

Prof. dr hab. inż. Franciszek W. PRZYSTUPA
Wydż. Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej,
50-370 Wrocław, ul. Łukasiewicza 7-9,
kom: 663 220 678
email: przyst5@wp.pl lub: franciszek.przystupa@pwr.edu.pl
dom - 52-207 Wrocław, ul. Czołgistów 7

Wrocław, 26 lutego 2018 r.

OPINIA
o rozprawie doktorskiej
mgr inż. Piotr Dudziaka
pt.

Badania zintegrowanej efektywności procesu rozdrabniania materiałów
uziarnionych naddźwiękowym młynem tarczowym

Promotor rozprawy: **prof. dr hab. inż. Józef Flizikowski**, Uniwersytet Techniczno -
Przyrodniczy w Bydgoszczy
Dziedzina: **Nauki techniczne**
Dyscyplina: **Budowa i eksploatacja maszyn**

1. Geneza problematyki rozprawy

Badania procesu rozdrabniania materiałów uziarnionych naddźwiękowym młynem tarczowym wynikają z potrzeby przemysłu na tego rodzaju wiedzę. Przyczynią się do rozwoju metod budowy i eksploatacji młynów o naddźwiękowej prędkości elementu roboczego.

W związku zapotrzebowaniem na materiał rozdrobniony producenci starają się nieustannie konstruować i budować nowe maszyny, które swoją efektywnością przewyższają znane dotychczas rozwiązania. Osobne działania to ulepszanie konstrukcji istniejących. W obu przypadkach niezbędne jest określenie czy urządzenie spełnia kryteria efektywności. Stąd niezbędnym jest przeprowadzanie doświadczalnych badań dla określenia nieznanymi parametrów pracy i uzyskiwanych efektów. Potrzeba znacznych ilości drobno zmielonych materiałów - w bardzo krótkim czasie pobudziła serię badań nad przemysłowymi wersjami młyna tarczowego, który osiąga wyższe prędkości obwodowe. Wykorzystanie drobnych materiałów jest niezbędne w wielu gałęziach przemysłu – np. branża spożywcza czy przemysł farmaceutyczny, itd.

Rozpatrywanym w dysertacji przykładowym obiektem - młynem tarczowym jest maszyna realizująca proces rozdrobnienia wsadu uziarnionego do postaci mikroziaren z prędkością liniową punktu materialnego narzędzia w konstrukcyjnej postaci specjalnej tarczy przy prędkości krawędzi powyżej $343 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

W wywodzie dysertacji wykazano, że wysokie prędkości obwodowe, (w zakresie ok. $500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) pozwalają na rozdrobnienie materiału do mikrometrycznego wymiaru produktu. Zjawiska i procesy zachodzące podczas mielenia, powodują zintegrowane korzyści w jakości geometrycznej, energetycznej, a nawet ekologicznej produktu. Zużywające się w krótkim czasie tarcze, wysokie koszty ich produkcji – są cechami negatywnymi. Zyski i koszty trudno jest modelować istniejącymi dotychczas narzędziami analizy rozdrabniania.

Stwierdza się, iż utrzymanie cech geometrycznych tarczy rozdrabniającej wykonanej ze stali, nie pokrytej żadną powłoką powiększającą odporność na ścieranie w procesie mielenia, umożliwia tylko krótki czas jej eksploatacji. Łopatki na powierzchni bocznej tarczy w trakcie pracy młyna ścierają się do wysokości powierzchni międzyłopatkowej, powodując znaczący spadek jakości otrzymywanego produktu. Uderzanie materiału w wysokoobrotową płaską tarczę nie posiadającą wypustów nie wywołuje rozdrabniania materiału w oczekiwanym stopniu.

Rozwiązania problemów analizowanych procesów Autor dysertacji upatruje w zintegrowanym podejściu do elementów i relacji kształtujących efektywność rozdrabniania, tj.: skuteczność; ekonomiczność; informacyjność; sprawność; eksploatacyjność. Jest to podejście właściwe, ma wszelkie cechy analizy naukowej o aspekcie praktycznym.

Rozwiązanie z efektywnym działaniem w obiegu zamkniętym pozwala na uzyskanie wysokiej jakości ziaren produktu, jednakże zwiększa to zapotrzebowanie na energię elektryczną związaną z okresem potrzebnym na mikro- i nano-drobne zmielenie materiału. Uzyskanie optymalnego kształtu tarczy rozdrabniającej a także zabezpieczonej przed nadmiernymi procesami tribologicznymi pozwoli producentom obniżyć ceny dostarczanych urządzeń oraz części zamiennych. Idą za tym wymierne rezultaty produkcyjne. Uzyskuje się odpowiedniej jakości produkt przy mniejszych nakładach i kosztach pracy. Związane jest to jednak z koniecznością przeprowadzenia badań zintegrowanej efektywności pracy naddźwiękowego młyna tarczowego.

