



Politechnika Koszalińska
Wydział Mechaniczny

dr inż. Paweł Sutowski

Autoreferat

Załącznik 2a

do wniosku o przeprowadzenie postępowania
habilitacyjnego w dziedzinie Nauk Technicznych
w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn

Koszalin, 2019

Spis treści

1.	Charakterystyka habilitanta.....	5
1.1.	Imię i nazwisko.....	5
1.2.	Uzyskane stopnie i tytuły naukowe.....	5
1.3.	Przebieg pracy zawodowej.....	5
2.	Wskazanie osiągnięcia naukowego.....	6
2.1.	Syntetyczny opis osiągnięć naukowych zawartych w monografii.....	6
2.2.	Znaczenie naukowe i uytylitarne osiągnięcia naukowego.....	10
3.	Charakterystyka osiągnięć naukowo-badawczych w zakresie teoretycznych oraz doświadczalnych podstaw monitorowania i oceny wybranych procesów obróbki ściernej oraz ścierno-erozyjnej z zastosowaniem wysokoczęstotliwościowego sygnału emisji akustycznej.....	12
3.1.	Charakterystyka porównawcza zjawiska kruchego pęknięcia pojedynczych ziaren ściernych różnego rodzaju i gatunku w odniesieniu do zmian wartości deskryptorów emisji akustycznej.....	12
3.2.	Określenie zbioru parametrów sygnału emisji akustycznej właściwych do charakterystyki procesu mikroskrawania pojedynczym ziarnem ściernym.....	16
3.3.	Wyznaczenie wpływu wartości parametrów szlifowania na zmiany sygnału emisji akustycznej oraz powiązanie parametrów sygnału z elementarnym obciążeniem ziarna ściernego w strefie szlifowania.....	19
3.4.	Charakterystyka zmian zdolności skrawnej ściernicy przy pomocy syntetycznego wskaźnika zmian geometrycznych czynnej powierzchni oraz deskryptorów sygnału emisji akustycznej.....	22
3.5.	Opracowanie metodyki oceny zmian chropowatości powierzchni przedmiotu szlifowanego przy pomocy analizy sygnału emisji akustycznej.....	27
3.6.	Ocena stanu naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego przy zastosowaniu analizy wartości skutecznej i wskaźnika właściwej energii impulsów sygnału emisji akustycznej.....	30
3.7.	Opracowanie metodyki oceny procesu szlifowania materiału typu Inconel® Alloy 600 z zastosowaniem sygnału emisji akustycznej.....	34
3.8.	Opracowanie metodyki monitorowania i oceny hybrydowego procesu szlifowania elektroerozyjnego z zastosowaniem sygnału emisji akustycznej w środowisku wyładowań elektrycznych.....	38
3.9.	Analiza i ocena chropowatości oraz odchyłki płaskości powierzchni obrabianej w procesie szlifowania elektroerozyjnego z zastosowaniem sygnału emisji akustycznej.....	44
3.10.	Opracowanie metodyki predykcji zużycia ściernicy przy zastosowaniu wybranych deskryptorów sygnału emisji akustycznej w procesie szlifowania elektroerozyjnego.....	46
3.11.	Wyznaczenie wartości energii kinetycznej kształtek oraz określenie energii kumulowanej przez przedmiot obrabiany z zastosowaniem analizy symulacyjnej kinematyki wsadu roboczego w wygładzarce rotacyjno-kaskadowej.....	48
3.12.	Opracowanie metodyki oceny energii wsadu roboczego w wygładzarce rotacyjnej za pomocą sygnału emisji akustycznej.....	53

3.13. Analiza i ocena zmian w widmie sygnału emisji akustycznej zarejestrowanego dla różnych prędkości obrotowych komory roboczej wygładzarki, w warunkach przejścia przedmiotu obrabianego przez całą szerokość strumienia kształtek ściernych.....	57
3.14. Wyznaczenie wpływu energii kinetycznej oraz potencjału obróbczego strumienia kształtek roboczych w procesie wygładzania kształtkami ściernymi na parametry mikronierówności i izotropowość powierzchni obróbce.....	59
4. Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze.....	61
5. Charakterystyka działalności naukowej.....	70
6. Charakterystyka działalności dydaktycznej oraz organizacyjnej.....	71

1. Charakterystyka habilitanta



ORCID:

0000-0003-2863-5414

1.1. Imię i nazwisko

PAWEŁ SUTOWSKI

1.2. Uzyskane stopnie i tytuły naukowe

- **2008** – stopień **doktora** nauk technicznych w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn uzyskany na Wydziale Mechanicznym Politechniki Koszalińskiej. Tytuł rozprawy: *”Ocena okresu trwałości ściernic z wykorzystaniem wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej w procesie obwodowego szlifowania płaszczyzn”*, promotor: prof. dr hab. inż. Jarosław Plichta, recenzenci: prof. dr hab. inż. Wojciech Kacalak, dr h.c. multi. (Politechnika Koszalińska), prof. dr hab. inż. Bogdan Kruszyński (Politechnika Łódzka).

Rozprawa doktorska obroniona z wyróżnieniem.

- **2001** – tytuł zawodowy **magistra** inżyniera kierunku Mechanika i Budowa Maszyn uzyskany na Wydziale Mechanicznym Politechniki Koszalińskiej, kierunek: Mechanika i Budowa Maszyn, specjalność: Inżynierskie Zastosowania Komputerów. Tytuł pracy: *”Modelowanie w programie I-DEAS w odniesieniu do artykułów AGD”*, promotor: prof. dr inż. Tadeusz Karpiński, recenzent: prof. dr hab. inż. Jarosław Plichta.

1.3. Przebieg pracy zawodowej

Przebieg pracy naukowej:

- | | |
|--------------------------------|--|
| 01.10.2008 – 31.09.2018 | POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Produkcji, ul. Raławicka 15-17, PL 75-620 Koszalin. Zespół Badawczo-Dydaktycznym Planowania i Sterowania Produkcją. Stanowisko: adiunkt. |
| 01.03.2008 – 31.09.2008 | POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Produkcji, ul. Raławicka 15-17, PL 75-620 Koszalin. Zespół Badawczo-Dydaktycznym Planowania i Sterowania Produkcją. Stanowisko: asystent. |

Przebieg pracy dydaktycznej:

- | | |
|--------------------------------|--|
| 01.10.2018 – teraz | POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Produkcji, ul. Raławicka 15-17, PL 75-620 Koszalin. Zespół Badawczo-Dydaktycznym Planowania i Sterowania Produkcją. Stanowisko: starszy wykładowca. |
| 01.10.2008 – 31.09.2018 | POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Produkcji, ul. Raławicka 15-17, PL 75-620 Koszalin. Zespół Badawczo-Dydaktycznym Planowania i Sterowania Produkcją. Stanowisko: adiunkt. |

Przebieg pracy dydaktycznej:

- 01.10.2013 – 31.09.2014** PAŃSTWOWA WYŻSZA SZKOŁA ZAWODOWA w Wałczu, Instytut Politechniczny Wydziału Społeczno-Inżynieryjnego, ul. Wojska Polskiego 99, 78-600 Wałcz. Stanowisko: **wykładowca**.
- 01.03.2008 – 31.09.2008** POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Produkcji, ul. Raławicka 15-17, PL 75-620 Koszalin. Zespół Badawczo-Dydaktycznym Planowania i Sterowania Produkcją. Stanowisko: **asystent**.
- 01.10.1999 – 29.02.2000** POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Produkcji, ul. Raławicka 15-17, PL 75-620 Koszalin. Stanowisko: **asystent stażysta** (staż przygotowujący do podjęcia obowiązków nauczycieli akademickiego).
-

2. Wskazanie osiągnięcia naukowego

Jako osiągnięcie, wynikające z artykułu 16. ustęp 2. ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniu naukowym i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.), wskazuję **monografię naukową**:

Sutowski P. (2019): *Teoretyczne i doświadczalne podstawy monitorowania oraz oceny wybranych procesów obróbki ściernej i ścierno-erozyjnej z zastosowaniem wysokoczęstotliwościowego sygnału emisji akustycznej*. Monografia Wydziału Mechanicznego, nr 358, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, ISSN 0239-7129, ISBN 978-83-7365-509-6.

Praca autorska (100% udziału habilitanta).

Wskazana autorska monografia uzyskała pozytywne recenzje wydawnicze prof. dr. hab. inż. Czesława Niżankowskiego, em. profesora zwyczajnego Politechniki Krakowskiej oraz dr. hab. inż. Marcina Gołąbczaka, profesora nadzwyczajnego Politechniki Łódzkiej. Monografia zawiera ogółem 328 stron druku zwarteo, w tym 42 tabele, 126 rysunków oraz wykaz oznaczeń i literatury liczącej 266 pozycji (w tym 10 autorskich pozycji literaturowych).

2.1. Syntetyczny opis osiągnięć naukowych zawartych w monografii

W monografii przedstawiono wybrane wyniki analitycznych i eksperymentalnych badań własnych nad identyfikacją obszarów przydatności wysokoczęstotliwościowego sygnału emisji akustycznej (skrót AE od ang. *acoustic emission*) do monitorowania i oceny wybranych procesów obróbki ściernej oraz ścierno-erozyjnej.

Praca zawiera obszerny opis wyników badań, zarówno pod względem poznawczym, jak i użytkowym, do których można zaliczyć:

– w obszarze badań ziaren ściernych:

1. **Charakterystyka porównawcza zjawiska kruchości pęknięcia pojedynczych ziaren ściernych różnego rodzaju i gatunku w odniesieniu do zmian wartości deskryptorów emisji akustycznej**. Przeprowadzenie analizy sygnałów emisji

akustycznej w procesie dekohezji ziaren ściernych różnych gatunków podczas prób ich wytrzymałościowego obciążania. Wykazanie różnic sygnałowych w zależności od budowy strukturalnej ziaren ściernych.

2. **Określenie zbioru parametrów sygnału emisji akustycznej właściwych do charakterystyki procesu mikroskrawania pojedynczym ziarnem ściernym.** Charakterystyka zjawisk podstawowych, związanych z pracą oraz zużyciem ziaren ściernych, takich jak pękanie, mikrowykruszenia, czy też bruzdowanie i tarcie wierzchołków ziaren o powierzchnię materiału w aspekcie zmienności parametrów sygnału emisji akustycznej. Określenie charakteru zmian energii oraz środka ciężkości widmowej sygnału emisji akustycznej w funkcji czasu pracy ziaren ściernych.
 - w obszarze badań procesu szlifowania ściernicowego:
3. **Wyznaczenie wpływu wartości parametrów szlifowania na zmiany sygnału emisji akustycznej oraz powiązanie parametrów sygnału z elementarnym obciążeniem ziarna ściernego w strefie szlifowania.** Wskazanie na zależność funkcyjną między wartością skuteczną sygnału emisji akustycznej, a obciążeniem strefy obróbki, charakteryzowanym prędkością posuwu stycznego i głębokością szlifowania. Opracowanie istotnych statystycznie zależności funkcyjnych między sygnałem emisji akustycznej a elementarnym obciążeniem ziarna ściernego w strefie obróbki w przypadku zastosowania stałej głębokości szlifowania.
4. **Charakterystyka zmian zdolności skrawnej ściernicy przy pomocy syntetycznego wskaźnika zmian geometrycznych czynnej powierzchni oraz deskryptorów sygnału emisji akustycznej.** Charakterystyka zużycia krawędziowego oraz starcia czynnej powierzchni ściernicy przez zmienność wybranych deskryptorów sygnału emisji akustycznej oraz autorskiego geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej. Wyznaczenie zbioru parametrów sygnału emisji akustycznej do identyfikacji zmian zdolności skrawnej ściernicy ze szczególnym uwzględnieniem energii sygnału oraz spłaszczenia rozkładu rejestrowanych wartości. Opracowanie wskaźnika energii sygnału emisji akustycznej przypadającej na jednostkową powierzchnię kontaktu ściernicy z powierzchnią przedmiotu obrabianego. Wyznaczanie modelu wiążącego w sposób statystycznie istotny wskaźnik energetyczny sygnału emisji akustycznej ze wskaźnikiem geometrycznym zmian czynnej powierzchni ściernicy.
5. **Opracowanie metodyki oceny zmian chropowatości powierzchni przedmiotu szlifowanego przy pomocy analizy sygnału emisji akustycznej.** Opracowanie metody oszacowania chropowatości powierzchni przedmiotu szlifowanego za pomocą sygnału emisji akustycznej przy uwzględnieniu warunków realizacji procesu, w szczególności wartości posuwu stycznego stołu szlifierki oraz głębokości szlifowania. Opracowanie modeli wiążących amplitudę sygnału emisji akustycznej z parametrem R_a struktury geometrycznej powierzchni.
6. **Ocena stanu naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego przy zastosowaniu analizy wartości skutecznej i wskaźnika właściwej energii impulsów sygnału emisji akustycznej.** Opracowanie modeli korelacyjnych dla różnych warunków procesu szlifowania, które w sposób istotny statystycznie wiążą wartości maksymalnych

naprężeń zalegających w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego ze zbiorem wybranych deskryptorów sygnału emisji akustycznej, w tym ze spłaszczeniem i skośnością rozkładu wartości sygnału oraz wartością autorskiego wskaźnika energii sygnału, przypadającej na jednostkową powierzchnię kontaktu ściernicy z przedmiotem.

7. **Opracowanie metodyki oceny procesu szlifowania materiału typu Inconel® Alloy 600 z zastosowaniem sygnału emisji akustycznej.** Przeprowadzenie badań eksperymentalnych tworzących podstawy oceny efektywności procesu szlifowania stopu niklu ściernicami konwencjonalnymi z ziarnami elektrokorundu szlachetnego oraz zielonego węgla krzemu. Zastosowanie oceny sygnału emisji akustycznej, zarówno w domenie czasu, jak i częstotliwości, w celu identyfikacji stanu czynnej powierzchni ściernicy w trakcie usuwania nadmiaru obróbkowego.
 - w procesie szlifowania elektroerozyjnego:
8. **Opracowanie metodyki monitorowania i oceny hybrydowego procesu szlifowania elektroerozyjnego z zastosowaniem sygnału emisji akustycznej w środowisku wyładowań elektrycznych.** Dokonanie eksperymentalnej weryfikacji opracowanej metodyki na przykładzie szlifowania stopu tytanu. Ocena zmienności amplitudowej sygnału emisji akustycznej dla różnych paramentów wyładowań. Porównawcza ocena zmian wartości sygnału emisji akustycznej podczas obróbki z różną energią wyładowań oraz bez udziału wyładowań elektrycznych. Analiza i ocena zmian wartości sygnału emisji akustycznej podczas obróbki ściernicą o ostrej i stępionej czynnej powierzchni. Zastosowanie analizy widmowej gęstości mocy sygnału emisji akustycznej do identyfikacji stępienia ściernicy.
9. **Analiza i ocena chropowatości oraz odchyłki płaskości powierzchni obrabianej w procesie szlifowania elektroerozyjnego z zastosowaniem sygnału emisji akustycznej.** Opracowanie modeli korelacyjnych do oceny parametrów chropowatości oraz odchylenia płaskości powierzchni szlifowanej.
10. **Opracowanie metodyki predykcji zużycia ściernicy przy zastosowaniu wybranych deskryptorów sygnału emisji akustycznej w procesie szlifowania elektroerozyjnego.** Zastosowanie analizy skupień, drzewa klasyfikacyjnego oraz nieparametrycznej regresji adaptacyjnej typu MARSplines w celu identyfikacji stopnia stępienia czynnej powierzchni ściernicy. Porównanie istotności zastosowania analizy sygnału emisji akustycznej oraz składowych siły szlifowania w identyfikacji zużycia ściernicy. Opracowanie klasyfikatora stanu czynnej powierzchni ściernicy opartego o pomiar i analizę wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej oraz składowej stycznej siły szlifowania.
 - w procesie rotacyjno-kaskadowego wygładzania kształtkami ściernymi:
11. **Wyznaczenie wartości energii kinetycznej kształtek oraz określenie energii kumulowanej przez przedmiot obrabiany z zastosowaniem analizy symulacyjnej kinematyki wsadu roboczego w wygładzarce rotacyjno-kaskadowej.** Wyznaczenie prędkości i toru ruchu wsadu roboczego oraz pojedynczych kształtek ściernych w trakcie

realizacji procesu wygładzania. Analiza przepływu masowego wsadu w celu określenia energii kumulowanej przez przedmiot obrabiany. Określenie naprężeń efektywnych na powierzchni przedmiotu obrabianego w procesie wygładzania rotacyjno-kaskadowego. Opracowanie modeli korelacyjnych pomiędzy prędkością obrotową wirnika komory roboczej wygładzarki, a średnią energią kinetyczną kształtki ściernej oraz zmianą energii wewnętrznej skumulowanej przez przedmiot obrabiany.

12. **Opracowanie metodyki oceny energii wsadu roboczego w wygładzarce rotacyjnej za pomocą sygnału emisji akustycznej.** Doświadczalne wyznaczenie miejsc o największym poziomie energetycznym w poprzecznym przekroju wsadu roboczego złożonego z kształtek ściernych przez analizę emisji fal naprężeń wysokiej częstotliwości, mających swoje źródło w strefie obróbki. Wyznaczenie zbioru deskryptorów sygnału emisji akustycznej, które charakteryzują się wysoką korelacją z prędkością obrotową wirnika komory roboczej i mogą posłużyć do wyznaczania lokalnej energii kinetycznej wsadu roboczego. Określenie powierzchni obszaru o wysokim potencjale obróbczym w poprzecznym przekroju wsadu roboczego złożonego z kształtek ściernych przez analizę sygnału emisji akustycznej.
13. **Analiza i ocena zmian w widmie sygnału emisji akustycznej zarejestrowanego dla różnych prędkości obrotowych komory roboczej wygładzarki, w warunkach przejścia przedmiotu obrabianego przez całą szerokość strumienia kształtek ściernych.** Określenie użyteczniejszego zakresu częstotliwości do analizy procesu wygładzania kształtkami ściernymi w kinematyce procesu rotacyjno-kaskadowego. Wyznaczenie obszarów o wysokim potencjale obróbczym przez zastosowanie analizy środka ciężkości widma oraz entropii widmowej sygnału emisji akustycznej. Eksperymentalne opracowanie modeli korelacyjnych między tymi deskryptorami widmowymi a prędkością obrotową wirnika komory roboczej. Ocena wysokoczęstotliwościowego sygnału emisji akustycznej, pochodzącego z obszarów o różnym potencjale obróbczym, przez zastosowanie analiz wywodzących się z akustyki dźwięku. Wyznaczanie i analiza chromagramów oraz opracowanie metodyki ich analizy w celu oszacowania wartości granicznej, wskazujące na niski lub wysoki potencjał obróbczy strefy wsadu roboczego, w którym aktualnie znajduje się przedmiot obrabiany.
14. **Wyznaczenie wpływu energii kinetycznej i potencjału obróbczego strumienia kształtek roboczych w procesie wygładzania na parametry mikronierówności i izotropowość powierzchni po obórcie.** Weryfikacja doświadczalna opracowanej metodyki w celu przeprowadzenia procesu wygładzania kształtkami ściernymi ze zwiększoną wydajnością.

