

**Remigiusz MICHALCZEWSKI\***

**PRZEBIEG PROCESU ZACIERANIA  
SMAROWANYCH WYSOKOBCIĄŻONYCH  
SKOJARZEŃ CIERNYCH Z ELEMENTAMI  
POKRYTYMI POWŁOKĄ WC/C**

**SCUFFING PROPAGATION OF HEAVILY-LOADED  
LUBRICATED FRICTION JOINTS WITH WC/C  
COATED PARTS**

**Słowa kluczowe:**

powłoka niskotarciowa, zacieranie, aparat czterokulowy

**Key words:**

low-friction coating, scuffing, four-ball tester

**Streszczenie**

Celem pracy było opisanie mechanizmów niszczenia smarowanego wysokoobciążonego węzła tarcia z elementami pokrytymi niskotarciową powłoką WC/C tworzących strefę tarcia.

---

\* Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, tel. (48) 364-42-41, fax (48) 36-447-65

Badania wykonano dla niskotarciowej powłoki WC/C (a-C:H:W) otrzymanej metodą reaktywnego rozpylania w procesie PVD. Testy przeprowadzono z wykorzystaniem aparatu czterokilowego, stosując metodę badania zacierania w warunkach ciągłego narastania obciążenia. Badania wykonano dla czterech kombinacji materiałowych: stal/stal (kulka górna stalowa / kulki dolne stalowe), stal/powłoka (kulka górna stalowa / kulki dolne stalowe pokryte powłoką WC/C), powłoka/stal (kulka górna pokryta powłoką WC/C / kulki dolne stalowe), powłoka/powłoka (kulka górna pokryta powłoką WC/C / kulki dolne pokryte powłoką WC/C). Węzeł tarcia smarowano polialfaolefinowym olejem syntetycznym (PAO-8) bez dodatków uszlachetniających.

Obserwację warstwy wierzchniej przeprowadzono z wykorzystaniem mikroskopu elektronowego (SEM) i mikroskopu sił atomowych (AFM). Analizy składu warstwy wierzchniej wykonano, stosując mikroanalizator rentgenowski (EDS), spektrometr z wyładowaniem jarzeniowym (GDO-ES) i rentgenowską spektroskopię fotoelektronową (XPS).

W oparciu o wykonane analizy i obserwacje opisano propagację zacierania badanych skojarzeń. Wysoka odporność na zacieranie skojarzenia stalowego, w którym pokryto powłoką element o większym stopniu przekrycia wynika z wyeliminowania powinowactwa materiałowego elementów trących oraz podatności tego skojarzenia na docieranie. Kluczową rolę odgrywa także wprowadzenie w strefę tarcia smaru stałego w postaci grafitu oraz transfer materiału z elementu stalowego na powierzchnie pokrytą powłoką.

## WPROWADZENIE

W przekładniach zębatych zacieranie jest jedną z najczęstszych przyczyn poważnych awarii, a zatarte elementy nie nadają się do dalszej eksploatacji i wymagają wymiany [L. 1]. Zwiększenie trwałości przekładni zębatych można osiągnąć między innymi poprzez zastosowanie na powierzchni roboczej zębów powłoki PVD/CVD mieszczącej się w granicach tolerancji wymiarowej elementów maszyn [L. 2]. Prace nad zwiększeniem odporności na zacieranie przekładni poprzez pokrycie powierzchni roboczych kół zębatych realizowane były w Europie w ramach inicjatywy COST Akcji 532 [L. 3], projektów Programów Ramowych Unii Europejskiej [L. 4] oraz w Stanach Zjednoczonych w ramach projektów NASA [L. 5]. W kraju opracowano dwuetapowy system doboru

cienkich, twardych powłok przeciwzużyciowych dla zwiększenia trwałości wysokoobciążonych kół zębatych obejmujący aspekty techniczne, ekonomiczne i fizykomechaniczne oraz właściwości tribologiczne [L. 6].

Doświadczenia autora wskazują, że przy stosowaniu powłok PVD do zwiększania trwałości wysokoobciążonego smarowanego węzła tarcia bardzo ważnym aspektem, warunkującym sukces techniczny, jest naniesienie powłoki na element o mniejszym stopniu przekrycia. W wielu przypadkach korzystniej jest zastosować powłokę na jednym elemencie węzła tarcia niż na obydwu [L. 7, 8], a czasem pokrycie obu elementów daje efekt przeciwny oczekiwanemu [L. 1]. Stopień przekrycia ma również znaczny wpływ na zużycie adhezyjne elementów stalowych bez powłoki [L. 9].

Powłoki niskotarciowe, pomimo, że w zasadzie nie wchodzą w reakcje tribochemiczne ze składnikami oleju, biorą aktywny udział w modyfikacji warstwy wierzchniej elementów trących [L. 10], a zwłaszcza współpracującego elementu stalowego [L. 11].

Uzyskane przez autora wyniki badań, przeprowadzonych z wykorzystaniem aparatu czterokulowego, dowodzą, że najwyższą odporność na zacieranie uzyskuje się dla skojarzenia powłoka/stal [L. 12]. W badaniach tych kulka górna pokryta powłoką jest elementem mniej narażonym na zużycie, natomiast kulki dolne (stalowe, bez powłoki) bardziej, gdyż powierzchnia tarcia kulki górnej jest wielokrotnie większa niż powierzchnia tarcia kulek dolnych.

W pracy podjęto się próby opisanie przebiegu propagacji zacierania dla skojarzeń: stal/stal, stal/powłoka, powłoka/powłoka, powłoka/stal w oparciu o uzyskane wyniki analiz i obserwacji.

## **METODY I OBIEKTY BADAŃ**

Badaniom poddano skojarzenie czterokulowe z elementami pokrytymi powłoką przeciwzużyciową. Elementami testowymi były kulki łożyskowe o średnicy nominalnej 1/2", wykonywane ze stali łożyskowej 100Cr6 w klasie dokładności 16 według PN-83/M-86452. Chropowatość powierzchni Ra wynosiła 0,032  $\mu\text{m}$ , a twardość 60÷65 HRC.

Elementy testowe zostały pokryte powłoką niskotarciową WC/C mieszczącą się w granicach tolerancji wymiarowej elementów maszyn. Jest to powłoka DLC z grupy a-C:H:Me, składającą się z trzech warstw: warstwy Cr zwiększającej adhezję do podłoża stalowego, twardej war-

stwy węgla wolframu WC oraz zewnętrznej warstwy będącej uwodornionym, amorficznym węglem domieszkowanym wolframem.

Dotychczasowe doświadczenia wskazują, że poprzez naniesienie powłoki WC/C na powierzchnie robocze zębów można uzyskać wzrost odporności na zacieranie [L. 13, 14] przy jednoczesnym nieznacznym pogorszeniu odporności na powierzchniowe zużycie zmęczeniowe [L. 4, 6]. Węzeł tarcia z elementami pokrytymi tą powłoką charakteryzuje się także korzystnym oddziaływaniem z klasycznymi bazami olejowymi [L. 15] oraz typowymi dodatkami przeciwzużyciowymi i przeciwzatarciowymi [L. 16]. Wykazano też możliwość stosowania olejów ekologicznych do smarowania wysokoobciążonych przekładni, na których zastosowano powłokę niskotarciową [L. 17, 18].

Badana powłoka osadzona była metodą PVD (*Physical Vapour Deposition*) z wykorzystaniem reaktywnego rozpylania magnetronego. Jej właściwości zestawiono w **Tab. 1**.

