

**Metody badań odporności materiałów na zużycie ściernie i erozyjne**M. Kućma ^a, J. Cwiek ^b^a Absolwentka Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Studenckie Koło Naukowe „Zaawansowanych Materiałów Inżynierskich”

email: martakucma@gmail.com

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Przetwórstwa Materiałów Metalowych i Polimerowych

email: janusz.cwiek@polsl.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono charakterystykę mechanizmów zużycia ściernego i erozyjnego materiałów oraz metody ich badania. Dodatkowo zamieszczono krótkie charakterystyki urządzeń będących na wyposażeniu wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej oraz przykładowe wyniki badań przeprowadzonych na tych urządzeniach.

Abstract: This paper presents the characteristics of abrasive wear and erosion mechanism of materials and methods of their study. Additionally this paper contains short descriptions of machines which are used on the Faculty of Mechanical Engineering and examples of research results.

Keywords: erosion test, wear resistance, pin-on-disc, ball-on-disc.

1. WSTĘP

Każdy eksploatowany przez człowieka przedmiot po pewnym czasie „zużywa się”. Niektóre materiały ulegają zużyciu szybciej, inne z kolei wolniej. Zależy to od ich własności (twardość), środowiska w jakim są stosowane (odporność na ścieranie) oraz warunków współpracy z innymi elementami (współczynnik tarcia). Nauką zajmującą się zagadnieniami związanymi z szeroko pojętym zużyciem jest inżynieria powierzchni. Współcześnie, w celu minimalizacji kosztów eksploatacji urządzeń i narzędzi, dąży się do uzyskiwania coraz to twardszych materiałów o większej odporności na ścieranie oraz do wytwarzania powłok o takich własnościach. Jednakże obserwuje się również inną tendencję, polegającą na takim doborze materiałów, aby żywotność produktów była ograniczona. Jest to działanie mające na celu zabezpieczenie wyłącznie interesów producenta i nazywa się „sztucznym postarzaniem produktów”.

2. CHARAKTERYSTYKA MECHANIZMÓW ŻYŻYCIA ŚCIERNEGO I EROZYJNEGO

Zużycie jest to stopniowa utrata materiału z warstwy wierzchniej ciała stałego. Spowodowane jest przez ruch tego ciała względem innego, będącego z nim w kontakcie. Podczas zużycia, w długim czasie, następuje stopniowe zmniejszanie się masy i zmiana wymiarów ciała stałego. Wyróżnia się następujące rodzaje zużycia [1,2]:

- trybologiczne:
 - ścierne, - zmęczeniowe, -z udziałem utleniania,
 - adhezyjne, - przez abrazję,
 - ścierno – adhezyjne, - wodorowe,
- nietrybologiczne:
 - erozyjne, - odkształceniowe, - ablacja.
 - kawitacyjne, - cieplne,
 - dyfuzyjne, - korozja,

Poniżej szczegółowo opisano mechanizm zużycia ściernego i erozyjnego materiałów, który bada się na wydziale Mechanicznym Technologicznym.

2.1. Zużycie ścierne

Zużycie ścierne następuje w przypadku, gdy współpracujące ze sobą elementy są wykonane z materiałów o dużej różnicy wartości twardości lub gdy w obszarach tarcia między nimi, występują luźne albo utwardzone cząstki ścierniwa lub wypukłości twardego materiału. Ubytek materiału podczas zużycia ściernego jest związany z następującymi procesami [2, 3]:

- mikroskrawaniem,
- bruzdowaniem,
- rysowaniem.

Na ten rodzaj zużycia narażone są przede wszystkim elementy robocze maszyn np. łożyska, koła zębate, hamulce i sprzęgła oraz urządzenia transportowe i narzędzia do kształtowania wyrobów ceramicznych [1].

2.2. Zużycie erozyjne

Erozja polega na stopniowej utracie materiału z warstwy wierzchniej, spowodowanej oddziaływaniem mechanicznym między powierzchnią ciała stałego a strumieniem cieczy, gazu albo cząstek stałych w cieczy lub gazie. Wyróżniamy dwa rodzaje erozji, w zależności od wielkości kąta padania cząstek na powierzchnię [1]:

- erozja ścierna – gdy kierunek ruchu cząstek tworzy mały kąt z powierzchnią, na ten rodzaj erozji szczególnie narażone są materiały miękkie,
- erozja udarowa – gdy kierunek padania cząstek jest zbliżony do prostopadłego, na ten rodzaj erozji narażone są materiały twarde.

