

**Ryszard RUTA \***

## **WYKORZYSTANIE ANALIZY MOCY TESTÓW DO WYZNACZENIA LICZNOŚCI PRÓBY W BADANIACH TRIBOLOGICZNYCH**

### **THE APPLICATION OF TEST POWER TO DETERMINATION OF THE TESTS NUMBER IN TRIBOLOGICAL RESEARCH**

#### **Słowa kluczowe:**

analiza mocy testów, planowanie eksperymentów, metoda Ball-cratering, rozrzut wyników, badania tribologiczne

#### **Key words:**

test power, plan of experiment, ball-cratering method, results scatter, tribological research

#### **Streszczenie**

W artykule przedstawiono propozycję procedury wyznaczania liczności próby, umożliwiającej oszacowanie z zadaną dokładnością wartości badanej wielkości (zmiennej losowej) na ustalonym poziomie wiarygodności. Jako miary wiarygodności przyjęto: poziom istotności i moc testu. Procedura wykorzystuje metody statystyki matematycznej dotyczące analizy mocy testów. Pokazano

---

\* Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, tel. (048)36-442-41, fax (048) 36-447-65.

zastosowanie opracowanej procedury do wyznaczenia liczby powtórzeń procedury testowej w metodzie ball-cratering oceny odporności powłok PVD na zużycie ściernie. W ramach prowadzonych badań odporności na zużycie ściernie powłok przeciwzużyciowych podstawowe znaczenie mają ślady zużycia w kształcie kraterów, których średnice są wykorzystywane do obliczenia wartości współczynnika odporności na zużycie ściernie. Testy zużyciowe wykonano w ustalonych warunkach pracy węzła tarcia tj. obciążenia, prędkości obrotowej na zadanej drodze tarcia w obecności węgliku krzemu SiC jako ścierniwa. Zgodnie z opracowaną procedurą każdy test powtórzono pięć razy, sprawdzono wiarygodność uzyskanych wyników oraz, w przypadkach uzyskania wyników o nieakceptowanej wiarygodności, przeprowadzono badania uzupełniające.

## WPROWADZENIE

Skuteczność i efektywność badań eksperymentalnych w znacznym stopniu można zwiększyć poprzez szerokie wykorzystanie nowoczesnych metod statystycznych zarówno na etapie planowania eksperymentów, jak i analizy uzyskanych wyników oraz opracowania adekwatnych i wiarygodnych modeli reprezentujących wiedzę uzyskaną w rezultacie przeprowadzonych badań. Szczególnie ważnym problemem, którego właściwe rozwiązanie w większości przypadków determinuje możliwość przeprowadzenia skutecznych i ekonomicznie uzasadnionych badań, jest oszacowanie liczby eksperymentów gwarantujących uzyskanie wartościowych i wiarygodnych informacji o przedmiocie badań. Szczególnie przydatną do tego celu okazała się analiza mocy testów opracowana w latach 80. ubiegłego wieku [L. 1]. Zastosowanie nowoczesnych metod projektowania eksperymentów w tribologii, będącej w swej istocie przede wszystkim nauką eksperymentalną, jest we wszech miar uzasadnione oraz powinno usprawnić i zwiększyć efektywność badań tribologicznych.

## ANALIZA MOCY TESTÓW

Ponieważ podstawą opracowania procedury wyznaczania liczebności próby są metody opracowane w ramach analizy mocy testów, poniżej podano główne zasady testowania hipotez statystycznych oraz metody oceny wielkości błędów, powstających w procesie weryfikacji hipotez statystycznych.

W celu wykazania prawdziwości tezy sformułowanej na podstawie badań empirycznych, formułuje się hipotezy:  $H_1$  – alternatywną, równoważną z weryfikowaną tezą oraz  $H_0$  – hipotezę zerową będącą jej zaprzeczeniem. W procesie weryfikacji dąży się do zakwestionowania hipotezy zerowej  $H_0$  jako mało prawdopodobnej (poniżej przyjętego poziomu istotności  $\alpha$ ), co daje podstawę do przyjęcia hipotezy alternatywnej  $H_1$  jako zaprzeczenia odrzuconej hipotezy zerowej.