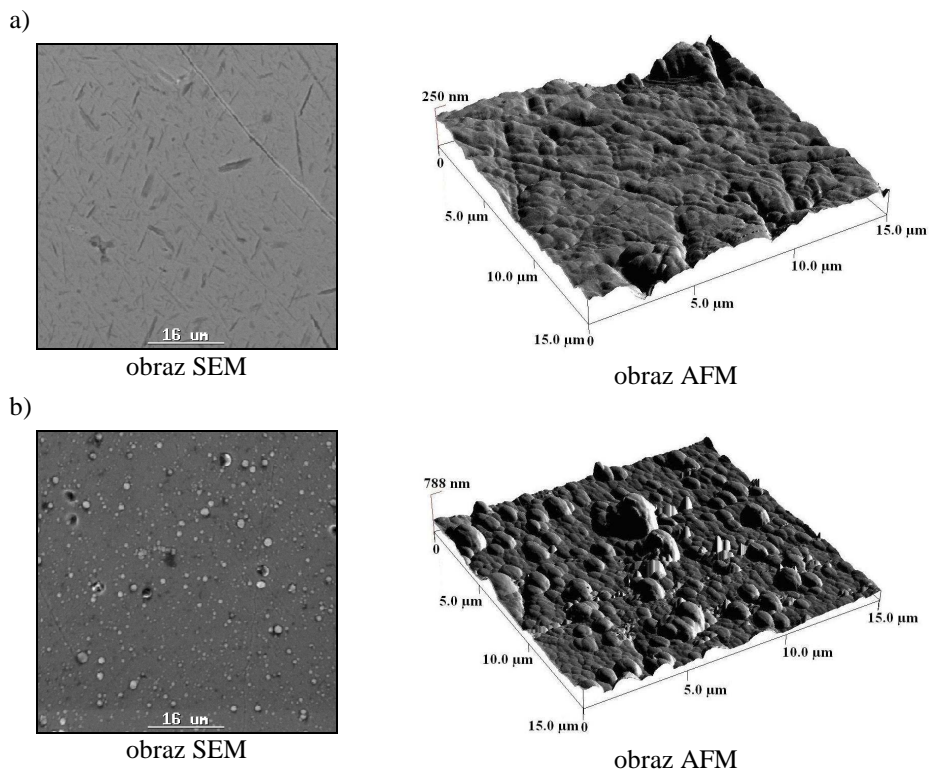
**Tab. 1. Właściwości powłoki WC/C**

Table 1. Properties of WC/C coating

Właściwość	Opis
Materiał	węgiel wolframu, węgiel
Rodzaj	a-C:H:W
Międzywarstwa	Cr, WC
Struktura	warstwowa
Grubość	~2 $\mu\text{m}$
Nanotwardość	~1080 HV
Moduł Younga	~140 GPa
Obciążenie krytyczne	106,2 N
Naprężenia wewnętrzne	-1,0 GPa

Powierzchnie elementu stalowego i pokrytego powłoką a-C:H:W przedstawiono na **Rys. 1**.

Oprócz zmian fizykochemicznych powłoka naniesiona na powierzchnie elementu stalowego wprowadza również zmianę topografii powierzchni elementów testowych.

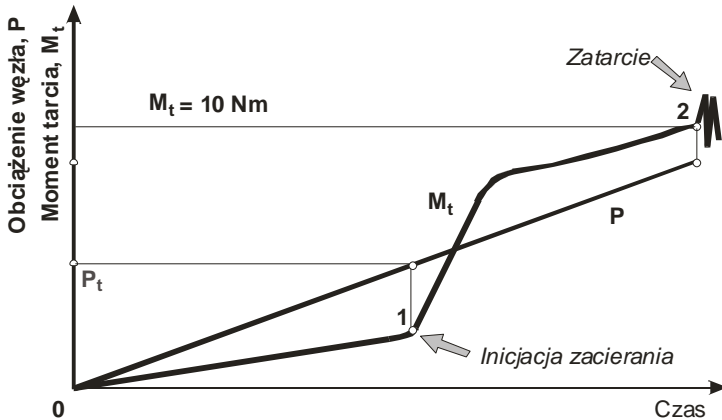


**Rys. 1. Obrazy SEM i AFM powierzchni kulki stalowej i pokrytej powłoką WC/C**  
 Fig. 1. SEM and AFM images of the surface layer of the steel ball and WC/C coated

## METODA BADANIA ZACIERANIA

Badanie zacierania wykonano za pomocą aparatu czterokulowego T-02, stosując metodę z narastającym obciążeniem [L. 19].

Właściwości przeciwzatarciowe smarowanego, czterokulowego węzła tarcia scharakteryzowano za pomocą znormalizowanego wskaźnika obciążenia zacierającego  $P_t$ . Wskaźnik  $P_t$  wyznaczono według normy PN-76/C-04147 [L. 20]. Oznaczenie polegało na przeprowadzeniu biegu zespołu czterech kulek stalowych w obecności badanego środka smarowego pod wzrastającym w sposób ciągły obciążeniem (zaczynającym się od obciążenia równego 0), aż do wystąpienia zacierania sygnalizowanego nagłym wzrostem oporów ruchu – inicjacja zacierania – Rys. 2, a następnie zatarcia. Za zatarcie przyjmowano przekroczenie dopuszczalnego momentu tarcia wynoszącego dla rozpatrywanego systemu 10 Nm.



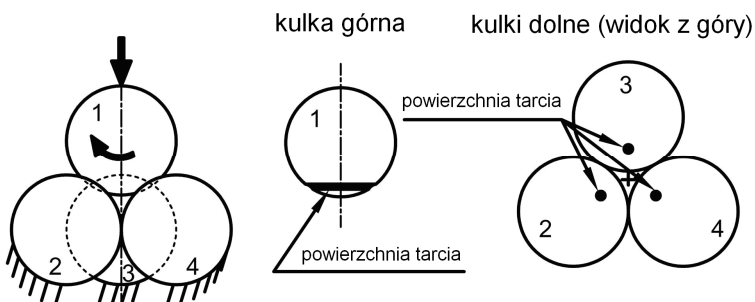
**Rys. 2.** Wykres zmian momentu tarcia ze wzrostem obciążenia P

Fig. 2. The friction torque under increasing load in four-ball tribosystem

Badania prowadzono w następujących warunkach: prędkość obrotowa wrzeciona 500 obr./min (prędkość poślizgu 0,19 m/s), prędkość narastania obciążenia 409 N/s, początkowe obciążenie węzła 0 N, temperatura początkowa oleju ok. 20°C. Minimalna liczba powtórzeń wynosiła 3. Akceptowano tylko te wyniki, które nie odstawały od wartości średniej, więcej niż o 10%. Wykonano także biegi przerywane w toku badania, celem dokonania analiz i obserwacji powierzchni w różnych etapach badania.

Im uzyskana wartość obciążenia zacierającego  $P_t$  jest wyższa, tym wyższa jest odporność badanego skojarzenia na zacieranie.

W skojarzeniu czterokulowym kulka górna jest elementem mniej narażonym na zużycie, natomiast kulki dolne bardziej, gdyż powierzchnia tarcia kulki górnej jest wielokrotnie większa niż powierzchnia tarcia kulek dolnych (**Rys. 3**).



**Rys. 3.** Ślad tarcia na kulce górnej i na kulkach dolnych skojarzenia czterokulowego

Fig. 3. Wear tracks in four-ball tribosystem: on the upper ball and on the lower balls

Zgodnie z definicją stopnia przekrycia jako stosunek powierzchni tarcia elementu próbki do powierzchni tarcia elementu przeciwpróbki w skojarzeniu czerokulowym kulka górna ma mniejszy stopień przekrycia niż kulki dolne.

Badania przeprowadzono dla czterech kombinacji materiałowych: stal/stal (kulka górna stalowa / kulki dolne stalowe), stal/powłoka (kulka górna stalowa / kulki dolne stalowe pokryte powłoką WC/C), powłoka/stal (kulka górna pokryta powłoką WC/C / kulki dolne stalowe), powłoka/powłoka (kulka górna pokryta powłoką WC/C / kulki dolne pokryte powłoką WC/C). W przyjętych oznaczeniach skojarzeń na pierwszej pozycji wskazano element o większej powierzchni tarcia, zaś na drugiej element o mniejszej powierzchni tarcia.

Węzeł tarcia smarowano syntetycznym olejem poliafaolefinowym (PAO-8) niezawierającym dodatków uszlachetniających (lepkość  $7.8 \text{ mm}^2/\text{s}$  w  $100^\circ\text{C}$ , wskaźnik lepkości 136).

Obserwację warstwy wierzchniej przeprowadzono z wykorzystaniem mikroskopu elektronowego (SEM) i mikroskopu sił atomowych (AFM). Analizy składu warstwy wierzchniej wykonano, stosując mikroanalizator rentgenowski (EDS), spektrometr z wyładowaniem jarzeniowym (GDOES) i rentgenowską spektroskopię fotoelektronową (XPS).

