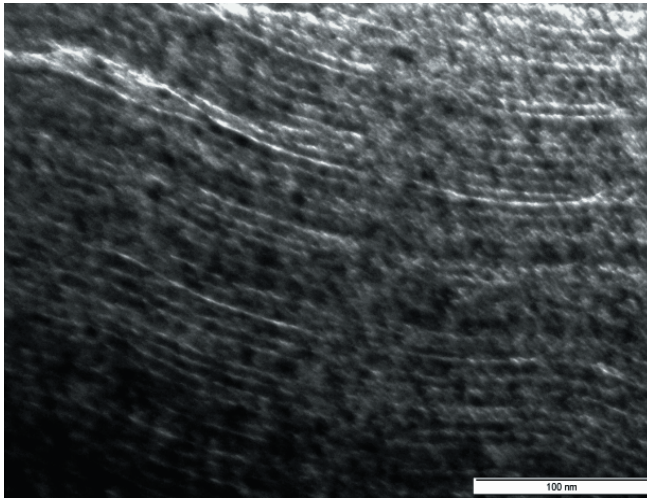
Wyniki testu „kulka-dysk” obrazują znaczącą zależność współczynnika tarcia od rodzaju powłoki (rys. 125).

Wielowarstwowa struktura z siarczkowymi nanocząstkami grafenopodobnymi przedstawiona na rysunku 126 charakteryzuje się niskim współczynnikiem tarcia suchego.

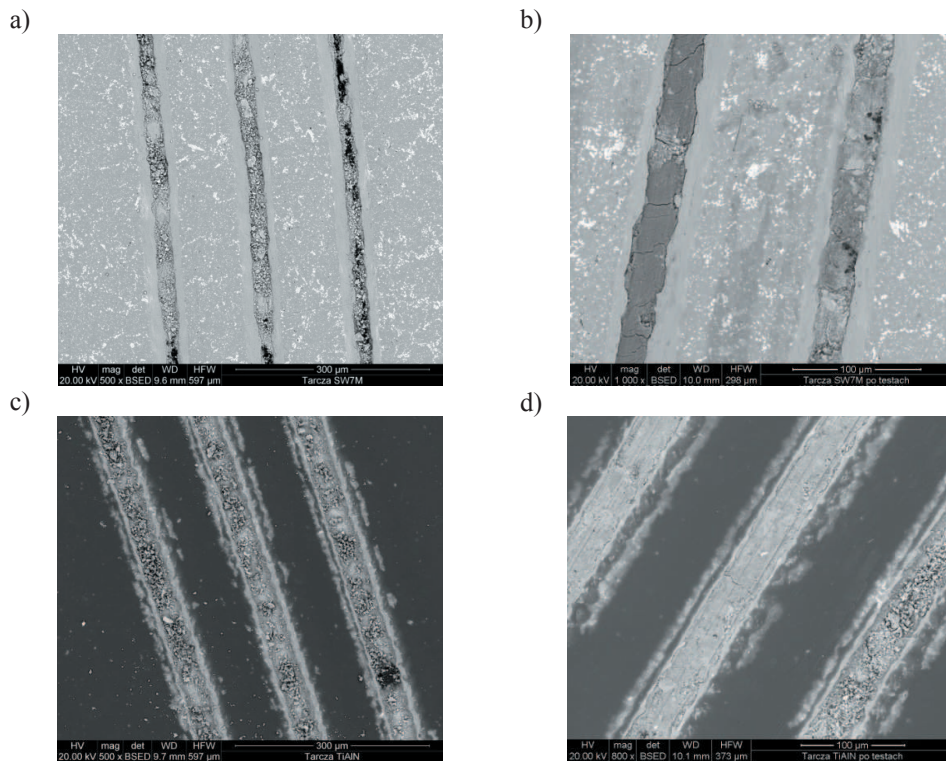
Proces charakteryzuje się kontrolowanym powolnym uwalnianiem siarczkowych nanocząstek grafenopodobnych z mikrokanalików (rys. 127). Efektem tego jest współczynnik tarcia równy około 0,03-0,05 podczas całego testu tarcia.

Teksturowanie powierzchni sprawdziło się w niektórych zastosowaniach przemysłowych wyraźnie podnosząc żywotność narzędzi np. stempli przeciwbieżnych [220]. Tarcie i zużycie ściernie są – razem z innymi parametrami – znacząco zależne od topografii powierzchni narzędzia i elementu obrabianego. W naszym przypadku, w wyniku zastosowania siarczkowych nanocząstek grafenopodobnych, uzyskano efekt quasi-hydrodynamicznego smarowania otrzymując niski współczynnik tarcia.