W przedstawionym powyżej testowaniu OP (odrzucająco-potwierdzającym) wyróżnić można następujące sytuacje (**Tabela 1**):

**Tabela 1. Sytuacje decyzyjne w procesie weryfikacji hipotez**

Table 1. Decision – making situations in the process of verifying hypotheses

		Hipoteza prawdziwa:	
		$H_0$	$H_1$
Wybrano hipotezę:	$H_0$	Poprawne przyjęcie $H_0$ $1 - \beta$	Błąd II rodzaju $\beta$
	$H_1$	Błąd I rodzaju $\alpha$	Poprawne odrzucenie $H_0$ $1 - \alpha$

Dwie z nich: przyjęcie prawdziwej hipotezy  $H_0$  i odrzucenie nieprawdziwej hipotezy  $H_0$  są decyzjami poprawnymi, natomiast zarówno przyjęcie fałszywej hipotezy  $H_0$  (i tym samym odrzucenie prawdziwej hipotezy  $H_1$ ) jak i odrzucenie poprawnej hipotezy  $H_0$  (i tym samym przyjęcie nieprawdziwej hipotezy  $H_1$ ) są decyzjami błędnymi.

Zgodnie z konstrukcją procedury weryfikacji hipotez statystycznych, prawdopodobieństwo błędu I rodzaju wyznaczone jest poprzez przyjęty poziom istotności  $\alpha$ . W praktyce w naukach przyrodniczych zazwyczaj przyjmuje się  $\alpha = 0,05$ , czasami 0,1; 0,01 oraz w szczególnych przypadkach 0,001. Należy zaznaczyć, że wartość poziomu istotności jest rezultatem arbitralnej decyzji badacza, która powinna być podjęta przed przystąpieniem do badań. W przypadku testowania OP niewielka wartość tego błędu ma zasadnicze znaczenie, ponieważ zabezpiecza przed błędnym potwierdzeniem nieprawdziwych rezultatów badań, sformułowanych w postaci hipotezy alternatywnej  $H_1$ . Oczywiście badacz zainteresowany jest także skutecznością wykrywania nieprawdziwości weryfikowanej hipotezy  $H_1$ , co jest równoznaczne z nieodrzuconiem poprawnej hipotezy  $H_0$ , czyli uniknięciem popełnienia błędu II rodzaju. Ponieważ prawdopodobieństwo popełnienia błędu tego rodzaju oznacza się zwyczajowo literą  $\beta$ , zatem prawdopodobieństwo uniknięcia tego błędu  $\mu = (1 - \beta)$  nazywane jest mocą testu.

Podsumowując można stwierdzić, że przy testowaniu OP błąd I rodzaju oznacza błędne potwierdzenie tezy badacza. Z punktu widzenia odbiorcy wyników badań błąd ten jest szczególnie niekorzystny, bo wiąże się z wydatkowaniem środków nie dających żadnych efektów. Natomiast błąd II rodzaju jest przede wszystkim niekorzystny dla badacza, gdyż pozbawia go wszelkich korzyści wynikających z prawdziwości postawionej tezy tylko z powodu losowego błędu w ocenie wyników. Zatem badacz zainteresowany jest weryfikacją swojego rozwiązania za pomocą testu, który przy zadanym poziomie istotności

$\alpha$  będzie miał dużą moc. W praktyce za wystarczającą moc testu przyjmuje się wartość  $\mu \geq 0,8$ .

Ponieważ w procesie badawczym wartość poziomu istotności jest z góry przyjęta, w celu uzyskania akceptowalnego poziomu mocy testu należy zbadać, od jakich czynników i w jaki sposób jest ona zależna.

Nie wnikając w sposób wyznaczania mocy testów (dokładnie opisany w literaturze [L. 2–4]), można wyróżnić następujące czynniki wpływające na moc testów:

- rodzaj testu – każdy test związany jest z określonym rozkładem prawdopodobieństwa statystyki testowej, o różnym kształcie funkcji gęstości, który ma istotny wpływ na wartość prawdopodobieństwa popełnienia błędu II rodzaju, co powoduje, że niektóre testy statystyczne z natury mają większą moc od innych;
- liczność próby – ogólnie, im większa próba, tym większa moc testu, co pośrednio wynika z budowy statystyki testowej, w rezultacie której liczność próby ma wpływ na miarę rozrzutu statystyki testowej;
- wielkość spodziewanego efektu – duża różnica pomiędzy wartością zawartą w hipotezie zerowej w stosunku do wartości postulowanej w hipotezie alternatywnej zwiększa moc testu w stosunku do małych różnic;
- błędy pomiarowe – każda próba obciążona jest pewnym błędem pomiaru badanego efektu, zaciemniającym rzeczywistą wartość poszukiwanego efektu, zatem każda korekta dokładności pomiarów poprawia moc testu.

Prezentowane poniżej rezultaty otrzymano wykorzystując Moduł Analiza Mocy Testów zawarty w programie STATISTICA firmy StatSoft. Zawarto w nim szereg analitycznych i graficznych narzędzi pozwalających na dokonanie dokładnej oceny czynników mających bezpośredni wpływ na moc testu oraz wymaganą licznosc próby, w większości powszechnie stosowanych typów analiz statystycznych [L. 4].