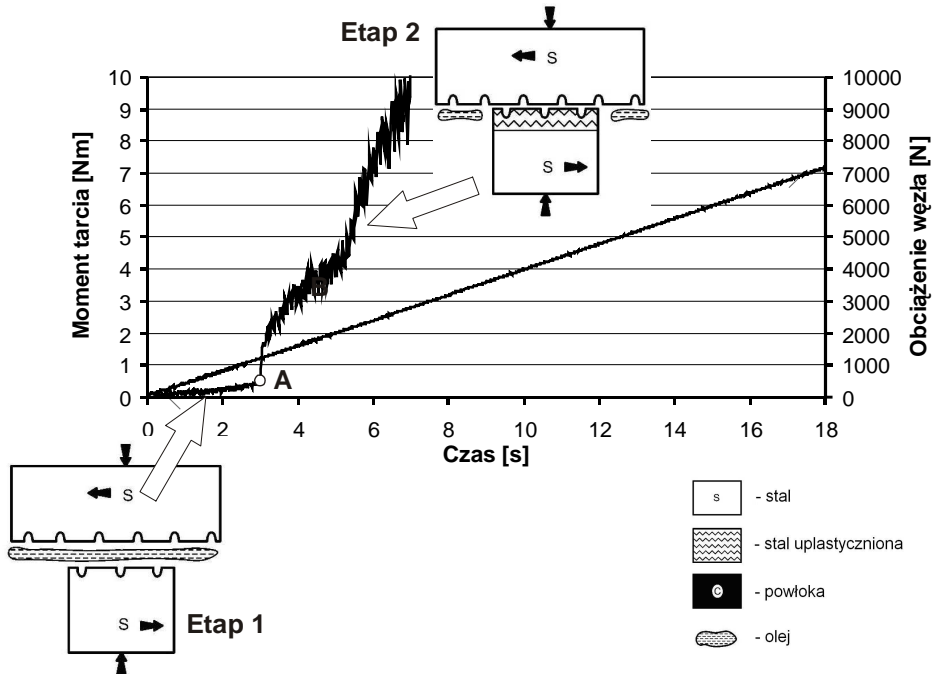
## WYNIKI BADAŃ I ICH DYSKUSJA

Celem badań było opisanie mechanizmów niszczenia smarowanego wysokoobciążonego węzła tarcia z elementami pokrytymi niskotarciową powłoką WC/C tworzących strefę tarcia w konfiguracjach: powłoka/powłoka, powłoka/stal, stal/powłoka i dla odniesienia stal/stal. W przyjętych oznaczeniach skojarzeń na pierwszej pozycji wskazano element o większej powierzchni tarcia, zaś na drugiej element o mniejszej powierzchni tarcia.

Dla wszystkich skojarzeń, w których zastosowano niskotarciową powłokę WC/C, uzyskano wzrost odporności na zacieranie, przy czym skuteczność przeciwdziałania zacieraniu zależała od konfiguracji materiałowej. Najwyższą odporność na zacieranie uzyskano dla skojarzenia powłoka/stal, następnie powłoka/powłoka i stal/powłoka. Zdecydowanie najmniejszą odporność na zacieranie ma skojarzenie stal/stal.

Proces zacierania czterokulowego skojarzenia stal/stal w warunkach narastającego obciążenia zilustrowano na **Rys. 4**. Wyodrębniono 2 etapy.

Poniżej obciążenia, zwanego obciążeniem zacierającym (punkt A na **Rys. 4**) panują korzystne warunki smarowania – etap 1 – smarowanie hydrodynamiczne (HD), elastohydrodynamiczne (EHD) oraz tarcie mieszane. Po przekroczeniu obciążenia zacierającego współpracujące powierzchnie ulegają destrukcji – etap 2 – następuje zacieranie.

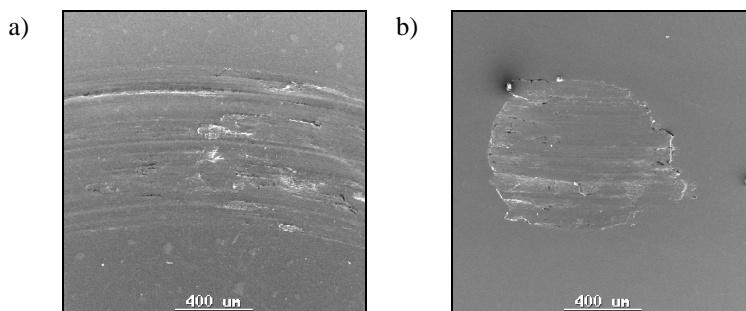


**Rys. 4. Model propagacji zacierania skojarzenia stal/stal**

Fig. 4. The scuffing propagation in steel/steel tribosystem

W skojarzeniu stal/stal powyżej obciążenia zacierającego występuje znaczne odkształcenie współpracujących powierzchni (zwłaszcza powierzchni tarcia na kulkach dolnych). Wzrost chropowatości współpracujących powierzchni oraz towarzyszący mu wzrost temperatury wężła tarcia prowadzi do zatarcia. Powierzchnie śladów zużycia, po wystąpieniu zacierania na elemencie górnym i dolnym, przedstawiono na **Rys. 5**.





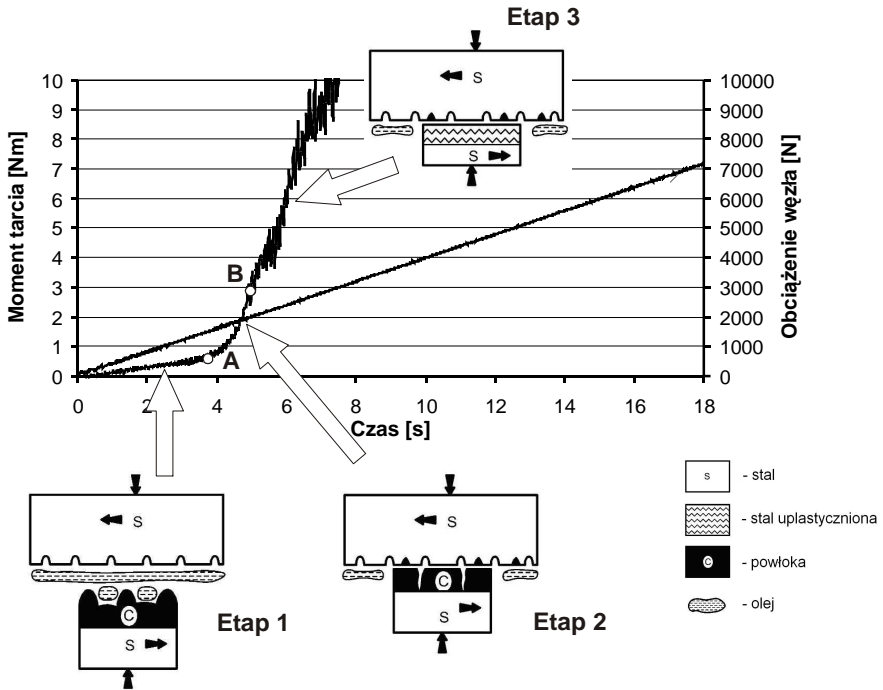
**Rys. 5. Obraz SEM powierzchni śladów tarcia skojarzenia stal/stal po wystąpieniu zacierania (etap 2): a) na kulce górnej, b) na kulce dolnej**

Fig. 5. SEM image from wear surface for steel/steel tribosystem after scuffing initiation (Stage 2): a) upper ball, b) lower ball

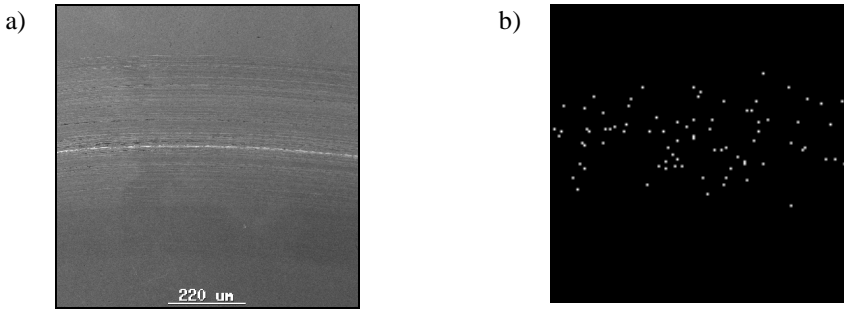
W skojarzeniu stal/stal zacieranie związane jest z powstawaniem szczień adhezyjnych jednakowych materiałów. Zapobiec temu można eliminując powinowactwo materiałowe poprzez zastosowanie cienkich, twardych powłok przeciwzużyciowych.

