

Ewa PAWELEC\*, Jarosław MOLEND\*<sup>\*</sup>

**ANALIZA PRZYDATNOŚCI WYBRANYCH METOD  
BADAWCZYCH DO OCENY SPÓJNOŚCI  
WEWNĘTRZNEJ OPRACOWANEGO SMARU  
ORAZ JEGO ODDZIAŁYWAŃ ADHEZYJNYCH  
Z PODŁOŻEM STALOWYM**

**ANALYSIS OF THE SUITABILITY OF SELECTED  
RESEARCH METHODS TO ASSESS THE COHESION  
OF A DESIGNED GREASE AND ITS ADHESIVE  
INTERACTIONS WITH THE STEEL SURFACE**

**Słowa kluczowe:**

adhezja, kohezja, smar plastyczny, penetracja, obciążenie zacierające

**Key words:**

adhesion, cohesion, grease, penetration, scuffing load

**Streszczenie**

Celem pracy był dobór metod badawczych i ocena informatywności otrzymanych wyników badania oddziaływań występujących pomiędzy opracowanym smarem plastycznym a roboczymi powierzchniami wężła

---

\* Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, ul. K. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom.

tarcia wykonanymi ze stali. Przeprowadzone prace wstępne wykazały, że do oceny może być zastosowany pomiar siły rozrywania, penetracji i obciążenia zacierającego, które to parametry wykazują liniową zależność pomiędzy sobą. Uzyskane wyniki wskazują, że istnieje możliwość wykorzystania opracowanych metodyk do oceny porównawczej stopnia adhezji smarów do podłoża.

## WPROWADZENIE

Opory tarcia przemieszczających się względem siebie ciał stałych wynikają z występowania sił oddziaływań międzycząsteczkowych dwóch różnych faz (w tym sił adhezji i kohezji) [L. 1]. Najogólniejsze prawo tribologii (wzór 1) wyraża opory tarcia przemieszczających się ciał jako sumę oporów adhezji ( $T_{adh}$ ) i oporów kohezji ( $T_{koh}$ ) [L. 2]

$$T_t = T_{adh} + T_{koh} \quad (1)$$

W zależności od warunków tarcia poszczególne składowe mogą wzrastać lub osiągać granicznie małe wartości (np. przy tarcu suchym wartość członu kohezji dąży do zera). Oprócz skrajnych przypadków istnieją w rzeczywistym styku smarowanym sytuacje, dla których wartości obydwu członów są zróżnicowane i dokładne ich obliczenie jest trudne. Występujące w węzle tarcia oddziaływania pomiędzy środkiem smarowym i powierzchnią stalową są zatem sumą oddziaływań kohezyjno-adhezyjnych.

Smary plastyczne należą do szeroko stosowanej grupy środków smarowych [L. 3], których rozszerzany obszar aplikacji wymaga wielu specyficznych właściwości, związanych między innymi z ich oddziaływaniem z materiałem węzła tarcia. Jest to szczególnie istotne w przypadku smarów stosowanych w warunkach zmiennych temperatur i prędkości obrotowych łożysk, gdzie o skuteczności ich działania decyduje zarówno spistość wewnętrzna, jak i adhezja do podłoża [L. 4, 5, 7].

Niemniej jednak w dotychczas stosowanym systemie diagnostycznym cech użytkowych smarów plastycznych nie występują bezpośrednie wskaźniki determinujące wartość adhezji i kohezji. Wykorzystuje się parametry pośrednie, których wynik uzależniony jest od wymienionych zjawisk fizykochemicznych.

W kraju prowadzone są prace badawcze, w których autorzy wykorzystują metodyki własne do badania oddziaływań środków smarowych z podłożami wykonanymi z różnych materiałów. W publikacji [L. 13] autorzy, z zastosowaniem maszyny wytrzymałościowej MTS Minibionix 810, badają oddziaływania smarów plastycznych z powierzchnią polipropylenu i miedzi, zaś w pracach [L. 14, 15] autor z zastosowaniem specjalnie wykonanego urządzenia dokonuje pomiarów siły oddziaływania pomiędzy powierzchniami stalowymi w procesie tarcia.

