

**mgr inż. Wojciech Mizak,
prof. dr hab. inż. Adam Mazurkiewicz,
dr hab. inż. Jerzy Smolik,
dr inż. Andrzej Zbrowski**

Instytut Technologii Eksploatacji - Państwowy Instytut Badawczy
ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, Polska
E-mail: wojciech.mizak@itee.radom.pl, adam.mazurkiewicz@itee.radom.pl,
jerzy.smolik@itee.radom.pl, andrzej.zbrowski@itee.radom.pl

Problemy dozowania ścierniwa w modelowaniu procesu zużycia erozyjnego.

Słowa kluczowe: *erozja, badania weryfikacyjne, dozowanie ścierniwa, metodyka badań dozownika*

Streszczenie: Artykuł prezentuje charakterystykę problemów występujących podczas badań erozji w warunkach laboratoryjnych. Rozpatrzono zagadnienia związane z precyzyjnym dawkowaniem materiału ściernego w systemie badawczym do symulacji procesu zużycia erozyjnego. Przedstawiono autorskie rozwiązanie układu dozowania erodenta. Zaprezentowano wyniki badań weryfikacyjnych wykonanych w celu określenia dokładności dozowania w zależności od stosowanych parametrów systemu sterowania.

1. Wprowadzenie

Postęp technologiczny determinuje coraz większe wymagania w odniesieniu do nowo projektowanych maszyn i urządzeń, które powinny charakteryzować się wysoką niezawodnością, funkcjonalnością i wydłużonym czasem eksploatacji w ekstremalnych warunkach środowiskowych. Rozwój przemysłu, lotniczego, energetycznego, petrochemicznego, wpłynął na wzrost oczekiwań w stosunku do materiałów konstrukcyjnych i funkcjonalnych, szczególnie w zakresie właściwości mechanicznych, odporności na korozję oraz erozję [8,18]. Efektem formułowanych wymagań jest wzrost liczby zaawansowanych rozwiązań materiałowych, oraz innowacyjnych technologii z zakresu inżynierii powierzchni [5]. Tradycyjne materiały zastępowane są przez lżejsze bardziej złożone strukturalnie kompozycje materiałów, które przy mniejszej masie posiadają możliwość przenoszenia większych obciążeń. Ze względu na obszar zastosowań nowoczesne materiały konstrukcyjne i funkcjonalne wymagają szczegółowych badań uwzględniających proces zużycia erozyjnego. Badania erozji uderzeniowej regulowane są normami w zależności od rodzaju powłoki i materiału konstrukcyjnego.

Metoda przedstawiona w normie ASTM-G76 jest ukierunkowana na badania odporności erozyjnej materiałów konstrukcyjnych oraz funkcjonalnych. Badany materiał poddawany jest oddziaływaniu mieszaniny ścierniwa i powietrza. Erodent opada grawitacyjnie do komory mieszania, po czym łączy się ze sprężonym powietrzem. Powstała mieszanina wydostaje się przez dyszę i uderza w badaną próbkę [12].

Normatywne badania procesu zużycia erozyjnego prowadzone wg PN-76/C-81516 ukierunkowane są na badanie odporności powłok lakierniczych. Badanie prowadzone jest

dwoma metodami. Pierwsza z nich polega na przetarciu w badanej powłoce eliptycznego otworu swobodnie opadającym materiałem ściernym. W drugiej metodzie tarcza o standardowych wymiarach pokryta papierem ściernym, przesuwa się po próbce ruchem posuwisto zwrotnym na odcinku o znormalizowanej długości, pod stałym obciążeniem [13].

Metoda opisana w normie PN-EN ISO 16282 jest przeznaczona do sprawdzania odporności na zużycie erozyjne materiałów ogniotrwałych. Miarą odporności na ścieranie jest objętość materiału startego z płaskiej powierzchni próbki umieszczonej prostopadle do dyszy, przez którą pod ciśnieniem wydmuchiwany jest węgiel krzemu [14,7].

Stosowane są też metody niestandardowe, które w większości przypadków do rozpędzania cząstek ścierniwa wykorzystują siłę odśrodkową powstającą w wirówce. Medium, które wywołuje proces erozji, to mieszanina ścierniwa i wody [15,16].

Ważną rolę przy charakteryzowaniu odporności na zużycie erozyjne materiałów mają badania eksperymentalne, które umożliwiają odtwarzanie rzeczywistego procesu zużycia, oraz zapewniają wyznaczenie przewidywanej trwałości eksploatacyjnej badanego elementu konstrukcyjnego. Badania przeprowadzane zgodnie z obowiązującymi normami: ASTM-G76, PN-76/C-81516, PN-EN ISO 16282 realizowane są w warunkach ustandaryzowanych, które różnią się od rzeczywistych warunków eksploatacji.

Eksploatacja elementów konstrukcyjnych maszyn i urządzeń technicznych zwykle znacznie odbiega od parametrów w zaprezentowanych normach. Odmienne warunki panują w maszynach przepływowych inne w silnikach odrzutowych, wentylatorach, piecach zawieszinowych lub cyklonach. Dotyczy to przede wszystkim wymuszeń termicznych oraz energii zderzenia, które w zasadniczy sposób wpływają na odporność erozyjną materiałów konstrukcyjnych i funkcjonalnych. Różnorodność środowisk eksploatacyjnych, w których występuje zużycie erozyjne, determinuje potrzebę opracowania aparatury badawczej i metod badań symulacyjnych umożliwiających odwzorowanie procesu w sposób zbliżony do rzeczywistej eksploatacji [19,1,20]. Opracowana aparatura może stanowić narzędzie dla badaczy i konstruktorów, pomagające wyjaśnić fizykalne aspekty procesu erozji materiałów.

