

**Krzysztof LIGIER\***, **Jerzy NAPIÓRKOWSKI\***

**ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI ZUŻYCIOWYCH  
DWUSKŁADNIKOWYCH POWŁOK  
EPOKSYDOWYCH Z WYPEŁNIENIEM  
CERAMICZNYM W WARUNKACH ZUŻYWANIA  
HYDROŚCIERNEGO**

**ANALYSIS OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES  
OF TWO-COMPONENT, CERAMIC FILLED EPOXY  
LAYERS UNDER HYDRO-ABRASIVE WEAR CONDITIONS**

**Słowa kluczowe:**

zużycie hydrościerne, powłoki epoksydowe, metoda ball-cratering

**Key words:**

hydro-abrasive wear, epoxy layers, ball-cratering method

**Streszczenie**

W pracy dokonano analizy procesów zużyciowych materiałów epoksydowych z wypełnieniem ceramicznym stosowanych w procesie regeneracji elementów pomp. Badania prowadzono za pomocą metody ball-cratering w oparciu o nor-

---

\* Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Katedra Budowy Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, Polska, e-mail: klig@uwm.edu.pl, napj@uwm.edu.pl.

mę PN-EN 1071-6: 2007. Ocenie poddano materiały epoksydowe z wypełnieniem ceramicznym o podwyższonej odporności na ścieranie. Materiałem porównawczym było żeliwo EN-GJL-250 stosowane do wytwarzania elementów pomp do cieczy zanieczyszczonych. Wyznaczono przebieg zużywania badanych materiałów w funkcji drogi tarcia. Wykazano, że badane powłoki charakteryzują się mniejszą intensywnością zużywania w porównaniu z materiałem oryginalnym.

## WPROWADZENIE

Do przetłaczania cieczy zanieczyszczonych stosuje się powszechnie wirowe pompy odśrodkowe. Zazwyczaj w medium roboczym występują znaczne ilości zanieczyszczeń mineralnych. Ich obecność wynika z nieszczelności pomiędzy wirnikiem a korpusem pompy. W toku eksploatacji pomp intensywnemu zużyciu podlegają przede wszystkim uszczelnienia zewnętrzne i wewnętrzne, podzespół odciążenia, łożyskowanie i elementy przepływowe. Przebieg procesu zużywania uzależniony jest od rodzaju tworzywa konstrukcyjnego, stopnia zanieczyszczenia medium oraz prędkości przepływu cieczy [L. 1–3]. Odtworzenie stanu zdadności elementów odbywa się najczęściej poprzez regenerację materiałami epoksydowymi z wypełnieniem ceramicznym [L. 4, 5]. Materiały te charakteryzują się zróżnicowanymi właściwościami i są ciągle udoskonalane w aspekcie wytrzymałościowym i zużyciowym [L. 5–8]. W żadnej z dostępnych prac nie stwierdzono badań z zakresu analizy właściwości zużyciowych materiałów epoksydowych w warunkach zużywania hydrościernego.

Celem pracy jest analiza właściwości zużyciowych powłok na bazie materiałów epoksydowych z wypełnieniem ceramicznym stosowanych w regeneracji elementów przepływowych pomp odśrodkowych.

## MATERIAŁY DO BADAŃ

Badaniom poddano powłoki uzyskane poprzez nałożenie dwuskładnikowych powłok epoksydowych z wypełnieniem ceramicznym na materiały wirników pomp wirowych odśrodkowych (Tab. 1). Zastosowano dwie technologie nałożenia powłok – ręcznie z wykorzystaniem pędzla oraz natryskowo za pomocą pistoletu. Średnia grubość powłok nakładanych ręcznie wynosiła ok. 0,7 mm, a powłoki nakładanej natryskowo ok. 0,3 mm. Wirniki pomp odśrodkowych wykonano z żeliwa EN-GJL-250 zgodnego z PN-EN-1561:2000. Próbkę porównawczą wykonano z materiału pobranego z dwóch różnych wirników, oznaczając je W4 i W5.