Celem niniejszej pracy było porównanie informatywności wyników badań uzyskanych poprzez pomiar siły rozrywania, penetracji i obciążenia zacierającego oraz ocena możliwości korelacji umożliwiającej identyfikację zależności pomiędzy parametrami opisującymi oddziaływania adhezyjne i kohezyjne smaru.

## **PRZEDMIOT BADAŃ**

Podczas badań zastosowano nietoksyczne smary plastyczne skomponowane na bazie syntetycznego oleju estrowego i stałej ilości zagęszczacza nieorganicznego (modyfikowana krzemionka), zawierające w składzie dodatki adhezyjne. Jeden z dodatków zaliczany jest do grupy syntetycznych estrów (kompozycje z jego udziałem oznaczono Bio), drugi jest kopolimerem etylenu i propylenu (kompozycje z jego udziałem oznaczono Van). Do badań przygotowano próbki smarów zawierających 3, 5 i 10% m/m dodatków adhezyjnych [L. 6].

Tak przyjęta metodyka badań pozwoliła na określenie wpływu rodzaju i ilości dodatków adhezyjnych na zmianę oddziaływań smaru z powierzchnią stalową i zmianę spistości wewnętrznej.

Dla celów porównawczych, według przyjętych metodyk, wykonano badania dla komercyjnych smarów określanych przez producenta, jako smary o podwyższonej adhezji do podłoża, różniące się klasą konsystencji.

## **METODYKA BADAŃ**

Do badania oddziaływań smaru z podłożem stalowym opracowano metodyki własne i na podstawie uzyskanych wyników oceniono ich informatywność.

### Pomiar siły rozrywania warstwy smaru

Do pomiaru siły pozwalającej na rozdzielenie dwóch powierzchni, pomiędzy którymi występuje smar plastyczny zastosowano maszynę wytrzymałościową typ 5582 amerykańskiej firmy Intron.

Stanowisko wyposażone było w głowice pomiarową o zakresie do 2 kN, ekstensometr oraz szczęki umożliwiające mocowanie elementu testowego. Na potrzeby eksperymentu zaprojektowano i wykonano tarcze stalowe o średnicy 10 cm (**Rys. 1**).



**Rys. 1. Tarcze testowe do badania siły rozrywania powierzchni pokrytych smarem**

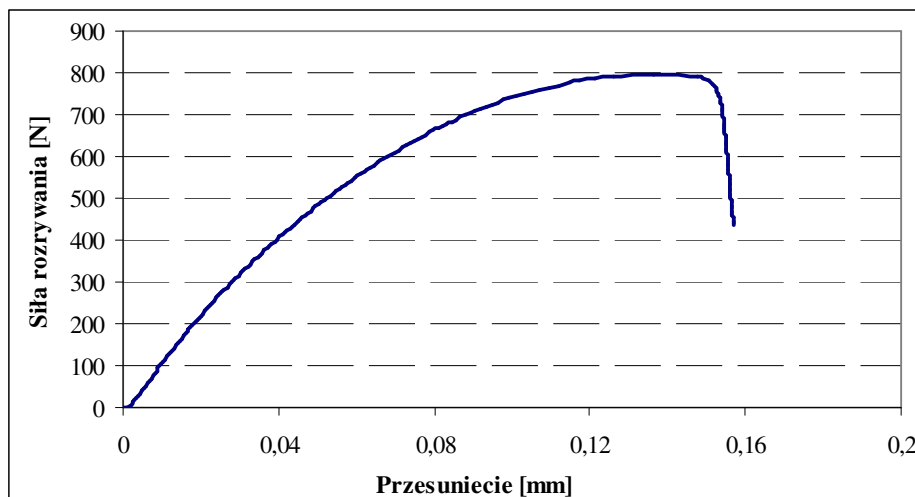
Fig. 1. Test disks used for investigation of the tear force of surfaces covered with grease

Na powierzchnię jednej tarczy nałożono smar i z liniowo narastającą siłą zbliżano do siebie obydwie powierzchnie aż do ustalenia stałej szczeliny (0,2 mm) pomiędzy powierzchniami, wyciśnięty nadmiar smaru usuwano mechanicznie. Przyjęcie takiej procedury badawczej pozwoliło na uzyskanie warstwy smaru o takiej samej grubości podczas każdego pomiaru, a tym samym wyeliminowanie błędów spowodowanych różnicowanymi oddziaływaniami wewnątrzcząsteczkowymi zdeteterminowanymi grubością warstwy smaru.