Pokrycie powłoką elementu bardziej narażonego na zużycie – o mniejszej powierzchni tarcia (kulki dolne) powoduje jedynie nieznaczny wzrost odporności skojarzenia na zacieranie, pomimo że zostaje ograniczone powinowactwo materiałowe elementów trących, a tym samym zmniejszona tendencja do tworzenia szczień adhezyjnych. Na **Rys. 6** przedstawiono model zacierania skojarzenia stal/powłoka, w którym wyszczególniono trzy etapy: smarowanie HD, EHD i tarcie mieszane (etap 1), docieranie (etap 2) i zacieranie (etap 3).

W początkowym okresie (Etap 1) panują korzystne warunki smarowania, dochodzi jedynie do nielicznych kontaktów nierówności powierzchni. Współpracujące powierzchnie są oddzielone warstwą środka smarowego. Chropowata powierzchnia powłoki stanowi rezerwuuar dla środka smarowego. Wzrost obciążenia (etap 2 – docieranie) powoduje przerwanie warstwy smarowej i bezpośredni kontakt współpracujących powierzchni. Następuje docieranie węzła tarcia. Niskotarciowa powłoka pełni rolę smaru stałego, chroniąc powierzchnie przed zacieraniem. W pierwszej kolejności wyrównane zostają nierówności powierzchni elementu pokrytego powłoką. Następuje transfer materiału powłoki na element stalowy (**Rys. 7**).

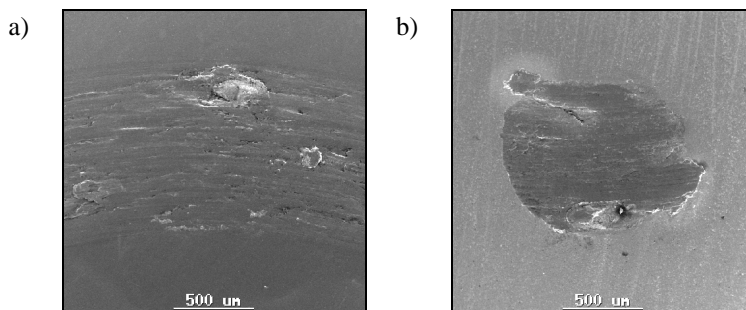


Rys. 6. Model propagacji zacierania skojarzenia stal/powłoka  
Fig. 6. The scuffing propagation in steel/coating tribosystem



Rys. 7. Powierzchnia śladu tarcia stalowej kulki górnej – etap 2, skojarzenie stal/powłoka: a) obraz SEM, b) rozkład powierzchniowy W  
Fig. 7. The worn surface from steel upper ball – Stage 2, steel/coating tribosystem: a) SEM image, b) W distribution

Jednakże, ze względu na ograniczoną ilość materiału powłoki (ze styku punktowego następuje transfer materiału na znacznie większą powierzchnię tarcia na kulce górnej), w dość krótkim czasie powłoka zostaje usunięta. Dochodzi do metalicznego kontaktu powierzchni, co w konsekwencji prowadzi do zacierania (etap 3). Współpracujące powierzchnie zostają zdeformowane plastycznie i zatarte (**Rys. 8**).

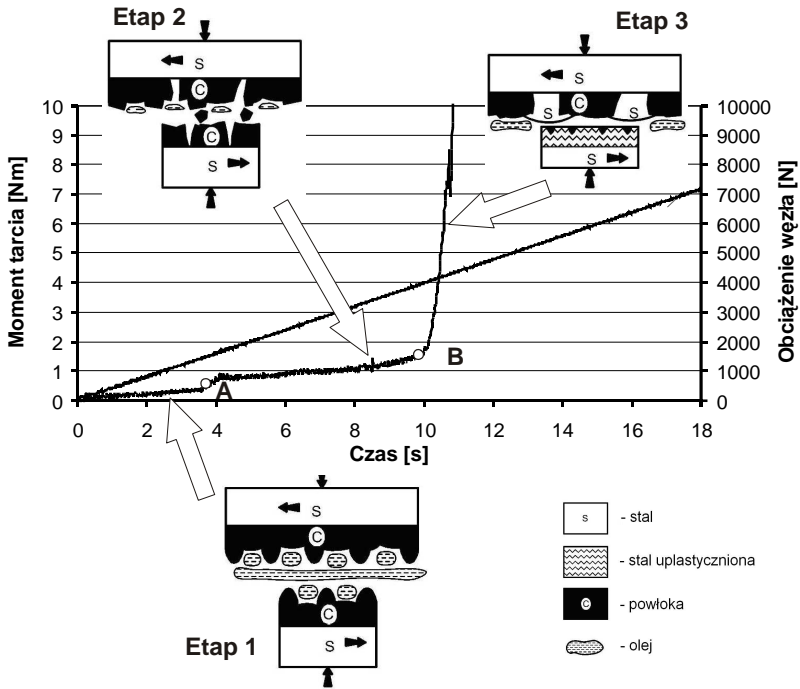


**Rys. 8. Obraz SEM powierzchni śladów tarcia po wystąpieniu zacierania – etap 3, skojarzenie stal/powłoka: a) kulka górna (stal), b) kulka dolna (powłoka)**

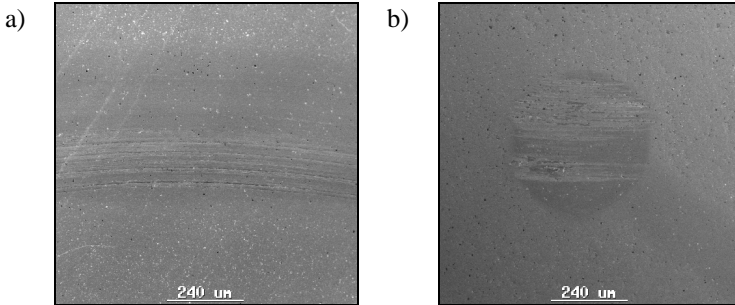
Fig. 8. SEM images from worn surface after scuffing initiation – Stage 3, steel/coating tribosystem: a) upper steel ball, b) lower coated ball

Pokrycie wszystkich elementów węzła tarcia powłoką niskotarciową jest również skutecznym sposobem przeciwdziałania zacieraniu. Dla skojarzenia powłoka/powłoka uzyskano znacznie wyższą odporność na zacieranie niż dla skojarzenia stal/stal bądź stal/powłoka. Na **Rys. 9** przedstawiono model zacierania skojarzenia powłoka/powłoka, w którym wyszczególniono trzy etapy: tarcie mieszane (etap 1), destrukcja powłoki (etap 2) i zacieranie (etap 3).

W początkowym okresie (etap 1) panują korzystne warunki smarowania hydrodynamicznego. Współpracujące powierzchnie są oddzielone warstwą środka smarowego. Powłoka skutecznie chroni elementy stalowe przed zacieraniem. Jednak węzeł tarcia ze wszystkimi elementami pokrytymi powłoką niskotarciową nie ulega dotarciu. Powierzchnie stają się bardziej chropowate. Fotografie powierzchni tarcia po 2 sek. badania (etap 1) z widocznym zużyciem powodującym zwiększenie chropowatości współpracujących powierzchni przedstawiono na **Rys. 10**.