Jako podstawowe osiągnięcie naukowe w zakresie teoretycznych i doświadczalnych podstaw monitorowania oraz oceny wybranych procesów obróbki ściernej i ścierno-erozyjnej z zastosowaniem wysokoczęstotliwościowego sygnału emisji akustycznej zaliczam:

- wskazanie przydatności sygnału emisji akustycznej do monitorowania wybranych i opisanych w monografii procesów obróbki ściernej oraz ścierno-erozyjnej;
- opracowanie odpowiednich technik stosowania sensorów sygnału emisji akustycznej, wskazanie właściwych technik obróbki sygnału emisji akustycznej oraz deskryptorów tego sygnału do monitorowania procesów obróbki ściernej oraz ścierno-erozyjnej;

- określenie licznych związków korelacyjnych pomiędzy wielkościami wynikowymi (efektami) badanych procesów obróbki ścierniej oraz ścierno-erozyjnej, a deskryptorami sygnału emisji akustycznej oraz przekształcenie tak uzyskanych funkcji obiektów badań w modele matematyczne przez merytoryczną, teoretyczną analizę zjawisk towarzyszących i przeprowadzenie eksperymentów pomocniczych;
- opracowanie autorskiego wskaźnika oceny zużycia narzędzi ściernych oraz utraty zdolności procesu obróbki ścierniej;
- opracowanie modelu symulacyjnego i wykonanie doświadczeń symulacyjnych w zakresie kinematyki i dynamiki wsadu roboczego w procesie wygładzania pojemnikowego kształtkami ściernymi w celu sprawdzenia deskryptorów sygnału emisji akustycznej w formie pochodnych energii;
- zaproponowanie wskaźnika energii sygnału emisji akustycznej przypadającej na jednostkową powierzchnię kontaktu ściernicy do oceny zmian zdolności skrawnej ściernicy.

2.2. Znaczenie naukowe i uytylitarne osiągnięcia naukowego

Znaczenie naukowe i uytylitarne prezentowanego dorobku naukowego zawiera się w obrębie znaczącego poszerzenia wiedzy w zakresie wykorzystania sygnału emisji akustycznej do monitorowania i oceny stanu narzędzi oraz wyników obróbki w procesach obróbki ścierniej oraz ścierno-erozyjnej.

Procesy te należą do najtrudniejszych rodzajów obróbki, wymagających zarówno umiejętności praktycznych, często popartych wieloletnim doświadczeniem, jak i wiedzy o zjawiskach elementarnych zachodzących w strefie obróbki, co ciągle wymaga wielu wyjaśnień na podstawie realizowanych badań teoretyczno-doświadczalnych.

Wszystkie procesy, które wzięto pod uwagę w badaniach, łączy jedno ogniwo — proces usuwania materiału dokonywany jest ostrzami ziaren wykonanych z twardego materiału, o nieoznaczonej ściśle liczbie i nieokreślonym geometrycznie kształcie. Zasadniczą różnicą jest natomiast to, że ziarna ściernie, realizują ten proces z uwzględnieniem różnych mechanizmów obróbkowych, wynikających z odmiennej kinematyki, parametrów i energii obróbki. Dodatkowo, ziarna ściernie występują w dwóch odmiennych formach: w postaci spojonej jednonarzędziowej (ściernica) i spojonej w zbiorze swobodnych narzędzi ściernych (kształtki ściernie). Z powyższych względów analizowane procesy obróbki i zużycia narzędzi, są znacznie trudniejsze w ocenie, niż ma to miejsce na przykład w przypadku procesów skrawania pojedynczym ostrzem (lub zespołem ostrzy) o ustalonej geometrii i kącie natarcia (toczenie, frezowanie, wiercenie).

Praca, oprócz elementów poznawczych, posiada także aspekt praktyczny — rozszerza bazę wiedzy i daje podstawy do opracowania systemów doradczych, nadzorowania i sterowania procesami z zastosowaniem, łatwo implementowanej na stanowiskach roboczych, metody emisji akustycznej — szczególnie w odniesieniu do kreowania podsystemów monitorowania jakości powierzchni obrabianych i oceny zdolności skrawnej ściernic.

Głównym celem wieloletnich prac badawczych było opracowanie metodyki, która z wykorzystaniem wysokoczęstotliwościowego sygnału emisji akustycznej, dałaby podstawy do monitorowania i oceny stanu narzędzi oraz struktury geometrycznej powierzchni (lub innych cech określających rezultat jakościowy), w wybranych procesach obróbki ścierniej i ścierno-erozyjnej.

Wiele z wyników badań oraz analiz sygnału emisji akustycznej, wykazało, że odpowiednio ukierunkowana diagnostyka deskryptorów tego sygnału, pozwala m.in., na:

- określenie charakterystyki procesu mikroskrawania ziarnem ściernym wraz z zastosowaniem sygnału emisji akustycznej, jako nośnika informacji o zdolności skrawnej różnych gatunków ziaren ściernych;
- ocenę struktury geometrycznej powierzchni materiałów, będącej rezultatem procesu szlifowania konwencjonalnego, szlifowania elektro-erozyjnego oraz ukształtowania powierzchni w procesie wygładzania strumieniem kształtek ściernych;
- oszacowanie naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego w procesie szlifowania powierzchni płaskich;
- ocenę stanu czynnej powierzchni ściernic wykonanych z różnych gatunków ziaren ściernych;
- ocenę energii oddziaływania kształtek ściernych na powierzchnię materiału obrabianego w procesie wygładzania w wygładzarkach pojemnikowych, umożliwiając w ten sposób wyznaczenie obszaru o największym potencjale obróbczym i zwiększenie wydajności procesu obróbki.

Przedstawione rozwiązania problemów monitorowania i oceny procesów obróbki ścierniej oraz ścierno-erozyjnej, stanowią rozszerzenie dotychczas znanych i stosowanych metod związanych z monitorowaniem i nadzorowaniem procesów. Jednocześnie nie stanowią one zamkniętych form i mogą, a nawet powinny być dalej rozszerzane, zarówno pod kątem obróbki sygnału, jak i rozszerzenia na inne obszary współczesnych procesów technologicznych.

Z aplikacyjnego punktu widzenia, zaproponowana metodyka badań i analiz, szczególnie odnośnie sposobu akwizycji i przetwarzania wysokoczęstotliwościowego sygnału emisji akustycznej, może stanowić alternatywne rozwiązanie problemów monitorowania oraz oceny procesów obróbki ścierniej i ścierno-erozyjnej. W szczególności odnosi się to do wyników innych prac badawczo-naukowych, prezentowanych w literaturze światowej, które w głównej mierze nawiązują do stosowania analiz innych procesów resztkowych, monitorowanych za pomocą mierników mocy, siły, drgań, temperatury i innych.

Otrzymane rezultaty badań, wskazują na możliwość zastosowania opracowanej metodyki nie tylko w ośrodkach badawczych i warunkach laboratoryjnych, ale także w praktyce przemysłowej.

Niezależnie od rodzaju technicznego obiektu diagnostyki, zaawansowana ocena sygnału emisji akustycznej, może znaleźć swoje zastosowanie, szczególnie tam, gdzie zachodzą zjawiska trybologiczne, przemiana struktury materiału, odkształcenia plastyczne lub sprężyste, czy też zachodzą oddziaływania termiczne, które wywołują naprężenia lub odprężenia materiału, lub całych analizowanych układów.

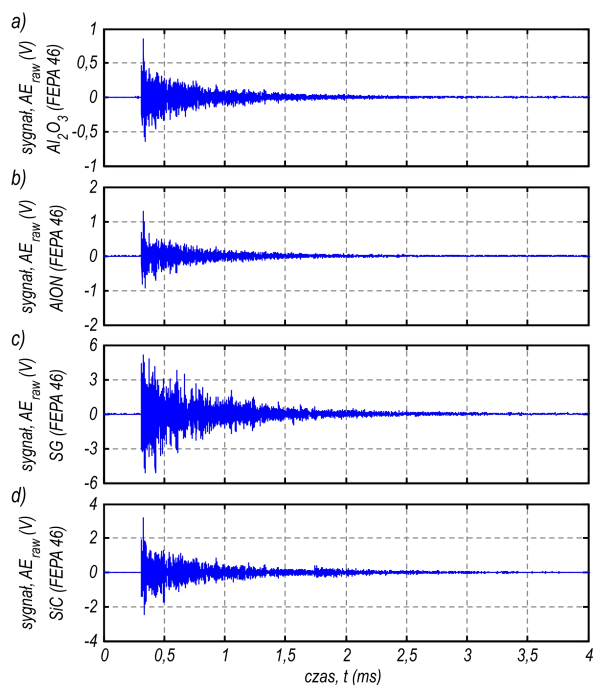
Przedstawione wyniki badań mogą stanowić także punkt wyjścia do kontynuowania prac naukowych i rozwinięcia proponowanych rozwiązań w wielu kierunkach, szczególnie w zakresie nowych obszarów zastosowania diagnostyki, opartej o analizę parametryczną sygnału emisji akustycznej.

3. Charakterystyka osiągnięć naukowo-badawczych w zakresie teoretycznych oraz doświadczalnych podstaw monitorowania i oceny wybranych procesów obróbki ścierniej oraz ścierno-erozyjnej z zastosowaniem wysokoczęstotliwościowego sygnału emisji akustycznej

3.1. Charakterystyka porównawcza zjawiska kruchego pęknięcia pojedynczych ziaren ściernych różnego rodzaju i gatunku w odniesieniu do zmian wartości deskryptorów emisji akustycznej

W badaniu zjawiska kruchego pęknięcia fale sprężyste stanowią ważną informację o uszkodzeniach ziaren poddanych obciążeniu. W wyniku działania sił naprężeń, proces pęknięcia, w tym mikro- i makropęknięcia, mogą zachodzić w różny sposób i z różną energią. Monitorowanie i szczegółowa diagnostyka fal naprężeń, stanowiących rezultat kolejnych etapów dekohezji ziaren ściernych, mogą stanowić narzędzie opisu mechanizmu pęknięcia oraz stanowić informację o odporności materiału na kruche pęknięcie. Na podstawie odpowiednio ukierunkowanej analizy sygnału amplitudowo-częstotliwościowej wskazano na różnice w wartości uwalnianej energii.

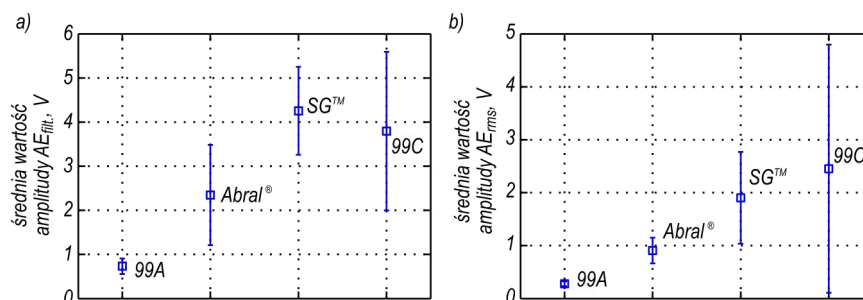
Zarejestrowane sygnały emisji akustycznej (AE) mają charakter impulsów tłumionych wykładniczo. Źródło każdego impulsu jest nagłe i wyzwala dużą ilość energii, która wywołuje drgania ośrodka rozchodzenia się fali akustycznej, o tym większej amplitudzie, im większa jest energia wytworzona podczas pęknięcia ziarna (rys. 1). Po gwałtownym uwolnieniu energii fale naprężeń ulegają tłumieniu i rozproszeniu w ośrodku ich rozprzestrzeniania.



Rys. 1. Przykładowe impulsy emisji akustycznej ($AE_{filt.}$) zarejestrowane podczas pęknięcia ziaren ściernych w przypadku: a) elektrokorundu szlachetnego, b) azotko-tlenku glinu, c) mikrokrystalicznego korundu spiekane go, d) zielonego węgla krzemu

Największą energię pęknięcia, przejawiającą się najwyższą amplitudą impulsu AE, charakteryzowały się próbki ziarna SGTM oraz 99C (rys. 1c i 1d). Najmniejsze napięcie na przetworniku piezoelektrycznym uzyskano, natomiast podczas pęknięcia ziaren elektrokorundu szlachetnego 99A (rys. 1a).

Analiza wartości średnich, zarówno nieprzetworzonego sygnału AE, jak i wartości skutecznej, zarejestrowanych w momencie, w którym nastąpiła dekohezja ziaren ściernych, wskazuje na rozróżnialną postać sygnału w zależności od gatunku ziarna ściernego. Na wykresach, zamieszczonych na rys. 2, wyniki pomiarów uszeregowano w kolejności rosnącej wartości skutecznej sygnału AE. Wartość ta informuje pośrednio o energii źródeł fal sprężystych, zarejestrowanych przez czujnik.



Rys. 2. Średnie wartości oraz odchylenie standardowe wartości szczytowej sygnału AE zarejestrowanego podczas pęknięcia różnych gatunków ziaren ściernych, opisane: a) nieprzetworzonym sygnałem, poddanym jedynie wzmocnieniu i filtracji (AE_{filt}), b) wartością skuteczną sygnału (AE_{rms})

Otrzymana kolejność odpowiada odporności na pęknięcie wyrażonej wskaźnikiem odporności na pęknięcie (MOR). Najniższą wartość parametru $AE_{rms} = 0,28$ V odnotowano w przypadku kruchego pęknięcia ziaren elektrokorundu szlachetnego. Dla tego ziarna zaobserwowano także najmniejszy rozrzut wartości ocenianych parametrów, co świadczy o dużej powtarzalności otrzymanych wyników. Ziarna Abral® ulegały dekohezji przy średniej wartości $AE_{rms} = 0,9$ V, czyli trzykrotnie większej energii sygnału AE.

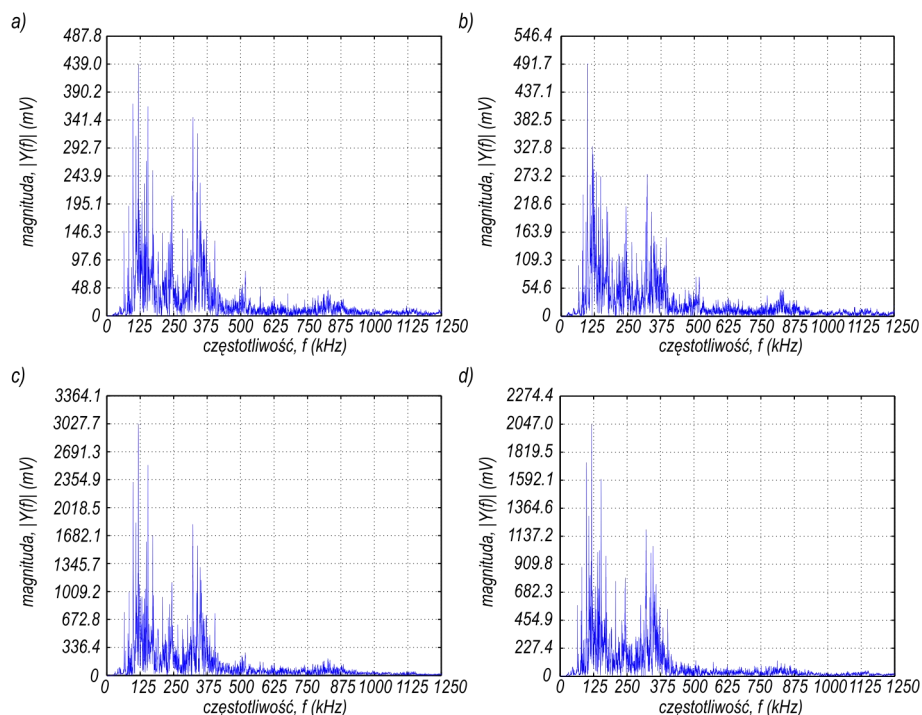
Ziarna SGTM to impulsy $AE_{filt} = 4,2$ V i $AE_{rms} = 1,9$ V, natomiast ziarna 99C to sygnały na poziomie $AE_{filt} = 3,8$ V i $AE_{rms} = 2,45$ V. Cechą charakterystyczną tych ziaren było dodatkowo wyzwalanie fal sprężystych o nierównomierniej energii, co przełożyło się na bardzo duży rozrzut obu ocenianych parametrów.

Z przeprowadzanych badań i analiz wynika, że deskryptor określający sumę zdarzeń w sygnale emisji akustycznej może być dobrą miarą etapów pęknięcia, składających się na makroskopowy proces niszczenia ziaren ściernych. Wynika to z zależności tego parametru od mikrostruktury materiału oraz proporcjonalności do rozmiaru kryształów i odległości międzykryształicznych. Rejestrowana energia zdarzeń sygnału AE charakteryzuje się taką samą zmiennością, co liczba i tempo zdarzeń. Najniższą wartość osiąga dla ziaren elektrokorundu szlachetnego, a największą dla ziaren mikrokryształicznego korundu spiekanego. Duży rozrzut wartości energii, szczególnie w przypadku ziaren Abral® i 99C, świadczy jednakże o odmienności procesu pęknięcia, szczególnie uzależnionego od charakterystyki konkretnego ziarna.

Korelacja energii i tempa zdarzeń świadczy o tym, że sygnał AE jest ściśle zdeterminowany ilością zdarzeń zachodzących w badanym ośrodku, a szczególnie ilością źródeł impulsów przypadających na jednostkę czasu. Im więcej zjawisk generuje impulsy sygnału AE, tym większa wartość średnia rejestrowanej energii sygnału. Ponadto, tempo zdarzeń emisji akustycznej, związane z rozwojem szczeliny, jest bezpośrednią miarą

współczynnika intensywności naprężeń K_{Ic} , który określa zmianę rozkładu naprężeń w materiale sprężystym w obecności pęknięcia. Stąd, parametr ten można zaliczyć do grupy deskryptorów sygnału AE, właściwych do charakterystyki lub identyfikacji procesu kruchego pęknięcia ziaren ściernych.

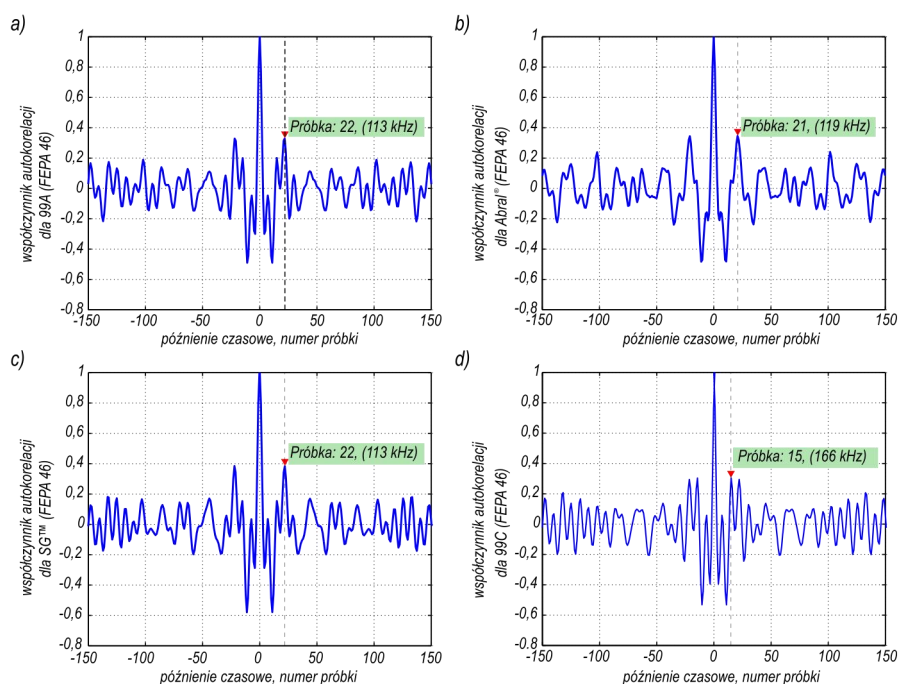
Badania w domenie częstotliwości uzupełniają wiedzę o przebiegu procesu pęknięcia ziaren odnośnie poszczególnych składowych sygnału, a tym samym pozwalają na bardziej dokładną charakterystykę źródła impulsów emisji akustycznej. Widma częstotliwościowe i fazowe sygnałów akustycznych pęknięcia ziaren ściernych, poddanych obciążeniu statycznemu, wykazują wzajemne podobieństwo (rys. 3). Niezależnie od budowy strukturalnej ziaren, udział składowych częstotliwościowych jest bardzo podobny. Wyraźna różnica występuje w wartości bezwzględnej (magnitudzie) natężenia poszczególnych składowych harmonicznych, dzieląc analizowane ziarna na dwie grupy: ziarna pękające z dużą energią (mikrokryształiczny korund spiekany, węgiel krzemu) oraz ziarna o blisko pięciokrotnie mniejszej energii (elektrokorund szlachetny, azotko-tlenek glinu). Podział ten wynika z różnicy w twardości rozpatrywanych gatunków ziaren ściernych (np. twardość dla ziaren mikrokryształicznego korundu spiekane go oszacowana jest na poziomie 24-30 GPa w skali Knoop), jak również z różnic w budowie strukturalnej ziaren mono-, poli- i mikrokryształicznych.