Pomiar polegał na rozsuwaniu tarcz ze stałą prędkością 0,033 mm/s aż do momentu rozerwania warstwy smaru, co obserwowano jako nagłe obniżenie wartości mierzonej siły rozciągania. Rozdzielenie złączonych powierzchni tarcz wymagało pokonania sił wiążących cząsteczki smaru z podłożem i oddziaływań międzycząsteczkowych występujących w warstwie smaru. W efekcie zmierzona została wartość siły potrzebnej do rozdzielenia powierzchni tarcz z warstwą smaru występującą jako odręb-

na faza. Na podstawie zarejestrowanych wyników badania wykreślany jest wykres przebiegu zmiany siły odrywania w funkcji przesunięcia badanych tarcz. Z otrzymanych wykresów odczytywana jest maksymalna wartość siły potrzebnej do oderwania połączonych smarem tarcz badawczych.

Przykładowy przebieg zmiany siły rozrywania w funkcji przesunięcia przedstawiono na **Rys. 2**.

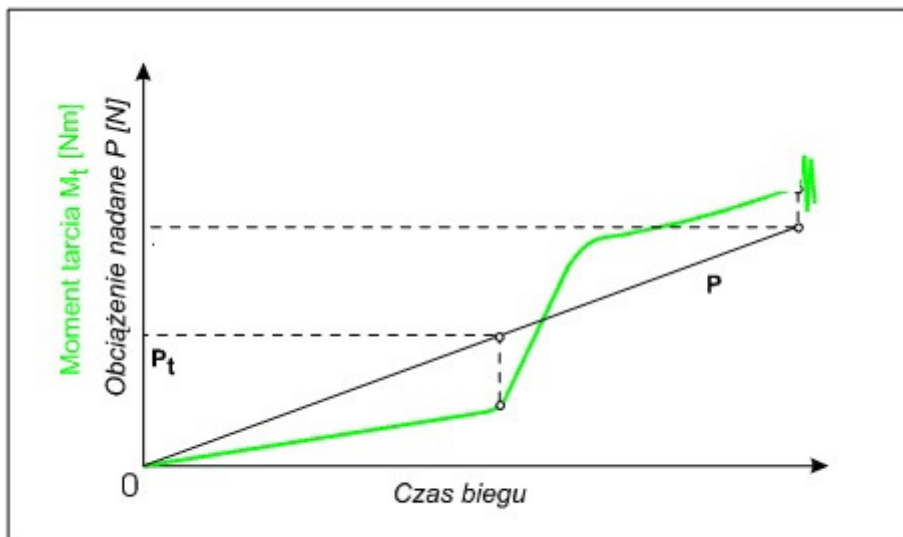


**Rys. 2.** Przebieg zmiany siły rozrywania w funkcji przesunięcia

Fig. 2. Changes of tear force as a function of displacement

### **Badanie oddziaływań smaru z podłożem metodą pomiaru trwałości filmu smarowego**

Badanie prowadzono z wykorzystaniem zmodyfikowanego aparatu czterokulowego umożliwiającego badania przy liniowo narastającym obciążeniu [L. 8–10]. Jako parametr kryterialny wybrano wartości obciążenia zacierającego ( $P_t$ ) odpowiadającego krytycznemu obciążeniu, przy którym dochodzi do przerwania filmu smarowego i inicjacji zacierania. Wartość  $P_t$  odzwierciedla zdolność filmu smarowego do przenoszenia obciążeń i jest pochodną oddziaływań środka smarowego z powierzchnią węzła tarcia [L. 4, 6]. Przykładowy przebieg momentu tarcia przedstawiono na **Rys. 3**.