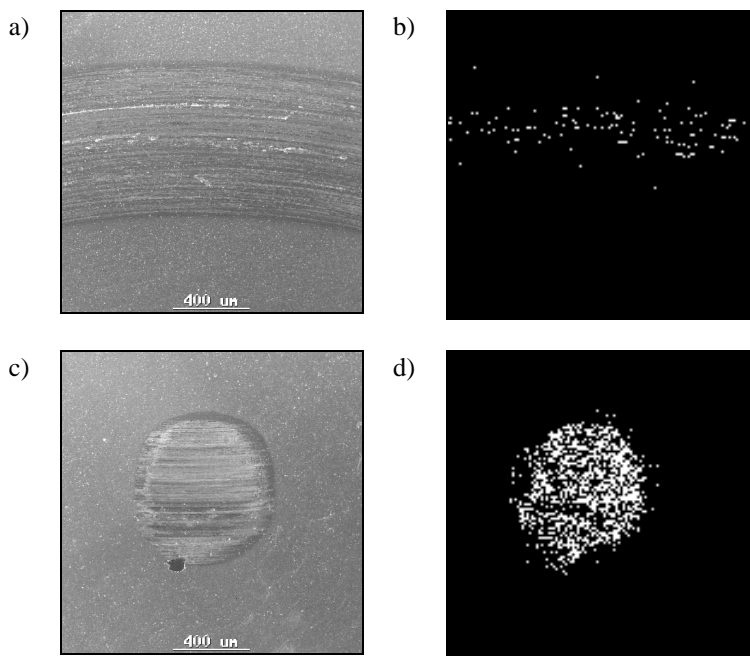


**Rys. 9. Model propagacji zacierania skojarzenia powłoka/powłoka**  
 Fig. 9. The scuffing propagation in coating/coating tribosystem



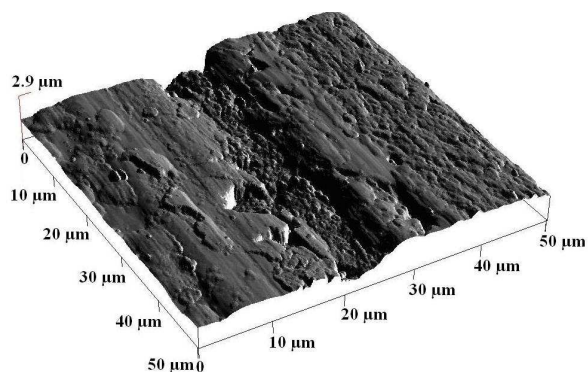
**Rys. 10. Obraz SEM powierzchni śladów tarcia – etap 1, skojarzenie powłoka/powłoka: a) kulka górna, b) kulka dolna**  
 Fig. 10. SEM images from worn surfaces – Stage 1, coating/coating tribosystem: a) upper ball, b) lower ball

Na powierzchni tarcia kulki górnej dochodzi do znacznego spękania powłoki i jej delaminacji. Wprowadzone w strefę tarcia produkty tarcia (fragmenty powłoki) sprzyjają wykruszaniu powłoki (etap 2). Miejscami stalowe podłoże zostaje odsłonięte – **Rys. 11, 12.**



**Rys. 11. Powierzchnie śladów zużycia – etap 2, skojarzenie powłoka/powłoka: a) obraz SEM na kulce górnej, b) rozkład Fe na kulce górnej, c) obraz SEM na kulce dolnej, d) rozkład Fe na kulce dolnej**

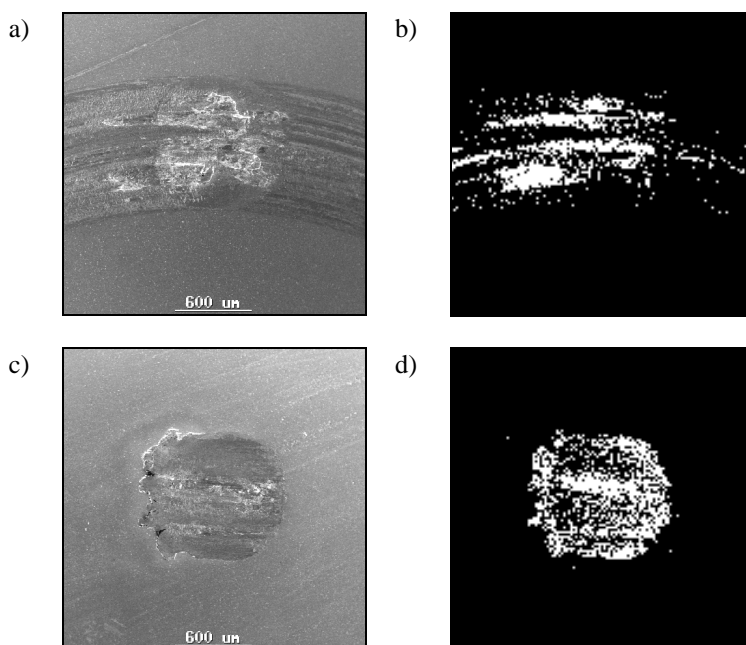
Fig. 11. The worn surface, Stage 2, coating/coating tribosystem: a) SEM image from the upper ball, b) Fe distribution, c) SEM image from lower ball, d) Fe distribution



**Rys. 12. Obraz AFM powierzchni tarcia na kulce górnej – etap 2, skojarzenie powłoka/powłoka**

Fig. 12. AFM image from the upper steel ball, Stage 2, coating/coating tribosystem

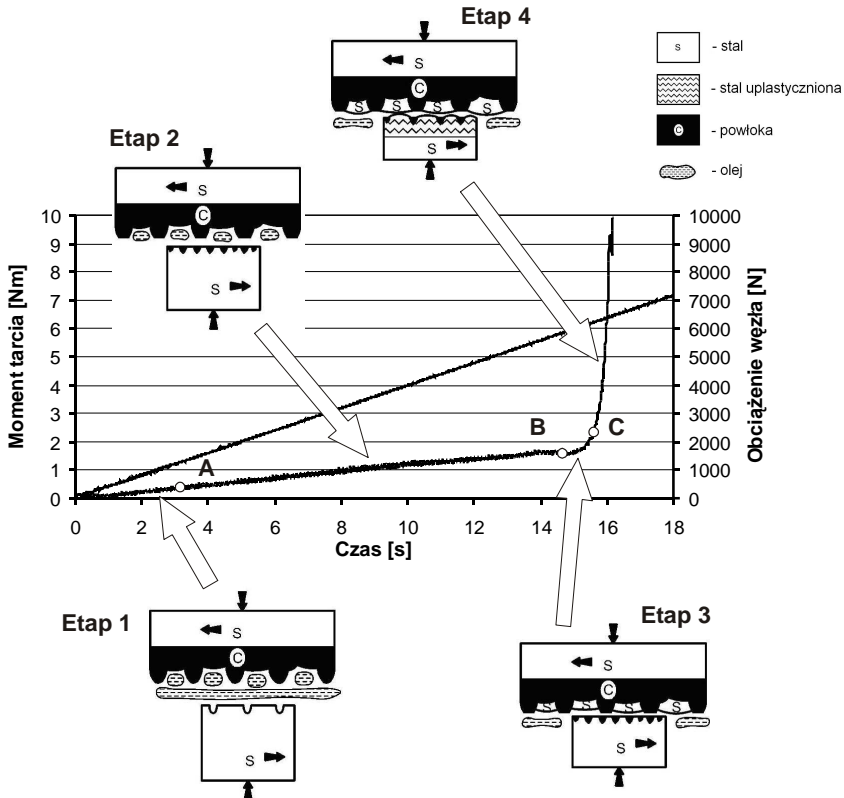
Następnie następuje transfer odkształconej stali z powierzchni tarcia na kulce dolnej na powierzchnię tarcia na kulce górnej. Wzrost obciążenia węzła tarcia prowadzi do powstania szepień adhezyjnych pomiędzy materiałem podłoża (odkształconym plastycznie) a materiałem przeniesionym z kulek dolnych na kulkę górną. Następuje zatarcie węzła tarcia (etap 3). Powierzchnie śladów tarcia skojarzenia powłoka/powłoka w momencie występowania zacierania przedstawiono na **Rys. 13**.



**Rys. 13. Powierzchnie śladów zużycia – etap 3, skojarzenie powłoka/powłoka: a) obraz SEM na kulce górnej, b) rozkład Fe na kulce górnej, c) obraz SEM na kulce dolnej, b) rozkład Fe na kulce dolnej**

Fig. 13. The worn surface, Stage 3, coating/coating tribosystem: a) SEM image from the upper ball, b) Fe distribution, c) SEM image from lower ball, d) Fe distribution

Najkorzystniejszym skojarzeniem, pod względem odporności na zacieranie, jest powłoka/stal, w którym niskotarciową powłokę przeciwzuzyciową naniesiono na element mniej narażony na zużycie o większej powierzchni tarcia – kulkę górną. Skutecznie zostaje ograniczone powinowactwo materiałowe elementów trących, a tym samym tendencja do tworzenia szepień adhezyjnych. Na **Rys. 14** przedstawiono model zacierania skojarzenia stal/powłoka.