**Tabela 1. Charakterystyka dwuskładnikowych powłok epoksydowych**

Table 1. Characteristic of two-component epoxy layers

| Oznaczenie próbki       | W1   | W2  | W3  |
|-------------------------|--|---|---|
| Nazwa                   | Loctite z napełniaczem SiC   | Loctite z napełniaczem Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | Loctite z napełniaczem włókien SiC  |
| Rodzaj powłoki          | epoksydowa z napełniaczem ceramicznym w postaci węgla krzemu SiC     | epoksydowa z napełniaczem ceramicznym w postaci tlenku aluminium Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | epoksydowa o wysokim połysku wzmocniana włóknami ceramicznymi w postaci węgla krzemu SiC      |
| Przeznaczenie powłoki   | powłoka odporna na kawitację i ścieranie oraz redukująca turbulencję | powłoka odporna na ścieranie  | powłoka niskotarciowa odporna na oddziaływanie korozyjne i ścierające, redukująca turbulencję |
| Technologia naniesienia | ręcznie pędzlem, czas utwardzania 24 h w temp. 20°C,                 | ręcznie pędzlem, czas utwardzania 24 h w temp. 20°C,  | natryskowo, czas utwardzania 24 h w temp. 20°C,   |

## METODYKA BADAŃ

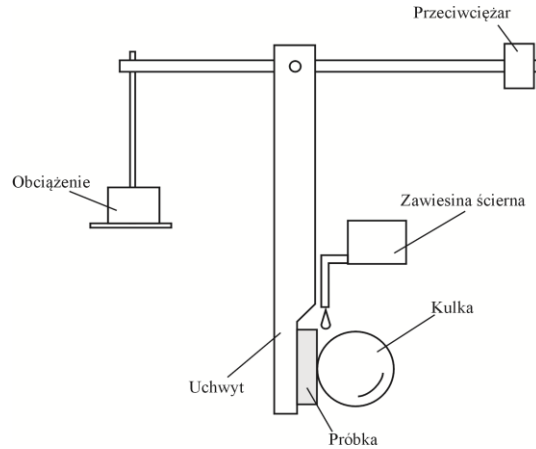
Badania zużycia przeprowadzono na stanowisku tribologicznym T-20 (**Rys. 1**) przeznaczonym do oceny odporności na zużycie materiałów konstrukcyjnych i powłok w warunkach zużywania ściernego z wykorzystaniem metody ball-cratering [**L. 9–11**].

Jako materiału ściernego użyto wodnej zawiesiny frakcji pylistej gliny ilastej o grubości ziarna poniżej 0,1 mm. Zawiesinę sporządzono z 300 g pyłu oraz 500 g wody destylowanej. Zawiesinę w czasie badań mieszano za pomocą mieszadła magnetycznego i podawano do węzła tarcia za pomocą pompy perystaltycznej w ilości 15 cm<sup>3</sup>/min.

Próby zużywania pary tribologicznej w skojarzeniu kulka/tarcza przeprowadzono w następujących warunkach:

- obciążenie styku 0,5 N;
- średnica kulki 25,4 mm;
- prędkość obrotowa kulki 350 obr./min
- prędkość poślizgu 0,15 m/s;
- droga tarcia 200 m, 400 m, 600 m, 800 m.

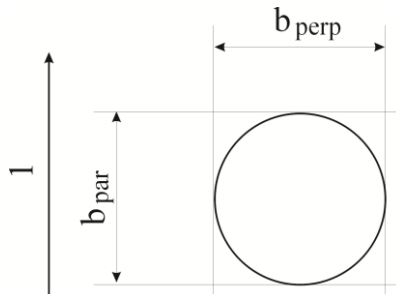
Badano próbki o kształcie prostopadłościanu o wymiarach 25 × 30 × 6 mm. Próbki wycinano z elementów przepływowych za pomocą strumienia wody, unikając w ten sposób wpływu temperatury na strukturę.



**Rys. 1. Schemat stanowiska tribologicznego do badania odporności na zużycie metodą ball-cratering**

Fig. 1. Scheme of tribological test-stand for ball-cratering investigation of wear resistance