Podczas erozji zachodzą następujące procesy [1]:

- mikroskrawanie,
- tworzenie bruzd, umocnienie odkształceniowe,
- zużycie zmęczeniowe,
- pękanie i wykruszanie materiałów kruchych,
- reakcje chemiczne i elektrochemiczne.

Szybkość erozji jest różna dla każdego rodzaju materiałów. I tak dla materiałów miękkich jest największa, gdy kąt padania strumienia cząstek wynosi 20-30° (głównym zużyciem jest wtedy erozja ścierna poprzez mikroskrawanie), natomiast dla materiałów twardych, gdy ten kąt wynosi 90° (dominującym zużyciem jest wykruszanie się materiału). Na zużycie erozyjne narażone są m.in.: urządzenia do transportu materiałów rozdrobnionych, pompy wody z odwiertów, rury [1].

3. PRZEGLĄD METOD BADAWCZYCH DO OCENY ODPORNOŚCI NA ZUŻYCIE ŚCIERNE I EROZYJNE.

Badania zużycia materiałów wykonuje się w warunkach laboratoryjnych lub eksploatacyjnych. Badania laboratoryjne dostarczają informacji o procesach fizycznych zachodzących podczas zużycia materiałów. Podczas takich badań powinno się dokonać pomiarów ilościowych siły i momentu tarcia oraz wartości zużycia i jego intensywności [4].

Pomiar siły i momentu tarcia

Pomiary ilościowe oporów tarcia można wykonać stosując różne metody [4]:

- rejestrację przy pomocy dynamometrów (siłomierzy), np. urządzenie Kuzniecowa. Próbkę umocowaną w ramieniu urządzenia, przemieszczając się działa na dynamometr. Ten z kolei równoważąc siłę tarcia wyznacza jej wartość.
- pomiar przy pomocy czujników: indukcyjnych, elektrycznych i piezoelektrycznych.

Ilościowe metody badania zużycia

Metody określenia ilościowego stopnia zniszczenia pozwalają na określenie odporności materiałów na zużycie trybologiczne. Literatura opisuje następujące metody pomiaru [4]:

- wagową, w której wyznacza się różnicę masy próbki przed i po procesie zużycia,
- profilografowania, która polega na porównaniu profilogramów powierzchni próbki przed i po badaniu,
- metryczną, w której wyznacza się różnicę wymiaru liniowego próbki przed i po próbie,
- sztucznych baz, polegającą na porównaniu wymiarów wgłębienia (o określonym kształcie i głębokości) na powierzchni próbki, przed i po procesie zużycia,
- pomiaru natężenia i ciśnienia płynów przepływających poprzez szczelinę między trącymi elementami,
- pneumatycznego pomiaru mikrometrycznego, przy użyciu mikrometru pneumatycznego,
- czujników indukcyjnych i zegarowych,
- dynamometrów puszgowych,
- pomiarów tensometrycznych, wykorzystującą odkształcenie belki tensometrycznej pod wpływem zużywania się pary trącej badana próbka – przeciwpróbka,
- przy pomocy izotopów promieniotwórczych, która polega na pomiarze aktywności promieniotwórczej znacznika, równomiernie rozłożonego w całej masie badanej próbki.