2. Ogólna koncepcja urządzenia do badania zużycia erozyjnego

Dostępna aparatura badawcza umożliwia przeprowadzanie badań standardowych, jednak możliwość realizacji badań ponadnormatywnych jest ograniczona w znacznym zakresie. Jedyne nieliczne urządzenia zapewniają możliwość przeprowadzania badań w warunkach wysokotemperaturowych [10,17]. Podstawowym ograniczeniem funkcjonalnym jest precyzyjne dozowanie materiału ściernego. Na precyzję dawkowania wpływa wielkość cząstek erodenta, jego wilgotność oraz typ zastosowanego podajnika. Większość stosowanych dozowników nie spełnia wymogów precyzyjnego dostarczania materiału ściernego i nie jest w stanie zapewnić powtarzalności wyników procesu dozowania [8,21,9]. Dokładne badania procesu erozji wymagają opracowania aparatury badawczej nowej generacji, umożliwiającej precyzyjną regulację parametrów procesu badawczego, szczególnie dotyczących precyzji dozowania erodenta.

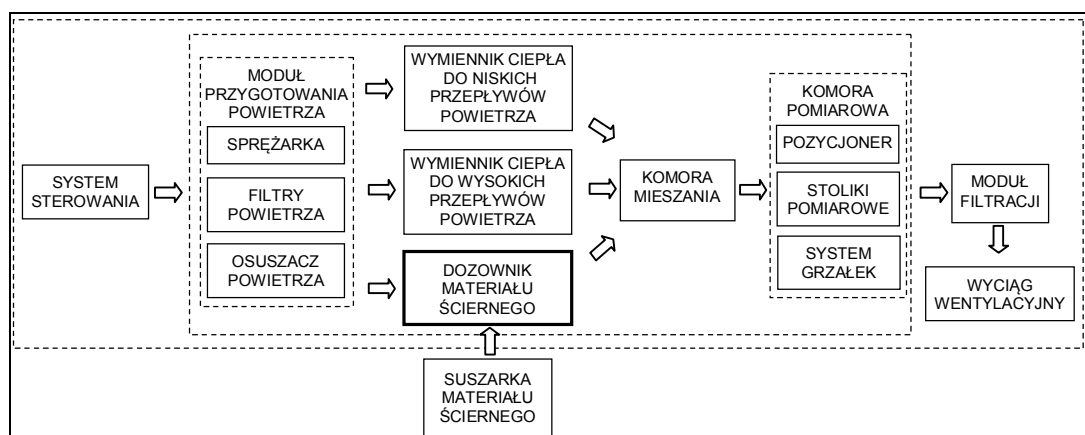
W ITeE-PIB prowadzono prace, których głównym celem było zaprojektowanie aparatury badawczej do odtwarzania mechanizmu zużycia erozyjnego materiałów konstrukcyjnych i funkcjonalnych. Opracowane urządzenie umożliwia przeprowadzanie badań normatywnych oraz niestandardowych. Ważnym założeniem była możliwość precyzyjnego sterowania parametrami procesu erozji w szerokim zakresie, określonym na podstawie rzeczywistych warunków występujących w maszynach narażonych na erozję uderzeniową. Podstawowe założenia dotyczące parametrów pracy urządzenia zaprezentowano w tabeli 1.

Tab. 1. Podstawowe parametry urządzenia do badania zużycia erozyjnego.

Lp.	Opis	Parametry
1	Temperatura strugi powietrza.	20 – 600°C
2	Ciśnienie powietrza.	0 – 0,6MPa
3	Prędkość powietrza, przy wylocie z dyszy.	0 – 100m/s
4	Wydatek ścierniwa.	2 – 10g/min

Zakresy parametrów dobrano w sposób umożliwiający pełną realizację badań wg normy ASTM G 76 oraz badań nienormatywnych wg własnych eksperymentów. Opracowano strukturę systemu do symulacji zużycia erozyjnego (rys.1). Zaproponowana modułowa koncepcja urządzenia pozwala odtwarzać mechanizm erozji uderzeniowej, która powstaje na skutek oddziaływania mieszaniny materiału ściernego i powietrza.

Dostępna aparatura badawcza posiada ograniczoną funkcjonalność w stosunku do pełnego zakresu badań, jakie powinny być realizowane w obszarze zużycia erozyjnego. Instrumentarium wykorzystywane w badaniach erozji nie daje możliwości przeprowadzania badań w powtarzalnych warunkach dla większej ilości próbek. Opracowana modułowa budowa oraz funkcjonalność urządzenia zapewnia elastyczne sterowanie parametrami procesu erozji w szerokim zakresie, umożliwia umieszczenie w komorze pomiarowej ośmiu próbek z różnych materiałów. Dodatkowo każda z próbek może być pochylona pod innym kątem w stosunku do strugi materiału ściernego. Dostępne narzędzia badawcze z zakresu zużycia erozyjnego pozwalają na realizację badań w warunkach wysokotemperaturowych w ograniczonym zakresie. W spotykanych rozwiązaniach niezależne sterowanie temperaturą badanej próbki oraz strugi materiału ściernego i powietrza jest nie możliwe. W opracowanym rozwiązaniu zastosowano dwa niezależne moduły grzewcze, które umożliwiają niezależne sterowanie temperaturą powietrza dostarczanego do komory pomiarowej oraz temperaturą badanej próbki. Zaproponowane rozwiązania stanowią istotną zaletę systemu do symulacji procesu zużywania erozyjnego.



Rys. 1. Schemat blokowy systemu do symulacji procesu zużywania erozyjnego.