Rys. 3. Porównanie sygnałów AE w domenie częstotliwości, zarejestrowanych w procesie kruchego pęknięcia ziaren: a) elektrokorundu szlachetnego, b) azotko-tlenku glinu, c) mikrokryształicznego korundu spiekane go, d) zielonego węgla krzemu

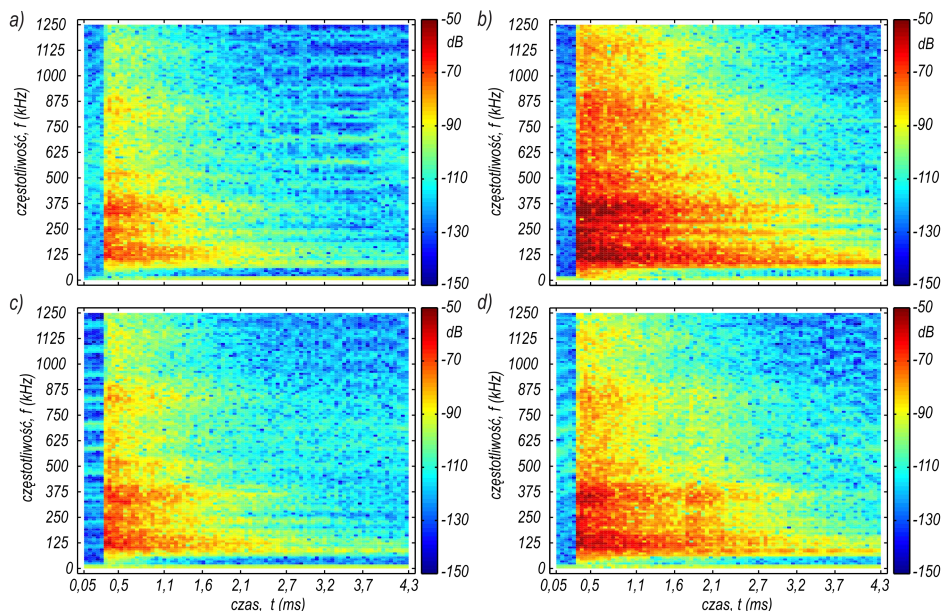
Przeprowadzone analizy wykazały, że badane ziarna ściernie charakteryzują się bardzo bliskimi wartościami podstawowej częstotliwości emisji impulsów akustycznych, rejestrowanych w procesie ich pęknięcia (rys. 4). Dla każdego z analizowanych gatunków ziaren ściernych zarejestrowano co najmniej jeden przypadek, w którym częstotliwość podstawowa została określona na poziomie 113 kHz. Z tego powodu można stwierdzić, że jest to typowa wartość harmonicznej opisująca zjawisko kruchego pęknięcia ceramicznego

ziarna ściernego, charakteryzująca jednocześnie falę sprężystą przekształconą przez przetwornik piezoelektryczny w impuls emisji akustycznej w układzie pomiarowym.



Rys. 4. Wyniki detekcji podstawowej częstotliwości w sygnale AE z wykorzystaniem metody autokorelacji dla: a) elektrokorundu szlachetnego, b) azotko-tlenku glinu, c) mikrokrystalicznego korundu spiekanego, d) zielonego węgliku krzemu

Spektrogramy (rys. 5) ujawniają natomiast, że wraz z upływem czasu impulsy AE pęknięcia ziaren ściernych charakteryzują się zanikaniem kolejnych częstotliwości. Składowe są tłumione w różnym tempie, odwrotnie proporcjonalnie do częstotliwości.



Rys. 5. Przykładowe spektrogramy analizowanych sygnałów dla impulsów akustycznych pęknięcia ziaren: a) Al_2O_3 , b) AlON , c) SG^{TM} , d) SiC

W końcowej fazie widmo ujawnia tylko skrajnie niskie harmoniczne częstotliwości, co jest charakterystyczne dla sygnałów tłumionych. Po czasie 1-2 μ s wytłumione są wysokie częstotliwości (powyżej 1000 kHz), po 2-3 μ s częstotliwości średnie (500-875 kHz). Niskie częstotliwości (do 375 kHz) charakteryzują się najwyższą amplitudą i występują w sygnale najdłużej. Po 2 μ s ich energia jest wytłumiona o 90 dB lub mniej.

Najważniejsze wnioski w zakresie zastosowania sygnału AE do oceny porównawczej ziaren ściernych w procesie dekohezji:

- do dekohezji ziaren ściernych, zbudowanych z różnych materiałów i o różnej strukturze krystalograficznej, potrzebna jest inna wartość obciążenia, pomimo, że wszystkie analizowane ziarna należą do jednej grupy materiałów ceramicznych;
- różnice między sygnałami AE rejestrowanymi podczas prób dekohezji różnych gatunków ziaren ściernych, wskazują na możliwość rozróżniania ziaren z zastosowaniem metody analizy emisji fal naprężeń, szczególnie w przypadku trzech gatunków: 99A, Abral[®] i SGTM; każdy z tych gatunków ziaren charakteryzuje się wzrastającą sumą i tempem zdarzeń (w przytoczonej kolejności);
- tempo zdarzeń w sygnale AE, poprzez swój związek z budową krystaliczną ziaren i ich odpornością na kruche pękanie, stanowi wyjątkowo wrażliwy parametr oceny w diagnostyce tego zjawiska.

Publikacje:

1. Nadolny K., **Sutowski P.**, Herman D.: *Analysis of aluminum oxynitride AION (Abral[®]) abrasive grains during the brittle fracture process using stress-wave emission techniques*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(9–12): 1961-1976. DOI: 10.1007/s00170-015-7338-1.
2. **Sutowski P.**, Nadolny K.: *The identification of abrasive grains in the decohesion process by acoustic emission signal patterns*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87(1-4): 437-450. DOI: 10.1007/s00170-016-8504-9.
3. Nadolny K., **Sutowski P.**, Herman D.: *Badania właściwości mechanicznych nowej generacji ziaren ściernych z azotko-tlenku glinu AION z zastosowaniem sygnału emisji akustycznej*. Mechanik 2012, 82(8-9): 375-390.
4. **Sutowski P.**, Nadolny K.: *Zastosowanie wzorców sygnału emisji akustycznej do identyfikacji wybranych gatunków ziaren ściernych w procesie ich dekohezji*. Mechanik, 2015, 88(8-9): 319-324. DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.393.

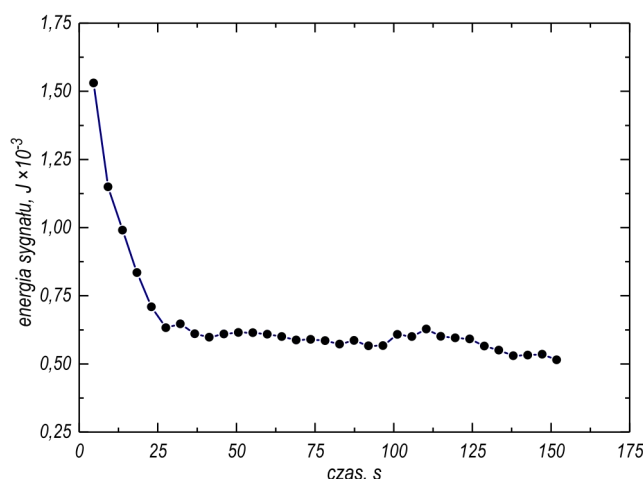
3.2. Określenie zbioru parametrów sygnału emisji akustycznej właściwych do charakterystyki procesu mikroskrawania pojedynczym ziarnem ściernym

Poszerzanie stanu wiedzy, dotyczącej zjawisk podstawowych w procesach szlifowania, może następować na drodze badań i analiz procesu mikroskrawania pojedynczym mikroostrzem w tak zwanym teście rysy (ang. scratch test). Elementarne zjawiska towarzyszące procesowi mikroskrawania materiałów decydują o przebiegu tego procesu, jego energochłonności, mikrogeometrii i stanie warstwy wierzchniej przedmiotu obrobionego oraz zużyciu ostrza skrawającego (ziarna ściernego).

Ze względu na strukturę ziarna oraz jego indywidualne cechy, próby eksperymentalne mikroskrawania wykazały, że zaobserwowaną, dominującą formą zużycia było zużycie wytrzymałościowe (wykruszenia i mikrowykruszenia) w pierwszej fazie pracy ziarna oraz

zużycie ściernie w przypadku dłuższego okresu jego pracy. Ziarna elektrokorundu szlachetnego (99A), przy przyjętej dynamice procesu mikroskrawania, podlegały zasadniczo następującej formie zużycia: najpierw mikrowykruszeniu wierzchołków ziaren, a następnie znacznie wolniejszemu ścieraniu ich części roboczej. Ziarna mikrokrystalicznego korundu spiekanego (SGTM) oraz regularnego azotku boru (CBN550) wykazały w badaniach eksperymentalnych znacznie lepsze właściwości skrawne w odniesieniu do ich trwałości. Pracę mikroskrawania wykonywały one bardziej stabilnie (nie zarejestrowano przypadków pęknięcia ziarna, a jedynie stopniową utratę wysokości), przez co dłużej utrzymywały swoją geometrię w porównaniu do ziaren elektrokorundu szlachetnego.

Sygnał emisji akustycznej poddano analizie zarówno w domenie czasu, jak i częstotliwości. Najlepszą korelacją z zużyciem ziaren ściernych, ocenianą przez głębokość rysy na powierzchni materiału, charakteryzowały się: energia sygnału, środek ciężkości widma oraz znormalizowany punkt opadania widma. Na rys. 6 przedstawiono w jaki sposób zmieniała się wartość energii sygnału emisji akustycznej, zmierzona podczas procesu mikroskrawania pojedynczym ziarnem 99A F30.



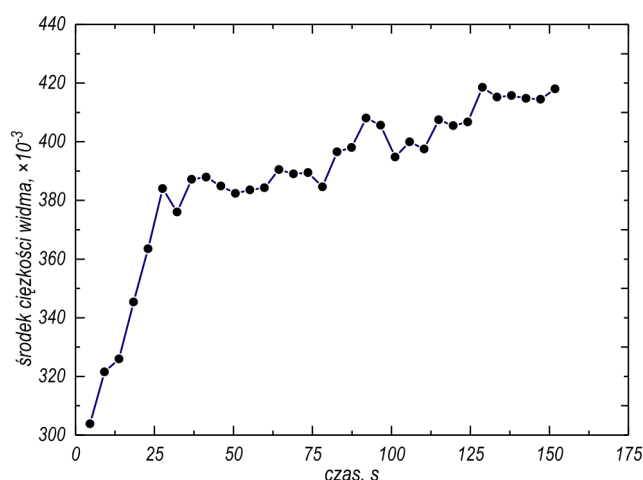
Rys. 6. Energia sygnału emisji akustycznej zmierzona podczas procesu mikroskrawania pojedynczym ziarnem ściernym 99A F30

W początkowych 25 sekundach pracy ziarna widać znaczące spadki wartości energii sygnału. Okres ten odpowiada szybkiemu, sukcesywnemu wykruszeniu ziarna, czyli pracy o typowym charakterze zużycia wytrzymałościowego. Dalsza część krzywej świadczy o zmianie charakteru zużycia zachodzącego w strefie skrawania, co objawia się niemal spłaszczeniem przebiegu. Oznacza to, że jeżeli proces mikroskrawania zachodzi z względnie dużą wydajnością objętościową i dodatkowo ziarno ulega wykruszaniu, to w procesie występuje uwalnianie dużych ilości energii, która w formie fal akustycznych jest rejestrowana przez czujnik piezoelektryczny. Gwałtowne spadki wartości energii sygnału AE świadczyć mogą o zmniejszeniu głębokości mikroskrawania (siła niezbędna do wykonania pracy jest mniejsza), natomiast ustabilizowane wartości lub ich powolny spadek powinny być interpretowane jako mikrowykruszenia oraz ścierny charakter zużywania się ziarna, zwykle dążący do całkowitej utraty zdolności skrawnej.

Opracowany model zależności energii sygnału AE względem głębokości rysy (z) ukształtowanej przez ziarno ściernie określono w postaci funkcji potęgowej:

$$E_{AE} = 5,67346 \cdot 10^{-4} + 6,574 \cdot 10^{-6} \cdot z^{1,93638}.$$

Odwrotny kierunek, ale nie charakter zmian w funkcji czasu pracy ziarna ściernego, posiadają deskryptory charakteryzujące zarejestrowany sygnał AE w domenie częstotliwości, które charakteryzują rozkład widma określając jego środek ciężkości (rys. 7) oraz znormalizowany punkt opadania.



Rys. 7. Przykładowa zmienność środka ciężkości widma dla sygnału emisji akustycznej zmierzona podczas procesu mikroskrawania pojedynczym ziarnem ściernym 99A F30

Wartości tych parametrów początkowo gwałtownie rosną w czasie, gdy ziarno ulega pęknięciom i kruszeniu. Oznacza to, że w tym okresie pracy ziarna udział harmonicznych o dominującej magnitudzie w sygnale AE przesuwają się w kierunku wyższych częstotliwości, przy czym 95% harmonicznych koncentruje się zawsze poniżej 0,5 szerokości pasma akwizycji danych. W drugiej fazie zmiany środka ciężkości widma oraz punktu opadania widma wyhamowują — dążą do wartości granicznej dla danego ziarna.

Przebieg wartości obu deskryptorów jest zbliżony, a tym samym mogą być one używane zamiennie.

Najważniejsze wnioski w zakresie zastosowania sygnału AE do oceny porównawczej ziaren ściernych w procesie mikroskrawania:

Wyniki analiz procesu mikroskrawania różnymi gatunkami ziaren ściernych wskazują na znaczny potencjał sygnału AE do oceny zdolności skrawnej ziarna w odniesieniu do skutków geometrycznych jego pracy (objętość usuniętego materiału). Deskryptory sygnału emisji akustycznej posiadają wyraźną korelację z głębokością rys, przyjmując postać funkcji nieliniowych (głównie wykładniczych i potęgowych) o proporcjonalnej zależności.

Do najważniejszych wniosków, wynikających z badań procesu mikroskrawania pojedynczym ziarnem ściernym, można zaliczyć:

- istnienie wyraźnej zależności funkcjonalnej między energią sygnału AE, a czasem pracy i zużyciem ziarna ściernego;
- istnienie wyraźnej zależności funkcjonalnej między energią sygnału AE, a głębokością rysy powstającej w procesie mikroskrawania ziarnem ściernym;
- do oceny skrawności oraz zużycia ziarna ściernego można wykorzystać deskryptory charakteryzujące sygnał AE w domenie częstotliwości: środek ciężkości widma oraz znormalizowany punkt opadania widma; ich zmienność, w funkcji czasu pracy ziarna ściernego, wyraża postępujące zużycie wytrzymałościowe i ściernie oraz, z ograniczoną dokładnością, momenty samoostrzenia mikrowierzchołków ziaren ściernych.

Publikacje:

1. **Sutowski P.:** *The Possibilities of Monitoring the Grinding Process with the Application of AE Signal. Możliwości monitorowania procesu szlifowania z wykorzystaniem sygnału emisji akustycznej.* [W:] Zeszyty Naukowe Wydziału Mechanicznego Nr 33, „Modern Techniques and Technologies” „Nowoczesne techniki i technologie”, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2004, 301-310. ISSN: 1640-4572.
2. Nadolny K., Kapłonek W., **Sutowski P.:** *Combined of the CLSM-SEM Techniques for Measurement and Analysis of the Single Grain Cutting Scratch on INCOLOY® alloy 800HT®.* Proceedings of 11th IMEKO TC14 Symposium on Laser Metrology for Precision Measurement and Inspection in Industry (ISCQM2013), Kraków-Kielce, Poland, September 11-13, 2013, Session F1.2 Micro and Nanometrology (ID116), 40-43.
3. **Sutowski P.:** The effect of process parameters on grinding forces and acoustic emission in machining tool steel 1.2201/NC10. *Journal of Mechanical and Energy Engineering*, 2017, 1/41(1): 37-44.

3.3. Wyznaczenie wpływu wartości parametrów szlifowania na zmiany sygnału emisji akustycznej oraz powiązanie parametrów sygnału z elementarnym obciążeniem ziarna ściernego w strefie szlifowania

Ocena obciążenia aktywnych ziaren ściernych wykonano na podstawie analizy reakcji sygnału AE na zmiany grubości warstwy skrawania przypadającej na ziarno ściernie.

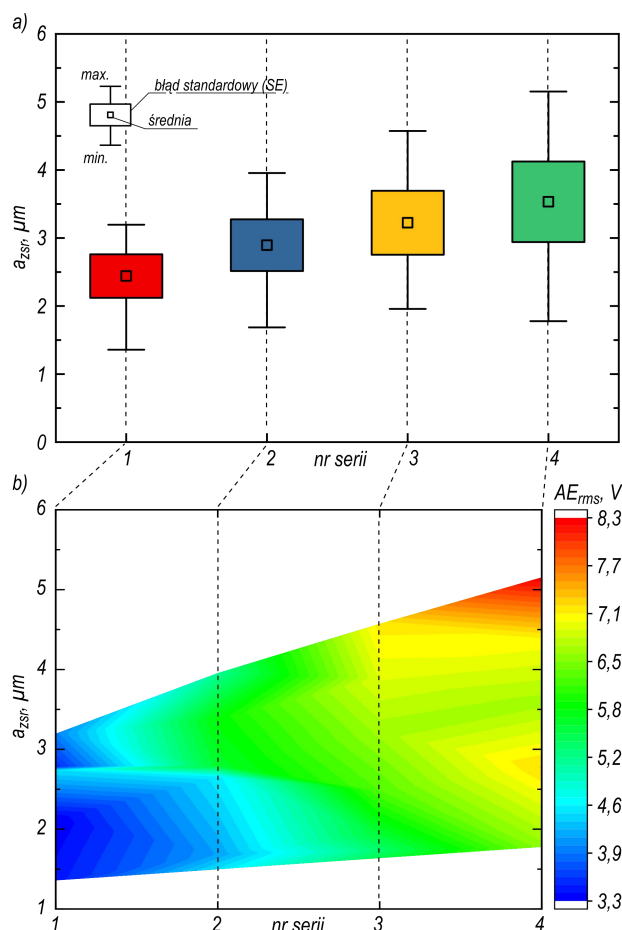
Jak wykazano w badaniach, zmiany elementarnych grubości warstw skrawanych w istotny sposób wpływają na charakter odkształceń w strefie obróbki, czego odzwierciedleniem jest natychmiastowa reakcja rozproszenia sygnału AE oraz zmienności jego wartości skutecznej (rys. 8).