2. Wybór tematu i zakres pracy

Prowadzone analizy i badania, opisane w dysertacji, mieszczą się w dyscyplinie naukowej budowa i eksploatacja maszyn, konkretnie w zakresie konstrukcji tarczowego zespołu roboczego, jego użytkowania oraz wiedzy o wzajemnych relacjach cech konstrukcyjnych tarczy, jej cech ruchu oraz procesach masowych materiałów uziarnionych - tzn. inżynierii rozdrabniania.

Zintegrowanie efektywności procesu rozdrabniania materiałów uziarnionych, poprzez analizowanie, ocenianie i tworzenie, realizuje Autor w oparciu o kryteria efektywnej wydajności, zapotrzebowania mocy, jednostkowego zużycia energii i wielkości cząstek wsadu i produktu.

Podjęcie próby rozwiązania sformułowanych w dysertacji problemów ma na celu zaproponowanie i weryfikację modelu matematycznego umożliwiającego zaprojektowanie zespołu konstrukcji procesowej spełniającego wymagania funkcjonalności, postaci, jakości otrzymywanych ziaren produktu, przy jednoczesnym spadku jednostkowego zapotrzebowania na energię, wynikającego z relacji wydajności masowej i zapotrzebowania mocy i zachowaniu wyższej odporności na ścieranie. Obecnie projektowane są młyny tarczowe, które nie osiągają ponaddźwiękowej prędkości obwodowej. Urządzenia laboratoryjne działają w trybie okresowym - z wielokrotnym przejściem (cyrkulowaniem) materiału przez komorę roboczą i jest to wystarczające do uzyskania produktów o wymiarach ziaren poniżej 20 mikrometrów.

Badania zintegrowanej efektywności procesu rozdrabniania materiałów uziarnionych naddźwiękowym młynem tarczowym to istotny problem budowy i eksploatacji systemów maszynowych, w szczególności ich optymalizacji efektywnościowej.

3. Charakterystyka ogólna.

Praca zawiera 6 zasadniczych rozdziałów, w tym wprowadzenie, dodatkowo zestawienie bibliografii, wykazy tabel, oznaczeń i rysunków; na końcu jeden załącznik i streszczenia. Jest edytowana na 136 stronach, bibliografia obejmuje 117 pozycji różnojęzycznej literatury, jest pewna ilość pozycji własnych lub współautorskich. Praca jest właściwie zilustrowana graficznie a dane uporządkowane są tabelarycznie. Edycja całości jest swoiście uporządkowana, wspomaga śledzenie wyводу.

W pracy przedstawiono stan wiedzy i praktykę problematyki zintegrowanej efektywności procesu rozdrabniania materiałów uziarnionych naddźwiękowym młynem tarczowym w dotychczasowym dorobku budowy i eksploatacji maszyn, na tej podstawie zaproponowano założenia własnej metodyki badań prowadzeniowych oraz analizę, ocenę i rozwój proponowanych konstrukcji w świetle uzyskanych wyników. Szczegółowy zakres dysertacji dotyczy:

- analizy krytycznej problematyki procesu mielenia naddźwiękowym młynem tarczowym,
- opisu głównych teorii rozdrabniania,
- oceny maszyn wykorzystywanych do efektywnego przygotowania nadawy a także maszyn do mielenia materiałów drobno-uziarnionych,
- wskazania charakterystyk metod mielenia materiałów,
- omówienia możliwości prowadzeniowych badań młynów innowacyjnych,
- wprowadzenia projektu modelu 3D tarczy rozdrabniającej o prędkości naddźwiękowej,
- opracowanie modelu matematycznego i metodyki badań zintegrowanej efektywności procesu mielenia z wykorzystaniem naddźwiękowego młyna tarczowego,
- realizacji badań wydajności masowej, zapotrzebowania mocy i jednostkowego zapotrzebowania energii na rozdrabnianie z innowacyjną konstrukcją młyna,
- analizy wyników badań, ocena i rozwój konstrukcji w świetle uzyskanych rezultatów,
- przekazania podsumowania i wniosków.

Po analizie stanu wiedzy postawiono cele pracy:

Celem pracy jest opracowanie i realizacja oryginalnej metodyki badań, zmierzającej do wyznaczenia modelu matematycznego zintegrowanej efektywności procesu rozdrabniania materiałów uziarnionych naddźwiękowym młynem tarczowym dla potrzeb projektowania, konstruowania i wytwarzania, a w konsekwencji użytecznej eksploatacji zespołu mielącego o naddźwiękowej prędkości tarczy rozdrabniającej. Celem badań jest również eksperymentalne wyznaczenie wpływu prędkości procesu mielenia dwóch mikro-uziarnionych materiałów w warunkach wybranych cech konstrukcyjnych zespołu mielącego, o naddźwiękowej prędkości tarczy rozdrabniającej na zintegrowaną efektywność mielenia mikro-ziaren.