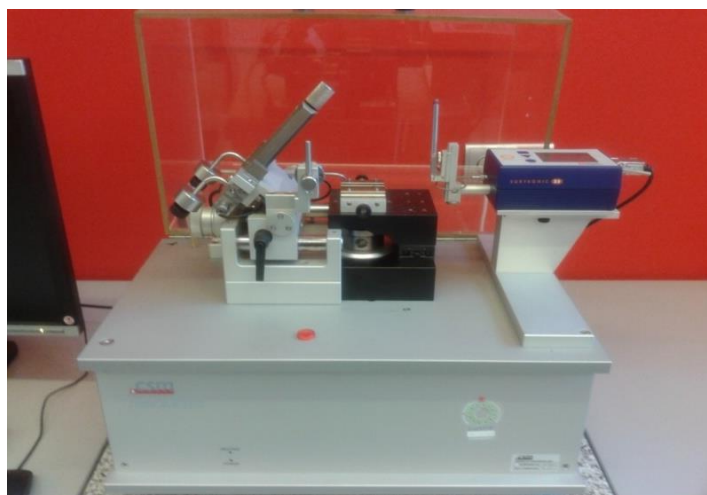
4. METODY BADAŃ ODPORNOŚCI MATERIAŁÓW NA ZUŻYCIE ŚCIERNE I EROZYJNE, STOSOWANE NA WYDZIALE MECHANICZNYM TECHNOLOGICZNYM POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Badanie odporności na zużycie ścierne metodą pin-on-disk/ball-on-disk/pin-on-plate, polega na pomiarze współczynnika tarcia oraz wielkości (objętości lub masy) zużycia materiału wyrażonej w mm^3 lub w mg. Trzpień (*pin* lub kula - *ball*) jest dociskany z siłą P do obracającej się z zadaną prędkością n tarczy, wykonanej z badanego materiału lub z naniesioną powłoką (w zależności od celu badań). W przypadku pin-on-plate trzpień (lub kula) jest dociskany do płytki wykonującej ruch posuwisto-zwrotny [5].

Amerykańska norma **ASTM G 99 – 95a** określa następujące warunki wykonania badania [5]:

- tarcza i trzpień są wykonane ze stali bądź Al_2O_3 ,
- trzpień jest dociskany do tarczy z określoną siłą, przy pomocy ramienia lub dźwigni,
- prędkość obrotowa tarczy oraz droga tarcia (ilość obrotów tarczy) są regulowane,
- pomiary zużycia powinny być wykonywane, w co najmniej w dwóch reprezentatywnych miejscach na powierzchni trzpienia i powierzchni dysku - ostateczne wyniki powinny zostać uśrednione,
- wyniki odporności na zużycie powinny być przedstawione jako: utrata objętości materiału wyrażona w mm^3 dla trzpienia i tarczy osobno lub przeliczona na utratę masy.

Na wyposażeniu Instytutu Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej, znajduje się tribometr firmy *CSM Instruments*, do badania odporności na zużycie ścierne metodami: pin-on-disc, ball-on-disc, pin-on-plate lub ball-on-plate (rys. 1).



Rysunek 1. Stanowisko do badań tribologicznych

Figure 1. Tribological test station

Zalety urządzenia [6]:

- dokładnie skalibrowane pomiary tarcia i zużycia,

- stabilny punkt kontaktowy,
- możliwość stosowania zmiennych rozmiarów i kształtów próbek,
- automatyczne wyłączanie (długość ścieżki / współczynnik tarcia),
- możliwość prowadzenia testów w cieczach i kontrolowana wilgotność,
- test zgodny z normą DIN 50324 i ASTM,
- oprogramowanie do akwizycji danych, kontrolowane w czasie rzeczywistym wyświetlanie danych graficznych, współczynników tarcia i zużycia itp.

Na wyposażeniu Katedry Spawalnictwa, wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej, znajdują się urządzenia do badania erozji spowodowanej cząstkami stałymi oraz zużycia ściernego metodą pin-on-disc i ball-on-disc.

Urządzenie T-01M służy do badania właściwości trybologicznych materiałów używanych na ślizgowe elementy maszyn (rys. 2) [7].



Rysunek 2. Stanowisko do badania właściwości tribologicznych materiałów, metodą pin-on-disc lub ball-on-disc

Figure 2. Pin-on-disc and Ball-on-disc test station

Urządzenie T-10 (rys. 3) przeznaczone jest do badania właściwości tribologicznych materiałów używanych na ślizgowe elementy maszyn, przede wszystkim cienkich powłok, metodą ball-on-disc. W trakcie badań wykonywanych na ww. urządzeniach, rejestrowane są następujące parametry [7]:

- siła tarcia,
- sumaryczne zużycie liniowe elementów węzłów tarcia,
- temperatura otoczenia węzła tarcia,
- prędkość obrotowa,
- czas i liczba obrotów tarczy (droga tarcia).