Średni poziom sygnału AE, określony wartością skuteczną napięcia (RMS) zmierzonym czujnikiem piezoelektrycznym, rośnie wraz ze zwiększeniem głębokości szlifowania. Szerokie pasmo rozproszenia sygnału AE_{rms} uwzględnia, oprócz zmienności elementarnych grubości skrawania dla ziaren aktywnych w strefie szlifowania, także wpływ innych czynników na kształtowanie fal sprężystych o różnym charakterze. Przyjmuje się, że sygnał RMS uwzględnia również informacje o wierzchołkach, które nie zainicjowały właściwego procesu skrawania, a jedynie były w kontakcie z powierzchnią obrabianą, wywołując jedynie procesy tarcia i bruzdowania.

Analizy sygnału emisji akustycznej pozwoliły na opracowanie modelu korelacyjnego, który w sposób istotny wiąże parametr procesu szlifowania, określający głębokość szlifowania, z wartością sygnału:

$$AE_{rms} = 33,179 a_e^{0,473}.$$

Podobne analizy przeprowadzono w zakresie ustalenia powiązań sygnału AE z prędkością posuwu i prędkością obwodową ściernicy. Oba te parametry nie wykazały tak wysoce znaczących istotności statystycznych w kształtowaniu wartości mierzonego sygnału AE, jak miało to miejsce w przypadku głębokości szlifowania. Ogólnie można natomiast stwierdzić, że wpływ obu rozpatrywanych parametrów obróbki posiada zbliżoną tendencję kształtowania sygnału AE_{rms} , jak w przypadku wartości a_{zsr} . Prędkość posuwu powoduje wzrost wartości sygnału AE, przy czym statystycznie istotna korelacja liniowa była możliwa do określenia wyłącznie dla głębokości szlifowania równej 0,03 mm. Przypuszcza się, że dla wybranego zakresu badań wartość ta gwarantowała najkorzystniejsze warunki przebiegu procesu szlifowania.



Rys. 8. Wpływ warunków procesu szlifowania na: a) zmienność średniej grubości warstwy skrawania, przypadającej na jedno ziarno ściernic; b) zmiany wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej (numer serii odpowiada kolejnym warunkom procesu szlifowania, głównie w odniesieniu zwiększanej głębokości szlifowania)

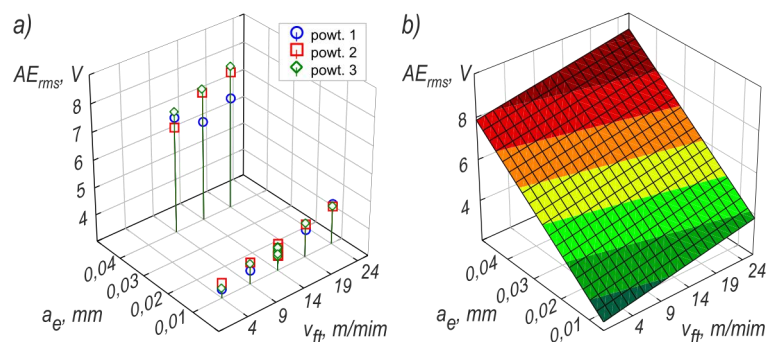
Prędkość obwodowa ściernicy nie wpływała jednoznacznie na kształtowanie wartości sygnału emisji akustycznej. Dla małych wartości głębokości szlifowania (0,01 i 0,02 mm) można sądzić jedynie o proporcjonalności między parametrami v_s oraz AE_{rms} . Dla wyższych wartości dosuwu ściernicy, zależności są już niejednoznaczne.

Wyniki pomiarów średniej wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej, rejestrowanej podczas procesu obwodowego szlifowania powierzchni płaskich w funkcji głębokości szlifowania (a_e) oraz prędkości posuwu stycznego stołu (v_{ft}), przedstawiono na rys. 9.

W wyniku aproksymacji współzależności pomiędzy trzema zmiennymi otrzymano równanie funkcji powierzchniowej, która przybliża relację pomiędzy analizowanymi czynnikami:

$$AE_{rms} = 1,8623 + 0,0514 v_{ft} + 120,991 a_e.$$

Dokonując oceny jakości modelu porównano wartości wyjściowe funkcji regresji z wynikami eksperymentów. Stopień dopasowania wyznaczonego modelu matematycznego można uznać za wystarczający, ponieważ spełniony został warunek istotności współczynnika korelacji wielowymiarowej, istotności współczynników formuły regresji, a wartość błędu równa średnio 2,17% można uznać za akceptowalną. Oznacza to, że w trakcie monitorowania procesu szlifowania należy oczekiwać, że wartości AE_{rms} będą różnić się średnio o 0,09 V od wartości oszacowanych na podstawie modelu.



Rys. 9. Wyniki badań doświadczalnych wpływu głębokości szlifowania i prędkości posuwu stycznego stołu szlifierki na wartość skuteczną sygnału AE: a) punktowy wykres rozrzutu, b) model powierzchniowy aproksymowany funkcją liniową

Najważniejsze wnioski z zastosowania sygnału AE do oceny elementarnego obciążenia aktywnych ziaren ściernych w procesie szlifowania:

Wyniki badań i analiz wykazują duży potencjał, jaki tkwi w sygnale AE w kontekście monitorowania procesu obróbki szlifowaniem. Każda zmiana warunków realizacji procesu, wywołuje zmiany w strefie szlifowania, a te przekładają się na zmiany rejestrowanego sygnału AE.

- bezpośrednie powiązanie sygnału AE z grubością warstwy skrawanej, przypadającą na ziarno jest trudne, ze względu na szereg czynników wpływających na rzeczywisty, diagnozowany proces obróbki szlifowaniem i jednocześnie różne źródła kształtujące impulsy emisji akustycznej, która jest rejestrowana przez układ pomiarowy z powierzchni przedmiotu obrabianego w postaci fali powierzchniowej;
- największy wpływ na kształtowanie sygnału emisji akustycznej mają parametry technologiczne określające głębokość szlifowania oraz prędkość posuwu stycznego stołu szlifierki, które decydują także o obciążeniu czynnej powierzchni ściernicy realizowanym zadaniem obróbczym;
- istnieje wyraźna zależność między wartością skuteczną sygnału AE, a obciążeniem strefy obróbki, charakteryzowanym prędkością posuwu stycznego i głębokością szlifowania; oba czynniki wpływają na rejestrowaną wartość sygnału, przy czym parametr wyrażający głębokość, wielokrotnie silniej kształtuje opisywaną zależność;
- między głębokością procesu szlifowania, a rejestrowaną wartością skuteczną sygnału AE można wyznaczyć istotny statystycznie związek;
- wraz ze wzrostem średniej grubości warstwy skrawanej, przypadającej na aktywne ziarno ściernie, występuje wzrost sygnału AE_{rms} ;
- zależność funkcyjna między parametrem a_{zsr} a AE_{rms} , może być wyznaczona tylko w przypadku stałej wartości głębokości procesu szlifowania (a_e);
- wartość skuteczną sygnału AE posiada związek z energią szlifowania, więc może zastąpić pomiary składowych siły szlifowania.

Publikacje:

1. **Sutowski P., Plichta S.:** *Wykorzystanie sygnału emisji akustycznej do monitorowania chropowatości powierzchni przedmiotu szlifowanego.* Materiały XXVI Naukowej Szkoły Obróbki Ścierniej, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Łódzkiej, Łódź 2003, 177-182.
2. **Sutowski P.:** *The Possibilities of Monitoring the Grinding Process with the Application of AE Signal. Możliwości monitorowania procesu szlifowania z wykorzystaniem sygnału emisji akustycznej.* [W:] Zeszyty Naukowe Wydziału Mechanicznego Nr 33, *Modern*

Techniques and Technologies (Nowoczesne techniki i technologie), Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2004, 301-310. ISSN: 1640-4572.

3. **Sutowski P.:** The effect of process parameters on grinding forces and acoustic emission in machining tool steel 1.2201/NC10. *Journal of Mechanical and Energy Engineering*, 2017, 1/41(1): 37-44.

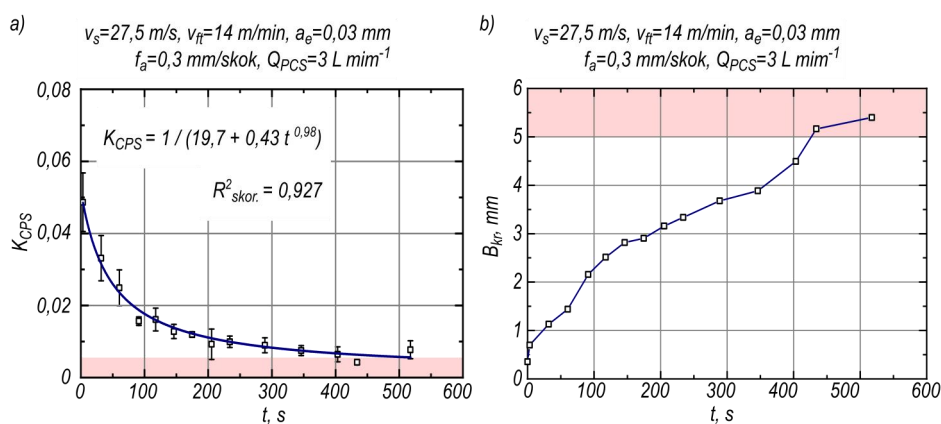
3.4. Charakterystyka zmian zdolności skrawnej ściernicy przy pomocy syntetycznego wskaźnika zmian geometrycznych czynnej powierzchni oraz deskryptorów sygnału emisji akustycznej

Monitorowanie i ocena zużycia czynnej powierzchni ściernicy może być dokonana pośrednio na podstawie obserwacji zmian wybranych parametrów wyjściowych procesu obróbki, najczęściej na podstawie oceny jakości kształtowanej powierzchni lub na podstawie analizy procesów reszkowych (termicznych, elektrycznych i wibroakustycznych). W pracy badawczej zaproponowano i zweryfikowano, w jaki sposób rejestracja i analiza sygnału emisji akustycznej może zastąpić pomiary geometryczne CPS.

Ocenę postępującego zużycia ściernicy dokonano przez wyznaczenie geometrycznego autorskiego wskaźnika zdolności skrawnych (K_{CPS}), ujmującego wielkości związane bezpośrednio z przekrojem warstwy skrawanej oraz wielkości określające charakter zużycia CPS: liczba wierzchołków ziaren statycznych na jednostkę długości profilu krawędziowego ściernicy (S_{st}), średnia grubość warstwy skrawania przypadająca na jedno aktywne ziarno ściernicze (a_{zsr}), średnia wysokość wierzchołków profilu chropowatości (Rc), starcie względne wierzchołków profilu krawędziowego ściernicy (l_{st}) oraz długość zużycia krawędziowego ściernicy (B_{kr}):

$$K_{CPS} = (S_{st} \cdot a_{zsr} \cdot Rc) / (l_{st} \cdot B_{kr}).$$

Ze względu na fakt, że przyjęty wskaźnik w swojej formule ujmuje związki między parametrami charakterystycznymi dla mikro- i makrogeometrii CPS, przyjęto założenie, że analiza jego wartości może stanowić syntetyczną ocenę zużycia ściernicy. Potwierdza to przykład przedstawiony na wykresie (rys. 10a), który wyraźnie uwidacznia spadek wartości K_{CPS} następujący wraz z upływem czasu pracy ściernicy. Świadczy to o pogarszaniu się stanu jej czynnej powierzchni, a w konsekwencji także zdolności skrawnej.

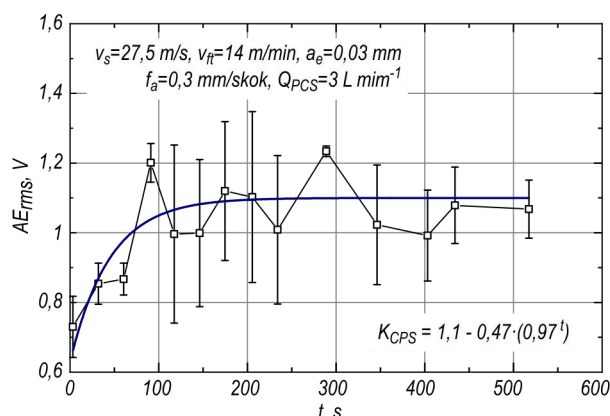


Rys. 10. Przykładowe zmiany wskaźnika zdolności skrawnych K_{CPS} w funkcji czasu pracy ściernicy 99A60J7V (zaciemnione pole określa obszar graniczny wykorzystywany do oceny utraty zdolności skrawnej)

Wykres zaprezentowany na rysunku 10a przedstawia uśrednione zmiany geometrycznego wskaźnika K_{CPS} wraz z jego lokalnymi odchyłkami wartości (odchyleniem standardowym). Na podstawie ułożenia kolejnych punktów pomiarowych można stwierdzić, że wraz z upływem czasu pracy ściernicy, jej zdolność skrawna malała do wartości około 0,005. Wartość ta została wyznaczona arbitralnie za graniczną dla konkretnych warunków i parametrów nastawczych procesu szlifowania. Zmiany wskaźnika następują stabilnie, co można opisać potęgową funkcją regresji z wysokim stopniem dopasowania danych do modelu.

Dla porównania, na rysunku 10b zamieszczono wykres zmian długości zużycia krawędziowego ściernicy (B_{kr}). Jest to charakter jednoznaczny z silną tendencją rosnącą, co można tłumaczyć postępującym zużyciem wytrzymałościowym ściernicy. W tym przypadku również można wyznaczyć wartość graniczną (zacierniowany obszar na wykresie), która wskazywałaby na przekroczenie dopuszczalnego zużycia kształtowego CPS, w tym także zwiększenie szerokości strefy styku ściernicy z powierzchnią obrabianą.

Analiza sygnału AE, której uśrednione pomiary przedstawiono na rys. 11 wskazuje na szybki wzrost sygnału w pierwszym okresie pracy ściernicy, a następnie na niestabilizowane zmiany w paśmie od 1 do 1,2 V. Wartość skuteczna sygnału jest pochodną jego energii, stąd można domniemać, że wraz z upływem czasu pracy ściernicy oraz postępującym procesem zużycia jej czynnej powierzchni, energia impulsów sygnału AE wzrasta, a tym samym wzrasta całkowita energia procesów zachodzących w strefie obróbki.



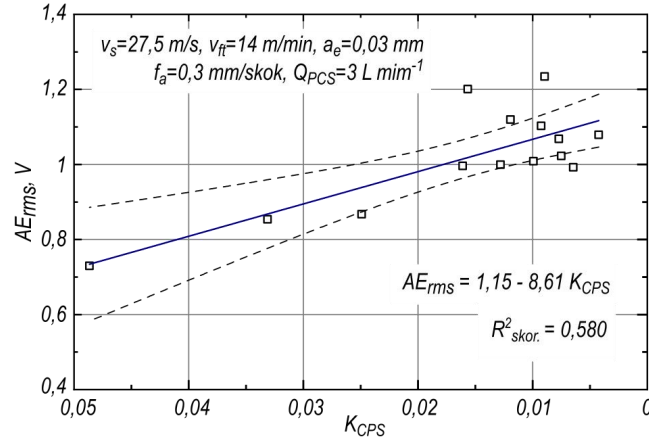
Rys. 11. Uśrednione zmiany sygnału emisji akustycznej (AE_{rms}) w funkcji czasu pracy ściernicy 99A60J7V)

Warunki procesu szlifowania przez określony czas zapewniają występowanie zjawiska samoostrzenia CPS i utrzymywanie zdolności skrawnej. W zależności od intensywności oraz typu źródeł sygnału AE (pękanie i kruszenie ziaren lub spoiwa), rejestruje się sygnał o znacznej zmienności. Proces taki jest jednak ograniczony, a jego tendencja powoli zanika na korzyść zjawisk zużycia ściernego. Pod koniec analizowanego okresu pracy ściernicy, w sygnale AE_{rms} można zaobserwować zmniejszenie rozstępu wartości i spadek odchylenia standardowego. Otrzymane relacje, pomiędzy wartością skuteczną emisji akustycznej AE_{rms} , a wskaźnikiem zdolności skrawnej ściernicy K_{CPS} , przedstawiono na rys. 12.

Typowa analiza obciążenia ziaren ściernych, zdolności skrawnej ściernicy, a tym samym bieżących warunków usuwania materiału w procesie szlifowania, bardzo często uwzględnia pomiary składowych siły szlifowania, przypadających na jednostkową powierzchnię strefy obróbki. W pracy badawczej zaproponowano nowy, autorski wskaźnik energetyczny, opisujący zdolność skrawną ściernicy z zastosowaniem energii sygnału emisji akustycznej przypadającą na jednostkową powierzchnię kontaktu ściernicy ($B_{kr} \cdot L_{\psi}$):

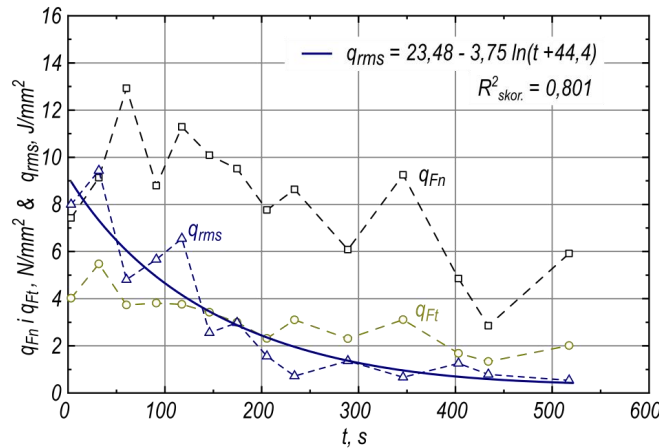
$$q_{rms} = E_{AE} / (B_{kr} \cdot L_{\psi}), [J/mm^2].$$

gdzie: E_{AE} — energia sygnału emisji akustycznej, B_{kr} — długości zużycia krawędziowego ściernicy, L_{ψ} — geometryczna długości styku ściernicy z przedmiotem obrabianym (zależna od średnicy ściernicy oraz głębokości szlifowania).



Rys. 12. Relacje między wartością skuteczną sygnału AE a wskaźnikiem zdolności skrawnej ściernicy (K_{CPS}) w rozpatrywanych warunkach realizacji procesu szlifowania

Charakter zmian wskaźnika q_{rms} w funkcji czasu pracy ściernicy dla wybranego przypadku szlifowania przedstawiono na rysunku 13. Przebieg ten charakteryzuje się systematycznym spadkiem wartości, podobnie jak ma to miejsce w przypadku wskaźników oszacowanych dla składowych siły szlifowania.



Rys. 13. Zmiany wartości wskaźników siły szlifowania oraz energii sygnału emisji akustycznej przypadających na jednostkową powierzchnię strefy obróbki w funkcji czasu pracy ściernicy

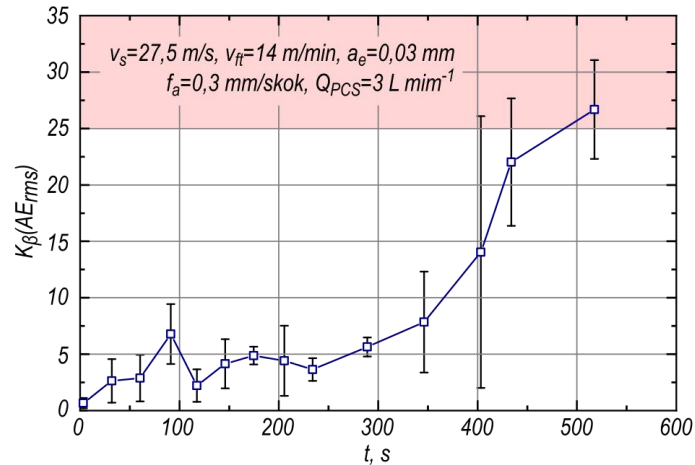
Na końcu analizowanego okresu pracy ściernicy wskaźnik q_{rms} osiąga swoją najmniejszą wartość (w przykładzie powyżej $0,5374 J/mm^2$), co można wykorzystać jako charakterystyczną wartość graniczną w ocenie zużycia ściernicy.