Jako przeciwpróbkę zastosowano kulkę o średnicy 25,4 mm (1") wykonaną ze stali 100Cr6 o składzie chemicznym: 0,95 – 1,1 % C, 0,25 – 0,45 Mn, 0,15 – 0,35 Si, 1,3 – 1,35 Cr. Twardość przeciwpróбки wynosiła 60 HRC, a chropowatość określona parametrem  $R_a$  wynosiła 0,32  $\mu\text{m}$ . Pomiarów średnicy krateru oraz objętości zużytego materiału dokonywano w kierunkach równoległym i prostopadłym do kierunku obrotów kulki (**Rys. 2**), za pomocą mikroskopu o dokładności 0,001 mm. Do obliczeń intensywności zużywania wykorzystano wartość średnią średnicy krateru obliczoną na podstawie zmierzonych wartości. Do oceny wskaźnika intensywności zużycia ściernego wykonywano biegi badawcze o długości drogi tarcia równej 200, 400, 600 i 800 m. Biegi badawcze powtarzano do uzyskania trzech powtarzalnych wyników. Do obliczenia wskaźnika intensywności zużycia wykorzystano krater, których różnica wymiarów  $b_{perp}$  i  $b_{par}$  nie przekraczała 10% (PN-EN 1071-6:2007).



**Rys. 2. Pomiar średnicy krateru bez perforacji powłoki: 1 – kierunek obrotów kulki**

Fig. 2. Crater diameter measurement with no layer perforation: 1 – direction of ball rotation

Badania prowadzono bez perforacji powłoki. Objętość zużycia obliczono ze wzoru:

$$V = \pi \frac{b^2}{64R} \quad (1)$$

dla  $h \ll R$ , gdzie  $R$  jest promieniem kuli,  $b$  średnicą krateru, a  $h$  głębokością krateru. Równanie zużycia Archarda wiąże objętość zużycia  $V$  z obciążeniem normalnym  $N$  i drogą poślizgu  $S$  w sposób następujący:

$$V = K_c SN \quad (2)$$

gdzie:

- $K_c$  – intensywność zużycia ściernego powłoki,
- $S$  – droga poślizgu,
- $N$  – obciążenie normalne.

Stąd:

$$K_c = \pi \frac{b^4}{64RSN} \quad (3)$$

Pomiaru twardości dokonano twardościomierzem Vickersa w zakresie HV 0,3 zgodnie z normą PN-EN ISO 6507-1:1999, czas obciążenia wgłębnika 10 s.

Skład chemiczny żeliwa wyznaczono metodą spektroskopową za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego JEOL typu JSM 5310LV funkcjonującego w układzie cyfrowym. Mikroskop wyposażono w detektor elektronów odbitych, detektor elektronów wtórnych i spektrometr rentgenowski typu EDS Ultra DR7 ThermoScientific. Badanie składu chemicznego prowadzono dla czterech punktów na powierzchni próbki. Strukturę badanych powłok epoksydowych oceniano za pomocą mikroskopu Neophot 32.

## ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Wyniki uzyskane z badań składu chemicznego żeliwa, twardości badanych materiałów oraz badań mikroskopowych powierzchni powłok przedstawiono odpowiednio w **Tabelach 2, 3 i 4**.

Przykładowe kratery powstałe w wyniku badań intensywności zużycia przedstawiono na **Rysunku 3**.

Zestawienie średniego wskaźnika intensywności zużywania obliczonego z trzech powtarzanych biegów badawczych dla drogi tarcia 200, 400, 600 i 800 m przedstawiono na **Rys. 4÷7**.

**Tabela 2. Skład chemiczny materiałów porównawczych**

Table 2. Chemical composition of comparative materials

| Oznaczenie próbki | Punkt pomiarowy | C [%] | Si [%] | Mn [%] | Fe [%] |
|-------------------|-----------------|-------|--------|--------|--------|
| <b>W4</b>         | 1               | 3,43  | 2,40   | 0,62   | 93,55  |
|                   | 2               | 2,54  | 2,29   | 0,68   | 94,49  |
|                   | 3               | 2,52  | 3,02   | 0,56   | 93,9   |
|                   | 4               | 2,64  | 2,94   | 0,78   | 93,64  |
|                   | Średnia         | 2,78  | 2,66   | 0,66   | 93,9   |
| <b>W5</b>         | 1               | 2,81  | 1,89   | 1,1    | 94,20  |
|                   | 2               | 3,18  | 2,73   | 1,26   | 92,83  |
|                   | 3               | 3,36  | 2,56   | 1,19   | 92,89  |
|                   | 4               | 3,22  | 2,38   | 1,34   | 93,06  |
|                   | Średnia         | 3,14  | 2,39   | 1,22   | 93,25  |