**Rys. 3. Przebieg momentu tarcia przy liniowo narastającym obciążeniu**

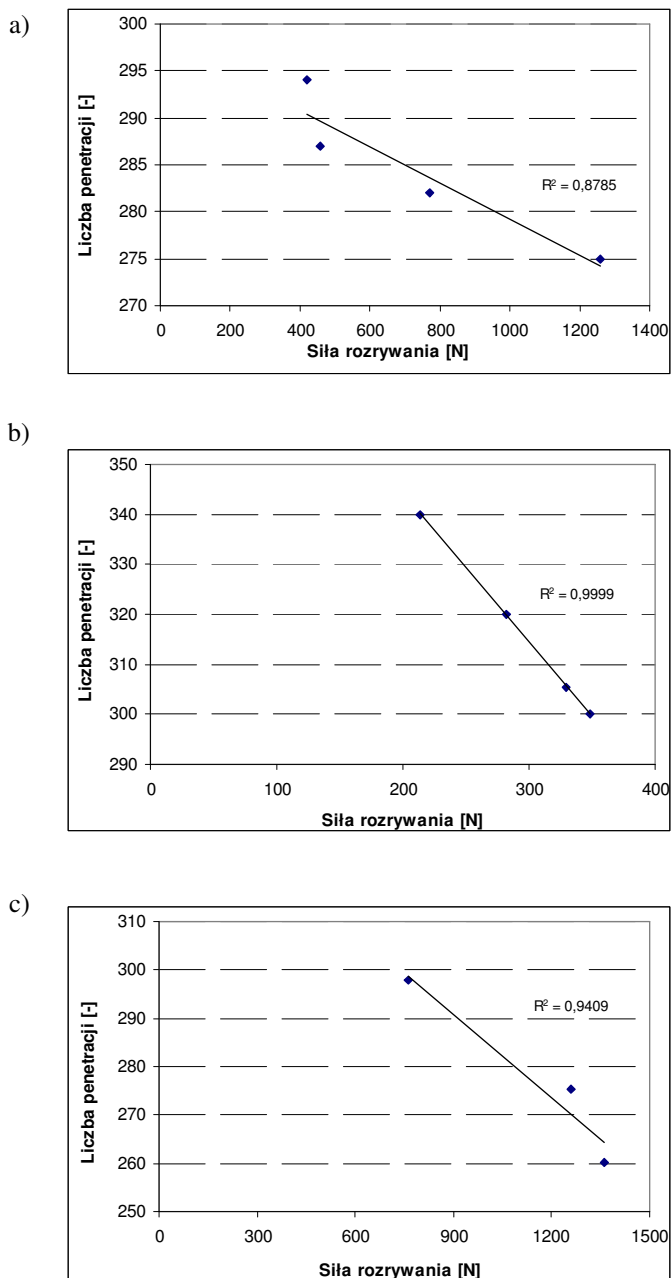
Fig. 3. Changes of the friction torque under linear-increasing load

### Badanie spójności wewnętrznej metodą penetracji

Do oceny spójności wewnętrznej struktury smaru zastosowano pomiar penetracji. Badanie wykonano z zastosowaniem opracowanego i wytworzonego w Instytucie Technologii Eksploatacji – PIB w Radomiu penetrometru laserowego [L. 11] Pomiar przeprowadzono zgodnie ze znormalizowanymi wymaganiami i polegał on na określeniu głębokości zanurzenia w smarze stożka o ściśle znormalizowanym kształcie i masie, w czasie pięciu sekund pod działaniem siły ciężkości [L. 12].