Z powyższego można wnioskować, że zmiany wskaźnika q_{rms} są skorelowane z tą zdolnością skrawną ściernicy. Zmienność tego wskaźnika odniesiono do zdolności skrawnej ściernicy, określonej wskaźnikiem K_{CPS} , co pozwoliło określić odpowiedni model:

$$q_{rms} = 25 + 5,4 \ln(K_{CPS} + 0,004).$$

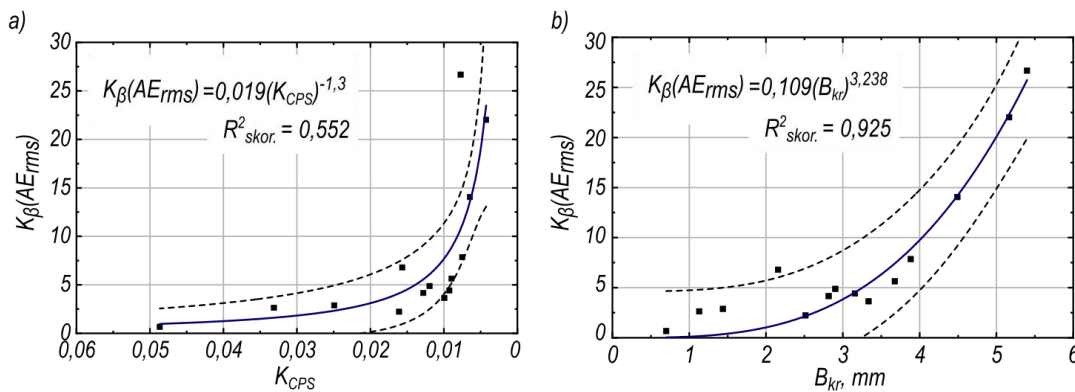
Bardzo istotnym jest też fakt częstego wykorzystywania rozkładu beta sygnału do analizy wyników badań stanu narzędzi skrawających w oparciu o hipotezę, że rozkład beta prawidłowo opisuje funkcję rozkładu wartości RMS sygnału AE.

Prace własne skupiono na ocenie utraty zdolności skrawnych ściernicy z zastosowaniem wskaźnika kurtozy sygnału emisji akustycznej $K_{\beta}(AE_{rms})$. Analizy wykazały, że zmiany parametru kurtozy, określone na podstawie próbek wartości skutecznej sygnału AE, są zależne od zmian zachodzących na czynnej powierzchni ściernicy. Parametr $K_{\beta}(AE_{rms})$ wzrasta szczególnie istotnie w końcowej fazie ocenianego czasu pracy ściernicy (rys. 14).



Rys. 14. Utrata zdolności skrawnej ściernicy wyrażona przez współczynnik kurtozy rozkładu wartości w sygnale AE

Charakter zmienności parametru AE_{rms} przekłada się na korelację ze zmianami geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej ściernicy oraz długości zużycia krawędziowego, co zaprezentowano na rysunku 15. Obie relacje są wyraźnie zarysowane, choć w przypadku wskaźnika K_{CPS} współczynnik determinacji wynosi tylko 0,552.



Rys. 15. Zmiany kurtozy wartości skutecznej sygnału AE w funkcji: a) geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej ściernicy, b) długości zużycia krawędziowego ściernicy

Wzrost kurtozy sygnału AE wraz z upływem czasu pracy ściernicy można wytłumaczyć postępującym zużyciem jej czynnej powierzchni i związanym z tym spadkiem liczby aktywnych ziaren ściernych oraz zanikaniem procesu mikroskrawania na rzecz procesów bruzdowania oraz tarcia o powierzchnię obrabianego materiału. W efekcie spada amplituda

oraz energia zdarzeń w sygnale AE, a ten staje się bardziej skupiony wokół swojej wartości średniej.

Najważniejsze wnioski z oceny zmian zdolności skrawnej ściernicy przy pomocy syntetycznego wskaźnika zmian geometrycznych czynnej powierzchni oraz deskryptorów sygnału emisji akustycznej:

- Autorski wskaźnik geometrycznego stanu starcia i zużycia wytrzymałościowego, stanowi syntetyczną ocenę CPS.
- Przeprowadzone analizy potwierdzają, że sygnał AE może być wykorzystany do monitorowania i oceny zużycia czynnej powierzchni ściernicy.
- Wzrost wartości parametru AE_{rms} występuje od zabiegu obciążania do momentu ustabilizowania stanu CPS (pierwsza faza pracy ściernicy).
- Zużycie krawędziowe ściernicy, występujące w okresie jej trwałości, znajduje swoje odzwierciedlenie w zmienności sygnału AE. Wzrost amplitudy sygnału AE, występujący w trakcie zużycia krawędziowego CPS, najprawdopodobniej spowodowany jest większą liczbą ziaren aktywnych na styku ściernicy z powierzchnią obrabianą, a tym samym źródeł impulsów.
- Zmiany wartości skutecznej sygnału AE mogą być interpretowane także w kontekście postępującego starcia oraz utraty zdolności skrawnej CPS. Systematyczny spadek wartości RMS sygnału AE następuje w końcowej fazie pracy ściernicy równoległe do wzrostu wartości geometrycznego wskaźnika zdolności skrawnej ściernicy (K_{CPS}).
- Do oceny postępującego stopienia ściernicy można wykorzystać zaproponowany wskaźnik energii sygnału AE przypadającej na jednostkową powierzchnię kontaktu ściernicy z przedmiotem obrabianym (q_{rms}). Wynika to z jego charakteru zmienności w funkcji czasu pracy ściernicy. Zmienność energii sygnału AE, przypadająca na jednostkową powierzchnię kontaktu ściernicy z przedmiotem obrabianym, posiada istotną korelację z geometrycznym wskaźnikiem zdolności skrawnej ściernicy (K_{CPS}). Dla obu wskaźników można wyznaczyć wartość graniczną, po przekroczeniu, której ściernicę należy uznać za stępioną.
- Pomiar wielkości geometrycznych może być całkowicie zastąpiony przez bieżącą rejestrację i ocenę deskryptorów sygnału AE, powiązanych z rozkładem beta. Szczególnie powiązanie znajduje tu współczynnik kurtozy rozkładu wartości sygnału względem średniej. Jego korelację z długością zużycia krawędziowego, można wykorzystać wprost do oceny zużycia wytrzymałościowego ściernicy lub pośrednio — w celu oszacowania parametru q_{rms} bez potrzeby wykonywania pomiaru zmiany geometrii zarysu krawędziowego ściernicy.
- Wskaźnik kurtozy (spłaszczenia) rozkładu wartości w rejestrowanym sygnale AE_{rms} jest parametrem skorelowanym z utratą zdolności skrawnej ściernicy i osiąga swoją największą wartość w końcowej fazie okresu trwałości narzędzia, co oznacza, że może być samodzielną wielkością do oceny stanu CPS.
- Wskazane deskryptory sygnału AE mogą być wykorzystane do monitorowania i oceny stanu CPS w systemie diagnostycznym.

Publikacje:

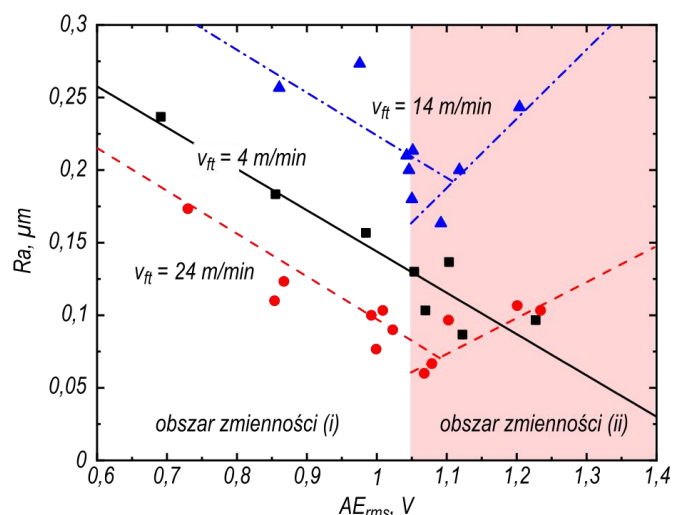
1. **Sutowski P., Plichta S.:** *An Investigation of the Grinding Wheel Wear with the Use of Root Mean Square Value of Acoustic Emission.* Archives of Civil And Mechanical Engineering, 2006, 6(1): 87-98. DOI: 10.1016/S1644-9665(12)60078-8.

2. **Sutowski P.:** *Wykorzystanie wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej oraz metod sztucznej inteligencji do oceny zużycia ściernicy.* *Pomiary Automatyka Kontrola*, 2009, 55(4): 255-258.
3. **Sutowski P.:** *Oszacowanie stopnia zużycia ściernicy z wykorzystaniem sygnału emisji akustycznej oraz teorii zbiorów rozmytych.* *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji*, 2010, 30(4): 47-56.
4. **Sutowski P., Plichta S.:** *Wykorzystanie wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej do oceny zużycia ściernicy.* *Zeszyty Naukowe Wydziału Mechanicznego Nr 36, XXVII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej pod patronatem Sekcji Podstaw Technologii Komitetu Budowy Maszyn PAN, Koszalin-Sarbinowo, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2004, 367-376. ISSN: 1640-4572.*

3.5. Opracowanie metodyki oceny zmian chropowatości powierzchni przedmiotu szlifowanego przy pomocy analizy sygnału emisji akustycznej

Prace eksperymentalne wykazały, że dobór parametrów procesu szlifowania znacząco wpływa na zmienność przekrojów elementarnych warstw skrawanych, chropowatość kształtowanej powierzchni oraz rejestrowane wartości sygnału AE.

Znaczny rozrzut lokalnych punktów pomiarowych określonych dla parametrów mikrostruktury geometrycznej powierzchni szlifowanych przełożył się na brak wyraźnych korelacji z sygnałem AE, rejestrowanym w trakcie procesu obróbki. Pomimo braku wiążących korelacji w sferze ogólnej, analiza wyników statystycznych funkcji regresji wykazała, że można określić model stanowiący o powiązaniu parametru R_a profilu chropowatości i wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej (rys. 16).



Rys. 16. Zależności pomiędzy chropowatością powierzchni szlifowanej a wartością skuteczną sygnału AE dla różnych prędkości posuwu (zaciemiony obszar wskazuje na możliwość zmiany kierunku relacji)

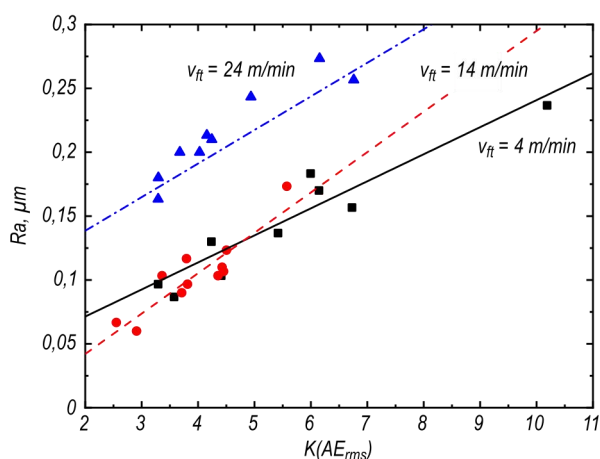
Zależności zaprezentowane na wykresie określone są następującymi funkcjami:

$$Ra = \begin{cases} 0,001364v_{ft}^2 - 0,030621v_{ft} + \\ + 0,55 - 0,304476667 AE_{rms}, & \text{for (i),} \\ -0,100059 \ln(v_{ft} - 3,98559) + \\ \left((0,421681 \ln(v_{ft})) - 0,866844 \right) AE_{rms} & \text{for (ii).} \end{cases}$$

przy założeniu wartości granicznej: (i) $AE_{rms} < 1,05$ V, (ii) $AE_{rms} > 1,05$ V.

Ogólnie można stwierdzić, że jeżeli w procesie rejestrowano wartość skuteczną sygnału AE równą 1 V i więcej, otrzymywano zwykle niższą średnią arytmetyczną rzędnych profilu chropowatości powierzchni obrabianych. Mogłoby to oznaczać, że w celu zapewnienia niskich chropowatości przedmiotu należałoby optymalizować przebieg procesu pod kątem rejestrowania względnie wysokich wartości AE_{rms} . Takie stwierdzenie nie jest jednak właściwe, ze względu na fakt przyrostu wartości sygnału AE w trakcie postępującego procesu zużywania się ściernicy.

W wyniku poszukiwań, ustalono, że wraz ze wzrostem spłaszczenia rozkładu sygnału AE_{rms} , rejestrowanego w trakcie eksperymentów, otrzymano zawsze coraz większe wartości średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości szlifowanych powierzchni (rys. 17).

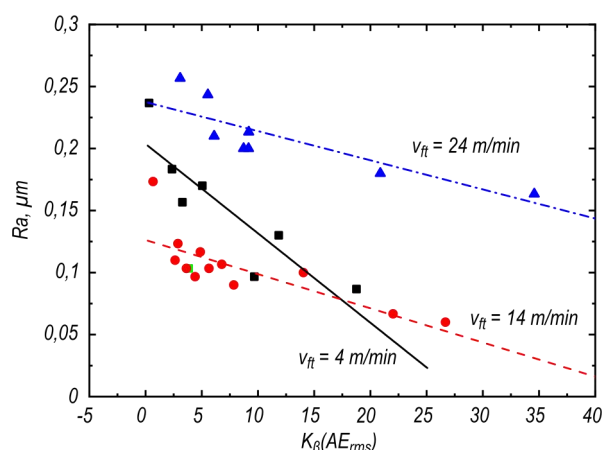


Rys. 17. Zmiany średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości powierzchni próbek w funkcji współczynnika spłaszczenia wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej ($K(AE_{rms})$)

Uwzględniając w modelu regresji wpływ prędkości posuwu stycznego (v_{ft}) otrzymano równanie modelu opisującego zależność średniej arytmetycznej wysokości mikro- nierówności profilu powierzchni:

$$Ra = 0,0008v_{ft}^2 - 0,0195v_{ft} + \\ + 0,0898 + (-0,00008v_{ft}^2 + \\ + 0,0025v_{ft} + 0,0128)K(AE_{rms}).$$

Podobne zależności korelacyjne otrzymano także w przypadku analizy współczynnika koncentracji rozkładu beta (rys. 18) oraz skośności rozkładu.



Rys. 18. Zmiany średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości powierzchni próbek w funkcji parametru kurtozy rozkładu beta wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej

Na podstawie analiz statystycznych opracowano ogólny model średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości powierzchni, który może znaleźć zastosowanie w procesie monitorowania i oszacowywania wyników operacji szlifierskich. W swojej postaci ujmuje on warunki obróbki (prędkości posuwu stycznego) oraz jeden z analizowanych deskryptorów:

$$Ra = 0,000933 v_{fi}^2 - 0,0244 v_{fi} + 0,2859 + (-0,00002 v_{fi}^2 + 0,0008 v_{fi} - 0,01) K_{\beta}(AE_{rms}),$$

$$Ra = 0,0013 v_{fi}^2 - 0,0345 v_{fi} + 0,3859 + (0,00024 v_{fi}^2 - 0,00793 v_{fi} + 0,089) S_{k\beta}(AE_{rms}),$$

$$Ra = 0,044 + 0,0025 \exp(0,109 v_{fi}) q_{rms}.$$

Dokładność predykcji tych modeli zależy od prędkości posuwu v_{fi} i zawiera się w przedziale od 60 do 85%. Im większa prędkość, tym mniejsza dokładność oszacowania wartości Ra .

W przypadku wzdluznych parametrów chropowatości profilu powierzchni szlifowanej, opracowanie modeli korelacyjnych okazało się niemożliwe.

Najważniejsze wnioski z oceny zmian chropowatości powierzchni warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego przy pomocy analizy sygnału emisji akustycznej:

- Dla żadnego z analizowanych parametrów sygnału AE, nie wykazano jednoznacznej i pełnej korelacji z parametrami chropowatości powierzchni.
- W celu oszacowania chropowatości powierzchni przedmiotu szlifowanego za pomocą sygnału AE należy każdorazowo uwzględnić warunki, w których przeprowadzany jest proces, w szczególności wartość posuwu oraz głębokość szlifowania.
- Deskryptorami sygnału AE, które pozwalają zgrubnie oszacować zmiany chropowatości, są przede wszystkim: współczynnik spłaszczenia sygnału wokół jego wartości średniej oraz współczynnik skośności tego rozkładu.
- Modele wiążące amplitudę sygnału AE z parametrem Ra struktury geometrycznej powierzchni pozwalają na oszacowanie wysokości nierówności z pewnością do 80%; w przypadku analizy kurtozy lub skośności rozkładu wartości sygnału AE dokładność modeli określających chropowatość powierzchni wzrasta do 87%.

- Ocena stanu mikrogeometrii powierzchni za pomocą rejestracji sygnału AE wymaga przeprowadzenia dalszych badań i poszukiwania nowych związków korelacyjnych.
- Współczynnik spłaszczenia jest parametrem, który można obecnie dołączyć do analiz w systemie monitorowania i oceny przebiegu procesu szlifowania; im będzie on niższy, tym wzrośnie prawdopodobieństwo otrzymania powierzchni o niskiej chropowatości.

Publikacje:

1. **Sutowski P.:** *Surface evaluation during the grinding process using acoustic emission signal.* Journal of Machine Engineering, 2012, 12(4): 23-34.
2. **Sutowski P.:** *Empiryczna estymacja chropowatości powierzchni oraz składowych siły szlifowania i sygnału emisji akustycznej w procesie szlifowania powierzchni płaskich.* Inżynieria Maszyn, 2015, 20(1): 65-77.
3. **Sutowski P., Plichta S.:** *Wykorzystanie sygnału emisji akustycznej do monitorowania chropowatości powierzchni przedmiotu szlifowanego.* Materiały XXVI Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Łódzkiej, Łódź 2003, 177-182.
4. **Sutowski P.:** *The Possibilities of Monitoring the Grinding Process with the Application of AE Signal. Możliwości monitorowania procesu szlifowania z wykorzystaniem sygnału emisji akustycznej.* [W:] Zeszyty Naukowe Wydziału Mechanicznego Nr 33, „Modern Techniques and Technologies” „Nowoczesne techniki i technologie”, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2004, 301-310. ISSN: 1640-4572.