**Rys. 14. Model propagacji zacierania skojarzenia powłoka/stal**

Fig. 14. The scuffing propagation in coating/steel tribosystem

W modelu wyszczególniono cztery etapy: smarowanie hydrodynamiczne (etap 1), tarcie mieszane (etap 2), transfer materiału z kulki stalowej na powłokę (etap 3) i zacieranie (etap 4).

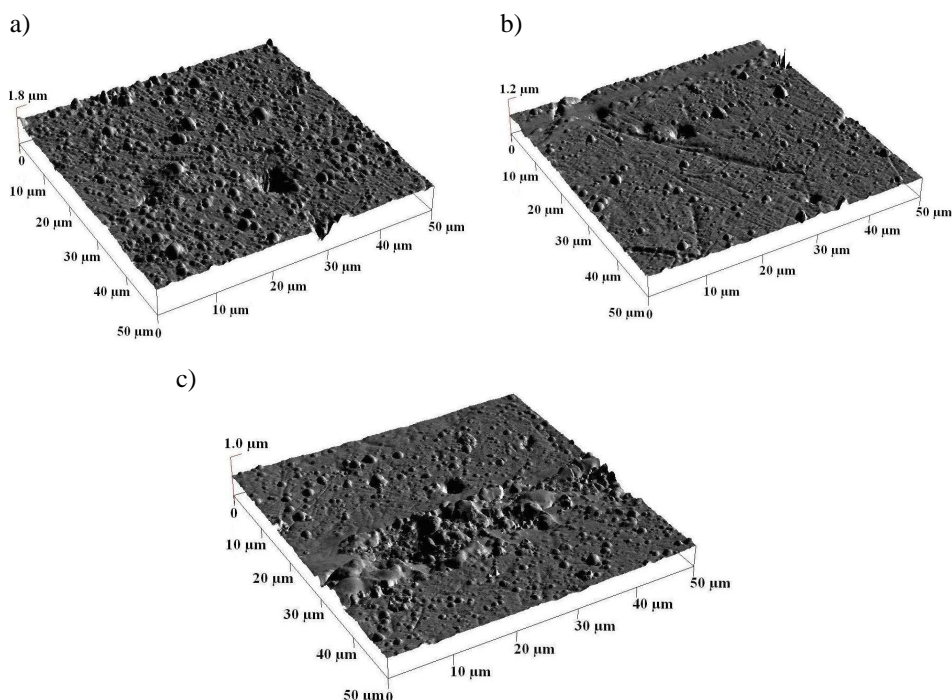
Na pierwszym etapie panują korzystne warunki smarowania, współpracujące powierzchnie są oddzielone filmem smarowym, występuje tarcie mieszane. Chropowata powierzchnia powłoki stanowi rezerwuuar dla środka smarowego. W skojarzeniu powłoka/stal po przekroczeniu obciążenia warunkującego istnienie hydrodynamicznego klina smarowego następuje metaliczny kontakt współpracujących powierzchni. Skojarzenie to ze względu na możliwość wprowadzenia w strefę tarcia smaru stałego (grafitu) jest bardzo podatne na docieranie.

Procesowi docierania towarzyszą znaczne zmiany chropowatości powierzchni. Obrazy AFM uzyskane z powierzchni tarcia elementu pokrytego powłoką zamieszczono na **Rys. 15**.

W skojarzeniu powłoka/stal następuje mechaniczne dopasowanie powierzchni – wyrównanie nierówności powierzchni elementu pokrytego powłoką (**Rys. 15a**), a następnie przeniesienie materiału z kulki stalowej na powłokę (**Rys. 15c**). Zmiany chropowatości na poszczególnych etapach przedstawiono na **Rys. 16**.

Wzrost chropowatości w ostatniej fazie badania wynika z transferu materiału z elementu dolnego na element pokryty powłoką.

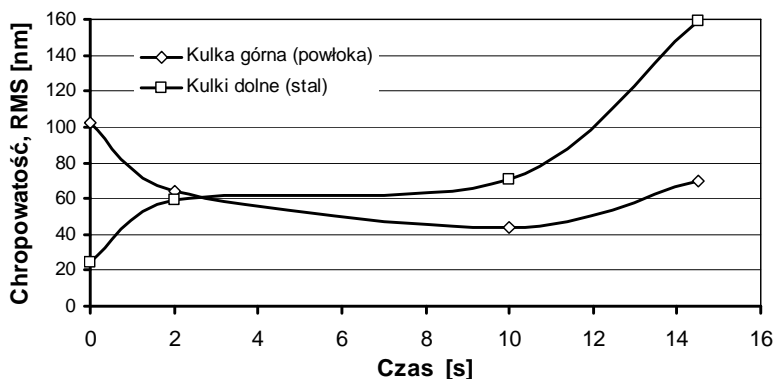
Proces modyfikacji warstwy wierzchniej skojarzenia powłoka/stal ma dość złożony przebieg. W pierwszej kolejności następuje wprowadzenie w strefę tarcia materiału powłoki. Część materiału powłoki w postaci grafitu stanowi smar stały. Obecność grafitu na powierzchni elementu stalowego potwierdzają wyniki XPS, wskazujące, że w warstwie wierzchniej elementu stalowego stężenie atomowe grafitu może osiągnąć nawet 40% – **Rys. 17**.



**Rys. 15.** Obrazy AFM ze śladów tarcia elementu z powłoką skojarzenia powłoka/stal na kolejnych etapach współpracy: a) tarcie mieszane (etap 1), b) docieranie (etap 2), c) transfer materiału z kulki stalowej na powłokę (etap 3)

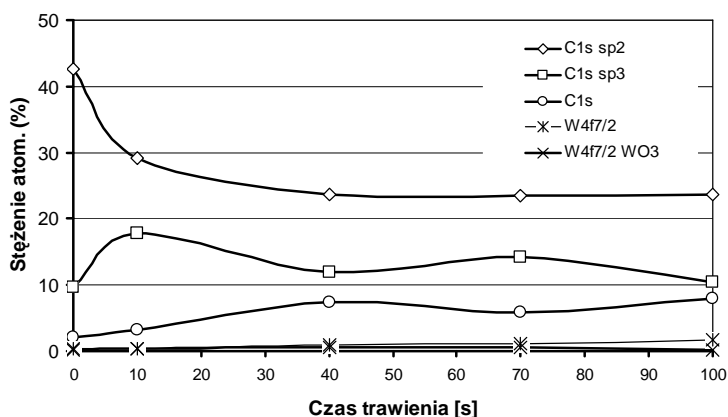
Fig. 15. AFM images of wear scar in coated ball, coating/steel tribosystem: a) mixed lubrication (Stage 1), b) run-in (Stage 2), c) steel material transfer on coated ball (Stage 3).