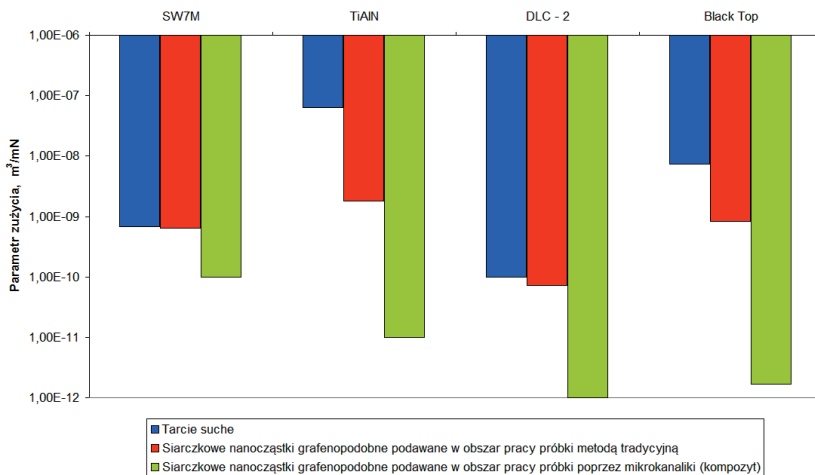
Korzystny efekt powolnego uwalniania siarczkowych nanocząstek grafenopodobnych na zużycie ściernie jest przedstawiony na rysunku 128. Zużycie ściernie zmniejszyło się dwukrotnie. Można przypuszczać, że efekt permanentnego tworzenia się cienkiej warstwy smarującej jest osiągnięty poprzez ciągle rozwarstwianie (łuszczenie) siarczkowych nanocząstek grafenopodobnych. To zjawisko szczególnie jest zauważalne przy kombinacji twardych powłok z siarczkowymi nanostrukturami grafenopodobnymi.



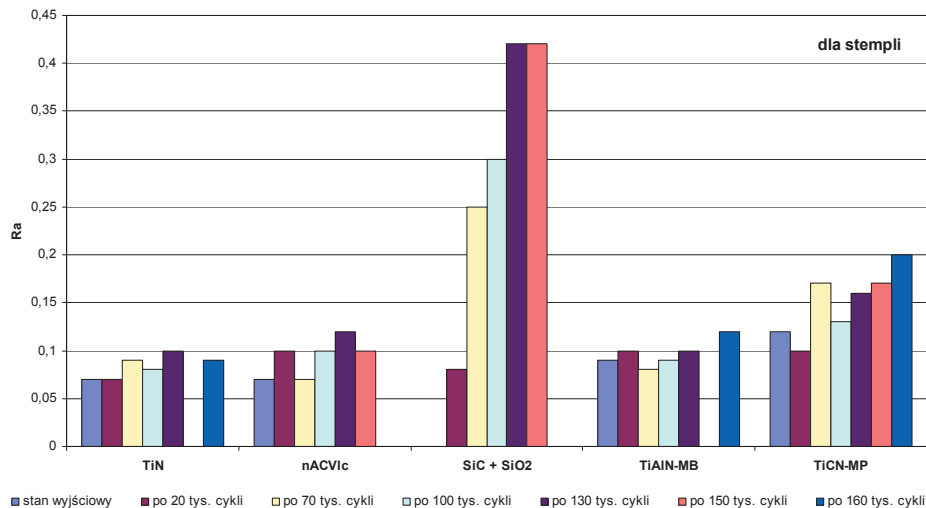
*Rysunek 126. Obraz HRTEM powłoki Black Top PVD [badania własne]*



**Rysunek 127.** Obrazy SEM mikrokanalów wypełnionych nanocząstkami  $\text{MoS}_2$ : a, b) – stal SW7M: a) – przed testem tarcia, b) – po teście tarcia; c, d) – powłoka TiAlN: c) – przed testem tarcia, d) – po teście tarcia [badania własne]



**Rysunek 128.** Parametr zużycia nowego kompozytu metalowego z twardymi powłokami i siarczkowymi nanocząstkami grafenopodobnymi [badania własne]



**Rysunek 129.** Chropowość stempli podczas uderzenia kolców (rys. 124b) [badania własne]

Na rysunku 129 przedstawiono zależność chropowości stempli z twardymi powłokami od liczby przetworzonych cykli podczas prób przemysłowych.

Wyniki badań przemysłowych wskazują, że efekt powolnego uwalniania siarczkowych nanocząstek grafenopodobnych z mikrokanalików (rezerwarów środka smarującego) jest bardziej korzystny w przypadku zastosowania kompozytu z powłoką twardą TiAlN. W przypadku zużycia zmęczeniowego narzędzia korzystniejsze jest zastosowanie kompozytu z powłoką twardą i mikrokanalikami wypełnionymi siarczkowymi nanocząstkami grafenopodobnymi aniżeli kompozytu tylko z siarczkowymi strukturami grafenopodobnymi. Natomiast zastosowanie na narzędzia do wyciskania na zimno kompozytu z mikrokanalikami wypełnionymi siarczkowymi nanocząstkami grafenopodobnymi wydaje się bardziej efektywne.