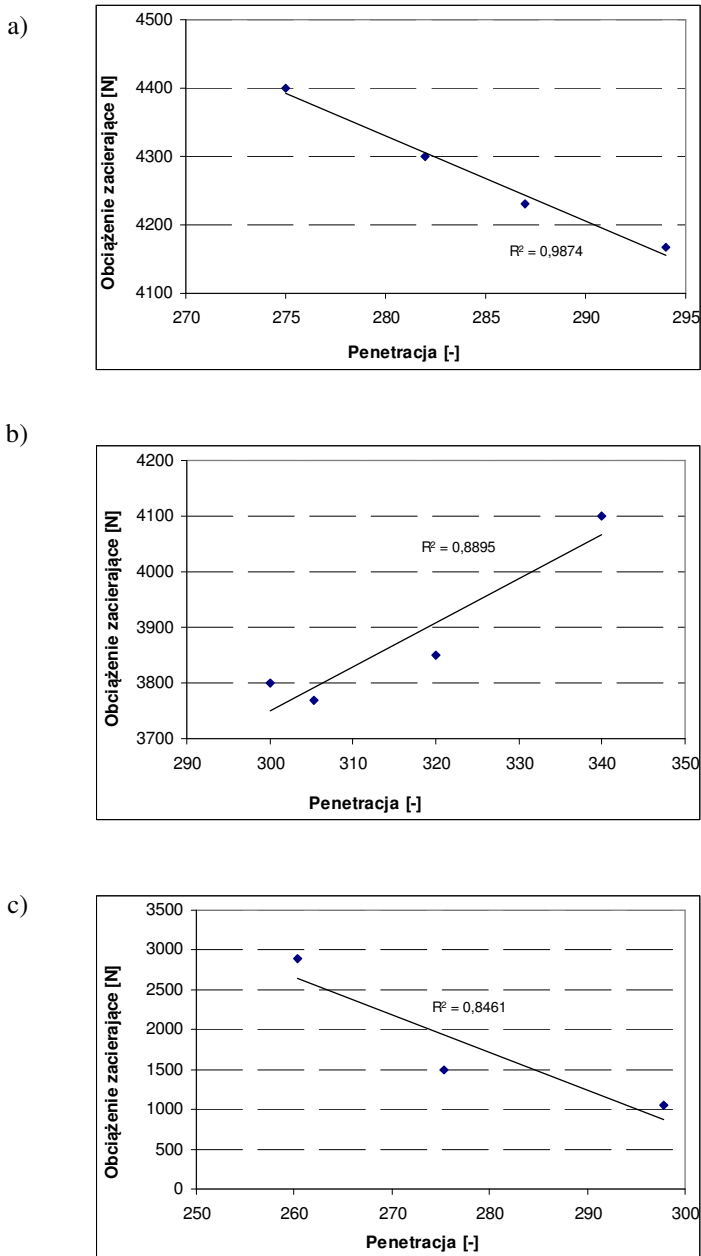
### WYNIKI BADAŃ

Przydatność wytypowanych metodyk badawczych w zakresie badania spójności wewnętrznej oraz oddziaływań smaru z podłożem oceniono, wykonując badania dla próbek smarów zawierających wzrastającą zawartość dodatków adhezyjnych. Wyniki pomiaru spójności wewnętrznej smaru, określonej wartością penetracji w funkcji siły rozrywania warstwy smaru przedstawiono na **Rys. 4**. Dla celów porównawczych zamieszczono również wyniki badań dla smarów komercyjnych o podwyższonej adhezji do podłoża i różnej klasie konsystencji.



**Rys. 4. Zależność siły rozrywania od penetracji dla smarów a) z dodatkiem Bio, b) z dodatkiem Van, c) komercyjnych**

Fig. 4. Dependence of tear force on the penetration for lubricants a) with the additive Bio, b) with the additive Van, c) commercial



**Rys. 5. Zależność obciążenia zacierającego od penetracji dla smarów: a) z dodatkiem Bio, b) z dodatkiem Van, c) komercyjnych**

Fig. 5. Dependence of scuffing load on the penetration for lubricants: a) with the additive Bio, b) with the additive Van, c) commercial