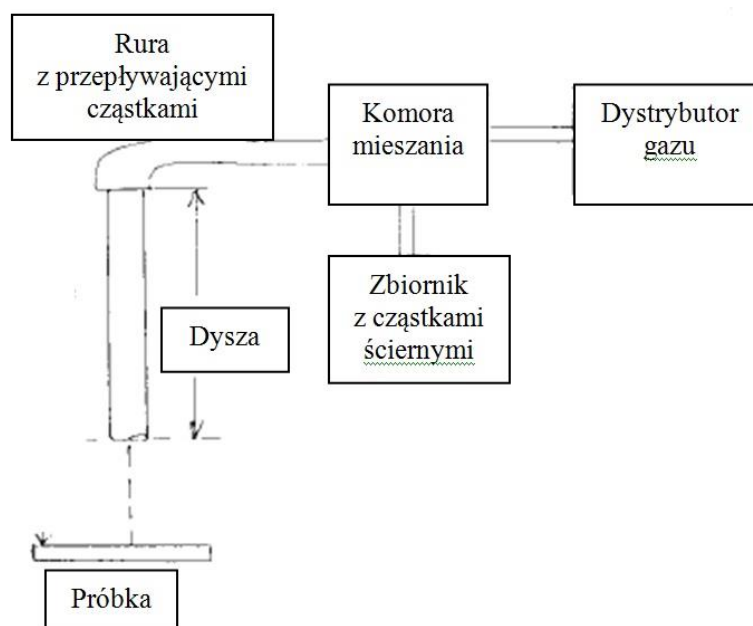
Rysunek 3. Stanowisko do badania właściwości tribologicznych materiałów, metodą ball-on-disc

Figure 3. Ball-on-disc test station

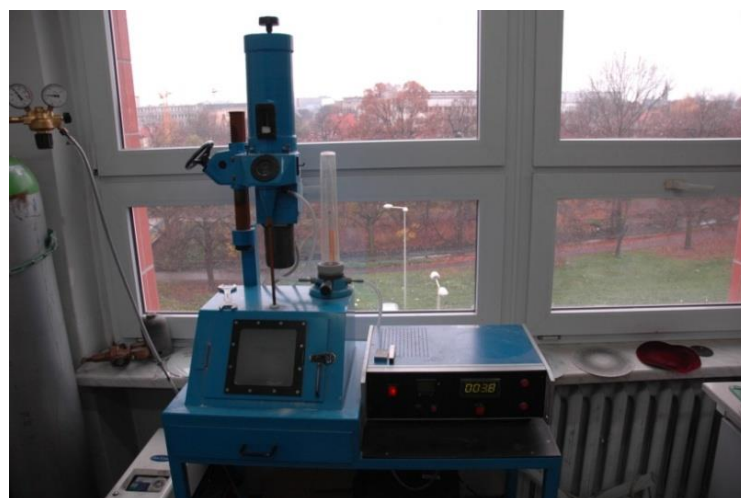
Urządzenie do badania zużycia erozyjnego powodowanego cząstkami stałymi (rys. 4 i 5), składa się z dystrybutora gazu, podajnika proszku, komory mieszania cząstek (ścierniwa) z przepływającym gazem oraz dyszy, która kieruje ścierniwo na badany materiał. Prędkość cząstek stałych jest regulowana prędkością przepływu gazu. Metoda ta może być stosowana dla szerokiego zakresu rozmiarów próbek [8].

Amerykańska norma **ASTM G 76 – 02** określa następujące warunki wykonania badania [8]:

- materiałem referencyjnym jest stal 1020 (oznaczenie według AISI) o średnim składzie chemicznym $C = 0.20 \pm 0.01\%$, $Mn = 0.45 \pm 0.10\%$, $Si = 0.1 \pm 0.05\%$, $S_{max} = 0.03 \pm 0.01\%$, $P_{max} = 0.01 \pm 0.01\%$ i twardości 70 ± 2 HRB,
- cząstki ściernie są wykonane z Al_2O_3 , mają rozmiar $50 \mu m$ i powinny być użyte tylko raz,
- posuw cząstek w podajniku wynosi $2 \pm 0,5$ g/min,
- prędkość padających cząstek wynosi 30 ± 2 m/s przy prędkości gazu 8 l/min,
- kąt między wylotem dyszy a próbką wynosi $90 \pm 2^\circ$,
- odległość między wylotem dyszy a powierzchnią próbki jest równa 10 ± 1 mm,
- czas badania wynosi co najmniej 10 min, podczas którego należy wykonać minimum cztery próby pomiarowe,
- wielkość erozji jest mierzona jako różnica mas próbki przed i po procesie, wyrażona w mg,
- średnia wartość erozji jest obliczana poprzez podzielenie szybkości erozji (mg/min) przez szybkość przepływu ścierniwa (g/min), a następnie podzielenie wyniku przez gęstość próbki (g/cm^3). Średnia wartość erozji podawana jest w mm^3/g .