**Tabela 3. Wyniki pomiarów twardości warstw wierzchnich**

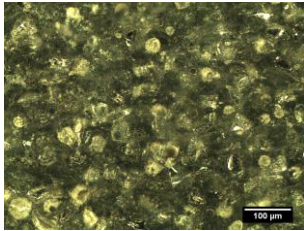
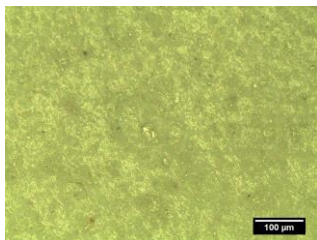
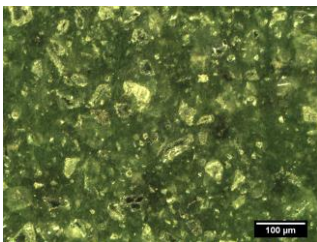
Table 3. Hardness measurement results of surface layers

| Numer próbki | HV 0,3  |                 |
|--------------|---------|-----------------|
|              | Średnia | Rozrzut         |
| W1           | 25,01   | 18,49 ÷ 27,79   |
| W2           | 17,59   | 14,27 ÷ 21,01   |
| W3           | 24,09   | 23,16 ÷ 24,56   |
| W4           | 395,50  | 322,40 ÷ 477,50 |
| W5           | 435,87  | 425,65 ÷ 443,74 |

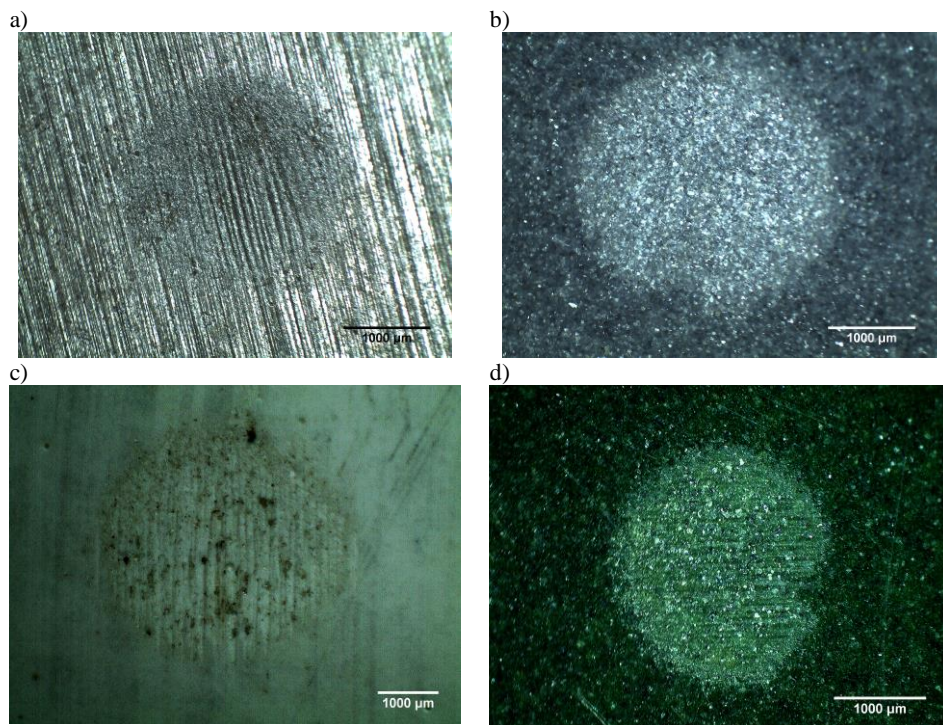
Przebieg zmian wskaźnika zużycia wskazuje, że warstwy uzyskane poprzez nałożenie powłok epoksydowych z wypełnieniem ceramicznym wykazują się intensywnością zużywania mniejszą w stosunku do materiałów oryginalnych. Wraz ze wzrostem długości drogi tarcia następuje zwiększenie różnic pomiędzy uzyskiwanymi wartościami zużycia. Najniższym zużyciem charakteryzowała się warstwa W2, dla której wielkość ziaren napelnienia była najmniejsza. Jednocześnie warstwa ta charakteryzowała się najmniejszą średnią twardością. Warstwa uzyskana poprzez nakładanie ręczne ma zbliżoną twardość jak poprzez natryskiwanie, jednak w tym drugim przypadku charakteryzuje się ona mniejszym rozrzutem twardości na powierzchni.