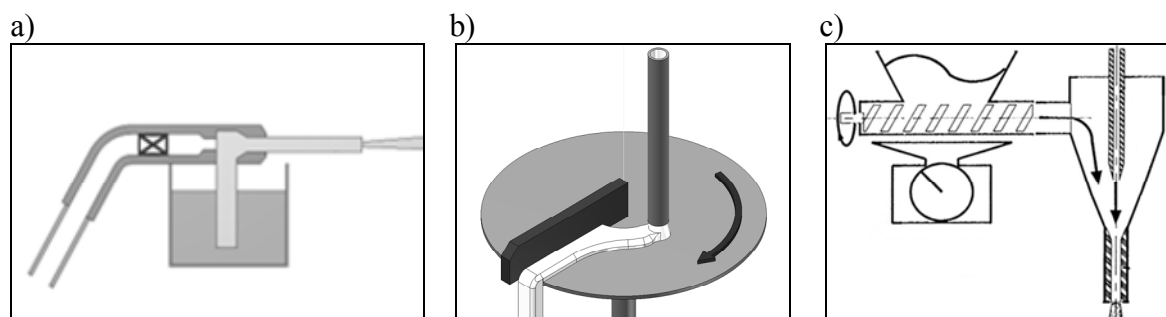
W strukturze urządzenia znajduje się: moduł przygotowania powietrza, wymienniki ciepła, dozownik materiału ściernego, komora mieszania, moduł komory pomiarowej, zespół filtrów oraz system sterowania. W zależności od zadanej wartości natężenia przepływu, przefiltrowane i osuszone powietrze przepływa przez jeden z wymienników. Po ogrzaniu do temperatury wymaganej w badaniach kierowane jest do komory mieszania, gdzie łączy się ze ścierniwem. Powstała mieszanina wydostaje się przez dyszę i bombarduje badaną próbkę. Następnie czynnik gazowy przepływa przez zestaw filtrów, które przechwytyją cząstki zużytego ścierniwa.

W badaniach zużycia erozyjnego istotna jest dokładność, powtarzalność oraz równomierność procesu dozowania ścierniwa. Nieprecyzyjne dawkowanie materiału ściernego, może prowadzić do zaburzenia procesu zużywania, a otrzymane wyniki będą obarczone grubym błędem. Ponieważ dokładność dozowania znacząco wpływa na proces erozji, dokonano analizy dostępnych urządzeń dozujących, opracowano własne rozwiązanie konstrukcyjne, a następnie przeprowadzono weryfikację na stanowisku badawczym.

3. System dozowania erodenta

Dozowanie erodenta jest uzależnione od zastosowanego rozwiązania konstrukcyjnego układu, które wpływa na precyzję oraz równomierność podawania materiału ściernego.

Do grupy najczęściej stosowanych rozwiązań należą układy z eżektorowym systemem zasilania w ścierniwo, za pomocą dozownika tarczowego lub dozownika ślimakowego. W eżektorowy systemie zasilania w ścierniwo wykorzystywany jest efekt Venturiego, w którym struga powietrza samoczynnie zasysa cząstki materiału ściernego z zasobnika (rys.2a). Ilość pobieranego materiału ściernego zależy od prędkości strugi powietrza oraz gramatury erodenta. Takie rozwiązanie wyklucza możliwości niezależnego sterowania ilością dozowanego ścierniwa oraz prędkością mieszaniny, ponieważ ilość pobieranych cząstek materiału ściernego jest uzależniona od prędkości strugi powietrza.



Rys. 2. Systemy dozujące wykorzystywane w stanowiskach do badania zużycia erozyjnego: a) dozownik eżektorowy [20], b) dozownik tarczowy, c) dozownik ślimakowy [4].

W dozowniku tarczowym materiał ścierny z zasobnika, wydostaje się przez dyszę i opada grawitacyjnie na wirujący dysk (rys.2b). Następnie ścierniwo przemieszcza się zgodnie z ruchem obrotowym dysku, po czym kierowane jest, przy pomocy nieruchomego zgarniacza, do komory mieszania. Wydatek ścierniwa zależy od prędkości obrotowej tarczy oraz odległości pomiędzy tarczą i dyszą zasobnika.

Dozowniki ślimakowe stosowane są do dozowania materiałów sypkich metodą objętościową (rys.2c). Ilość odmierzanego materiału ściernego zależy od prędkości obrotowej oraz geometrii ślimaka. Urządzenie umożliwia precyzyjne dozowanie w sposób ciągły, niezależnie od prędkości strugi powietrza.