## **WYKORZYSTANIE ANALIZY MOCY TESTU DO WYZNACZENIA WIELKOŚCI PRÓBY**

Pojęcia i metody analizy mocy testu wykorzystywane do wyznaczenia licznosci próby zostaną zilustrowane na przykładzie oceny wyników procedury testowej, wykonywanej w ramach badania odporności na zużycie ścierne metodą ball-cratering. W rezultacie 5 powtórzeń procedury otrzymano 5 kraterów śladów zużycia, których najważniejszą cechą w prowadzonych badaniach są średnice otrzymanego śladu zużycia. W rezultacie przeprowadzonych badań otrzymano następujące wielkości średnicy  $d = 1,663; 1,713; 1,735; 1,664; 1,676$  o wartości średniej  $m_d = 1,690$  i odchyleniu standardowym  $S_d = 0,032$ .

Ważne jest stwierdzenie, jaka jest dokładność i wiarygodność uzyskanych wyników. Założono, że badaczka interesują wyniki obarczone błędem mniej-

szym od 1% mierzonej wielkości, co jest równoznaczne z udowodnieniem, że uzyskana wartość  $m_d$  może różnić się od wartości faktycznej o błąd  $\delta_m = \pm 0,01 \cdot m_d = 0,017$ . Zatem należy stwierdzić, czy 5-krotne powtórzenie procedury gwarantuje uzyskanie takiej dokładności na akceptowanym poziomie wiarygodności, wyznaczonym poprzez wartość poziomu istotności  $\alpha \leq 0,05$  i moc testu  $\mu \geq 0,8$ .

W przypadku prowadzonych badań, w celu sprawdzenia, czy uzyskane wyniki charakteryzują się dokładnością  $m_{0,01d}$ , należy postawić następujące hipotezy:

$$H_0: \delta_d = 0 \text{ i hipotezę alternatywną } H_1: \delta_d \neq 0$$

Proces weryfikacji hipotezy  $H_0$  polega na wyznaczeniu wartości prawdopodobieństwa testowego  $p$  uzyskania wartości  $\delta_d$  przy założeniu, że faktyczna wartość jest równa zero. Jeżeli prawdopodobieństwo testowe  $p$ , wyznaczone na podstawie pięciokrotnego powtórzenia procedury testowej, jest mniejsze od przyjętego poziomu istotności  $\alpha = 0,05$ , to uznaje się, że zaszło zdarzenie bardzo mało prawdopodobne i w związku z tym należy odrzucić hipotezę  $H_0$  i jako prawdziwą przyjąć hipotezę  $H_1$ . Natomiast w przypadku, gdy prawdopodobieństwo  $p$  jest większe od  $\alpha$ , można tylko stwierdzić, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy  $H_0$ .

Wykorzystując moduł „Analiza Mocy Testów” programu STATISTICA, wprowadzono wartości parametrów: wielkość próby  $N = 5$ , dopuszczalny błąd  $\delta_d = 0,017$ , poziom istotności  $\alpha = 0,05$ , empiryczne odchylenie standardowe  $S = 0,032$  i postać hipotezy  $H_0 \delta_d = 0$ , co umożliwiło wyznaczenie mocy testu dla omawianego przykładu.

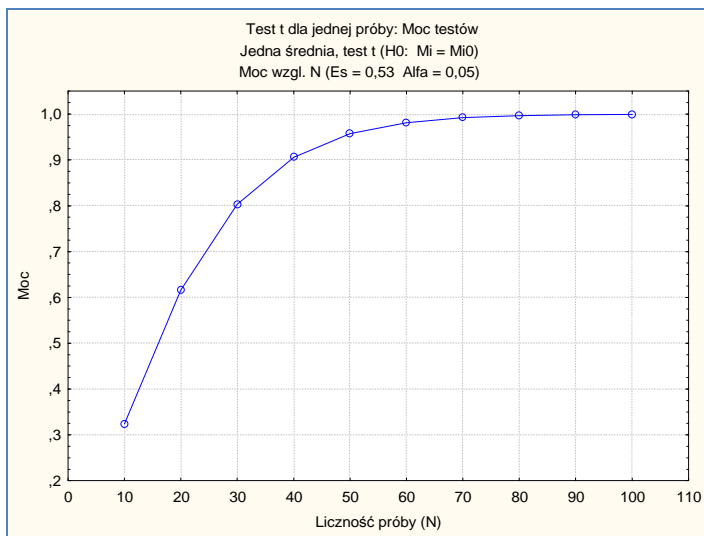
Rezultaty przeprowadzonych obliczeń przedstawiono w postaci **Tabeli 2**, zawierającej, oprócz wyznaczonej mocy, również wprowadzone wcześniej wartości parametrów.