4. Cel naukowy, założenia, cele szczegółowe

Jako główny cel pracy przyjęto opracowanie i realizacja oryginalnej metodyki badań, zmierzającej do wyznaczenia modelu matematycznego zintegrowanej efektywności procesu rozdrabniania materiałów uziarnionych naddźwiękowym młynem tarczowym dla potrzeb projektowania, konstruowania i wytwarzania.

Dla osiągnięcia celu sformułowane zostały następujące pytania badawcze:

- Czy zastosowanie nowej konstrukcji procesowej o naddźwiękowej prędkości tarczy rozdrabniającej spowoduje zmniejszenie zapotrzebowania mocy, zintegrowanego zużycia energii oraz zwiększenie wydajności – mielenia mikro-ziaren?
- Jakie wartości parametrów pracy zespołu mielącego o naddźwiękowej prędkości tarczy rozdrabniającej zapewniają najmniejsze zapotrzebowanie mocy, jednostkowe zużycie energii na rozdrabnianie oraz największą wydajność procesu mielenia mikro-ziaren?
- Czy zastosowanie nowej konstrukcji zespołu mielącego o naddźwiękowej prędkości tarczy rozdrabniającej wpłynie na ujednorodnienie rozkładu granulometrycznego produktu?

5. Metodyka rozwiązania problemu

Autorska metoda, zgodna z zaawansowanymi współczesnymi zasadami prowadzenia badań naukowych, opiera się w pierwszej kolejności na systematycznym przeglądzie, opracowaniu oraz krytycznej analizie przyjętych w środowisku naukowym obiektów oraz metod badań w procesach rozdrabniania materiałów uziarnionych naddźwiękowym młynem tarczowym.

W celu przybliżenia problemu zintegrowanej efektywności procesu rozdrabniania materiałów uziarnionych naddźwiękowym młynem tarczowym w dotychczasowym dorobku budowy i eksploatacji maszyn, przeprowadzono analizę stanu wiedzy o inżynierii, teoriach, materiałach, maszynach, procesach i celach rozdrabniania, dla określenia założeń oraz istoty metodyki prowadzeniowych badań własnych.

Najbardziej istotnym zagadnieniem powiązaniem z rozdrabnianiem jest oszacowanie pracy użytecznej potrzebnej do zamiany wsadu w produkt: zmniejszenia wymiaru, objętości; zwiększenia powierzchni właściwej, co bezpośrednio wiąże się z właściwościami materiałów. Dla sprecyzowania i umiejscowienia problemu zintegrowanej efektywności procesu rozdrabniania, wskazano aspekty teoretyczne rozważań i badań efektywnego mielenia w odniesieniu do jednostkowego zapotrzebowania energii. Zaprezentowano teorie rozdrabniania, nazwane przez Molendowskiego podstawowymi teoriami rozdrabniania o charakterze wytrzymałościowym, w powiązaniu z teorię Rittingera, Kicka oraz Bonda.

Przedstawiono krytyczną ocenę stanu i rozwoju środków technicznych do rozdrabniania, badania zintegrowanej efektywności procesu rozdrabniania materiałów uziarnionych naddźwiękowym młynem tarczowym. Istotne opisy dotyczyły sposobów i czynności mielenia.

W zależności od technologii mielenia - przedstawiono zintegrowaną charakterystykę sposobów wykorzystywanych do mielenia materiałów w odniesieniu do wydajności procesu. Wskazano na graniczne wartości parametrów pozyskiwanego rozdrobnienia.

W tym miejscu dysertacji założono, że rozwiązania problemów budowy i eksploatacji innowacyjnego młyna zostaną osiągnięte na drodze doświadczalnych badań prooptymalizacyjnych efektywności procesu rozdrabniania materiałów uziarnionych naddźwiękowym młynem tarczowym, w zintegrowanym podejściu do konstrukcyjnych elementów i relacji kształtujących efektywność rozdrabniania, tj.: skuteczność; ekonomiczność; informacyjność; sprawność; eksploatacyjność.

Przy czym za kryteria efektywności przyjęto: wydajność masową i zapotrzebowanie mocy na skuteczną realizację mielenia; jednostkowe zużycie energii związane z ekonomicznością procesu; stopień rozdrobnienia, relacje wymiaru wsadu i produktu, jako kryterium wpływu systemu sterowania, dostępu informacji, wiedzy na proces i produkt mielenia; sprawność, kryterium podatności systemu na mielenie celowe, użyteczne; trwałość – kryterium funkcjonowania elementów i środków w określonym czasie, otoczeniu, użytkowania, obsługi, zasilania/logistyki systemu mielenia.