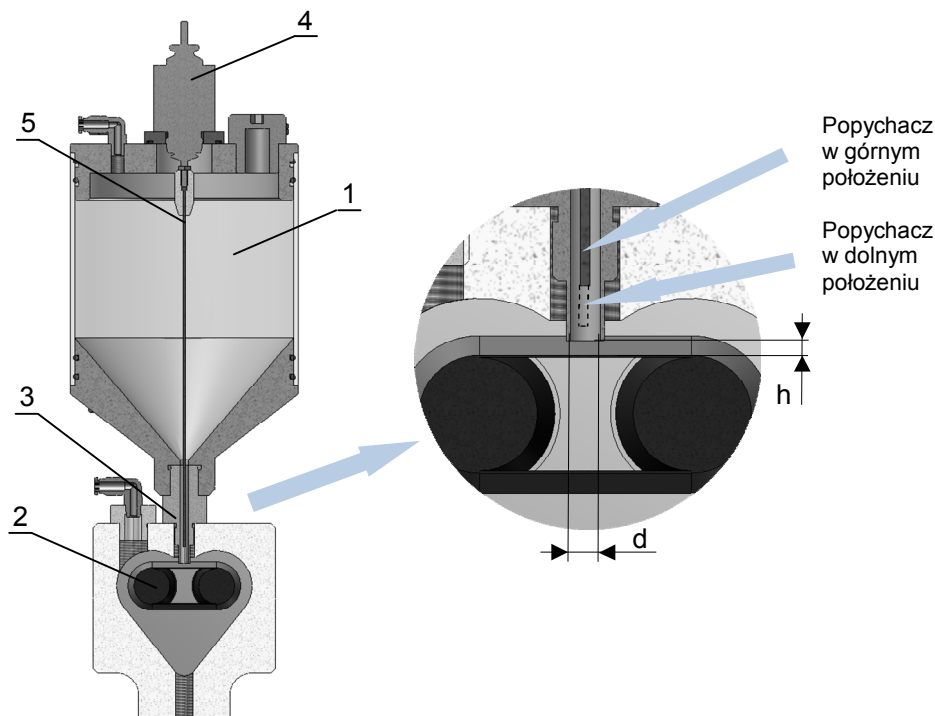
W badaniach zużycia erozyjnego stosowane są materiały ścierne, charakteryzujące się dużą twardością. Dozowniki powinny zapewnić precyzyjne dozowanie oraz odznaczać się odpornością eksploatacyjną na oddziaływanie erodenta. Wśród zaprezentowanych rozwiązań tylko podajnik ślimakowy umożliwia precyzyjne podawanie transportowanego materiału. Negatywne oddziaływanie ścierniwa, na ślimak oraz elementy z nim współpracujące, powoduje jednak szybkie zużywanie poszczególnych elementów, czego efektem może być niekontrolowana zmiana parametrów procesu dozowania.

Na podstawie przeprowadzonej analizy rozwiązań opracowano własną koncepcję dozownika ścierniwa. Głównym założeniem było zaprojektowanie systemu dozowania, który zapewni dawkowanie ścierniwa o gramaturze 20 - 150 μm , z dokładnością $\pm 0,5$ g/min

i wydajnością w zakresie od 2 do 10 g/min. Przyjęte założenia uwzględniają, także parametry określone przez normę ASTM G76.

Opracowany moduł dozowania ścierniwa (rys.3), składa się z podajnika taśmowego, wymiennej kryzy dozującej oraz zasobnika materiału ściernego. W przedstawionym systemie dozującym do transportu ścierniwa zastosowano podajnik taśmowy, wykorzystywany w systemach podawania korundu w maszynach do cięcia wodą. Ze względu na gramaturę erodenta i zakresy dawkowania, odbiegające od wartości stosowanych dla korundu w maszynach technologicznych opracowano autorskie rozwiązanie układu dozowania. W tym celu w układzie podajnika maszyny technologicznej zaimplementowano dodatkowy system pneumatyczny i elektromechaniczny. Wprowadzone układy funkcjonalne zwiększają precyzję regulacji wydatku erodenta oraz zapobiegają niekontrolowanym przerwom w dozowaniu. Zastosowany układ elektropneumatyczny przeciwdziała blokowaniu się drobin erodenta w kryzie dozującej. Główne problemy związane ze stosowaniem transporterów taśmowych w aplikacjach dotyczą, negatywnego oddziaływania materiałów sypkich na pas przenośnika [2,3]. Występują problemy z przepływem i ukierunkowaniem strugi transportowanego materiału w przesypie, co powoduje dodatkowe opory w podajniku, blokowanie się przesypu i zużycie komponentów transportera [6]. Natomiast podczas przesypu transportowanego materiału na taśmę podajnika występują oddziaływania dynamiczne, trudne do modelowania za pomocą metody analitycznej, które powodują nieregularny proces podawania materiałów sypkich [11].

W celu stabilizacji parametrów dozowania, urządzenie wyposażono w elektromagnes z drgającym rdzeniem, który zapobiega zapychaniu kanału w kryzie dozującej.



Rys. 3. Opracowany systemy dozujący: 1 – zasobnik ścierniwa, 2 – podajnik taśmowy, 3 – kryza dozująca, 4 – elektromagnes, 5 – popychacz

Elektromagnes osadzono w górnej pokrywie zasobnika, z prętowym popychaczem zamocowanym do rdzenia. Ze względu na wymiary kryzy dozującej, w której porusza się popychacz, zastosowany został elektromagnes o skoku 6 mm, sile pchającej 30 N oraz częstotliwości drgań od 1,5 do 15 Hz. Podczas pracy elektromagnesu popychacz wykonuje ruchy posuwisto-zwrotne, które umożliwiają płynne przemieszczanie się materiału ściernego

w kryzie. Ilość dozowanego materiału ściernego zależy od prędkości liniowej podajnika, wewnętrznej średnicy kryzy dozującej d oraz odległości h pomiędzy pasem podajnika, a powierzchnią czołową kryzy (rys.3). Wg przyjętych założeń prędkość liniową podajnika można regulować w zakresie od 0,8 do 3,6 m/min. Szerokość taśmy wynosi 12 mm.