**Tabela 2. Wyniki analizy mocy testów**

Table 2. Results of the test power

	Moc
	Jedna średnia, test $H_0: \mu_i = \mu_{i0}$
	Wartość
Średnia hipotezy zerowej ( $\mu_{i0}$ )	0,00
Średnia w populacji ( $\mu_i$ )	0,017
Odch. std. w populacji ( $\sigma$ )	0,032
Efekt standaryzowany ( $E_s$ )	0,53
Liczność próby ( $N$ )	5
Prawdop. bł. I rodzaju ( $\alpha$ )	0,05
Wartość krytyczna $t$	2,78
Moc	0,15

Jak można zauważyć, obliczona moc 0,15 dla 5-elementowej próby ma bardzo małą skuteczność odrzucenia rezultatów obciążonych błędem większym od przyjętej wartości 0,017. W celu zbadania możliwości zwiększenia mocy testu można wykorzystać generowane przez program wykresy, pokazujące zależność mocy testu: od wielkości próby  $N$  (**Rys. 1**), wielkości efektu standaryzowanego  $E_s$  (**Rys. 2**) oraz przyjętego poziomu istotności  $\alpha$  (**Rys. 3**).



**Rys. 1.** Wykres mocy testu względem liczności próby

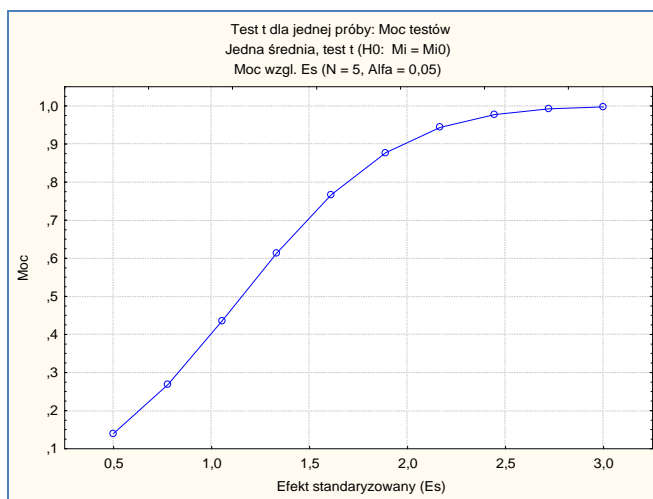
Fig. 1. The graph of the test power as the function of the tests number

Na podstawie przedstawionego wykresu można wnioskować, że uzyskanie akceptowalnego poziomu mocy testu  $\geq 0,8$  wymaga zwiększenia liczności próby do 30 elementów.

Interesująco prezentuje się wykres mocy testu w zależności od wartości efektu standaryzowanego  $E_s$ , przy zadanej liczności próby  $N = 5$  (**Rys. 2**).

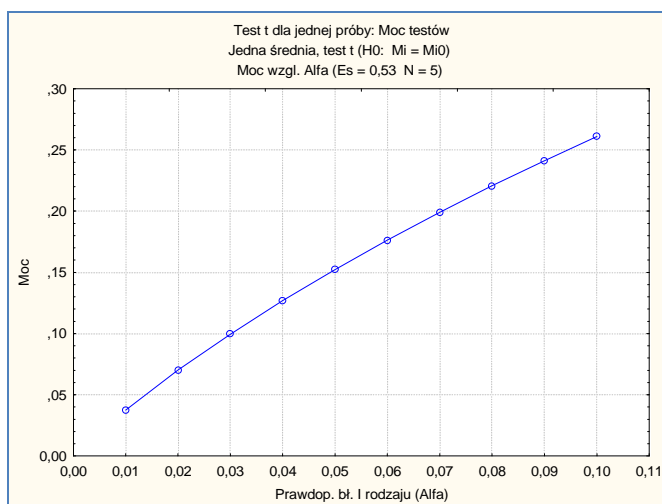
Efekt standaryzowany  $E_s = \delta_d/S$  w przypadku ustalonej wartości odchylenia standardowego zależy proporcjonalnie od zakładanej dokładności procedury testowej. I tak dla wymaganej dokładności 3%  $E_s = 1,58$ , a dla 5% aż 2,64. Na wykresie (**Rys. 2**) zależności mocy testu od wartości efektu standaryzowanego można zauważyć, że dla wartości  $E_s = 1,58$  moc testu dla 5-elementowej próby wynosi 0,75, a dla 2,64 aż 0,99.