**Rys. 16. Chropowatość powierzchni śladów tarcia w skojarzeniu powłoka/stal (AFM, obszar analizy 50 x 50  $\mu\text{m}$ )**

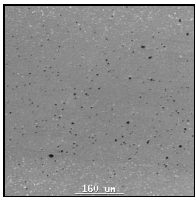
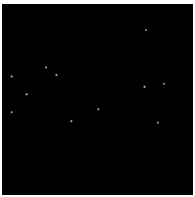
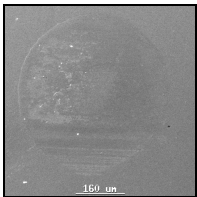
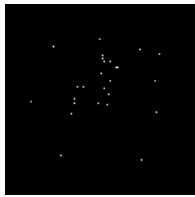
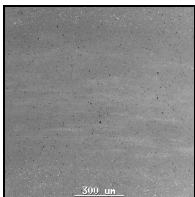
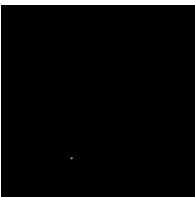
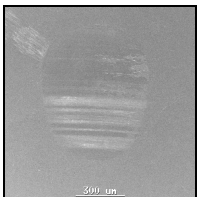

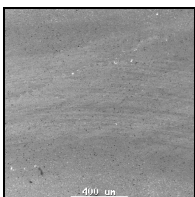

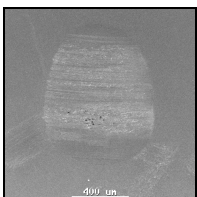
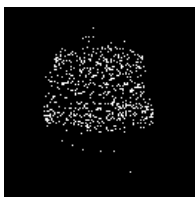
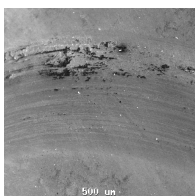
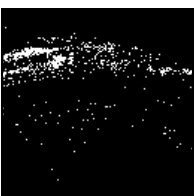
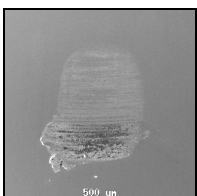

Fig. 16. Surface roughness from wear scar, coating/steel tribosystem (AFM, 50x50  $\mu\text{m}$  inspection area)



**Rys. 17. Wyniki analizy XPS z powierzchni kulki stalowej skojarzenia powłoka/stal (etap 4)**

Fig. 17. XPS results from steel ball, Stage 4, coating/steel tribosystem

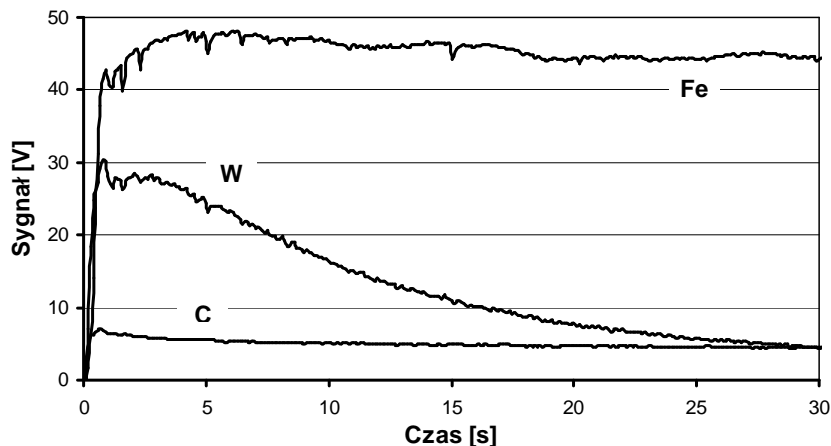
Materiał powłoki osadza się na powierzchni elementu stalowego – widoczny W na powierzchni stali, w zasadzie od początku współpracy – **Rys. 18**. Przy wyższych obciążeniach odnotowano odwrócenie procesu przenoszenia. Na etapie 3 zaobserwowano transfer zmodyfikowanego materiału warstwy wierzchniej elementu stalowego na powierzchnię powłoki. Potwierdzają to wyniki analizy EDS – obecność Fe na powierzchni powłoki – **Rys. 18**.

Powierzchnia tarcia na kulce górnej (pokrytej powłoką)		Powierzchnia tarcia na kulce dolnej (bez powłoki)	
Etap 1 (tarcie mieszane)			
			
obraz SEM	rozkład Fe	obraz SEM	rozkład W
Etap 2 (docieranie)			
			
obraz SEM	rozkład Fe	obraz SEM	rozkład W
Etap 3 (transfer materiału z kulki stalowej na powłokę)			
			
obraz SEM	rozkład Fe	obraz SEM	rozkład W
Etap 4 (zatarcie)			
			
obraz SEM	rozkład Fe	obraz SEM	rozkład W

**Rys. 18. Wyniki analizy SEM/EDS ze śladów tarcia skojarzenia powłoka/stal**

Fig. 18. The results of SEM/EDS analyses from wear scars of coating/steel tribosystem

Dalszy wzrost obciążenia prowadzi do zatarcia. W momencie zatarcia na powierzchni śladu tarcia kulek dolnych (stalowych) obserwuje się znaczny depozyt materiału powłoki. Rozkład W w głąb warstwy wierzchniej elementu stalowego przedstawiono na **Rys. 19**. Wolfram nie występuje jedynie na powierzchni, ale wbudowany jest w warstwę wierzchnią.



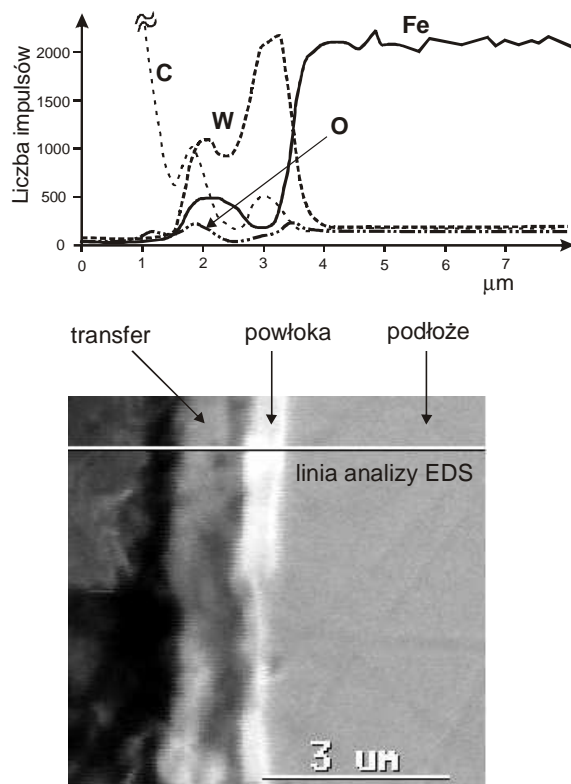
**Rys. 19.** Wyniki analizy GDOES rozkładu w głąb warstwy wierzchniej śladu zużycia na kulce stalowej po zatarciu – etap 4 (skojarzenie powłoka/stal)

Fig. 19. The results of GDOES analysis of wear scar of steel ball after seizure (Stage 4, coating/steel tribosystem).

Wzbogacona w wolfram powierzchnia elementu stalowego ma tendencję do tworzenia szcziepnień adhezyjnych z materiałem powłoki. Obecność zdeformowanego materiału z elementu stalowego na powierzchni tarcia pokrytej powłoką potwierdziły wyniki rozkładu pierwiastkowego w przekroju poprzecznym śladu tarcia. Przekrój poprzeczny śladu zużycia na kulce górnej (pokrytej powłoką) oraz wyniki analizy EDS przedstawiono na **Rys. 20**.

W skojarzeniu powłoka/stal następował transfer zdeformowanej plastycznie stali, z domieszką materiału powłoki, zwłaszcza wolframu, z elementu o mniejszej powierzchni tarcia na element o większej powierzchni tarcia, przy czym powłoka nie ulegała całkowitej destrukcji. Zacieranie skojarzenia powłoka/stal nie jest następstwem usunięcia po-

włoki z elementu mniej narażonego na zużycie, lecz transferu zmodyfikowanego materiału z elementu stalowego na powierzchnię powłoki.



**Rys. 20. Przekrój poprzeczny przez ślad zużycia na kulce górnej pokrytej powłoką po zatarciu oraz wyniki analizy EDS (skojarzenie powłoka/stal, etap 4)**

Fig. 20. The cross section of wear scar of upper coated ball after seizure and EDS analysis (Stage 4, coating/steel tribosystem).

## PODSUMOWANIE

Najkorzystniejszym skojarzeniem, pod względem odporności na zacieranie jest powłoka/stal, w którym niskotarciową powłokę przeciwzużyciową naniesiono na element mniej narażony na zużycie, o większej powierzchni tarcia. Skutecznie zostaje ograniczone powinowactwo materiałowe elementów trących, a tym samym tendencja do tworzenia szepień adhezyjnych. Skojarzenie to ze względu na możliwość wprowadzenia w strefę tarcia smaru stałego (grafitu) jest bardzo podatne na docieranie.