Rysunek 4. Schemat urządzenia do badania zużycia erozyjnego [8]
Figure 4. Scheme of erosion test machine [8]



Rysunek 5. Stanowisko do badania zużycia erozyjnego materiałów
Figure 5. Erosion test station

5. WYNIKI TESTU EROZYJNEGO WYKONANEGO NA STANOWISKU DO BADANIA ZUŻYCIA EROZYJNEGO MATERIAŁÓW

Material do badań

Badaniu odporności erozyjnej poddano próbki, pobrane z fragmentu rury ekranowej komory spalania kotła parowego OP-650, wykorzystywanego w elektrowniach (rysunek 6). Rura była pokryta powłoką ochronną typu HIGHRESIST (NiCrB wzmacniana węglnikami), o grubości 400 μm .



Rysunek 6. Obraz jednej z próbek poddanych badaniu

Figure 6. An image of the sample examined

Parametry i wyniki badania

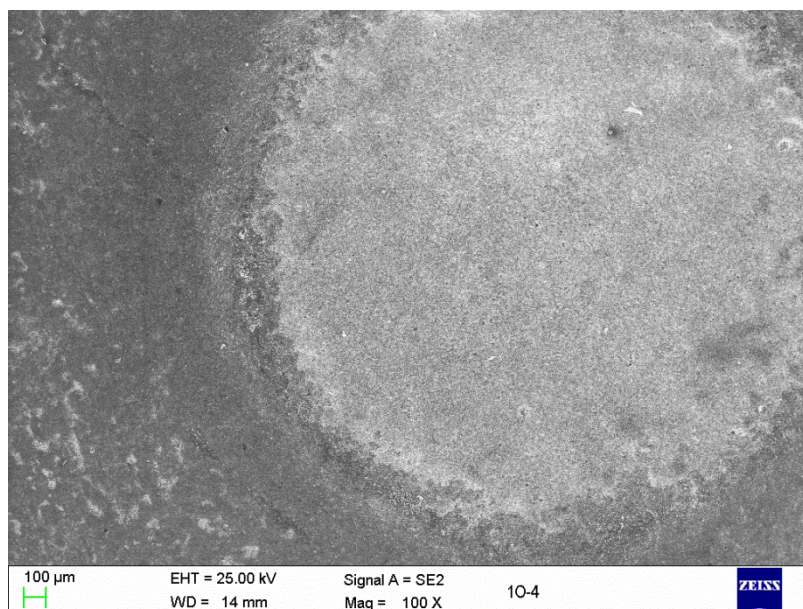
Zgodnie z normą ASTM zostały wykorzystane cząstki ściernie z Al_2O_3 , o rozmiarze $50\mu\text{m}$. Prędkość cząstek padających na powierzchnię próbki wynosiła 30 m/s. Otrzymane wyniki przedstawiono w tabeli nr 1.