Natomiast na podstawie wykresu zależności mocy testu od poziomu istotności (**Rys. 3**) można stwierdzić, że w badaniach eksperymentalnych w sensownym zakresie  $\alpha \in [0,01-0,1]$  występuje stosunkowo mały wpływ poziomu istotności na moc testu, zmieniającą się od 0,4 dla  $\alpha = 0,01$  do 0,26 dla  $\alpha = 0,1$ .



**Rys. 2. Wykres mocy testu w zależności od efektu standaryzowanego**

Fig. 2. The graph of the test power as the function of the standardised effect



**Rys. 3. Wykres mocy testu w zależności od poziomu istotności**

Fig. 3. The graph of the test power as the function of the significance level

Przyjmując konkretne wartości: poziomu błędu I rodzaju i akceptowanego poziomu błędu II rodzaju, można, wykorzystując przedstawiony aparat analizy mocy testu, wyznaczyć minimalną wielkość próby, pozwalającą na uzyskanie wyników badań empirycznych o zakładanej wiarygodności. Przedstawione postępowanie zostało uogólnione w postaci procedury doboru liczności próby, pozwalającej na oszacowanie rezultatu badań eksperymentalnych na założonym poziomie wiarygodności.

## PROCEDURA DOBORU WIELKOŚCI PRÓBY DLA OSZACOWANIA REZULTATU BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Ponieważ wyniki badań eksperymentalnych w zdecydowanej większości przypadków można interpretować jako realizację zmiennej losowej, reprezentującej pewną cechę przedmiotu badań (zjawiska, obiektu technicznego bądź procesu), zadanie doboru wielkości próby można sprowadzić do zadania oszacowania (z zadaną dokładnością) wartości średniej określonej zmiennej losowej  $X$ . W tym celu, wykorzystując narzędzia analizy mocy testu, opracowano procedurę składającą się z następującej sekwencji działań:

1. Przyjąć konkretne wartości:
  - poziom istotności testu  $\alpha$ ,
  - akceptowalny poziom błędu II rodzaju  $\beta$ ,
  - zakładaną dokładność oszacowania  $\delta_{\%}$  [%],
  - początkową licznosc próby  $n_0$ ,
  - licznik cykli  $k = 1$ .
2. Przeprowadzić badania mające na celu uzyskanie  $n = k \cdot n_0$  wartości  $x_i$  badanej zmiennej losowej  $X$ .
3. Wyznaczyć wartości:

średnią  $m$

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} x_i$$

odchylenie standardowe  $S$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{i=n} (x_i - \bar{x})^2$$

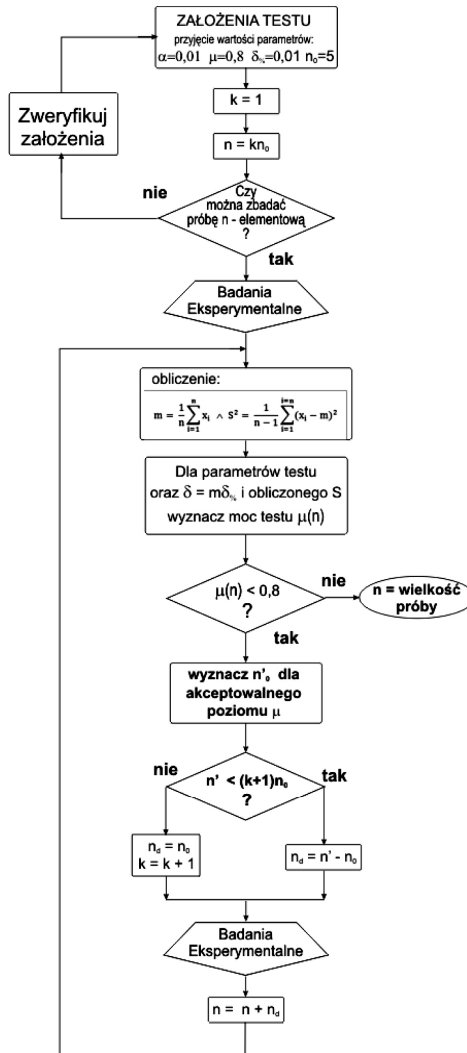
4. Wykorzystując moduł „Analiza Mocy Testów” programu STATYSTYKA wprowadzić: przyjęte w pkt. 1 wartości parametrów testu oraz wyznaczone w pkt. 3 wartości  $S$  i  $\delta = m \cdot \delta_{\%}$ .
5. Obliczyć moc testu (**Tabela 1**).
6. W przypadku uzyskania akceptowalnej wartości mocy testu przyjąć  $n$  jako poszukiwaną wielkość próby.