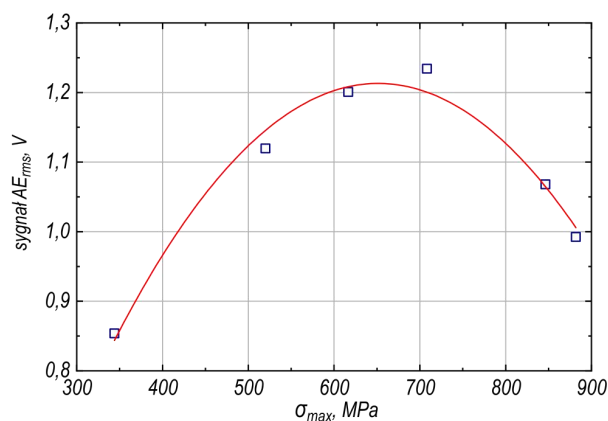
3.6. Ocena stanu naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego przy zastosowaniu analizy wartości skutecznej i wskaźnika właściwej energii impulsów sygnału emisji akustycznej

Efekty obróbki oceniane są między innymi przy pomocy pomiaru cech stanu warstwy wierzchniej (WW). Stan, w jakim znajduje się warstwa wierzchnia materiału kształtowanego w procesie obróbki ściernej, jest wynikiem mechanicznego i cieplnego oddziaływania narzędzia. Stąd rozkład naprężeń jest jednym z podstawowych informacji o warstwie wierzchniej.

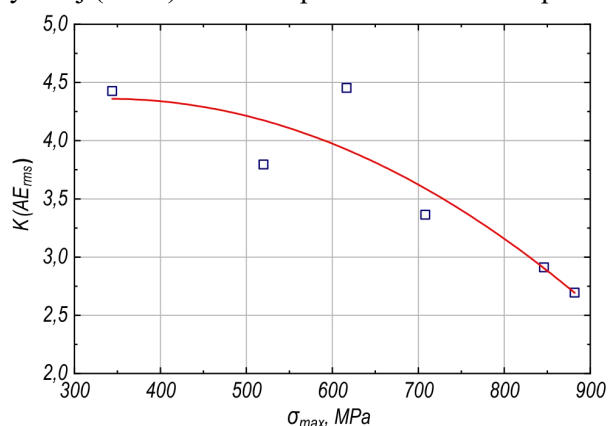
Przykładowe zmiany sygnału AE, uwzględniające podstawowy parametr impulsów AE związany z przenoszoną przez nie energią (wartość skuteczna), w funkcji maksymalnych naprężeń warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego przedstawiono na rys. 19.

Jedynym wyraźnym aspektem we współzależności obu badanych zmiennych jest zbliżony kształt linii trendu dla różnych warunków przebiegu procesu obróbki szlifowaniem. Świadczą one o tym, że wraz ze wzrostem średniej wartości rejestrowanych sygnałów AE można spodziewać się wzrostu naprężeń. Jednakże sygnał AE_{rms} po przekroczeniu pewnej wartości granicznej (1,2 V w przykładzie na rys. 19) zaczyna spadać, gdy ściernica przechodzi do kolejnej, nieodwracalnej fazy zużycia, a wartości naprężeń wciąż rosną.

Znacznie wyraźniejszą zależnością sygnału AE od naprężeń charakteryzuje się zmienność parametru kurtozy. Utworzone linie trendu wyraźnie wskazują na to, że spadek rejestrowanej wartości $K(AE_{rms})$ może być powiązany ze wzrostem naprężeń. Oznacza to, że w przypadku, gdy rozkład sygnału AE charakteryzuje się coraz szerszym rozłożeniem wartości wokół wartości średniej, przez co wysokość rozkładu maleje, to można spodziewać się coraz większych naprężeń (rys. 20).

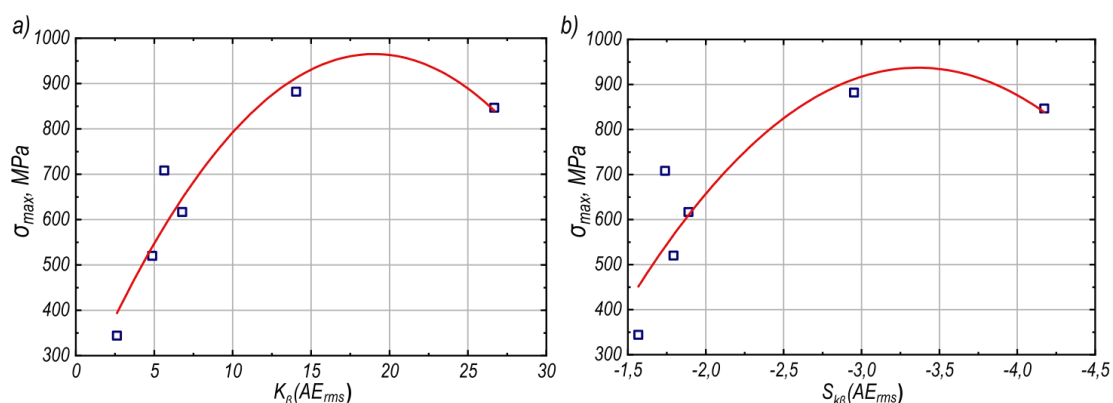


Rys. 19. Korelacje pomiędzy maksymalnymi wartościami naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego (σ_{max}), a rejestrowanymi wartościami skutecznymi sygnału emisji akustycznej (AE_{rms}) w trakcie procesu szlifowania powierzchni płaskich



Rys. 20. Korelacje pomiędzy maksymalnymi wartościami naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego (σ_{max}), a zarejestrowanymi zmianami parametru kurtoza wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej ($K(AE_{rms})$) w trakcie procesu szlifowania powierzchni płaskich

Odmiernym charakterem wykazały się parametry opisujące rozkład beta. Zarówno spłaszczenie $K_{\beta}(AE_{rms})$ jak i skośność $S_{k\beta}(AE_{rms})$ okazały się skorelowane z wartościami naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotów poddanych obróbce (rys. 21).



Rys. 21. Przykładowe zależności między maksymalnymi naprężeniami warstwy wierzchniej przedmiotów szlifowanych a parametrami rozkładu beta rejestrowanej wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej: a) kurtoza rozkładu, b) skośność rozkładu rejestrowanych wartości

Zaprezentowane zależności korelacyjne, które mogą posłużyć do wyznaczenia wartości naprężeń, mają następującą postać modeli matematycznych:

$$\sigma_{max} = 195,8477 + 80,8874 K_{\beta}(AE_{rms}) - 2,1265 K_{\beta}(AE_{rms})^2,$$

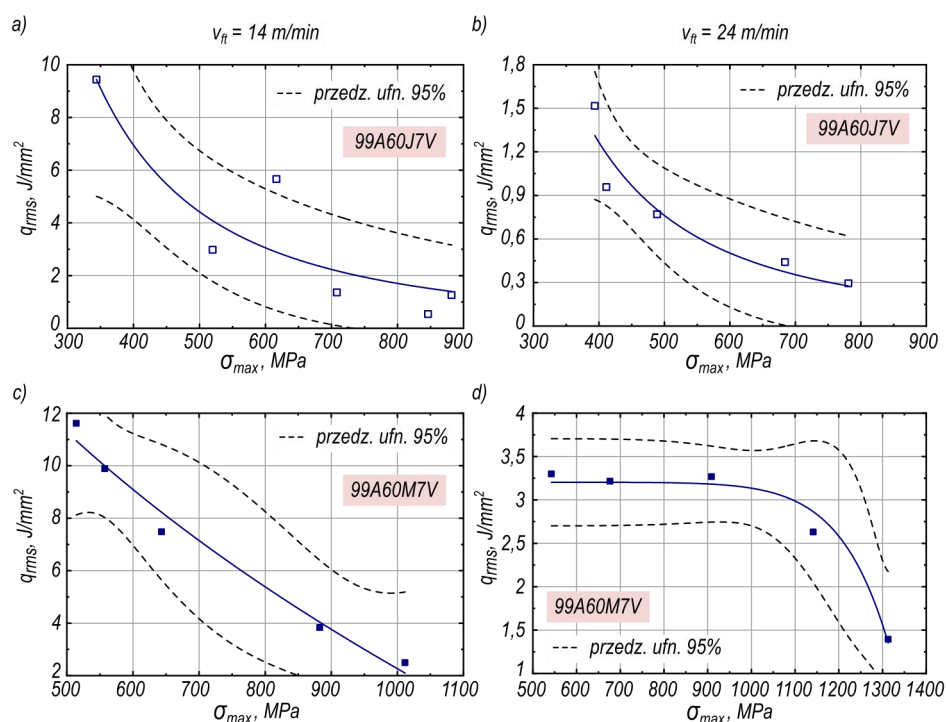
$$K_{\beta}(AE_{rms}) = 75,70177 - 0,22424 \sigma_{max} + 0,00017 \sigma_{max}^2,$$

$$\sigma_{max} = -766,70 - 1013,17 S_{k\beta}(AE_{rms}) - 150,61 S_{k\beta}(AE_{rms})^2,$$

$$S_{k\beta}(AE_{rms}) = -8,82580 + 0,02186 \sigma_{max} - 0,00002 \sigma_{max}^2.$$

Powyższe relacje potwierdzono w badaniach eksperymentalnych, w których niezależnie od twardości ściernicy oraz charakteru jej zużycia, odnotowano silne korelacje między zmianami sygnału AE oraz oszacowanymi wartościami naprężeń własnych w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego.

Na wielkość naprężeń powstających w warstwie wierzchniej przedmiotów obrabianych w trakcie operacji szlifowania wpływ mają nie tylko wartości sił, ale również wielkość powierzchni, na które oddziałują. Z tego powodu, do analiz dołączono wskaźnik q_{rms} , opisujący ilość energii w sygnale AE przypadającą na jednostkową powierzchnię kontaktu ściernicy z przedmiotem obrabianym. Zmienność tego wskaźnika w funkcji naprężeń maksymalnych warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego przedstawiono w postaci wykresów na rys. 22.



Rys. 22. Zmienność wskaźnika q_{rms} w funkcji naprężeń maksymalnych warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego dla ściernicy 99A60J7V (górny wiersz) oraz 99A60M7V (dolny wiersz) dla dwóch różnych prędkości posuwu stycznego v_{fi} : 14 m/min (kolumna lewa), 24 m/min (kolumna prawa)

Szczegółowe analizy wykazały, że korelacje zachodzące między maksymalnymi wartościami naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego i zarejestrowanymi zmianami wskaźnika energii impulsów emisji akustycznej przypadającej na jednostkową powierzchnię wskazują na jednoznaczną zależność.

Na uwagę zasługuje fakt, że wraz ze wzrostem naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu szlifowanego, który następował w funkcji czasu pracy ściernicy, zarejestrowano spadek energii impulsów emisji akustycznej. Zaistnienie powyższego zjawiska można uzasadnić zmieniającym się udziałem intensywności i energii źródeł impulsów AE oraz przyrostem długości zużycia krawędziowego ściernicy.

Energia źródeł impulsów sygnału AE może rosnać wraz z czasem pracy ściernicy, ale wzrost ten jest ograniczony. W badaniach potwierdzono, że w rezultacie zużycia ściernicy spada amplituda oraz energia zdarzeń w sygnale AE, którego wartości coraz bardziej skupiają się wokół wartości średniej (następuje szybki przyrost kurtozy $K_{\beta}(AE_{rms})$). W połączeniu z postępującym zużyciem wytrzymałościowym i przyrostem powierzchni kontaktu ściernicy z przedmiotem obrabianym następuje ustawiczne zmniejszanie wskaźnika q_{rms} .

Najważniejsze wnioski z ocena stanu naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego przy zastosowaniu analizy wartości skutecznej i wskaźnika właściwej energii impulsów sygnału emisji akustycznej:

- Otrzymane wyniki świadczą o istotności pomiaru i oceny sygnału AE oraz wskazują na wysoką efektywność tego narzędzia do szacowania naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego. Wynika to z faktu, że sygnał AE ujmuje w swojej postaci szereg różnych czynników, mających wpływ na ostateczne kształtowanie się wyników obróbki.
- Spośród analizowanych deskryptorów sygnału AE, największe wartości współczynnika determinacji, dla opracowanych modeli, posiadają parametry kurtozy i skośności rozkładu beta oraz wskaźnik reprezentujący wartość energii impulsów AE, przypadającą na jednostkę powierzchni kontaktu ściernicy z przedmiotem obrabianym.
- Wskaźnik q_{rms} nie koncentruje się wyłącznie na makrogeometrycznych zmianach CPS, lecz przez uwzględnienie zmian energetycznych w strefie szlifowania, stąd znacznie pełniej oddaje charakter procesów zachodzących podczas obróbki, w tym zjawisk występujących w materiale obrabianym.
- Wyznaczone modele mogą posłużyć do oceny stanu naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego, w szczególności w przypadku analizy granicznej opartej na wartości q_{rms} .

Publikacje:

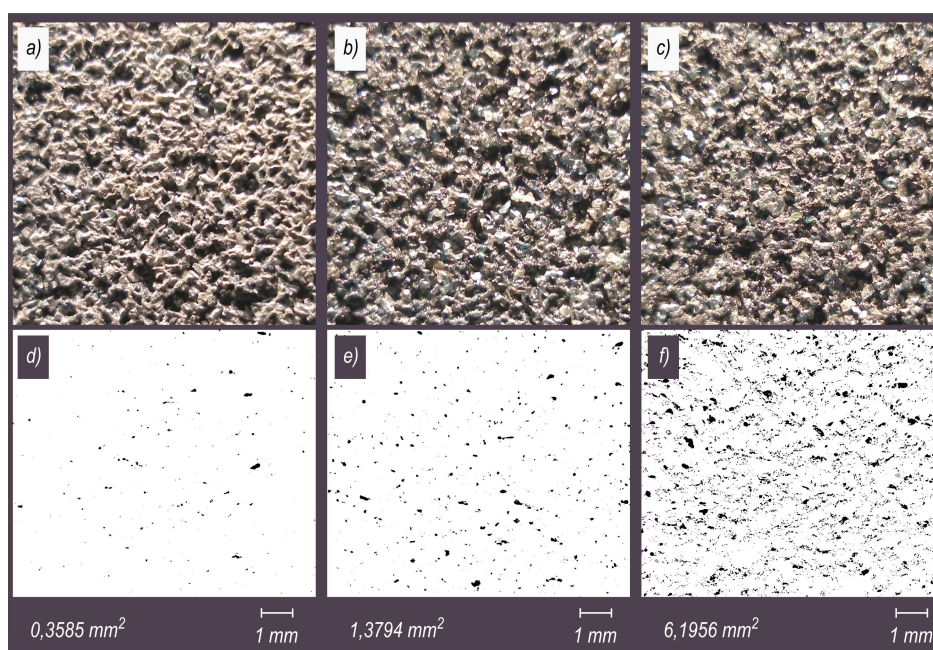
1. **Sutowski P.:** *Surface evaluation during the grinding process using acoustic emission signal.* Journal of Machine Engineering, 2012, 12(4): 23-34.
2. **Sutowski P.:** *Oszacowanie maksymalnych naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotów szlifowanych z wykorzystaniem sygnału emisji akustycznej.* [W:] Plichta J. (red.) Współczesne problemy obróbki ścierniczej. Monografia Wydziału Mechanicznego nr 167, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2009, 369-378. ISSN: 0239-7129.
3. **Sutowski P.:** *The Possibilities of Monitoring the Grinding Process with the Application of AE Signal. Możliwości monitorowania procesu szlifowania z wykorzystaniem sygnału emisji akustycznej.* [W:] Zeszyty Naukowe Wydziału Mechanicznego Nr 33, *Modern Techniques and Technologies (Nowoczesne techniki i technologie)*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2004, 301-310. ISSN: 1640-4572.

3.7. Opracowanie metodyki oceny procesu szlifowania materiału typu Inconel® Alloy 600 z zastosowaniem sygnału emisji akustycznej

W przeprowadzonych badaniach zasadniczym celem było określenie szlifowalności stopu niklu Ni-Cr-Fe oraz wyznaczenie optymalnych warunków obróbki z jednoczesną analizą przebiegu procesu, jego wyników. Metodyka badań zakładała pomiaru oraz analizę deskryptorów sygnału AE, zarówno w domenie czasu, jak i częstotliwości.

Analizowany materiał, stop niklu Ni-Cr-Fe, należy do rodziny austenitycznych nadstopów niklowo-chromowych, które są zazwyczaj używane do pracy w wysokiej temperaturze. Charakterystyka stopów na osnowie niklu, w odniesieniu ich podatności na obróbkę skrawaniem, szczególną uwagę zwraca na dużą ciągliwość, małą przewodność cieplną oraz podatność na utwardzanie w procesie obróbki. Badania eksperymentalne w tym zakresie wykazały, że w przyjętym zakresie parametrów nastawnych największy wpływ na szlifowalność stopu Inconel® 600 miał przekrój poprzeczny warstwy skrawanej. Dominujący wpływ miała wielkość a_e , mniejszy — wartość posuw osiowego (f_a).

Badania wykazały także znaczące zużycie krawędziowe ściernic, które wynikało ze wzrostu obciążenia wierzchołków ziaren aktywnych z powodu ich stępienia, a w konsekwencji destrukcji mostków spoiwa. Dodatkowym czynnikiem intensyfikującym ten proces było zalepienie wierzchołków ziaren i w konsekwencji wzrost energii tarcia oraz temperatury w strefie styku. Na rys. 23 przedstawiono przykładowe obrazy makroskopowe czynnej powierzchni ściernicy z ziarnami zielonego węgla krzemu (99C) w funkcji czasu szlifowania dla eksperymentalnie dobranych najkorzystniejszych wartości parametrów nastawczych procesu obróbki ze względu na szlifowalność materiału.

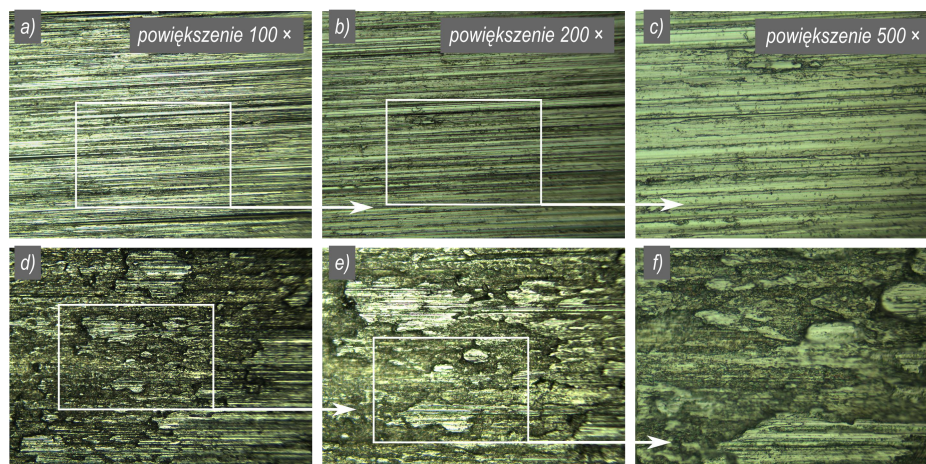


Rys. 23. Obrazy makroskopowe ściernicy zbudowanej z ziaren zielonego węgla krzemu (99C) po usunięciu określonej ilości materiału obrabianego (drugi rząd reprezentuje płaskie powierzchnie, które odbiły światło kamery — ziarna ze startą krawędzią; sumaryczną powierzchnię starcia podano w mm^2): a) ściernica ostra ($V_w = 0 \text{ mm}^3$, po zabiegu obciągania), b) ściernica częściowo stępiona (200 mm^3), c) ściernica całkowicie stępiona — starte wierzchołki ziaren (440 mm^3)

Drugi rząd zdjęć to przetworzone cyfrowo za pomocą funkcji progowania i segmentacji obrazy CPS. Ciemne obszary reprezentują miejsca, które ze względu na spłaszczenie odbijały światło kamery. Sumaryczną powierzchnię starcia dla kolejnych powierzchni zamieszczono pod obrazami. Wzrasta ona od wartości 0,3585 mm², przez 1,3794 mm² do 6,1956 mm².