Zintegrowana efektywność mielenia w naddźwiękowym młynie tarczowym związane bezpośrednio z konstrukcją tarczy rozdrabniającej. Zastosowane w innowacyjnym procesie rozdrabniania wysokie prędkości obwodowe (naddźwiękowe) stawiają bardzo wysokie wymagania konstrukcyjnym cechom narzędzia. Mają one bezpośredni wpływ na wytrzymałość tarczy a także na efektywne mielenie. Parametry pracy zespołu rozdrabniającego generują konieczność wykorzystania nowoczesnych programów wspomagających projektowanie aby już w pierwszym etapie projektowania uwzględnić ww. parametry pracy, postać geometryczną oraz cechy konstrukcyjne.

Konstrukcja tarczy rozdrabniającej powinna spełniać kryteria zintegrowanej efektywności tj. wykazywać możliwie jak największą wydajność mielenia przy jak najmniejszym zapotrzebowaniu mocy uzyskując tym samym niskie jednostkowe zużycie energii.

Prowadzeniowe badania zintegrowanej efektywności procesu rozdrabniania skierowane zostały na stanowisko badawcze naddźwiękowego młyna tarczowego, którego konstrukcja urządzenia została opatentowana.

Zaproponowano narzędzie rozdrabniające – tarczę zamkniętą w szczelnej stalowej obudowie, której kształt zapobiega aglomeracji rozdrabnianego materiału wewnątrz obudowy. Tarcza zamocowana jest sztywno na wale urządzenia, który spoczywa w hydrodynamicznych łożyskach poprzecznych a także wzdłużnych.

Dla potrzeb badań teoretycznych modelu matematycznego zintegrowanej efektywności procesu rozdrabniania materiałów uziarnionych naddźwiękowym młynem tarczowym założono, iż proces rozdrabniania odbywa się w trakcie sprzężenia hydrokinetycznego pomiędzy pompą i pierścieniem krążącego materiału – wirtualna turbina – wykorzystując energię kinetyczną powietrza, jako substancji roboczej. Koncepcja mielenia w naddźwiękowym młynie tarczowym bazuje na zjawiskach rozdrabniania z wykorzystaniem tarczy rozdrabniającej o naddźwiękowej prędkości obwodowej jej brzegu. Do zjawisk tych należy rzut łopatkowy, infuzja przestrzeni roboczej, tarcie powierzchniowe oraz łączenie tych zjawisk. Założono także, iż na jakość produktu – rozkład granulometryczny – ma wpływ na prędkość obrotowa tarczy rozdrabniającej oraz współczynnik wypełnienia rotora przy optymalnym zasilaniu materiałem wsadowym.

Dla realizacji celu badań przyjęto parametry procesu naddźwiękowego rozdrabniania związane z prędkością tarczy rozdrabniającej, dla której prędkości obrotowe wynoszą od $16\,000\text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ do $20\,000\text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$. W związku z wykorzystaną średnicą tarczy rozdrabniającej otrzymano naddźwiękowe prędkości obwodowe od $347\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do $434\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla prędkości dźwięku w powietrzu. Jako prędkość rozdrabniania przyjęto prędkość obwodową brzegu tarczy rozdrabniającej.

Do prowadzonego rozdrabniania wybrano dwa materiały: cement portlandzki CEM II oraz pył bazaltowy, dla których wielkość ziaren nadawy była zmienna w granicach $1,22\text{ }\mu\text{m} <f> 87\text{ }\mu\text{m}$. Założono, iż wielkość cząstek produktu dla grupy 85% materiałów nie może przekraczać $20\text{ }\mu\text{m}$, a minimalna wydajność nie może być mniejsza niż $100\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$. Analizy rozkładu ziarnowego oraz wielkości cząstek zmielonych materiałów były przeprowadzane w laserowym mierniku cząstek.

Autorskie rozwiązanie problemu zintegrowanej efektywności procesu rozdrabniania materiałów uziarnionych naddźwiękowym młynem tarczowym, na podstawie badań cyfrowych zjawisk aerokinetycznych, uzupełniło wiedzę i aspekty analityczne zagadnień cząstkowych. Określono kinematyczne i dynamiczne charakterystyki ruchu elementów zespołu konstrukcji według idei mielenia aerokinetycznego wirnika tarczy (pompy wirowej) i pierścienia mielonego materiału (wirtualnej turbiny), zaś od strony praktycznej momenty obrotowe, moc, sprawności, wydajności, jednostkowe zużycie energii – tzn. podstawowe parametry zintegrowanej efektywności mielenia.