W przypadku, gdy wyznaczona moc jest na poziomie nieakceptowanym, należy skorzystać z wykresu mocy testu względem licznosci próby (**Rys. 1**), za pomocą którego wyznaczamy wielkość próby  $n'$  gwarantującą osiągnięcie zakładanej mocy testu. Na podstawie wartości  $n'$  należy wykonać dodatkowych  $n_d$  badań (wracając do punktu 2). Przy czym  $n_d = n' - n_0$  (dla  $n' < n_0$ ) i  $n_d = n_0$  i  $k = k + 1$  (dla  $n' \geq n_0$ ). Dalej w pkt. 3 należy wyznaczyć wartości  $m$  i  $S$  dla  $n = n_0 + n_d$ . W przypadku, gdy z różnych względów (czasowych, finansowych, zasobowych) nie można przeprowadzić badań z wyznaczoną wielkością próby  $n$ , należy zweryfikować założenia i ewentualnie zmodyfikować wartości parametrów ustalonych w punkcie 1 niniejszej procedury oraz wrócić do punktu 3



w celu wyznaczenia nowych wartości na podstawie wyników z próby początkowej i uzupełniającej i kontynuować postępowanie według punktów 4–7. Weryfikację założeń i ewentualną modyfikację wartości parametrów należy przeprowadzić wykorzystując informacje wynikające z wykresów zależności mocy testu: od wartości efektu standaryzowanego  $E_s$  (**Rys. 2**) bądź od przyjętego poziomu istotności  $\alpha$  (**Rys. 3**).

W celu pokazania struktury działań przedstawionej powyżej procedury na **Rys. 4** pokazano schemat ideowy algorytmu wyznaczania wielkości próby służącej do oszacowania (z zadaną dokładnością) wartości zmiennej losowej, reprezentującej wyniki badań eksperymentalnych.

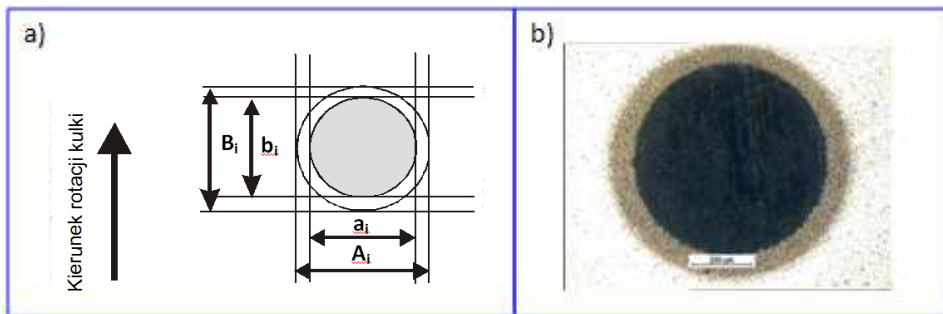


**Rys. 4. Algorytm wyznaczania wielkości próby dla oszacowania wartości zmiennej losowej**  
 Fig. 4. Algorithm of the sample size determination for evaluation of the random variable value

## ZASTOSOWANIE OPRACOWANEJ PROCEDURY W EKSPERYMENTALNYCH BADANIACH TRIBOLOGICZNYCH

Opracowana procedura została zastosowana do weryfikacji wyników otrzymanych z badań zużyciowych, przeprowadzonych metodą ball-cratering [L. 5–10] dla powłok PVD. W metodzie tej przeciwpróbka (kula) dociśnięta do próbki (tarcza) określoną siłą obraca się na powierzchni próbki zadaną prędkością obrotową przez zadany czas, w którym punkt na średnicy kręcącej się kulki pokonuje zadaną drogę. Do strefy kontaktu kula/tarcza doprowadzona jest zawiesina proszku ściernego SiC. W efekcie zużywania uzyskuje się kuliste wgłębienie – krater, którego wielkość jest mierzona przy użyciu optycznego mikroskopu pomiarowego.

Sposób pomiaru średnic śladów zużycia na powierzchni próbki ( $a_i$ ,  $b_i$  – średnice wewnętrzne,  $A_i$ ,  $B_i$  – średnice zewnętrzne i-tego krateru) oraz przykład śladu zużycia pokazano na **Rys. 5a** i **5b**.