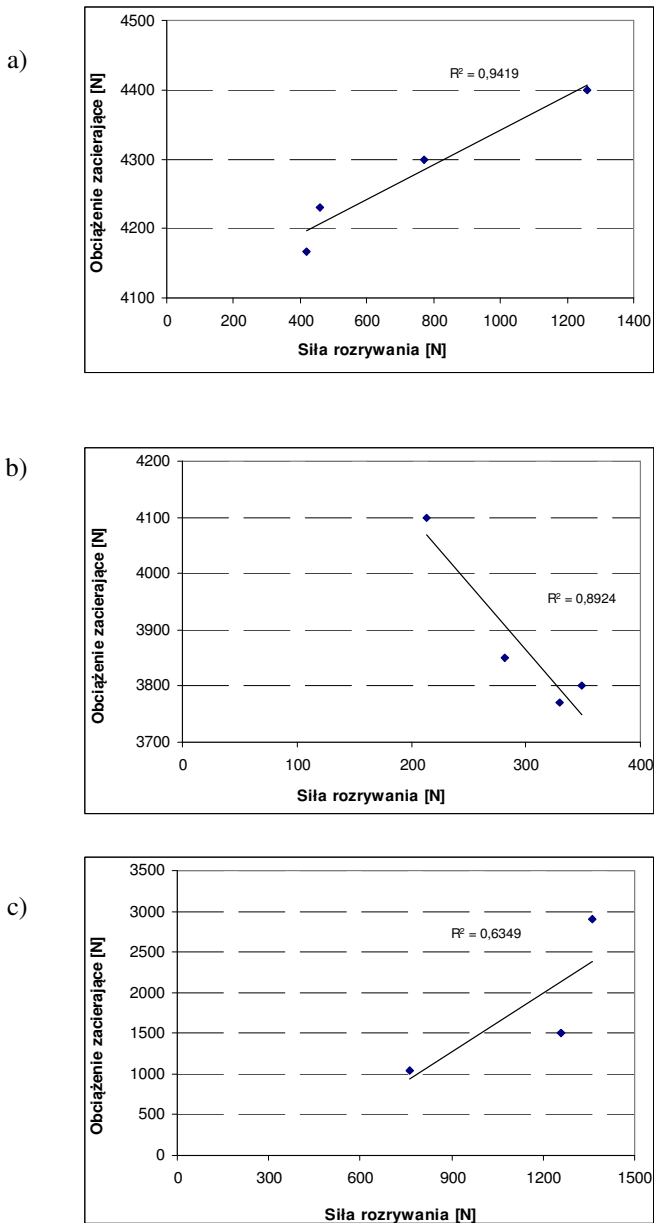


Analiza zależności pomiędzy siłą rozrywania warstwy smaru a wartością penetracji dla smarów o wzrastającej zawartości dodatków adhezyjnych wykazała występowanie liniowej korelacji pomiędzy badanymi parametrami. Wysoki współczynnik dopasowania liniowego ( $R^2$ ) pozwala na stwierdzenie, że wzrost oddziaływań kohezyjnych w strukturze smaru, przejawiających się zmniejszaniem się wartości penetracji, skutkuje wzrostem siły rozrywania (**Rys. 3**). Również zależność obciążenia zacierającego od penetracji charakteryzuje się wysokim współczynnikiem  $R^2$  (**Rys. 5**), co potwierdza istnienie zależności pomiędzy trwałością filmu smarowego a wartością oddziaływań kohezyjnych charakterystycznych dla badanej grupy smarów.

W przypadku smarów zawierających dodatek Bio i dla smarów komercyjnych stwierdzono wzrost trwałości warstwy smarowej ze wzrostem oddziaływań kohezyjnych występujących w strukturze smaru (**Rys. 5a i 5c**). Natomiast w smarach zawierających dodatek Van wzrost sił kohezji nie jest dostatecznym warunkiem wzrostu trwałości tworzonej warstwy smarowej, (**Rys. 4b**), co pozwala na stwierdzenie, że wysoka wartość obciążenia zacierającego jest w tym przypadku wynikiem oddziaływań adhezyjnych smaru z powierzchnią skojarzenia trącego.

Przedstawiona na **Rys. 5** zależność pomiędzy wartością obciążenia zacierającego i siły rozrywania wykazała istnienie korelacji liniowej o wysokim współczynniku dopasowania dla smarów z dodatkiem Bio i Wan (**Rys. 5a, b**), natomiast dla smarów komercyjnych o podwyższonej adhezji siła rozrywania warstwy smaru występującej pomiędzy testowymi tarczami jest w mniejszym stopniu skorelowana z obciążeniem zacierającym (**Rys. 5c**).

Wzrastające stężenie dodatku Van powoduje wzrost siły rozrywania przy zmniejszającej się wartości obciążenia zacierającego (**Rys. 6b**). Natomiast dla smarów komercyjnych i smarów z dodatkiem Bio wzrostowi siły rozrywania towarzyszy wzrost trwałości tworzonego w warunkach zacierania filmu smarowego określonego wartością obciążenia zacierającego.