W konstrukcji łopatki wirnika pompy wymuszają zmianę pędu materiału przepływającego poprzez kanały międzyłopatkowe, dając wynikowo wydajności i zapotrzebowania mocy w procesie mielenia. Połączenie wirnika pompy z wałem wejściowym sprzyja ocenie momentów obrotowych w łopatkach wirnika powodujących cyrkulację materiału wewnątrz obudowy, którego energia kinetyczna powstała w rezultacie zamiany energii mechanicznej generowanej przez ruch obrotowy wału napędzającego wirnik. Pierścień wirującego materiału wirtualnej turbiny przenosi powstający na łopatkach moment obrotowy na obudowę komory roboczej. Przedstawione zależności nie pozwalają jednak wnioskować o chwilowych i średnich wartościach momentu obrotowego, mocy w układzie oraz o zużyciu energii.

Analiza teoretyczna wyznaczenia modelu matematycznego zintegrowanej efektywności procesu rozdrabniania materiałów uziarnionych naddźwiękowym młynem tarczowym wykazała konieczność przeprowadzenia uzupełniających badań doświadczalnych dla uzyskania niezbędnych danych.

W tej części pracy przedstawiono założenia do realizacji badań zintegrowanej efektywności procesu rozdrabniania materiałów uziarnionych w naddźwiękowym młynie tarczowym. Przedstawiono także nową koncepcję opisu mielenia aerokinetycznego, której podstawą jest sprzężenie wirnika pompy oraz wirtualnej turbiny (pierścienia krążącego materiału). Wskazany został obiekt badań oraz stanowisko badawcze. Opracowano model matematyczny opierający się na aerokinetycznym podejściu do zagadnienia rozdrabniania w młynie. Dokonano prezentacji materiałów i oprogramowania wykorzystanego do badań, począwszy od oprogramowania komputerowego wspomagania projektowania CAD poprzez oprogramowanie wspomagające prace inżynierskie aż do oprogramowania wykorzystywanego do obliczeń statystycznych. Wskazano także narzędzia adaptowane do realizacji badań nad rozkładem ziarnowym nadawy i produktu rozdrabniania.

Zrealizowano badania rozkładu ziarnowego dla przyjętych do prób materiałów uziarnionych - cementu portlandzkiego oraz pyłu bazaltowego.

W dalszej kolejności przeanalizowano wyniki pomiarów poprzez analizy statystyczne, analizy związków pomiędzy zmiennymi, zintegrowanej wydajności, zapotrzebowania mocy, jednostkowego zużycia energii oraz analizę wymiarów produktu rozdrabniania i stopnia rozdrobnienia. Dokonano ogólnej analiza zintegrowanej efektywności mielenia oraz podsumowano analizy efektywności.

Dokonano prowadzeniowej oceny, uzasadniającej wdrożenie przedstawionej konstrukcji narzędzia rozdrabniającego – od struktury tarczy do programu produkcyjnego. Przedstawione narzędzie rozdrabniające dzięki swojej unikalnej postaci może zostać zastosowane tylko w naddźwiękowym młynie tarczowym. W konkluzji przekazano, że przedstawiona konstrukcja tarczy rozdrabniającej nie zostanie wdrożona do produkcji.

W skład przeprowadzonej oceny prowadzeniowej wchodziło kilka zmiennych. Pierwszym, jednym z dwóch najistotniejszych kryteriów było spełnienie warunków bezpieczeństwa pracy urządzenia. Wyniki analizy wytrzymałościowej wykazały, iż postać tarczy jak i materiał, z którego została ona wykonana spełnia wymogi dotyczące wytrzymałości w trakcie ruchu obrotowego przy nastawach maksymalnej prędkości obrotowej. Drugim kryterium efektywności procesu, który również wchodził w skład pozytywnej oceny prowadzeniowej, była wydajność masowa. Naddźwiękowy młyn tarczowy wykorzystujący opisywaną tarczę, w porównaniu z innymi, dostępnymi na rynku młynami tarczowymi, wykazuje znacznie wyższe wydajności procesu rozdrabniania. Trzecim oraz czwartym kryterium zintegrowanej efektywności była moc i jednostkowe zużycie energii. Wartości tych kryteriów były akceptowalne.

Kolejne kryterium – stopień rozdrobnienia – to kryterium pośrednie. Zależy nie tylko od wielkości cząstek produktu ale także od wielkości cząstek nadawy - stąd do oceny prowadzeniowej przyjęto jako czynnik wpływający na pozytywną ocenę. Inne kryterium w tej ocenie to poziom generowanego hałasu. W tym przypadku hałaśliwość stanowi czynnik negatywnej oceny.