**Rys. 5. Pomiar średnic śladu zużycia (a), przykład otrzymanego krateru po biegu badawczym (b)**

Fig. 5. The measurement of the wear scar axis (a), the example of the crater after the wear test (b)

Przedmiotem badania była powłoka wielowarstwowa (TiN/AlCrN) $\times$ 5 naniesiona na powierzchnię próbki metodą PVD [L. 12]. W ramach badań wykonanych przy obciążeniu 0,4 N i prędkości obrotowej 38 obr./s przeprowadzono 2 rodzaje eksperymentów: pierwszy – 4 układy dla dróg tarcia: 105, 115, 125 i 135 m oraz drugi dla dróg: 105, 125, 145 i 165 m. Dla każdego układu wykonano 5 powtórzeń, w rezultacie których otrzymano po 5 średnic śladów zewnętrznych  $A_i$ ,  $B_i$  i wewnętrznych  $a_i$ ,  $b_i$ .

W ramach weryfikacji określono moc testu  $t$  pozwalającego na weryfikację hipotezy o uzyskaniu wartości średniej badanych średnic z dokładnością 1% w przypadku próby 5-elementowej, co sprowadzono do weryfikacji hipotezy o wartości błędu mniejszej od przyjętej dokładności.

Ponieważ, jak wcześniej stwierdzono, moc testu zależy odwrotnie proporcjonalnie od rozrzutu wartości badanej zmiennej losowej i wprost proporcjonal-

nie od wielkości średniej, moc testów wyznaczano poczynając od układów o największym odchyleniu standardowym. W przypadku wystąpienia układów o takim samym odchyleniu uwzględniano układ o mniejszej wartości średniej błędu.

Wartości mocy wyników wraz z wymaganą liczebnością próby, gwarantującą uzyskanie mocy testu większej od 0,8 dla badanych układów eksperymentów o największych wartościach odchylenia standardowego, podano w **Tabeli 3**.

**Tabela 3. Zestawienie wyników analizy mocy testów układów eksperymentów o największych wartościach odchylenia standardowego**

Table 3. Results of the test Power of experimental systems for the largest values of the standard deviation

	Moc Jedna średnia, test t H0: $\mu_i = \mu_{i0}$					
	Exp.1 dr 125 Śrd.: a3-b3	Exp.1 dr 125 Śrd.: A3-B3	Exp.2 dr 165 Śrd.: A4-B4	Exp.2 dr 145 Śrd.: a3-b3	Exp.1 dr 115 Śrd.: a2-b2	Exp.2 dr 165 Śrd.: a4-b4
Średnia hipotezy zerowej $\delta_0$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Wartość błędu w próbie $\delta$	<b>0,017</b>	<b>0,018</b>	<b>0,019</b>	<b>0,017</b>	<b>0,016</b>	<b>0,017</b>
Odch. std. w próbie S	<b>0,032</b>	<b>0,021</b>	<b>0,017</b>	<b>0,012</b>	<b>0,011</b>	<b>0,009</b>
Efekt standaryzowany (Es)	0,53	0,86	1,12	1,42	1,45	1,89
Liczebność próby (N)	5	5	5	5	5	5
Prawdop. bł. I rodzaju $\alpha$	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Wartość krytyczna t	2,78	2,78	2,78	2,78	2,78	2,78
Moc $\mu$	<b>0,15</b>	<b>0,31</b>	<b>0,48</b>	<b>0,66</b>	<b>0,69</b>	<b>0,88</b>
Wymagana liczebność dla $\mu=0,8$	<b>30</b>	<b>13</b>	<b>9</b>	<b>7</b>	<b>6</b>	<b>5</b>

Analizując powyższą tabelę można zauważyć, że w przeprowadzonych badaniach dla przyjętych wartości: dokładności wyznaczenia wartości badanych średnic równej  $\delta = 1\%$  oraz poziomu istotności  $\alpha = 0,05$ , zadowalającą moc ( $\geq 0,80$ ) uzyskuje się dla wartości odchylenia standardowego mniejszego od 0,009 przy wartości średniej błędu większej od 0,017 (lub równoważnie od standaryzowanego efektu  $E_s \leq 1,89$ ).