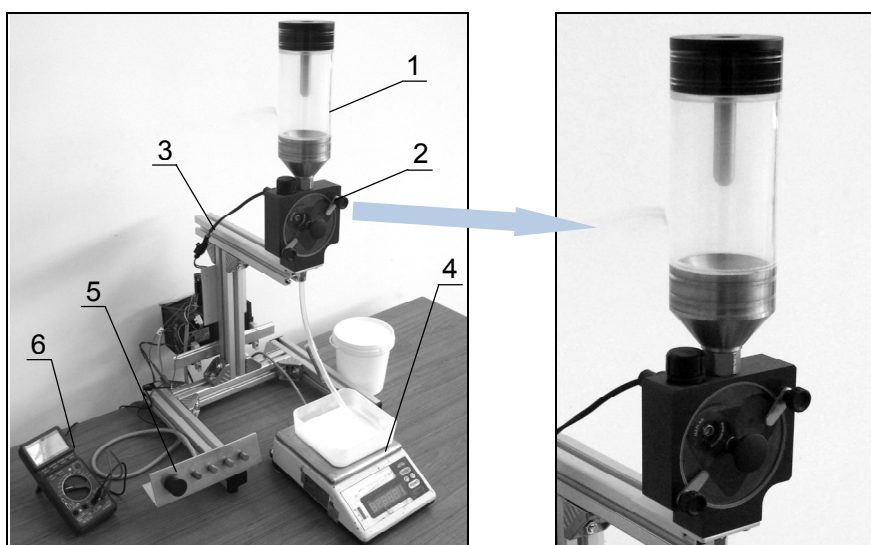
4. Metodyka badań

W celu laboratoryjnej weryfikacji zaprojektowanego modułu dozowania, opracowano metodykę badań oraz wykonano stanowisko badawcze. W badaniach zastosowano metodę przyspieszoną umożliwiającą wstępne rozpoznanie wpływu częstotliwości drgań popychacza i prędkości transportera na dokładność i wydajność procesu dozowania. W celu skrócenia prac eksperymentalnych badania przeprowadzono tylko dla skrajnych wartości drgań elektromagnesu i ośmiu prędkości liniowych podajnika dostępnych w pełnym zakresie regulacji. Parametry badań zaprezentowano w tab.2.

Tab. 2. Parametry badań modułu dozowania

Lp.	Opis	Parametry
1	Rodzaj ścierniwa.	tlenek glinu 50 μ m
2	Temperatura ścierniwa.	20°C
3	Częstotliwość drgań popychacza.	1,5; 15 Hz
4	Prędkości podajnika.	0,8; 1,2; 1,4; 1,8; 2,2; 2,6; 3; 3,6 m/min
5	Liczba testów przy określonej prędkości podajnika.	10
6	Czas trwania pojedynczego testu.	1 min

Badania przeprowadzono z zastosowaniem laboratoryjnego modelu opracowanego dozownika (rys.4). Jako materiał ścierny zastosowano tlenek glinu o gramaturze 50 μ m, który jest zalecany wg normy ASTM G 76. Istotnym elementem, który wpływa na prawidłowy przebieg dozowania jest wilgotność materiału ściernego. W celu ustalenia wilgotności ścierniwa na jednakowym powtarzalnym poziomie, ścierniwo poddano stabilizacji termicznej.



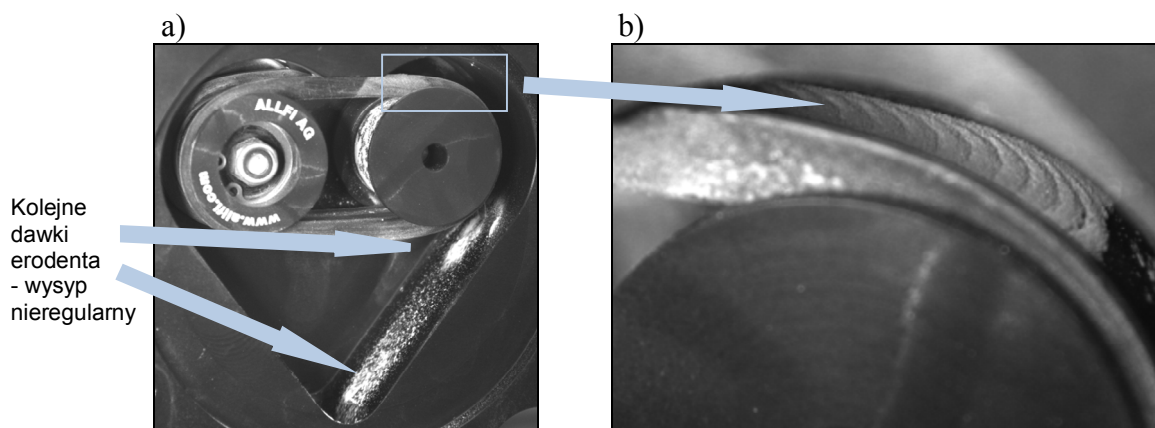
Rys. 4. Model laboratoryjny dozownika: 1 – zasobnik ścierniwa, 2 – podajnik taśmowy, 3 – konstrukcja wsporcza, 4 – waga, 5 – pulpit sterowniczy, 6 – miernik cyfrowy

Materiał ścierny wygrzewano w komorze termicznej przez godzinę, w temperaturze 150°C, a następnie przez dwie godziny studzono do osiągnięcia temperatury około 70°C. Po obróbce w komorze termicznej erodent umieszczono w hermetycznym pojemniku, gdzie był dalej studzony do temperatury otoczenia. Przygotowane ścierniwo wykorzystywano w badaniach jednokrotnie. Do każdej próby, zasobnik zasypywano taką samą ilością ścierniwa, o masie 1,5 kg.