**Tabela 4. Mikroskopowy obraz powierzchni badanych powłok epoksydowych**

Table 4. Microscopic image of the surface of tested epoxy layers

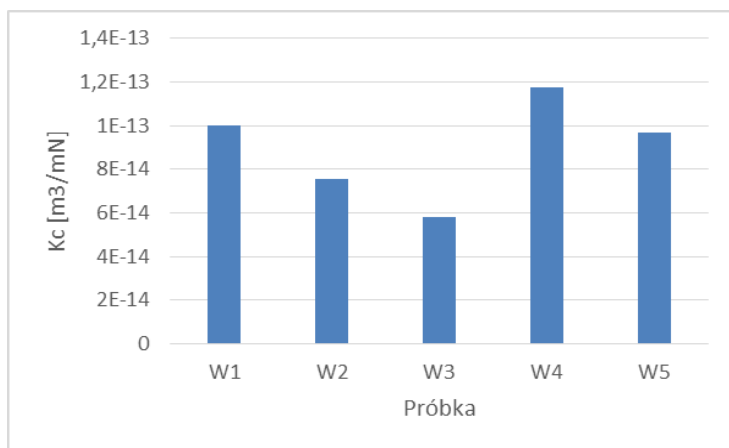
| Oznaczenie próbki | Struktura  |  |
|-------------------|--|--|
| W1                |   | nieregularne kształty ziaren napelnienia składającego się z węglików krzemu, połączone żywicą epoksydową z utwardzaczem.     |
| W2                |   | gładka powłoka wytworzona z napelnienia i żywic. Napelnienie składa się z bardzo małych drobin tlenku aluminium.             |
| W3                |  | powłoka wytworzona z napelnienia ceramicznego w postaci włókien węgla krzemu i żywic wykorzystanych do połączenia materiału. |

Przebieg zmian wartości wskaźnika intensywności zużycia badanych materiałów w funkcji drogi tarcia przedstawiono na **Rys. 8**. Istotna jest, ze względu na kształtowanie się wartości zużycia, droga tarcia. Przy czym wraz ze wzrostem drogi tarcia nie występuje proporcjonalne zwiększenie intensywności zużycia. Dla drogi tarcia 200 i 400 m o intensywności zużycia decydują przede wszystkim właściwości powierzchniowe warstwy wierzchniej. Najniższym zużyciem charakteryzowała się powłoka niskotarciowa wzmocniana włóknami SiC. Wraz ze wzrostem drogi tarcia najlepszymi właściwościami przeciwzużyciowymi charakteryzują się powłoki grubsze nakładane ręcznie, szczególnie z napelnieniem w postaci  $Al_2O_3$ . Jej odporność na zużycie była większa o 40% w stosunku do powłok z napelnieniem w postaci cząstek SiC oraz o 55% w stosunku do powłoki z napelnieniem włóknami SiC. Średnia intensywność zużycia żeliwa wykorzystywanego w budowie pomp odśrodkowych była ponaddwukrotnie większa od najlepszej z badanych powłok.



**Rys. 3.** Przykładowe kraterki uzyskane w trakcie badań (droga tarcia 800 m): a) próbka W4, b) próbka W1, c) próbka W2, d) próbka W3

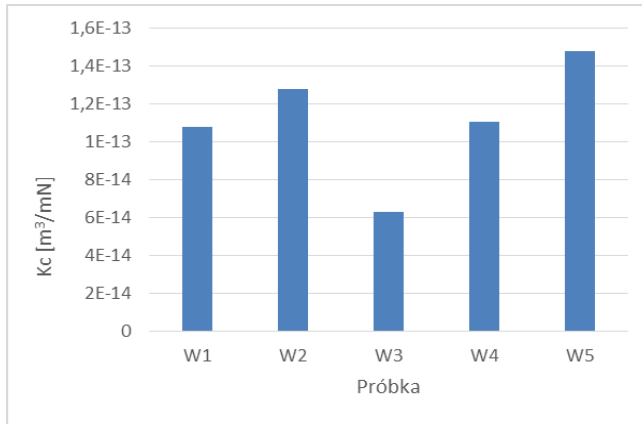
**Fig. 3.** Exemplary crater obtained during tests (wear distance 800 m): a) W4 sample, b) W1 sample, c) W2 sample, d) W3 sample