Zmiany zachodzące w warstwie wierzchniej skojarzenia powłoka/stal mają dość złożony przebieg. W pierwszej kolejności następuje wprowadzenie w strefę tarcia materiału powłoki. Materiał powłoki osadza się na powierzchni elementu stalowego. Dalszy wzrost obciążenia prowadzi do transferu zdeformowanej plastycznie stali, z domieszką materiału powłoki, zwłaszcza wolframu, na element pokryty powłoką.

Z przeprowadzonych badań i analiz wynikają następujące wnioski:

- poprzez zastosowanie cienkiej niskotarciowej powłoki mieszczącej się w granicach tolerancji wymiarowej elementów maszyn możliwe jest zwiększenie odporności na zacieranie wysokoobciążonego smarowanego węzła tarcia, co wynika głównie z eliminacji powinowactwa materiałowego współpracujących elementów,
- odporność na zacieranie zależy od konfiguracji materiałowej badanego skojarzenia; znacznie skuteczniejszym zabiegiem jest pokrycie powłoką niskotarciową elementu o większej powierzchni tarcia, czyli mniej narażonego na zużycie niż elementu o mniejszej powierzchni tarcia, czyli bardziej narażonego na zużycie.

Uzyskane wyniki są zgodne z obserwacjami uzyskanymi przez innych autorów, którzy zauważyli, że skojarzenie powłoka/stal ulega lepszemu dotarciu i w wielu przypadkach korzystniej jest zastosować powłokę na jednym elemencie węzła tarcia niż na obydwu [L. 7].

Wyjaśnienie procesu tarcia wysokoobciążonych elementów maszyn w warunkach zacierania, a także dokonany na tej podstawie jednoznaczny opis mechanizmów zużywania rozwiązuje problem świadomego kształtowania, z wykorzystaniem technologii PVD, wysokoobciążonych węzłów tarcia o zwiększonej odporności na zacieranie.

## PODZIĘKOWANIA

*Wyrażam podziękowania dla dr. Maksima Antonowa z Uniwersytetu w Tallinie za cenne konsultacje przy badaniu mechanizmu propagacji zacierania oraz dla mgr Edyty Osuch-Słomki za pomoc w wykonaniu analiz SEM/EDS.*

## LITERATURA

1. Szczerek M., Tuszyński W.: *Badania tribologiczne. Zacieranie*. Wyd. ITeE. Radom 2000, s. 142.

2. Michalczewski R.: Badania tribologiczne elementów z powłokami przeciwzużyciowymi, tworzących smarowany styk skoncentrowany. Rozprawa doktorska. Politechnika Łódzka, 2002.
3. Michalczewski R., Piekoszewski W., Szczerek M., Tuszyński W.: Chemomechanical synergy of PVD/CVD coatings and environmentally friendly lubricants in rolling and sliding contacts. COST 532 Conference, Triboscience and Tribotechnology, Gent-Belgia, 18-19 października 2004, s. 181–190.
4. Amaro R., Martins R., Seabra J.: MoST coatings for gears. Raport VTI: “Current trends in tribology”. Praca zbiorowa pod red. K. Vercammen, K. Van Acker, J. Meneve. VITO. Belgia. s. II.13 – II.16.
5. Krantz T.L., Cooper C.V., Townsend D.P., Hansen B.D.: Increased Surface Fatigue Lives of Spur Gears by Application of a Coating. Raport NASA/TM-2003-212463. 2003.
6. Michalczewski R., Szczerek M., Tuszyński W., Wulczyński J.: Metoda doboru cienkich, twardych powłok przeciwzużyciowych dla zwiększenia trwałości wysokoobciążonych kół zębatach. Cz. II. Wyniki testów przekładniowych. Tribologia. 2007, nr 6 s. 133–149.
7. Podgornik B., Jacobson S., Hogmark S.: DLC coating of boundary lubricated components – advantages of coating one of the contact surfaces rather than both or none. Tribology International. 2003, nr 36, s. 843–849.
8. Michalczewski R., Antonov M., Vlad M., Szczerek M., Hussainova Irina: The assessment of the coated elements behaviour before and after scuffing under four-ball lubricated testing conditions. Proceedings of the 2nd European Conference on Tribology. ECOTRIB 2009, Pisa, Italy, June 7–10, 2009, s. 107–112.
9. Nosal S.: Wpływ stopnia wzajemnego przekrycia na zacieranie adhezyjne. Tribologia. 2002, nr 4, s. 1261–1266.
10. Michalczewski R., Piekoszewski W., Szczerek M., Tuszyński W.: The lubricant-coating interaction in rolling and sliding contacts. Tribology International 42 (2009) 554–560.
11. Stavlid N.: On the formation of low-friction tribofilms in Me DLC steel sliding contacts. Rozprawa doktorska. Uniwersytet w Uppsali. Uppsala 2006.
12. Michalczewski R.: Wpływ konfiguracji materiałowej na odporność na zacieranie smarowanych skojarzeń z elementami pokrytymi powłoką niskotarciową. Tribologia. 2, 2009, s. 93–106. XXX Jesienna Szkoła Tribologiczna. 21–24 września 2009 r. Nałęczów.
13. Michalczewski R., Tuszyński W., Szczerek M.: Zastosowanie powłok DLC do zwiększania odporności na zacieranie kół zębatach smarowanych olejem ekologicznym. Inżynieria Powierzchni, 2008, nr 3, s. 49–57.

14. Michalczewski R., Szczerek M., Tuszyński W., Wulczyński J.: Badanie zdolności do przenoszenia obciążeń testowej przekładni zębatej z uzębieniem pokrytym powłoką WC/C. *Problemy Eksploatacji*, 2004, nr 4, s. 247–254.
15. Matuszewska A., Michalczewski R., Grądkowski M, Szczerek M: Dobór baz olejowych do węzłów tarcia z elementami pokrytymi powłoką WC/C. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn. Z. 2 (150)*, vol. 42, 2007, s. 31–40.
16. Podgornik B., Jacobson S., Hogmark S.: Influence of EP additive concentration on the tribological behaviour of DLC-coated steel surfaces. *Surface and Coatings Technology*. 2005, nr 191, s. 357–366.
17. Beckers M., Lugscheider E., Bobzin K., Burckhardt M.: Development and Characterization of Innovative PVD-coatings for Environmental Compatible Tribological Systems. 13<sup>th</sup> International Colloquium Tribology. Esslingen. Niemcy. 15–17 stycznia 2002, s. 1765–1772.
18. Weck M., Hurasky-Schonwerth, Bugiel Ch.: Service behaviour of PVD-coated gearing lubricated with biodegradable synthetic ester oil. *Gear Technology*, January/February 2004, s. 34–40, [www.geartechnology.com](http://www.geartechnology.com).
19. Piekoszewski W., Szczerek M., Tuszyński W.: The action of lubricants under extreme pressure conditions in a modified four-ball tester, *Wear*, 249 (2001), s. 188–193.
20. PN-76/C-04147. Badanie własności smarnych olejów i smarów.

**Recenzent:**  
**Wiesław ZWIERZYCKI**

## Summary

**The aim of this paper was to describe the mechanisms of the destruction of heavily loaded friction pair elements coated with low – friction WC/C coating.**

**The investigations were performed for low friction coatings WC/C (a-C:H:W) deposited by the reactive sputtering PVD process. Experiments were carried out using the four-ball tester and the method with continuously increasing loads. Tests were conducted for the four material combinations: steel/steel tribosystem (all balls uncoated), steel/coating tribosystem (one upper ball uncoated/three lower balls WC/C coated), coating/steel tribosystem (one upper ball WC/C coated/ three lower balls uncoated), coating/coating**

tribosystem (all balls WC/C coated). The friction pair was lubricated with pure polyalphaolefin synthetic base oil (denoted as PAO-8).

Observation of the surface layer was carried out using scanning electron microscopy (SEM) and atomic force microscopy (AFM). Analysis of the composition of the surface layers was performed using X-ray microanalyser (EDS), glow discharge optical emission spectrometry (GDOES), and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS).

Based on the results of performed analysis and observations, the propagation of scuffing was described. The high scuffing resistance of steel tribosystem was obtained when only one element, with higher overlapping ratio, was coated and resulted from reducing the adhesion between rubbing surfaces due to low chemical affinity (similarities) between the steel and the coating material. The presence of solid lubricant graphite in the friction zone and thereaction layer on the steel surface played an important role in creating antiscuffing properties.