5. Wyniki badań

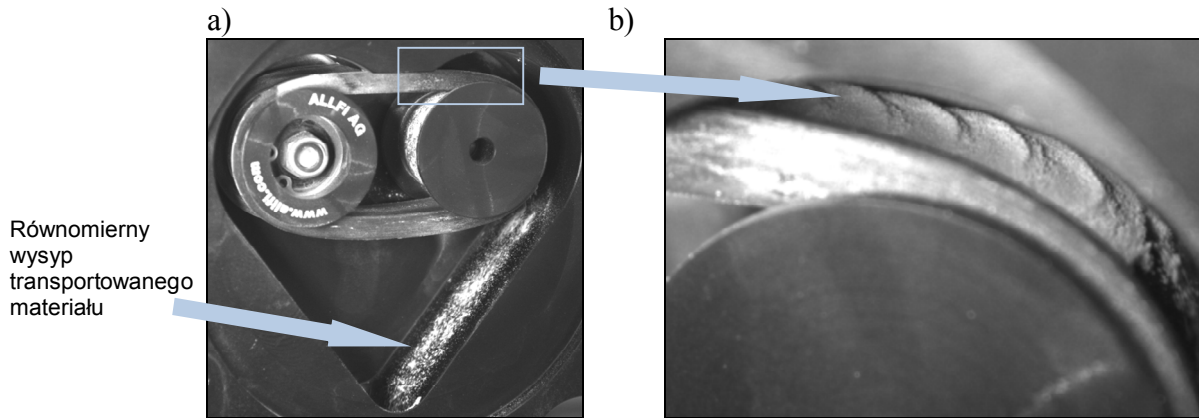
Podczas pracy podajnika z minimalną prędkością liniową 0,8m/min i częstotliwością drgań popychacza 1,5 oraz 15 Hz, proces dozowania zarejestrowano z zastosowaniem szybkiej techniki wizyjnej. Skład zestawu rejestrującego stanowiła kamera Phantom V310 z obiektywem Sigma 24-70 F2.8 oraz panelowy oświetlacz z diodami LED. Obraz zarejestrowano w dwóch ujęciach. Pierwsze ukazuje, w jaki sposób następuje ułożenie pokładu tlenku glinu na taśmie podajnika. Drugie przedstawia równomierność dawkowania erodenta opuszczającego taśmę transportera. Analizę obrazu przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania TEMA Motion firmy image SYSTEMS AB. Na podstawie analizy zarejestrowanych obrazów, uzyskano informacje dotyczące wpływu częstotliwości drgań popychacza na kształt pokładu ścierniwa układanego na poruszającej się taśmie transportera.

Przy częstotliwości drgań elektromagnesu wynoszącej 1,5 Hz, proces dozowania ścierniwa był nierównomierny. Na rys.5a przedstawiono przerywany, pulsacyjny charakter wysypywania ścierniwa z transportera. Wstęgą materiału ściernego układanego na taśmie była niejednolita, zaobserwowano systematyczne występowanie segmentów o kształcie łuski, z wyraźną granicą między kolejnymi obszarami (rys.5b). Poszczególne dawki przy osuwaniu się z pasa transportera opadały pojedynczo, oddzielając się na granicy każdego segmentu, co zaburzało przebieg równomiernego dozowania. Dozowanie miało charakter pulsacyjny.



Rys. 5. Zarejestrowany obraz strugi materiału ściernego: a) struga materiału ściernego po opuszczeniu taśmy transportera, b) struga materiału ściernego na taśmie transportera (częstotliwość drgań popychacz 1,5 Hz, prędkość rejestracji 300 fps, czas naświetlania 2000 μ s).

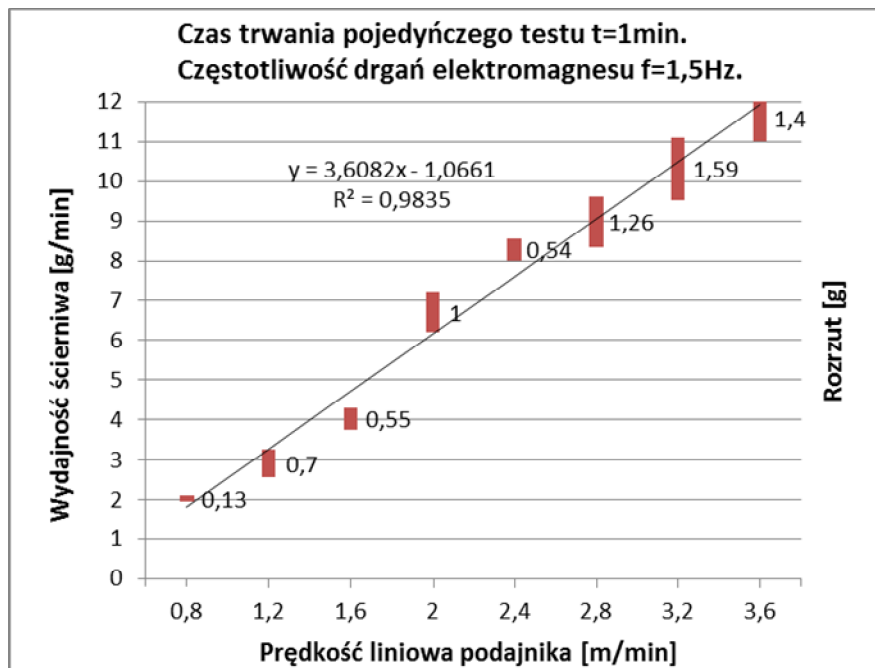
Przy wzroście częstotliwości drgań popychacza do 15 Hz, ścierniwo układało się w bardziej jednolitą wstęgę, niż przy niskich wartościach częstotliwości (rys.6b). Pomimo widocznych nierówności w nałożeniu materiału, nie zaobserwowano niedopuszczalnego wpływu segmentowania. Proces dozowania przebiegał w sposób ciągły, równomiernie, bez zakłóceń (rys.6a).



Rys. 6. Zarejestrowany obraz strugi materiału ściernego: a) struga materiału ściernego po opuszczeniu taśmy transportera, b) struga materiału ściernego na taśmie transportera (częstotliwość drgań popychacza 15 Hz, prędkość rejestracji 300 fps, czas naświetlania 2000 μ s).