Najistotniejszym kryterium w ocenie prowadzeniowej jest wielkość cząstki produktu. Ponieważ założono, iż wielkość cząstek produktu nie może przekroczyć wartości $20\ \mu\text{m}$ - to kryterium wpływa negatywnie na ocenę prowadzeniową. Dla obu materiałów spełniono powyższe kryterium tylko jednorazowo, dla rozdrabnianego cementu portlandzkiego przy $20\ 000\ \text{obr}\cdot\text{min}^{-1}$ natomiast dla pyłu bazaltowego dla $18\ 000\ \text{obr}\cdot\text{min}^{-1}$. Spełnienie powyższego kryterium dla wszystkich badanych prędkości pozwoliłoby na obniżenie zapotrzebowania na moc i jednostkowego zużycia energii przy zachowaniu wyższej wydajności w stosunku do dostępnych młynów tarczowych oraz otrzymywaniu założonych wielkości cząstek produktu rozdrabniania.

Udzielono odpowiedzi na pytania badawcze:

- zastosowanie nowej konstrukcji procesowej o naddźwiękowej prędkości tarczy rozdrabniającej (z przedziału badawczego), spowodowało zmniejszenie zapotrzebowania mocy, zintegrowanego zużycia energii, jednakże nie spowodowało zwiększenia wydajności mielenia mikro-ziaren,

- dla osiągnięcia stanu najmniejszego zapotrzebowania na moc w trakcie rozdrabniania ziaren materiału parametr prędkości ruchu obrotowego narzędzia musi uzyskać nastawę generującą prędkość liniową $347 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, nie jest to równoznaczne z uzyskaniem największej wydajności,
- w celu uzyskania największej wydajności procesu mielenia mikro-ziaren parametr prędkości narzędzia rozdrabniającego musi uzyskać nastawę wyższą o ok. 25%,
- zastosowanie nowej konstrukcji zespołu mielącego o naddźwiękowej prędkości tarczy rozdrabniającej (z przedziału badawczego) wpłynęło istotnie na ujednorodnienie rozkładu granulometrycznego produktu.

Przeprowadzone badania nad zintegrowaną efektywnością procesu rozdrabniania materiałów uziarnionych naddźwiękowym młynem tarczowym, w wymiarze teoretycznym wpłynęły na ewolucję budowy i eksploatacji młynów tarczowych w zakresie konstrukcji i eksploatacji tarczy rozdrabniającej, a także na rozwój idei naddźwiękowego mielenia. Przedstawiono istotne wnioski, typu poznawczego, praktycznego jako wytyczne do dalszych badań i zastosowań wdrożeniowych.

Opracowano i zrealizowano oryginalną metodykę badań cyfrowych i doświadczalnych, która doprowadziła do wyznaczenia i oceny modelu matematycznego zintegrowanej efektywności procesu rozdrabniania dwóch mikro-uziarnionych materiałów naddźwiękowym młynem tarczowym, dającej podstawy racjonalnego projektowania, konstruowania i wytwarzania, a w konsekwencji użytecznej eksploatacji zespołu mielącego o naddźwiękowej prędkości tarczy rozdrabniającej.

Na drodze eksperymentalnej wyznaczono wpływ prędkości procesu mielenia dwóch mikro-uziarnionych materiałów w warunkach wybranych cech konstrukcyjnych zespołu mielącego. Wskazano istotne dla budowy i eksploatacji młynów rozwiązania, które umożliwiły wyznaczenie modelu matematycznego dla wchodzących w skład zintegrowanej efektywności. Przedstawiono konstrukcję narzędzia rozdrabniającego, spełniającego wymagania bezpieczeństwa pracy dla realizacji procesu wytwarzania tarczy rozdrabniającej o ponaddźwiękowej prędkości jej brzegu. Badania doświadczalne pozwoliły na udzielenie odpowiedzi dotyczącej trwałości przedstawionej konstrukcji narzędzia. Zastosowanie nowej konstrukcji tarczy rozdrabniającej o naddźwiękowej prędkości obwodowej spowodowało zmniejszenie zintegrowanego istotne zużycia energii. Zastosowanie zespołu mielącego wpłynęło na ujednorodnienie rozkładu granulometrycznego zarówno w przypadku rozdrabnianego cementu portlandzkiego jak i dla pyłu bazaltowego, co potwierdzają wyniki analiz granulometrycznych nadaw i produktów rozdrabniania.