**Rys. 6. Zależność obciążenia zacierającego od siły rozrywania dla smarów: a) z dodatkiem Bio, b) z dodatkiem Van, c) komercyjnych**

Fig. 6. Dependence of scuffing load on the tear force for lubricants: a) with the additive Bio, b) with the additive Van, c) commercial

## POSUMOWANIE

1. Wysoki współczynnik korelacji pomiędzy badanymi parametrami pozwala na stwierdzenie, że zastosowane metodyki badawcze polegające na pomiarze siły rozrywania warstwy smaru, trwałości filmu smarowego i spójności wewnętrznej pozwalają skutecznie rozróżnić próbki smarów plastycznych pod względem ich oddziaływań z podłożem stalowym.
2. Stwierdzono wysoką zależność liniową pomiędzy parametrami fizykochemicznymi, które wykorzystano do opisu spójności wewnętrznej smaru oraz ich oddziaływania z podłożem stalowym.

*Praca naukowa wykonana w ramach realizacji Programu Strategicznego pn. „Innowacyjne systemy wspomagania technicznego zrównoważonego rozwoju gospodarki w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka”.*

## LITERATURA

1. Żenkiewicz M. Adhezja i modyfikowanie warstwy wierzchniej. WNT, Warszawa 2000.
2. Hebda M.: Procesy tarcia, smarowania i zużywania maszyn. ITeE – PIB, Warszawa – Radom 2007.
3. Czarny R.: Smary plastyczne. WNT, Warszawa 2004.
4. Drabik J., Pawelec E., Janecki J.: Environmentally-friendly ecological greases. Tribologia, 2004, 6, s. 53–60.
5. Zheleznyi L.V., Bogaichuk A.V., Kobylanskii E.V., Mishchuk O.A.: Antiwear properties of high-temperature greases. Chemistry and Technology of Fuels and Oils, 2007, 43, 6, p. 488–494.
6. Materiały ofertowe firmy C.H. Erbslöh KG.
7. Płaza S., Margielewski L., Celichowski G.: Wstęp do tribologii i tribochemia. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 2005.
8. Szczerek M., Tuszyński W.: Badania tribologiczne. Zacieranie. ITeE – PIB, Radom 2000.
9. Szczerek M., Tuszyński W.: A Method for Testing Lubricants under Conditions of Scuffing. Part I. Presentation of the Method. Tribotest journal 2002, 8–4, June, p. 273–284.
10. Piekoszewski W., Szczerek M., Tuszyński W.: A Method for Testing Lubricants under Conditions of Scuffing. Part II. The Anti-Seizure Action of Lubricating Oils. Tribotest journal 2002, 9–1, September, p. 35–48.

11. Molenda J., Samborski T., Wojutyński J.: Penetrometry do badania właściwości reologicznych smarów plastycznych. *Problemy Eksploatacji*, 2003, 3, p. 11–125.
12. Norma PN-C-04133: 1988, Pomiar penetracji smarów plastycznych i petrolatum penetrometrem ze stożkiem.
13. Biernacki K., Filipiak J.: Doświadczalne potwierdzenie istnienia warstwy przyściennej w smarach plastycznych, *Tribologia*, 2004, 1, s. 31–44.
14. Kusiak Cz.: Adhezja metali i tarcie ślizgowe. *Tribologia*, 2007, 2, s. 391–398.
15. Kusiak Cz.: Pomiar składowej stycznej i normalnej siły oddziaływania między powierzchniami w procesie tarcia z uwzględnieniem adhezji. *Tribologia*, 2005, 3, s. 147–153.

**Recenzent:**

**Ryszard CZARNY**

## Summary

**The aim of this study was the selection of research methods and the evaluation of the suitability of the results of the investigation of interactions between a designed lubricant and the working surfaces of tribosystem steel elements. The research indicated that measuring tear forces, penetration and scuffing load could be used to evaluate these interactions, because there is a linear relationship between these parameters. The obtained results show that the research method can be used for comparative evaluation of grease adhesion to the surface.**