**Rys. 4.** Wskaźnik intensywności zużycia badanych materiałów po przebiegu 200 m

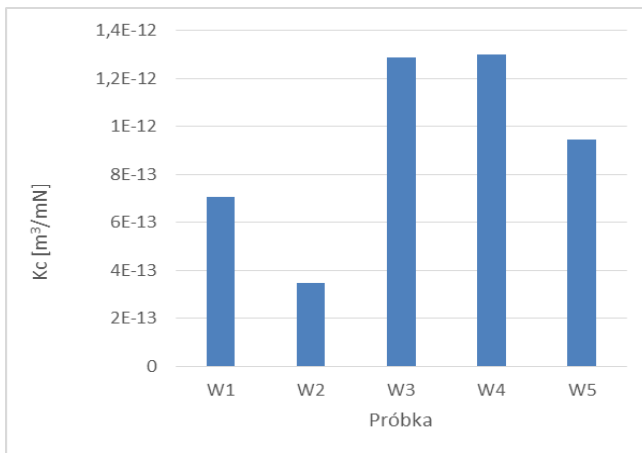
**Fig. 4.** Wear intensity coefficient of tested materials after 200 m of wear distance





**Rys. 5. Wskaźnik intensywności zużycia badanych materiałów po przebiegu 400 m**

Fig. 5. Wear intensity coefficient of tested materials after 400 m of wear distance

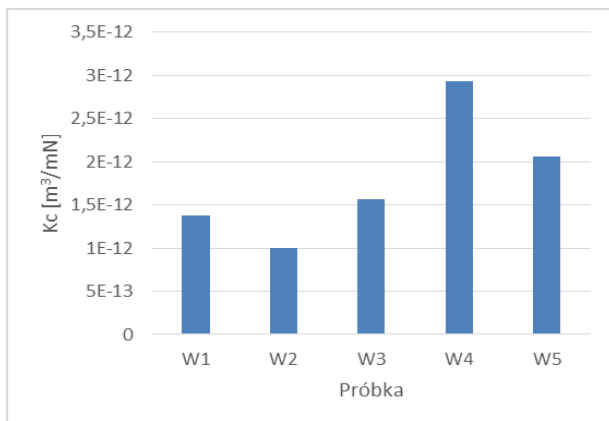


**Rys. 6. Wskaźnik intensywności zużycia badanych materiałów po przebiegu 600 m**

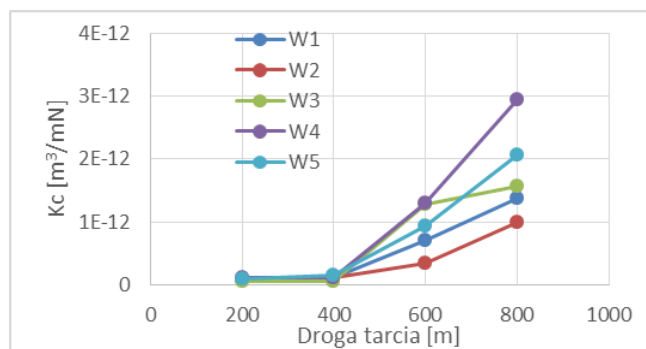
Fig. 6. Wear intensity coefficient of tested materials after 600 m of wear distance

Przebieg intensywności zużycia jest podobny dla większości badanych materiałów. W początkowej fazie intensywność zużycia jest niemal stała, dopiero po przebiegu 400 m następuje wyraźna zależność pomiędzy intensywnością zużycia a drogą tarcia. Ma to związek z nieznaczną powierzchnią styku na początku procesu zużycia, a co za tym idzie niewielkim oddziaływaniem zawiesiny ścierniej. W dalszym okresie, w miarę powiększania się krateru, oddziaływanie ścierniwa jest coraz większe i proces zużycia następuje instensywniej. W przypadku badanych powłok na przebiegu zużycia w początkowym okresie wpływ ma również współczynnik tarcia powłoki. Dla powłoki niskotarciowej (W3) uzyskano najniższą prędkość zużycia w począt-

kowym okresie tarcia. Po naruszeniu powierzchni powłoki nastąpił gwałtowny wzrost zużycia.