W procesie szlifowania stopu Inconel® 600 jakość obrobionej powierzchni zależała przede wszystkim od bieżącego stanu i stopnia zużycia czynnej powierzchni ściernic.

W początkowym okresie szlifowania, gdy ściernica charakteryzuje się dobrymi zdolnościami skrawnymi, na powierzchni przedmiotu obserwowanej w skali mikro występują wyraźnie widoczne rysy ukształtowane pojedynczymi ziarnami o ostrych wierzchołkach. Rysy te nie posiadają wypływek bocznych i charakteryzują się dużą ciągłością oraz jednorodnością. W skali makro struktura powierzchni jest jednolita, bez zauważalnych wad. W przypadku postępującego tępienia ściernicy powstają lokalne wypływy boczne na śladach skrawania, co zakłóca tę jednorodność i pogarsza jakość struktury geometrycznej powierzchni (rys. 24a-c). W momencie utraty właściwości skrawnej przez ściernice, warunki ich pracy były na tyle niekorzystne, że w wyniku wzrostu temperatury następowały duże odkształcenia w strefie szlifowania, prowadzące do przywierania ściernicy do powierzchni przedmiotu obrabianego (ang. *wheel-bite*). Rezultatem tego były, w zależności od warunków i parametrów obróbki, lokalne lub obejmujące całą powierzchnię przypalenia szlifierskie (rys. 24d-f).

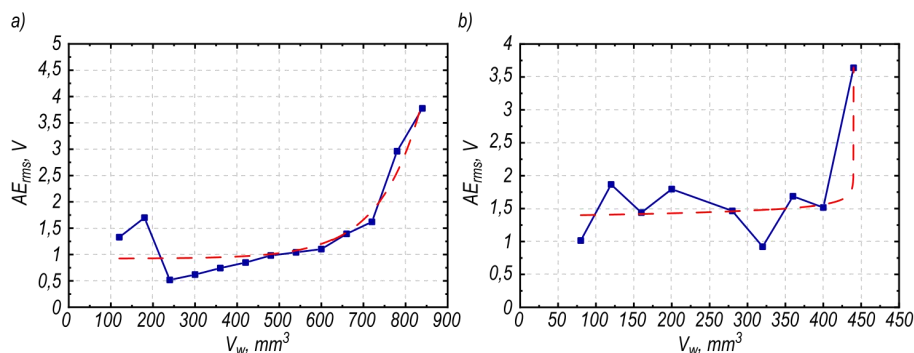


Rys. 24. Obrazy powierzchni po szlifowaniu ściernicą 99A60P7V wykonane mikroskopem metalograficznym typu B-353MET (OPTIKA SRL, Włochy): a) względnie ostrą ($V_w = 120 \text{ mm}^3$), b) stępioną (1020 mm^3)

Wartości rejestrowanego w przeprowadzonych badaniach sygnału AE zależały od zjawisk zachodzących w układzie OUPN, szczególnie na styku narzędzia z powierzchnią przedmiotu. Zmiany średnich wartości RMS (wartość skuteczna sygnału, będąca jego pochodną energetyczną) w funkcji czasu pracy ściernicy wyrażone wielkością ubytku materiału obrabianego (rys. 25) świadczą o tym, że parametr ten posiada współzależność ze zużyciem narzędzia.

Zarejestrowane sygnały wartości skutecznej emisji akustycznej charakteryzowały się ogólną tendencją wzrostową w funkcji czasu pracy narzędzia. Wzrost ten można opisać funkcją potęgową w postaci uproszczonego modelu Bleasdale-Neldera. W takim przypadku uzyskuje się formuły statystycznie istotne, które można zastosować do oszacowania kolejnych wartości parametru AE_{rms} w procesie szlifowania stopu Inconel® 600:

$$AE_{rms} = 1,86657 - 0,0021 V_w^{1/1,67265}, AE_{rms} = 0,00133 - 3,03171 \cdot 10^{-6} V_w^{1/20,2747}.$$



Rys. 25. Zmiany wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej w funkcji objętości usuniętego materiału szlifowanego ściernicą: a) 99A60P7V, b) 99C60P7V

Spektrogramy zawarte na rys. 26 przedstawiają wykresy widma amplitudowego sygnału AE, zarejestrowanego w czasie kontaktu ściernicy z materiałem obrabianym. Spektrogramy znacznie różnią się dla ściernicy ostrej (rząd pierwszy), średnio stępionej (rząd drugi) i całkowicie zużytej (rząd trzeci).

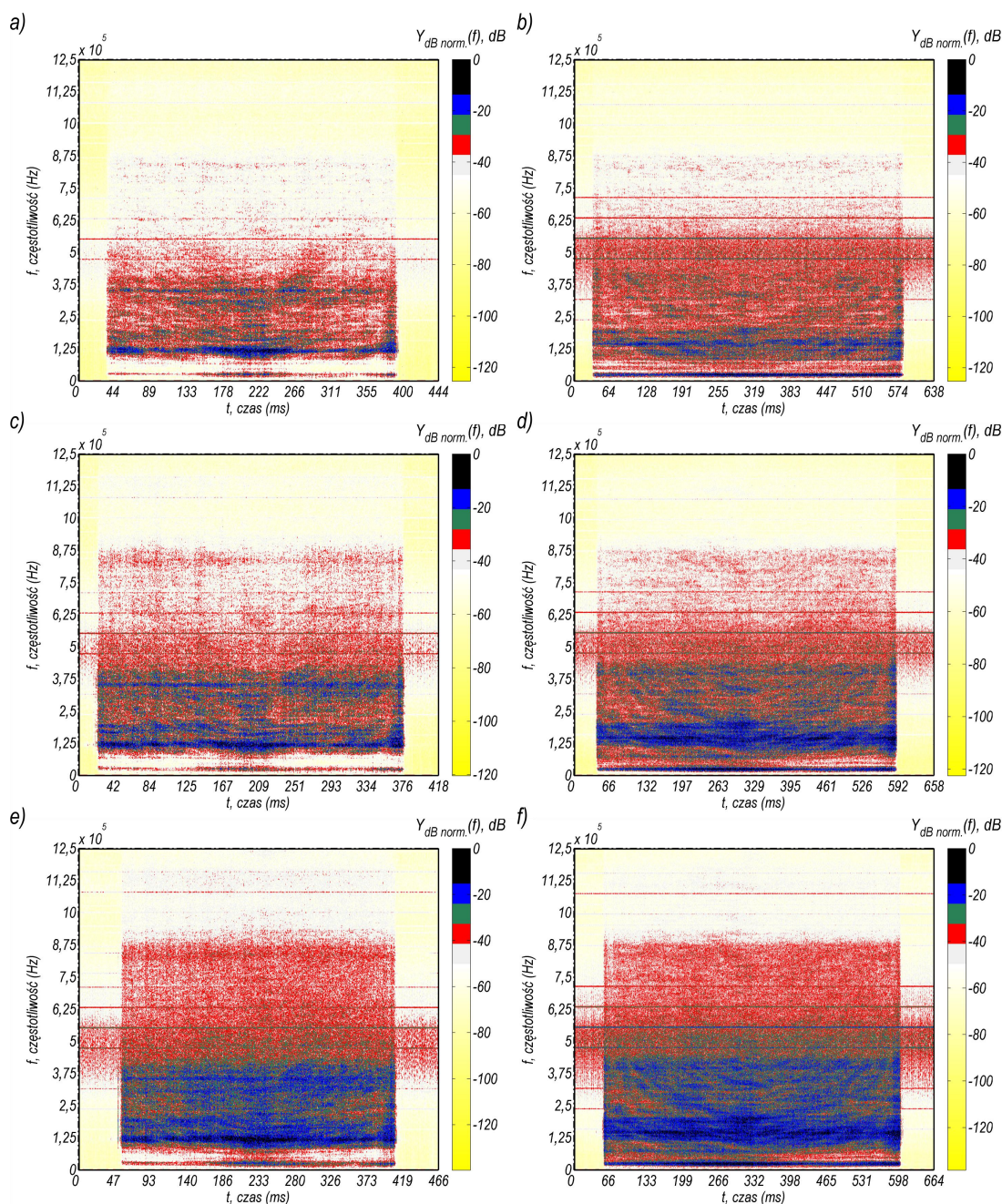
Podczas postępującego procesu zużycia narzędzia wyraźnie widać przyrost natężenia składowych harmonicznych sygnału wolnozmiennych (o małych częstotliwościach), a także pojawienie się i stopniowy przyrost składowych szybkozmiennych (o wysokich częstotliwościach). Należy przypuszczać, że składowe wolnozmiennne mogą być związane ze wzrostem amplitudy drgań samowzbudnych układu OUPN, natomiast pojawienie się składowych o wysokich częstotliwościach było odzwierciedleniem wzrostu intensywności zjawisk związanych ze zużyciem narzędzia.

Oznacza to, że jednoczesna analiza ultradźwięków w domenie częstotliwości i czasu, po zastosowaniu odpowiednio skierowanej analizy, może być dobrym narzędziem określającym szlifowalność materiału oraz stopień zużycia ściernicy.

Najważniejsze wnioski z oceny procesu szlifowania materiału typu Inconel® Alloy 600 z zastosowaniem sygnału emisji akustycznej:

- Wyniki przeprowadzonych badań i analiz wykazały, że stopy niklu Ni-Cr-Fe są materiałami, które wymagają określonych warunków, aby proces szlifowania był zrealizowany wydajnie i bez niepożądanych uszkodzeń cieplnych powierzchni obrabianej.
- Ściernice z ziarnami elektrokorundu szlachetnego oraz zielonego węgliku krzemu ulegają względnie szybkiemu zużyciu, co objawia się ich silnym starciem. Z tych powodów celowe jest wprowadzenie monitorowania oraz oceny procesu szlifowania tego typu materiałów.
- Jak wykazano w przeprowadzonych eksperymentach oraz analizach, stopień stępienia ściernicy może być oceniany przez pomiar wartości skutecznej sygnału AE. Wartość AE_{rms} charakteryzuje się tendencją wzrostową w funkcji czasu pracy ściernicy i objętości usuwanego materiału, osiągając swoją wartość maksymalną w momencie wystąpienia wad szlifierskich na powierzchni obrabianej.
- W analizie sygnału niezwykle istotna okazała się ocena amplitudy jego harmonicznej. Wraz z postępującym zużyciem ściernicy w sygnale pojawiają się składowe w zakresie wysokich częstotliwości (powyżej 600 kHz). Monitorowanie ich obecności oraz intensywności może być wykorzystane w systemie nadzorowania procesu szlifowania materiałów trudnoskrawalnych i wyznaczania momentu utraty zdolności skrawnej CPS.
- Ze względu na postępujące zużycie czynnej powierzchni ściernicy, które może nastąpić po względnie krótkim okresie szlifowania stopów niklu, jak i innych materiałów trudno

skrawalnych, zaleca się wprowadzenie rozbudowanego systemu monitorowania oraz oceny przebiegu procesu. Określanie stanu technicznego ściernicy powinno być oparte równocześnie o analizę sygnału w domenie czasu i częstotliwości. Ze względu jednak, że diagnostyka taka nie jest prosta (wymaga równoległej analizy wielu wartości) efektywnym wydaje się być wprowadzenie systemów ekspertowych, wspomaganych inteligentnymi metodami przetwarzania, klasyfikacji i wnioskowania.



Rys. 26. Spektrogram sygnału emisji akustycznej w funkcji ilości usuniętego materiału: a) ostra ściernica 99A60P7V, b) ostra ściernica 99C60P7V, c) ściernica 99A60P7V w połowie okresu trwałości, d) ściernica 99C60P7V w połowie okresu trwałości, e) ściernica 99A60P7V po utracie zdolności skrawnej, f) ściernica 99C60P7V po utracie zdolności skrawnej

Publikacje:

1. Plichta J., Nadolny K., Musiał W., **Sutowski P.:** *Wysoko efektywne szlifowanie materiałów trudno skrawalnych*. Monografia Wydziału Mechanicznego nr 225, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2012.
2. **Sutowski P.:** *Proces szlifowania powierzchni płaskich w materiałach trudno skrawalnych*. [W:] Plichta J., *et al.* (red.) *Wysoko efektywne szlifowanie materiałów trudno skrawalnych*. Monografia nr 225, Wydział Mechaniczny, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2012, 178-205. ISSN 0239-7129.
3. **Sutowski P.,** Musiał W., Nadolny K.: *Możliwości monitorowania, diagnostyki i sterowania procesami szlifowania materiałów trudno skrawalnych*. [W:] Plichta J., *et al.* (red.) *Wysoko efektywne szlifowanie materiałów trudno skrawalnych*. Monografia nr 225, Wydział Mechaniczny, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2012, 274-306. ISSN 0239-7129.

3.8. Opracowanie metodyki monitorowania i oceny hybrydowego procesu szlifowania elektroerozyjnego z zastosowaniem sygnału emisji akustycznej w środowisku wyładowań elektrycznych

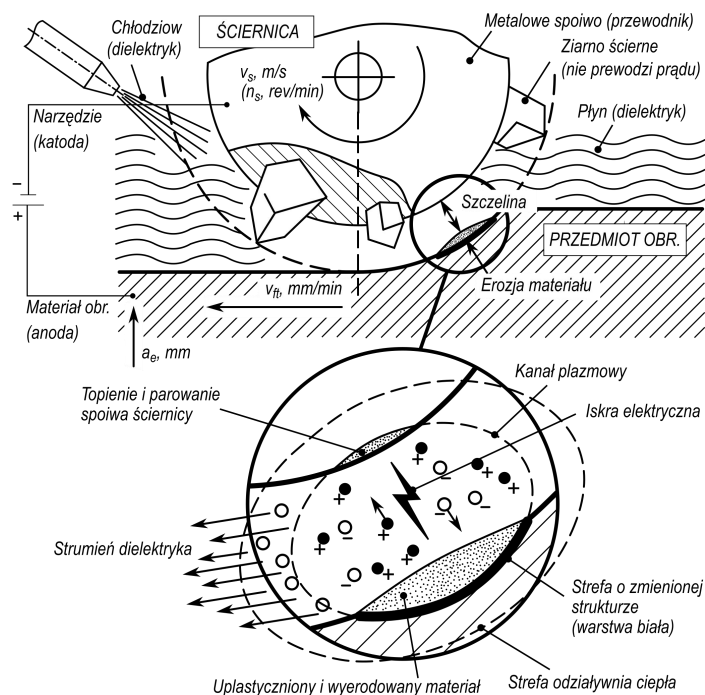
W procesach obróbki ścierniej istotnym problemem są właściwości materiałów i ich skrawalność, co szczególnie zauważalne jest w przypadku materiałów takich jak stopy tytanu, stopy niklu, czy ceramiki. W badaniach, których wyniki zaprezentowano w monografii, zastosowano szlifowanie hybrydowe z udziałem elektroerozyjnego usuwania materiału, co zdecydowanie zwiększa wydajność obróbki w przypadku szlifowania stopów tytanu.

Głównym celem przeprowadzonych badań była analiza czułości sygnału emisji akustycznej do oceny procesu szlifowania elektroerozyjnego (AEDG, ang. *abrasive electro-discharge grinding*), szczególnie w kontekście oszacowania zużycia ściernicy oraz wyników obróbki w postaci struktury geometrycznej powierzchni. Motywacją do uzyskania niezbędnej wiedzy, z zakresu monitorowania procesu szlifowania stopu tytanu, był słabo rozpoznany problem diagnostyczny obróbki z zastosowaniem supertwardych ściernic w procesie szlifowania elektroerozyjnego oraz brak wiedzy, czy proces diagnostyczny może być skutecznie przeprowadzony w przypadku wystąpienia wyładowań elektrycznych.

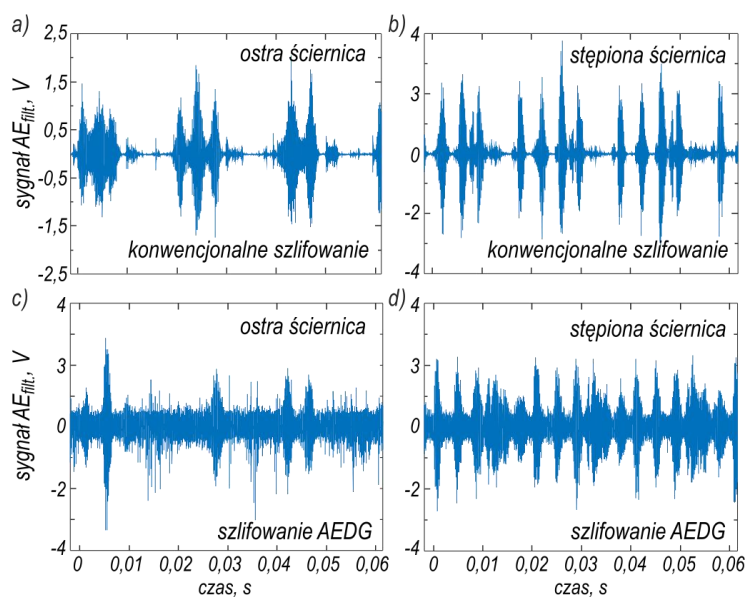
W procesie AEDG usuwanie kolejnych warstw materiału odbywa się za pomocą ściernicy, a przestrzeń międzyelektrodową wypełnia dielektryk. Mechanizm usuwania nadmiaru obróbkowego wynika z synergii wyładowań elektrycznych (występujących pomiędzy ściernicą a powierzchnią obrabianego przedmiotu) oraz mechanicznego mikroskrawania ziarnami aktywnymi, obecnymi na czynnej powierzchni ściernicy, co zilustrowano na rys. 27.

Rejestrowany sygnał emisji akustycznej (przykład na rys. 28) znacząco zmienia swoją charakterystykę w zależności od warunków w jakich przebiega proces szlifowania i od stopnia zużycia ściernicy.

Odnosząc charakter sygnału AE w procesie szlifowania AEDG do konwencjonalnego procesu szlifowania, obserwuje się znaczny wzrost poziomu szumu sygnału. Szum ten jest związany z dodatkowymi źródłami impulsów AE i może być uważany za wynik wyładowań elektrycznych.



Rys. 27. Schemat ilustrujący interakcję pomiędzy ściernicą a obrabianym przedmiotem w procesie AEDG

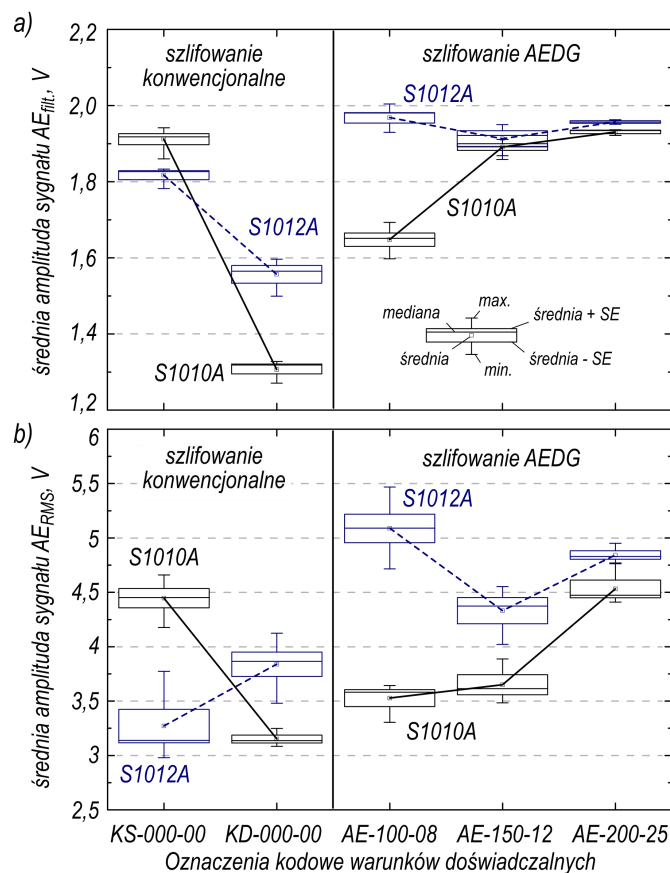


Rys. 28. Sygnały AE zarejestrowane w procesie szlifowania w różnych warunkach realizacji procesu obróbki — szlifowanie konwencjonalne: a) ściernica ostra (S1010A-KD-000-00), b) ściernica stępiona (S1012A-KD-000-00); szlifowanie typu AEDG: c) ściernica ostra (S1010A-AE-150-12), d) ściernica stępiona (S1012A-AE-150-12)

Badając wpływ warunków szlifowania oraz odpowiedź czujnika AE, proces realizowano kolejno: na sucho, z chłodzeniem, z wyładowaniami elektrycznymi o wzrastającej energii — rys. 29.