Kolejne testy przeprowadzono w celu określenia dokładności oraz powtarzalności dozowania materiału ściernego w pełnym zakresie prędkości liniowej podajnika. Dla każdej z wytypowanych prędkości podajnika, przeprowadzano serię pomiarów wg tab. 2. Dla każdej wartości prędkości podajnika wyznaczono wartość rozrzutu wydatku masowego transportowanej substancji.

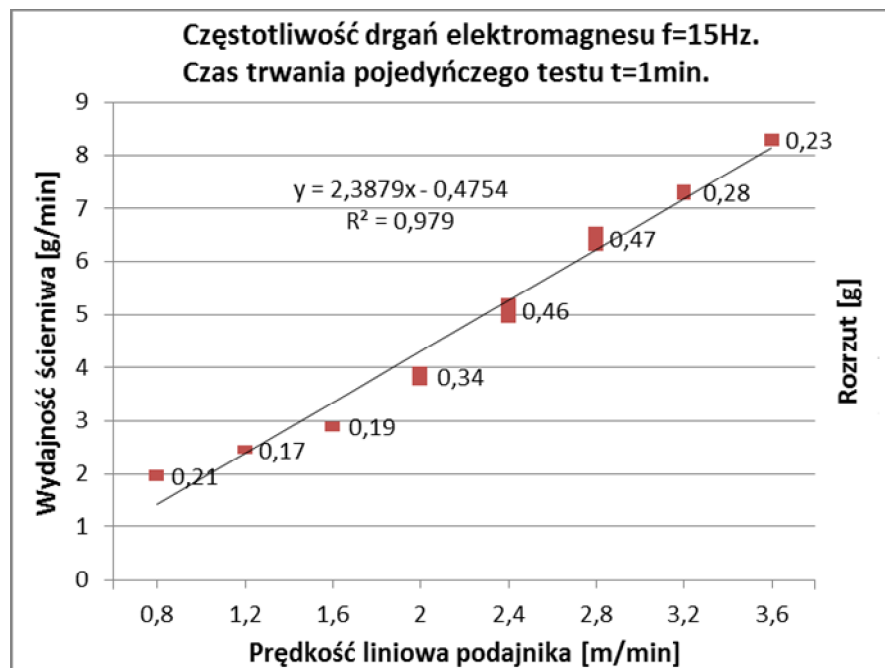
Wyznaczone wartości rozrzutu dla wybranych prędkości podajnika, przy częstotliwości drgań popychacza 1,5 Hz, przedstawiono na rys.7.



Rys. 7. Zakresy rozrzutu oraz wykres wydatku ścierniwa w funkcji prędkości liniowej podajnika.

Dla wyznaczonych wartości rozrzutu przedstawionych na rys.7 w postaci słupkowej, obliczono wartości średnie. Na podstawie średnich wartości rozrzutu opracowano wykres wydajności ścierniwa w funkcji prędkości podajnika. Aproksymację przeprowadzono z zastosowaniem funkcji liniowej o współczynniku korelacji $R^2=0,9835$.

Drugą serię badań przeprowadzono, przy częstotliwości drgań popychacza 15 Hz, pozostałe parametry nie uległy zmianie. Na rys.8 przedstawiono wartości rozrzutu wyznaczonego z serii 10 prób dla wybranych zaznaczonych na wykresie, prędkości liniowych podajnika.



Rys. 8. Zakresy rozrzutu oraz wykres wydatku ścierniwa w funkcji prędkości liniowej podajnika.

Wykres wydajność ścierniwa w funkcji prędkości podajnika dla średnich wartości rozrzutu przedstawiono na rys.8. Wykres aproksymacji przyjmuje kształt funkcji liniowej o współczynniku korelacji $R^2=0,979$.

6. Analiza wyników

Z analizy przeprowadzonych badań wynika, że częstotliwości drgań popychacza wpływa na precyzję dozowania materiału ściernego.

Przy niskiej wartości częstotliwości wynoszącej 1,5 Hz, pokład ścierniwa na taśmie transportera jest niejednorodny, proces podawania erodenta nie jest równomierny, ma charakter pulsacyjny. Ze wzrostem prędkości liniowej podajnika, wzrasta rozrzut otrzymanych wyników. Największy rozrzut występuje przy największych prędkościach podajnika. Wartość rozrzutu zawiera się w przedziale od 0,13 g do 1,59 g, co przekracza dopuszczalne zakresy określone w badaniach normatywnych.

Wzrost częstotliwości drgań do 15 Hz, spowodował spadek rozrzutu, wzrost dokładności oraz powtarzalności procesu dozowania. Pokład materiału ściernego posiada jednolitą strukturę, dozowanie jest procesem równomiernym i jednostajnym, bez zakłóceń. Wyższa częstotliwość drgań popychacza powoduje zmniejszenie różnicy pomiędzy minimalną,

a maksymalną wartością rozrzutu w pełnym zakresie prędkości liniowych podajnika. Rozrzut zawiera się w przedziale od 0,17 g do 0,47 g, co stanowi od 2 do 5,5% maksymalnej wydajności procesu dozowania.

Dla częstotliwości drgań popychacza wynoszącej 15 Hz, funkcja aproksymacji charakteryzuje się wysokim współczynnikiem korelacji. Oznacza to, że proces dozowania

można precyzyjniej opisać zależnością funkcyjną w systemie sterowania urządzenia do badania zużycia erozyjnego. Ze wzrostem częstotliwości następuje spadek wydajności dozowania materiału ściernego, przy identycznych wartościach prędkości liniowej podajnika.