Tabela 1. Wyniki testu erozyjnego

Table 1. Test erosion results

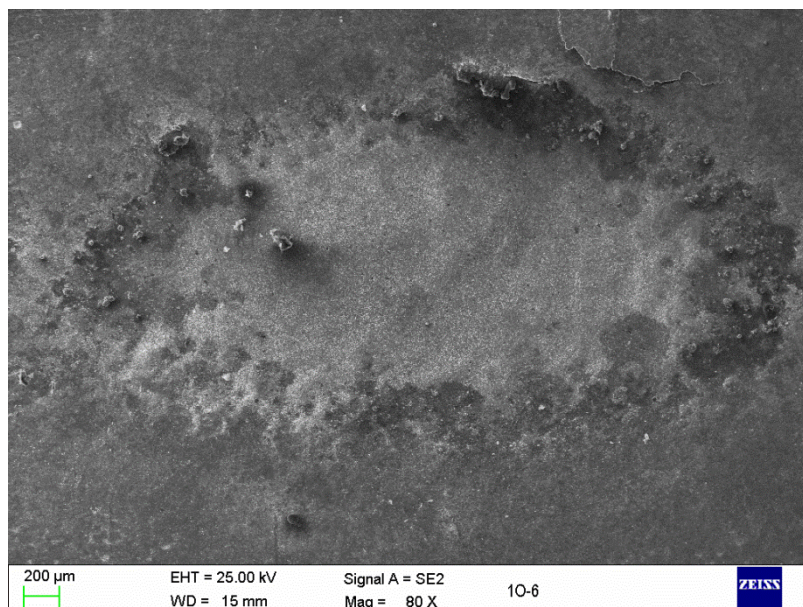
Rodzaj próbki	Czas trwania próby [min]	Kąt padania erodenta [°]	Nr próby erozyjnej (krateru)	Ubytek masy [mg]
1W ¹	10	90	1	0,4
	30		3	3,9
	30		4	4,1
	30		5	4,5
	30	30	6	2,6
	30		7	3,3
2W	30	90	1	4,3
	30		2	3,3
	15		3	1,5
	15		4	1,3
	30	30	5	2,5
	30		6	3,6
1O ²	30	90	1	6,3
	15		2	3,7
	15		3	3,6
	30		4	6,1
	30	30	5	5,5
	30		6	4,8
2O	30	90	1	6,2
	30		2	5,4
	30	30	3	4,9
	30		4	4,2
1- „W” oznacza badanie powierzchni, która w warunkach eksploatacyjnych stanowi wymurówkę (niezdegradowana), 2- „O” oznacza badanie powierzchni ogniowej (zdegradowana).				

Aby dokładnie scharakteryzować powstałe kartery, dodatkowo wykonano obserwację na mikroskopie skaningowym oraz badania profilometrem. Na rysunkach 7 i 8, zostały przedstawione obrazy powierzchni dwóch wybranych kraterów z próbki 1O, zaobserwowane na mikroskopie skaningowym. Rysunki 9 i 10, przedstawiają profile tych kraterów, otrzymane po badaniu profilometrem.



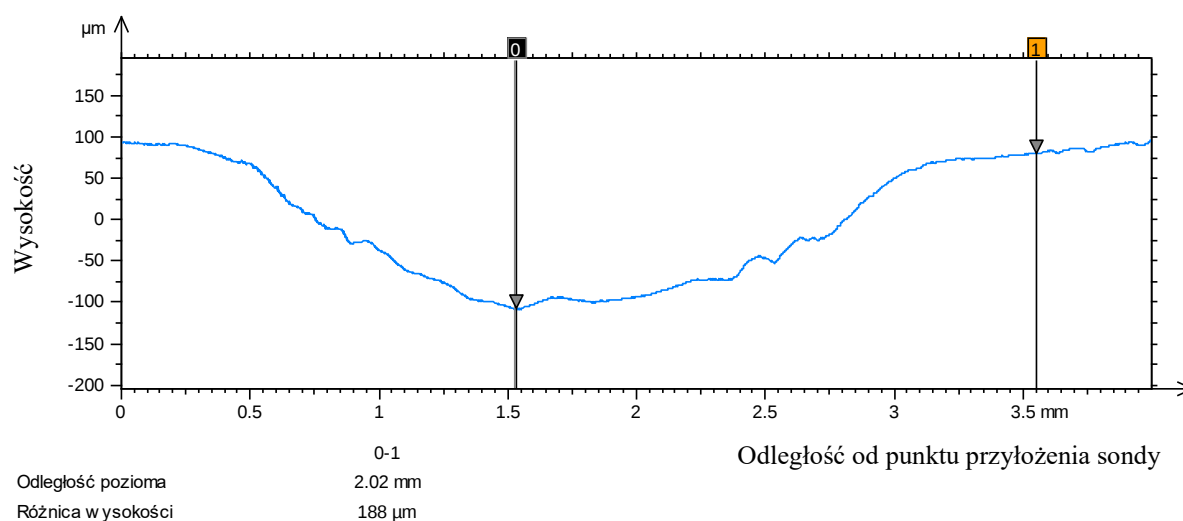
Rysunek 7. Obraz powierzchni krateru nr 4, na próbce 1O, pow. 100x