Badania zintegrowanej efektywności procesu rozdrabniania wykazały, iż w porównaniu z badaniami pilotażowymi, największy średni stopień rozdrobnienia w prowadzonych badaniach doświadczalnych uzyskano dla prędkości rozdrabniania $434 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ o wartości 1,46 dla rozdrabnianego cementu portlandzkiego, natomiast w grupie pyłu bazaltowego największy średni stopień rozdrobnienia wyniósł 1,52 dla prędkości $391 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

W stosunku do istniejących młynów tarczowych uzyskano znacznie większą wydajność procesu rozdrabniania materiałów uziarnionych. Każdy z materiałów poddanych rozdrabnianiu w naddźwiękowym młynie tarczowym uzyskał lepsze wyniki w wielkości cząstek produktu w różnych prędkościach rozdrabniania, co wskazuje na konieczność indywidualnego podejścia do rozdrabniania różnych materiałów.

Stwierdzono, że należy poddać optymalizacji postać szybkoobrotowego narzędzia – tarczy – rozdrabniającego, wprowadzając zmiany w zmiennych logicznych, skalarnych i wymiarowych, związanych z występującymi w narzędziu łopatkami. Rozwiązanie konstrukcyjne z jedną tarczą rozdrabniającą pozwala na obniżenie kosztów związanych z niezbędną wymianą narzędzia rozdrabniającego zużywającego się w krótkim czasie. Należy także rozważyć możliwości pokrycia tarczy powłokami zabezpieczającymi powierzchnie robocze przed nadmiernym zużywaniem.

Możliwości zróżnicowania parametrów pracy naddźwiękowego młyna tarczowego pozwala na przeprowadzenie większej liczby badań zintegrowanej efektywności procesu rozdrabniania materiałów uziarnionych, co przyczyni się do bardziej dokładnego sprawdzenia różnic w zapotrzebowaniu mocy, wydajności masowej, jednostkowym zużyciu energii a także wielkości cząstek produktu i stopnia rozdrobnienia, przez które efektywność zintegrowana, będąca przedmiotem niniejszej rozprawy, jest charakteryzowana.

Stwierdzić można jednocześnie, że rozdziały krytyczne dotyczące analizy stanu dziedziny mogą być podstawą dla edycji niezwykle ciekawej monografii w zakresie realizacji i wdrożeń procesów rozdrabniania materiałów uziarnionych naddźwiękowym młynem tarczowym.

6. Uwagi krytyczne

W opinii recenzenta w formalnym zapisie pracy można wykazać istotną dychotomię pomiędzy niezwykle ciekawym naukowo meritum pracy a jej prezentacją w postaci monografii. Recenzent ma świadomość, że każde dzieło zmieniałoby swój wyraz przy każdym innym autorze. Jednak uwagi odnośnie tej strony wydają się niezbędne do przedstawienia.

1. Już sam tytuł nie jest poprawny. Doktorat to zrealizowany cel – nowa metoda, odkrycie, itp. Tytułowe „Badanie..” nie może być celem doktoratu, jego wynik – tak. Badanie zintegrowanej efektywności procesu rozdrabniania materiałów..... można prowadzić latami nie uzyskując żadnego wyniku. Tutaj mamy nową metodę, nowatorski proces, konstrukcję – tytuł powinien to wyrazić.
2. Rozdział piąty (Analiza wyników badań) to w istocie dwa rozdziały. Chyba najważniejsze dla pracy. Pierwszy dotyczy realizacji materialnej badań, drugi rzeczywiście zajmuje się ich analizą. Dodatkowo etykietowanie słowne kolejnych podrozdziałów kolejnymi liczbami jest dość oryginalnym pomysłem.
3. Jako główny cel pracy przyjęto właściwie opracowanie i realizacja oryginalnej metodyki badań, zmierzającej do wyznaczenia modelu matematycznego zintegrowanej efektywności procesu rozdrabniania..... . Ale dla osiągnięcia celu sformułowane zostały trzy pytania badawcze, dotyczące uzyskania pożądanej jakości efektu procesowego. Te pytania należało zastąpić szeroką tezą, zbudowaną z przeformułowanych pytań, którą w istocie udowodniono!

Kilka uwag formalno - merytorycznych

1. Schematy na rys. 4.4 a, b są tak uproszczone, że z nich nic nie wynika – np. aż prosi się o prezentację zmian prędkości strugi na średnicy (a) czy przedstawienie niezwykle istotnych przyspieszeń przejściowych pomiędzy rurą zasilającą, tarczą i wylotem (b). Brakuje przyspieszeń, nawet pokazanych schematycznie. Wektor V_2 zaczyna się przy krawędzi tarczy i kończy przy krawędzi drugiej. Jest to błąd.
2. Jako prędkość rozdrabniania przyjęto prędkość obwodową brzegu tarczy rozdrabniającej – jest to kolejne uproszczenie, wymagające uzasadnienia.
3. W zależności 4.1 użyto błędnego zapisu złożonego funkcjonału. Czytelnik może odczytać ten zapis jako zrównanie efektywności z konstrukcją, procesem, i materiałem.
4. Kilka fragmentów pracy znalazło się chyba w niej przypadkowo – np. w rozdziale 4.1 schemat metodyki badań naukowych, czy w rozdziale 4.4.1. normowe szczegóły składów stali, jej cech wytrzymałościowych itp.
5. Recenzent stwierdza również braki w zakresie prób publikacyjnego wyjścia z metodą na szersze obszary krajowe i międzynarodowe poprzez edycję wyników częściowych już w czasie realizacji zadań pracy. Ten brak może być łatwo spełniony przez Autora na wiele znanych sposobów – poprzez udział w międzynarodowych spotkaniach dziedzinowych czy publikacje w recenzowanych periodykach.