Zgodnie z opracowaną procedurą w przypadku dwóch pierwszych (według **Tabeli 3**) eksperymentów wykonano po pięć dodatkowych testów, otrzymując następujące wartości łącznego (dla 10 testów) odchylenia standardowego: 0,053 i 0,018, co w sumie już dla 10 powtórzeń dało moc odpowiednio: 0,15; 0,80 i 0,87. Jak można zauważyć tylko w przypadku pierwszego eksperymentu nie osiągnięto zadowalającego poziomu mocy, a wyznaczona liczba 79 eksperymentów, wymagana dla uzyskania mocy 0,8, spowodowała zrewidowanie przyjętych założeń. Okazało się, że dopuszczenie błędu mniejszego od 3,5% wartości średniej z próby w przypadku 10 powtórzeń pozwoliło osiągnąć moc większą od 0,87. W przypadku eksperymentów trzeciego, czwartego i piątego wykonano dodatkowo 4, 2 i 1 test. W rezultacie otrzymano odchylenia standardowe prób (9-, 7- i 6-elementowych) równe odpowiednio: 0,017, 0,013 i 0,011, co w efekcie dało moc testów: 0,88, 0,82 oraz 0,81 i tym samym potwierdziło, że wyznaczone w drugim cyklu wielkości prób pozwalają na uzyskanie wyników testów z założoną dokładnością na przyjętym poziomie wiarygodności.

## WNIOSKI

Wykonywanie procedur testowych na urządzeniach odwzorowujących różnego rodzaju węzły tarcia jest istotnym elementem tribologicznych procesów badawczych. Jakość prowadzonych badań, ich dokładność i wiarygodność jest uzależniona od liczby powtórzeń procedur testowych; ich zbyt mała liczba zmniejsza dokładność i wiarygodność uzyskanych rezultatów, natomiast każde dodatkowe powtórzenie wiąże się niekiedy z bardzo dużym wzrostem nie tylko czasu badań, ale także ich kosztu. Przedstawiona w artykule propozycja wyznaczania liczby powtórzeń, wykorzystująca analizę mocy testów, jest próbą opracowania skutecznego i efektywnego narzędzia, umożliwiającego świadomy wybór minimalnej liczby powtórzeń gwarantujących uzyskanie rezultatów charakteryzujących się założoną dokładnością na akceptowanym poziomie wiarygodności.

## LITERATURA

1. Cohen J., *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*, 2<sup>nd</sup> ed. Hillsdale, NJ: L. Erlbaum Associates, 1988.
2. Dobosz M., *Wspomagana komputerowo statystyczna analiza wyników badań*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2001.
3. Kot S.M., Jakubowski J., Sokołowski A., *Statystyka*, Centrum Doradztwa i Informatyki Difin, Warszawa 2007.
4. StatSoft (2006). *Elektroniczny Podręcznik Statystyki PL*, Kraków, WEB: <http://www.statsoft.pl/textbook/stathome.html>
5. Gee M.G., Gant A., Hutchings I., Bethke R., Schiffman K., Van Acker K., Poulat S., Gachoń Y., Von Stebut J., *Progress towards standardisation of ball-cratering*, *Wear*, 2003, 255, pp. 1–13.
6. Gee M.G., Gant A.J., Hutchings I.M., Kusano Y., Bethke R., Schiffman K., Van Acker K., Poulat S., Gachoń Y., Von Stebut J., Hatto P., Plint G., *Results from an interlaboratory exercise to validate the micro-scale abrasion test*, *Wear*, 2005, 259, pp. 27–35.
7. Gee M.G., Wicks M.J., *Ball crater testing for the measurement of the unlubricated sliding wear of wear-resistant coatings*, *Surface and Coatings Technology*, 2000, 133–134, pp. 376–382.
8. Gee M.G., *The use of PC scanners in micro-abrasion wear testing*, *Wear*, 2005, 259, pp. 1448–1452.
9. Norma PN-EN 1071-6:2008 *Techniczna ceramika zaawansowana. Metody badania powłok ceramicznych*.
10. Osuch-Słomka E., Słomka Z., Szczerek M., *Określanie intensywności zużycia powłok niskotarciowych metodą ball-cratering*, *Tribologia*, 2009, 224, s. 127–137.
11. Osuch-Słomka E., *Badanie zużywania ściernego powłok przeciwzużyciowych metodą ball-cratering*, *Tribologia*, nr 2/2012 (242), s. 59–68.

## Summary

The article proposes a procedure for the determination of the number of test repetitions that enables the evaluation the value of investigated variable with the assumed precision on established the credibility level.

As the credibility measure, the significance level and the test power were assumed.

The procedure uses the statistical methods concerning the analysis of the tests power. The application of the developed procedure is described to determination the number of the test repetitions in the ball-cratering method in the evaluation of PVD coating resistance to an abrasive wear. In the scope of the research of the resistance to abrasive wear of the anti-wear coatings, crater-shaped wear scars have significance. The crater diameters are used for the coefficient determination of the resistance to abrasive wear. The wear tests referred to in this article were conducted in stable conditions of load, velocity and wear with the presence of silicon carbide.

In accordance with procedure, each test was repeated five times. The credibility of results where checked and additional tests were conducted as required.