Figure 7. Image of the crater surface no. 4, the sample 1O, mag. 100x



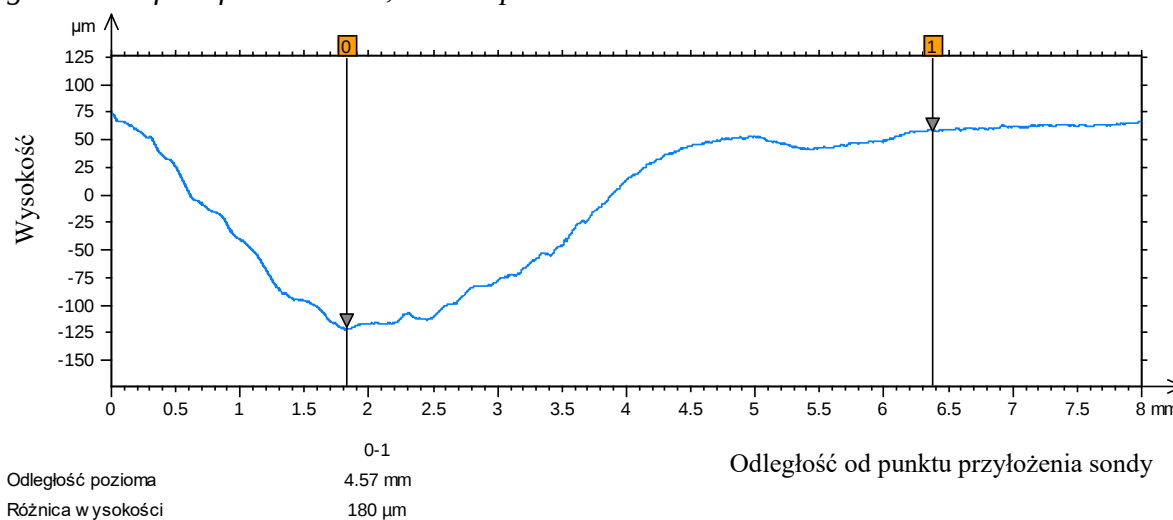
Rysunek 8. Obraz powierzchni krateru nr 6, na próbce 1O, pow. 80x

Figure 8. Image of the crater surface no. 6, the sample 1O, mag. 80x



Rysunek 9. Profil karteru nr 4, na próbce 10

Figure 9. Profile of crater no. 4, the sample 10



Rysunek 10. Profil karteru nr 6, na próbce 10

Figure 10. Profile of crater no. 6, the sample 10

6. PODSUMOWANIE

Badania odporności na zużycie ściernie, pozwalają na ilościowe określenie stopnia zużycia oraz wyznaczenie współczynnika tarcia, dla różnych materiałów. Wykonuje się je np. dla części maszyn współpracujących ze sobą w różnych warunkach eksploatacyjnych, w celu określenia odporności powłok na ścieranie.

Badania erozyjne są wykonywane w celu określenia wpływu cieczy, gazów lub cząstek zawieszonych w tych ośrodkach. Pozwala na porównanie stopnia zniszczenia, dla różnych kątów padania erodenta. Często, tą metodą bada się odporność na zużycie erozyjne materiałów stosowanych w energetyce (np. żeliw, stali stopowych).

LITERATURA:

1. Blicharski M., Inżynieria powierzchni, WNT, Warszawa 2009.
2. Dobrzański L.A., Dobrzańska – Danikiewicz A.D., Zmiany struktury i własności powierzchni materiałów inżynierskich w wyniku eksploatacji, Open Access Library, vol. 5, 2011.
3. Dobrzański L.A., Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo, WNT, Warszawa 2002.
4. Hebda M., Wachal A., Trybologia, WNT, Warszawa 1980.
5. ASTM G 99 – 95a Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus.
6. <http://www.csm-instruments.com/en/Pin-on-Disk-Tribometer>.
7. <http://www.katalog.itee.radom.pl/index.php/karty-katalogowe/pprzemys-metalowy-maszynowy.html>.
8. ASTM G 76– 012 Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets.