**Rys. 7. Wskaźnik intensywności zużycia badanych materiałów po przebiegu 800 m**  
Fig. 7. Wear intensity coefficient of tested materials after 800 m of wear distance



**Rys. 8. Zmiana wartości wskaźnika intensywności zużycia w zależności od drogi tarcia**  
Fig. 8. Wear intensity coefficient change in dependence of wear distance

## PODSUMOWANIE

Powłoki uzyskane poprzez nałożenie materiałów epoksydowych z napełnieniem ceramicznym charakteryzują się niższym zużyciem od żeliwa EN-GJL-250 stosowanego na wirniki pomp odśrodkowych.

W przebiegu procesu zużycia wyróżnić można dwa okresy:

- stałej intensywności zużycia wynikającej z niewielkiej powierzchni oddziaływania zawiesiny ścierniej,
- narastającej intensywności zużycia.

Na podstawie wyników uzyskanych w trakcie badań stwierdzono, że o zużyciu decyduje droga tarcia. W przypadku zużywania hydrościernego pomp odśrodkowych najlepsze odwzorowanie rzeczywistych parametrów eksploatacyjnych występuje dla drogi tarcia 800 m, gdyż dla tej drogi tarcia o przebiegu zużywania decydują nie tylko właściwości powłoki, ale również właściwości ścierniwa.

## LITERATURA

1. Fleming J.: Gains from material up-grades. World Pumps, November, 1994.
2. Jaroszewicz J., Kopciewski S.: Powłoki regeneracyjne jako sposób polepszenia charakterystyk eksploatacyjnych pomp wirowych. Przegląd Mechaniczny, Zeszyt 11/2002, s. 24–29.
3. Opiekun Z.A., Orłowicz A.W.: Hydrościernie zużycie łopatek wirników pomp pogłębiarek ssących. Tribologia: tarcie, zużycie, smarowanie, nr 1/2012, s. 109–118.
4. Kielbik K.: Modernizacja pomp przez zastosowanie powłok Belzona. Pompy-Pompownie nr 3/1996.
5. Jaroszewicz J., Kopciewski S.: Energooszczędna eksploatacja pomp wirowych, zwłaszcza w energetyce i ciepłownictwie. Przegląd Mechaniczny nr 7–8/2001, s. 13–20.
6. HAI Bin Yao, XIANG Zhang, WEN Ming You, YONG Sheng Li, LU Ming Mao: A Repair Technology of Anti-Cavitation and Anti-Abrasion on Water Pump Impeller. *Advanced Materials Research* (Volume 651), 2013, pp. 389–395.
7. XING Zhi, ZHOU Xin, LYU Zhen, ZHOU Yong: Effect of SiC Content on the Erosion and Wear Resistance of Epoxy/SiC Composite. *Journal of Materials Engineering* no 06/2013.
8. Rokita J.: Zmniejszenie energochłonności pomp jako rezultat zastosowania powłok regeneracyjnych, w świetle bilansu mocy pompy. Krajowe Forum Producentów i Użytkowników Pomp w Energetyce i Ciepłownictwie, Szczyrk, kwiecień 1997 (materiały konferencyjne).
9. Osuch-Słomka E., Słomka Z., Szczerek M.: Określanie intensywności zużycia powłok niskotarciowych metodą ball-cratering. Tribologia: tarcie, zużycie, smarowanie. 2009, vol. 224, s. 127–137.
10. Osuch-Słomka E.: Propozycja metodyki wyznaczania wartości parametrów testów dla metody ball-cratering. Tribologia. 2011, vol. 240, s. 161–171.
11. Osuch-Słomka E., Szczerek M.: Oznaczanie odporności na ścieranie powłok metodą ball-cratering Tribologia: tarcie, zużycie, smarowanie. Nr 6/2008, s. 113–126.

## Summary

**The paper presents the analysis of the abrasive wear of the selected materials used for the regeneration of the main elements of a centrifugal pump.**

**The wear abrasive study was conducted using the ball-cratering method based on the standard PN-EN 1071-6: 2007. Ceramic filled epoxy materials with high abrasion resistance were tested. The comparative materials were made of EN-GJL- 250 cast iron, which are applied to produce elements of pumps working in liquids containing mineral particles. The course of wear of the researched materials was investigated as a function of the wearing distance. The results indicated that the tested layers are characterized with a lower wear intensity compared to the original materials.**