7. Ocena formalna

Praca jest spójna, poprawna edytorsko, jej odbiór mimo wskazanych braków formalnych jest łatwy. Pojawia się kilka drobnych błędów językowych. Są to jednak błędy drugorzędne w odbiorze i w jakości pracy. Praca jest napisana poprawnie, występują przejęzyczenia, ale nie wystąpiły w niej istotniejsze błędy natury językowej. Stosowana terminologia jest właściwa. Edycja i poziom graficzny są na bardzo wysokim poziomie.

Upřednie uwagi i zastrzeżenia nie umniejszają merytorycznej wartości tej niezwykle ciekawej pracy, którą **oceniam bardzo pozytywnie**. Prezentowana praca **może być kontynuowana w zakresie uniwersalizacji wyników** przez Autora. Uwzględnienie w publikacjach uwag recenzenta pozbawi ograniczeń stosowalności metody.

Stwierdzam, że realizowany cel pracy odpowiada w pełni zawartości dysertacji. **Poczyniono istotny krok naukowy i praktyczny w badaniach zintegrowanej efektywności procesu rozdrabniania materiałów uziarnionych naddźwiękowym młynem tarczowym, co wzmacnia wiedzę z zakresu problematyki budowy i eksploatacji systemów maszynowych, w szczególności ich optymalizacji efektywnościowej.**

Cel pracy, czyli opracowanie i realizacja oryginalnej metodyki badań, zmierzającej do wyznaczenia modelu matematycznego zintegrowanej efektywności procesu rozdrabniania materiałów uziarnionych naddźwiękowym młynem tarczowym dla potrzeb projektowania, konstruowania i wytwarzania został w pełni zrealizowany.

Dla osiągnięcia celu sformułowane zostały pytania badawcze, na które udzielono satysfakcjonujących odpowiedzi.

Przedstawione wyniki otwierają nowe możliwości w dziedzinie budowy i eksploatacji maszyn a w szczególności dla badań zmierzających do wyznaczenia modelu matematycznego zintegrowanej efektywności procesu rozdrabniania materiałów uziarnionych naddźwiękowym młynem tarczowym dla potrzeb projektowania, konstruowania i wytwarzania.

Literatura dobrana jest właściwie, wszystkie pozycje aktualnej i różnojęzycznej literatury zostały wykorzystane. Przegląd literatury ma cech monografii – może być wykorzystany jako element szerszej monografii lub poradnika inżynierskiego czy podręcznika akademickiego.

Autor wykonał olbrzymie, pracochłonne zadanie nie popełniając dostrzegalnych i istotnych błędów. Metoda jest sprawdzona, wyniki pracy mogą być wdrożone.

8. Wnioski końcowe

Poprawność i oryginalność postawionego metodologicznego celu pracy jest niepodważalna. Stwierdzam wysoki stopień realizacji postawionego celu.

Analiza autorska źródeł literatury światowej i stanu techniki świadczy o znacznej wiedzy autora w dyscyplinie naukowej. Stwierdzić można nowatorstwo i oryginalność rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i stanu techniki reprezentowanych przez literaturę światową. Potwierdzić można istotne znaczenie uzyskanych wyników dla dyscypliny naukowej. Autor dysertacji wykazał umiejętności przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników.

Podstawowe cele pracy, uprzednio wskazane zostały w pełni zrealizowane.

Wypełniając obowiązek recenzenta oznajmiam, że postawiony przez Autora cel dysertacji został osiągnięty. Zgodnie z moją oceną i sumieniem stwierdzam, że rozprawa

mgr inż. Piotr Dudziaka pt.

***Badania zintegrowanej efektywności procesu rozdrabniania materiałów uziarnionych
naddźwiękowym młynem tarczowym***

spełnia ustawowe wymagania stawiane pracom doktorskim, wg Ustawy o Stopniach i Tytułach Naukowych z dnia 14.03.03, Dz. U. 2003 nr 65 poz. 595, w szczególności art. 13, ustęp 2. Stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony w dyscyplinie Mechanika i Budowa Maszyn.

Prof. dr hab. inż.

Franciszek W. PRZYSTUPA