7. Podsumowanie

W laboratoryjnych badaniach procesu zużycia erozyjnego, istotne jest równomierne dozowanie erodenta. Precyzyjne dawkowanie ścierniwa, umożliwia dokładne sterowanie parametrami badań i powtarzalne odwzorowanie zużycia materiałów konstrukcyjnych i funkcjonalnych. W opracowanym urządzeniu dozującym, istotne zadanie spełnia elektromagnes z drgającym popychaczem, który zapobiega zapychaniu się kryzy dozującej.

Badania laboratoryjne opracowanego systemu dozownika wykazały, że częstotliwość drgań popychacza, wpływa na dokładność oraz równomierność procesu dozowania. Przy częstotliwości 1,5 Hz, maksymalna wartość rozrzutu wynosi około $\pm 0,8$ g/min, co znacznie przekracza zakres $\pm 0,5$ g/min, określony w normie ASTM G 76. Natomiast, przy częstotliwości wynoszącej 15 Hz, zaobserwowano spadek wartości rozrzutu do $\pm 0,24$ g/min.

Przeprowadzone badania potwierdziły istotny wpływ wartości częstotliwości drgań popychacza na precyzyjne dozowanie tlenku glinu o gramaturze 50 μm . Zwiększenie częstotliwości drgań spowodowało wzrost dokładności, powtarzalności oraz równomierności dozowania. Ze wzrostem częstotliwości drgań popychacza odnotowano spadek wydatku ścierniwa.

Dalsze badania dozownika zostaną zrealizowane dla zakresu częstotliwości drgań popychacza pomiędzy 1,5-15 Hz, w celu wyznaczenia pełnej charakterystyki dozowania.

Literatura

1. Castberg T S, Johnsen R, Berget J. Erosion of hardmetals: Dependence of WC grain size and distribution, and binder composition. *Wear* 2013; 300: 1-7.
2. Chmiel J, Drzewiniecka B, Sokołowska A, Przybylak P. Problemy zużycia taśm przenośnikowych w transporcie nasion roślin oleistych. *Problemy Eksploatacji* 2010; 4: 207-214.
3. Czuba W, Furmanik K. Analysis of a grain motion in the transfer area of the belt conveyor. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2013; 15 (4): 390-396.
4. Denga T, Bingley M S, Bradley M S A, De Silva S R. A comparison of the gas-blast and centrifugal-accelerator erosion testers: The influence of particle dynamics. *Wear* 2008; 265: 945-955.
5. Drensky G, Hamed A, Tabakoff W, Abot J. Experimental investigation of polymer matrix reinforced composite erosion characteristics. *Wear* 2011; 270: 146-151.
6. Grima A P, Wypych P W. Investigation into calibration of discrete element model parameters for scale-up and validation of particle-structure interactions under impact conditions. *Powder Technology* 2011; 212: 198-209.
7. Jedynek L. Nowa metoda pomiaru odporności na ścieranie w aspekcie dokładności uzyskiwanych wyników. *Ceramika. Polski biuletyn ceramiczny* 2008; 103: 583-590.

8. Kumar S, Satapathy B K, Patnaik A. Thermo-mechanical correlations to erosion performance of short carbon fibre reinforced vinyl ester resin composites. *Materials and Design* 2011; 32: 2260-2268.
9. Laguna-Camacho J R, Marquina-Chavez A, Mendez-Mendez J V, Vite-Torres M, Gallardo-Hernandez E A. Solid particle erosion of AISI 304, 316 and 420 stainless steels. *Wear* 2013; 301: 398-405.
10. Levy A V, Yan J, Patterson J. Elevated Temperature Erosion of Steels. *Wear* 1986; 108: 43-60.
11. Molnár V, Fedorko G, Stehliková B, Kudelás Ľ, Husáková N. Statistical approach for evaluation of pipe conveyor's belt contact forces on guide idlers. *Measurement* 2013; 46: 3127-3135.
12. Norma ASTM G76-07: Standard Test method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets.
13. Norma PN-79/C-81516: Wyroby lakierowe - Oznaczanie ścieralności powłok lakierowych.
14. Norma PN-EN ISO 16282: (2009): Metody badań zwartych formowanych wyrobów ogniotrwałych. Oznaczanie odporności na ścieranie w temperaturze otoczenia.
15. Patent 61949, (1971): Sposób badania erozyjnej ścieralności materiałów oraz urządzenie do stosowania tego sposobu.
16. Piotrowski Z. Zwiększenie odporności na zużycie erozyjne dwufazowego staliwa Cr-Ni przez dodatek azotu i innych pierwiastków międzywęzłowych. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji* 2006; Vol.26, nr1: 105-121.
17. Shimizua K, Naruseb T, Xinbaa Y, Kimurac K, Minamic K, Matsumotod H. Erosive wear properties of high V-Cr-Ni stainless spheroidal carbides cast iron at high temperature. *Wear* 2009; 267: 104-109.
18. Swadźba L, Hetmańczyk M, Mendala B. Problemy degradacji oraz modyfikacji hefnem aluminidkowych powłok ochronnych na elementach turbin silników lotniczych. *Problemy Eksploatacji* 2011; 4: 53-64.
19. Zainul H, Prasetyo E. Materials selection in design of structures and engines of supersonic aircrafts: A review. *Materials and Design* 2013; 46: 552-560.
20. Zbrowski A, Mizak W. Analiza systemów wykorzystywanych w badaniach zużycia erozyjnego. *Problemy Eksploatacji* 2011; 3: 235-250.
21. Zikin A, Antonov M, Hussainova I, Katona L, Gavrilovic' A. High temperature wear of cermet particle reinforced NiCrBSi hardfacings. *Tribology International* 2013; 68: 45-55.