Wprowadzenie chłodziwa do strefy obróbki zmniejszyło zarówno siły występujące w procesie (z 300 do 100 N dla F_n oraz z 175 do 40 N dla F_t), jak i rejestrowaną amplitudę sygnału AE. W przypadku procesu szlifowania z udziałem PCS oraz ściernicy ostrej (seria S1010A), sygnał $AE_{filt.}$ zmniejszył się z 1,9 V do 1,3 V, a jego wartość skuteczna (AE_{rms})

zmaląa z 4,5 V do 3,2 V. Niższe wartości deskryptorów oznaczają, że proces obróbki przebiegał w korzystniejszych warunkach (wymagał mniej energii), co jest zgodne z teorią i praktyką.



Rys. 29. Zmiany amplitudy zarejestrowanych sygnałów AE dla różnych warunków procesu szlifowania: a) filtrowany sygnał emisji akustycznej ($AE_{filt.}$), b) wartość skuteczna sygnału AE (AE_{rms})

Dla stępionej ściernicy (seria S1012A), wartość zmierzonego sygnału AE ($AE_{filt.}$) zmniejsza się z 1,82 V do 1,57 V. Analiza statystyczna wartości RMS wykazała natomiast jej wzrost z 3,25 V do 3,8 V. Statystycznie, sygnał AE jest sygnałem losowym o zerowej średniej (oscyluje wokół wartości zero), natomiast deskryptor typu RMS zawiera w sobie „błąd” (w postaci odchylenia kwadratowego), przez co może być interpretowany, jako odchylenie standardowe sygnału. Większe rozproszenie danych (wyższa wartość RMS), może wskazywać na proces, który zachodzi w niekorzystnych warunkach.

Gdy proces szlifowania jest połączony z wyładowaniami elektrycznymi (prawa kolumna na rys. 29), sygnały mają wyższe wartości, niż w przypadku procesu konwencjonalnego. Wyjaśnieniem tego zjawiska może być udział dodatkowego czynnika (w postaci wyładowań elektrycznych) w procesie obróbki, co skutkuje większą liczbą źródeł impulsów AE i jednocześnie, wyższymi wartościami zarejestrowanych sygnałów.

Należy podkreślić, że opisywany wzrost jest wyraźnie obserwowany i proporcjonalny do energii wyładowań tylko w przypadku obróbki ostrą ściernicą (seria S1010A). Tendencja ta ma zależność potęgową dla parametru $AE_{filt.}$ i wykładniczą dla AE_{rms} . Oznacza to, że w przypadku sprawnej realizacji procesu skrawania (ściernica jest ostra, a jej aktywne ziarna wykonują proces mikroskrawania), główny wpływ na poziom sygnału AE ma energia fali

uderzeniowej, pochodząca od wyładowań elektrycznych i proporcjonalna do parametrów nastawczych generatora.

Korelacja pomiędzy parametrami elektrycznymi procesu AEDG, a zarejestrowanymi sygnałami wyjściowymi dla ściernicy stępionej (seria S1012A), nie wykazuje jednoznacznych trendów. Otrzymane zależności można zapisać w postaci wielomianu, co jednak nie przekłada się na fizyczne znaczenia takich relacji. W tym przypadku, można wnioskować jedynie o ogólnym wzroście obu deskryptorów. Co ciekawe, najwyższymi zaobserwowanymi wartościami sygnału AE (średnia wartość $AE_{rms} = 5,2$ V) charakteryzował się proces dla minimalnej energii wyładowań elektrycznych (przypadek S1012A-AE-100-08). Najniższe wartości sygnału AE, zaobserwowano natomiast w przypadku parametrów elektrycznych o średniej energii wyładowań (150 V i 12 A, oznaczenie: S1012A-AE-150-12).

W pierwszym przypadku, można sądzić, że parametry wyładowań iskrowych były za niskie, aby skompensować zużycie CPS i zmniejszyć energię realizacji zadania obróbkowego. Tym samym, można uznać, że proces przebiegał z dominacją obróbki ścierniej oraz zjawisk bruzdowania i tarcia o powierzchnię kształtowanego materiału.

W drugim przypadku można założyć, że wraz ze wzrostem energii wyładowań elektrycznych zwiększyła się także deformacja plastyczna materiału (w wyniku wzrostu temperatury procesu erozji), co ułatwiło usuwanie materiału obrabianego. Zwiększony udział odkształceń plastycznych (w stosunku do odkształceń sprężystych) mógł spowodować zmniejszenie energii niezbędnej do skrawania i reakcję czujnika piezoelektrycznego, a w konsekwencji obniżenie rejestrowanych wartości sygnału AE.

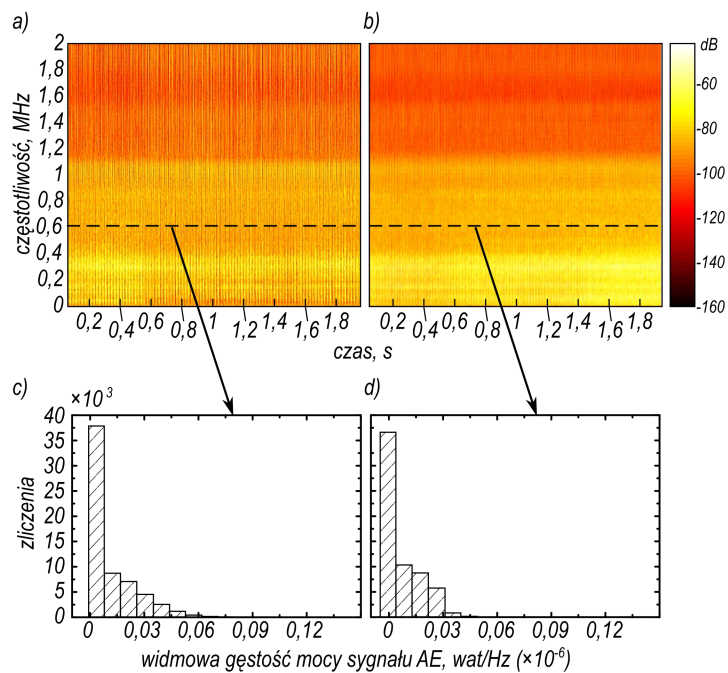
W przypadku stosowania wysokoenergetycznych wyładowań elektrycznych, dominacja procesu EDM nad mechanicznym usuwaniem materiału była sygnalizowana wzrostem wartości sygnału AE. Przyczyną tego jest wysoka energia fal uderzeniowych pęcherza gazowego, towarzysząca wyładowaniom elektrycznym. Według Korolewa oraz Krylova [1, 2], fale powierzchniowe Rayleigh'a wykrywane przez czujnik piezoelektryczny są generowane przez te wyładowania i mogą przenosić około 50% ich energii.

Widma sygnału AE (rys. 30), niezależnie od analizowanej częstotliwości (w zakresie do 1200 kHz), ujawniają zmiany intensywności harmonicznych, gdy w procesie szlifowania stosuje się ściernicę o wysokim stopniu zużycia. Statystyczny rozkład obserwowanych wartości w gęstości widmowej mocy (PSD), dla częstotliwości reprezentatywnej (600 kHz), przedstawiono na histogramach (rys. 30c–d). Kształt rozkładu PSD wskazuje na rozkład gamma z parametrami zależnymi od zdolności skrawnych ściernicy.

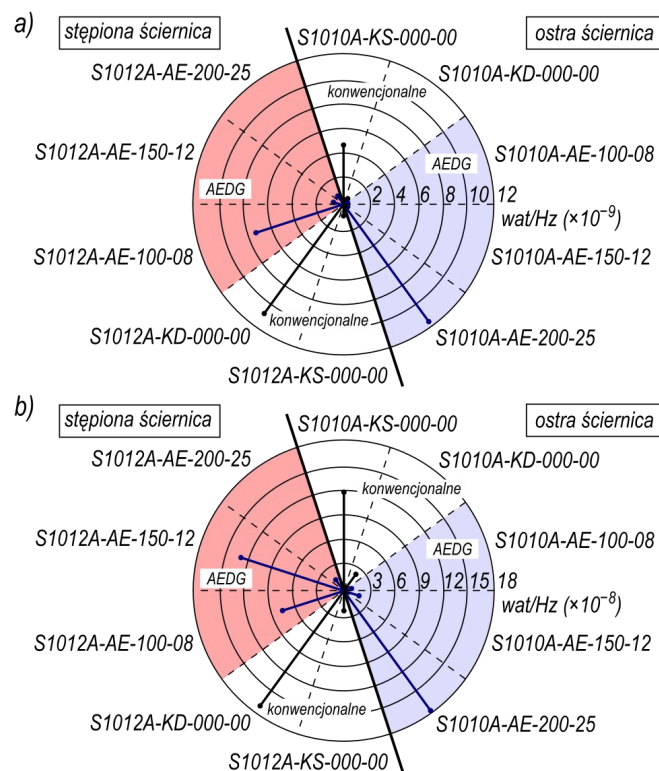
W zależności od warunków realizacji procesu szlifowania zarejestrowane wartości widma sygnału emisji akustycznej, niezależnie od zastosowania ściernicy ostrej lub stępionej, ulegają wyraźnej zmianie. Wyższy poziom gęstości widmowej mocy sygnału AE odnotowano zawsze w przypadku zastosowania ściernicy stępionej (seria S1012A). Zjawisko to można wytłumaczyć aktualnym stopniem zdolności skrawnej. Ściernica, która posiada względnie dużą zdolność skrawną (seria S1010A), w interakcji z powierzchnią przedmiotu generuje mniejszy opór w procesie mikroskrawania aktywnymi ziarnami ściernymi, a tym samym kreuje źródła emisji akustycznej o niższej energii.

Charakter zmian obserwowany jest również w przypadku analizy wartości średniej arytmetycznej, odchylenia standardowego, wariancji, skośności i kurtozy oraz skorygowanej sumy kwadratów i rozstępu danych. Przykłady zestawiono na rys. 31.

Zmiany napięcia i natężenia prądu wyładowań w procesie AEDG spowodowały zmniejszenie średnich wartości widma sygnału. W przypadku ściernicy ostrej spadek ten odnotowano z wartości 11,3 nW/Hz (S1010A-AE-200-25) do 0,2 nW/Hz (S1010A-AE-100-08). Dla ściernicy stępionej intensywność widma zmalała natomiast z wartości 7,3 nW/Hz (S1012A-AE-100-08) do 0,8 nW/Hz (S1012A-AE-200-25).



Rys. 30. Spektrogramy sygnału AE zarejestrowanego w procesie AEDG: a) ściernica ostra (S1010A-AE-150-12), b) ściernica stępiona (S1012A-AE-150-12), oraz rozkład wartości gęstości widmowej mocy dla składowej 600 kHz: c) S1010A-AE-150-12, d) S1012A-AE-150-12



Rys. 31. Wykres radarowy parametrów statystycznych widmowej gęstości mocy określonej dla sygnału AE zarejestrowanego w procesie szlifowania AEDG w różnych warunkach z udziałem ściernicy ostrej (S1010A) oraz stępionej (S1012A): a) wartość średnia, b) rozstęp wartości

Wyraźny trend zmian analizowanych wartości widma można zaobserwować także w przypadku statystycznego parametru wskazującego na rozstęp wartości. Porównując ściernicę ostrą ze stępioną (przeciwnie sekcje) można zauważyć, że zastosowanie ściernicy stępionej powoduje istotną zmianę w różnicy pomiędzy największą i najmniejszą wartością PSD. Niewielki rozstęp wartości w spektrum sygnału AE zmienia się na duży i odwrotnie. Oznacza to, że jeśli znane są aktualne parametry procesu szlifowania (również w przypadku procesu AEDG) można bardzo łatwo określić czy proces jest przeprowadzany z zastosowaniem ściernicy ostrej, czy stępionej.

Literatura:

- [1] Korolev, S.V.; Krylov, V.V.: Efficient excitation of Rayleigh waves by a strong shock wave initiated by a spark in air. Soviet Technical Physics Letters [online]. 1988, 14 (11), 843–845. ISSN 0360-120X.
- [2] Krylov, V.V.: On the theory of surface acoustic wave generation by electric spark discharge. Journal of Physics D: Applied Physics. 1992, 25 (2), 155–161. DOI: 10.1088/0022-3727/25/2/004.

Najważniejsze wnioski z oceny hybrydowego procesu szlifowania elektroerozyjnego z zastosowaniem sygnału emisji akustycznej w środowisku wyładowań elektrycznych:

- w zależności od energii wyładowań elektrycznych obserwowane w procesie obróbki wartości sygnału AE w znaczący sposób zmieniają swoje wartości;
- w zależności od stopnia stępienia ściernicy, obserwowane w procesie obróbki wartości sygnału AE w znaczący sposób zmieniają swoje wartości;
- odnosząc charakter sygnału AE w procesie szlifowania AEDG do konwencjonalnego procesu szlifowania, obserwuje się znaczny wzrost poziomu szumu sygnału. Szum ten jest związany z dodatkowymi źródłami impulsów AE i może być uważany za wynik wyładowań elektrycznych;
- udział dodatkowego czynnika w procesie obróbki (w postaci wyładowań elektrycznych), skutkuje większą liczbą źródeł impulsów AE i jednocześnie, wyższymi wartościami rejestrowanych sygnałów;
- w przypadku sprawnej realizacji procesu skrawania (ściernica jest ostra, a jej aktywne ziarna wykonują proces mikroskrawania), główny i proporcjonalny wpływ na poziom sygnału AE ma energia fali uderzeniowej, pochodząca od wyładowań elektrycznych;
- korelacja pomiędzy parametrami elektrycznymi procesu AEDG, a zarejestrowanymi sygnałami wyjściowymi dla ściernicy stępionej, nie wykazuje jednoznacznych trendów;
- w przypadku stosowania wysokoenergetycznych wyładowań elektrycznych, dominacja procesu EDM nad mechanicznym usuwaniem materiału sygnalizowana jest wzrostem wartości sygnału AE; za przyczynę tego zjawiska należy uznać wysoką energię fal uderzeniowych pęcherza gazowego, towarzyszącą wyładowaniom elektrycznym;
- do identyfikacji stępienia ściernicy można zastosować analizę wartości w dziedzinie częstotliwości; widmo sygnału dla ściernicy stępionej ma inny charakter wyrażony wartością średnią i rozstępem; wyższy poziom gęstości widmowej mocy sygnału AE odnotowuje się w przypadku zastosowania ściernicy stępionej.

Publikacje:

1. **Sutowski P., Świącik R.:** *The estimation of machining results and efficiency of the abrasive electro-discharge grinding process of Ti6Al4V titanium alloy using the*

high-frequency acoustic emission and force signals. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018, 94(1-4): 1263-1282. DOI: 10.1007/s00170-017-1011-9.

2. **Sutowski P.**, Świącik R.: *Badania wysokoczęstotliwościowych fal naprężeń w procesie elektroerozyjnego szlifowania stopu tytanu*. Mechanik, 2016, 89(8-9): 1098-1099. DOI: 10.17814/mechanik.2016.8-9.266.

3.9. Analiza i ocena chropowatości oraz odchyłki płaskości powierzchni obrabianej w procesie szlifowania elektroerozyjnego z zastosowaniem sygnału emisji akustycznej

W celu oceny procesu pod kątem przewidywania jakości powierzchni obrabianej w procesie szlifowania elektroerozyjnego określono oraz przeanalizowano funkcje korelacyjne pomiędzy zmierzonymi sygnałami emisji akustycznej, a wybranymi parametrami geometrycznej struktury powierzchni.

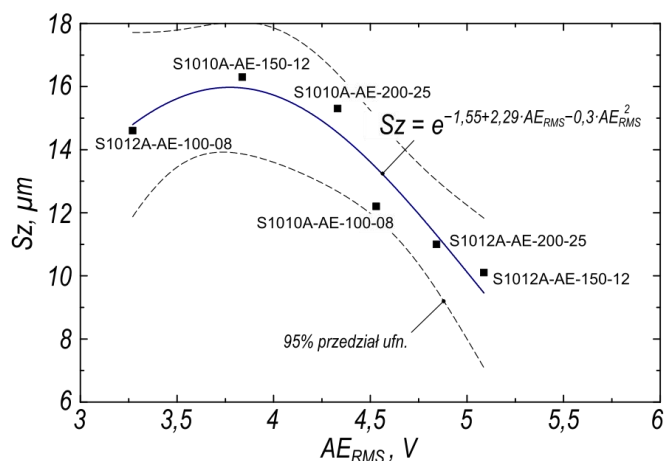
Badania eksperymentalne i analiza uzyskanych wyników wykazały, że dla procesu hybrydowego (w tym przypadku procesu AEDG), obejmującego wiele źródeł AE (w tym zakłócenia i szumy), możliwe jest określenie wyraźnej, statystycznie istotnej korelacji sygnału z niektórymi parametrami SGP.

W wyniku przeprowadzonych analiz wyodrębniono zbiór parametrów, dla których możliwe było określenie statystycznie istotnych modeli. Tab. 1 zawiera przykłady funkcji korelacyjnych, dla których uzyskano wysokie współczynniki determinacji, a test Fishera-Snedecora przekracza jego wartość krytyczną.

Tab. 1. Funkcje korelacyjne określone dla wybranych parametrów SGP powierzchni obrabianej, a sygnałem emisji akustycznej

Równanie	R ² _{skor.}	Wartość F
$Sz = 15,7 - 7,4 \cdot 10^{-16} \left(\frac{\exp(20,1 AE_{filt.}) - 1}{20,1} \right)$	0.82	298.80
$Sz = \exp(-1,5 + 2,3 AE_{rms} - 0,3 AE_{rms}^2)$	0.86	397.56
$Sa = \exp(-3,65 + 2,2 AE_{rms} - 0,3 AE_{rms}^2)$	0.60	83.49
$Sku = 3,7 \ln(2,2 \ln(AE_{rms}))$	0.65	592.34
$V_{vv} = \exp(12,7 - 6,1 AE_{rms} + 0,7 AE_{rms}^2)$	0.81	39.45
$V_{mp} = \exp(16,9 - 8,7 AE_{rms} + 1,1 AE_{rms}^2)$	0.65	29.72

Z przedstawionej grupy funkcji można wybrać trzy modele z najwyższym dopasowaniem do danych eksperymentalnych. Modele, które są najsilniej skorelowane z sygnałem AE, a więc mogą być wykorzystane do przewidywania chropowatości powierzchni, to te, które opisują relacje z parametrem *Sz* (wysokość powierzchni) i *V_{vv}* (objętość pustek dolin). Rys. 32 zawiera przykładowy wykres punktów pomiarowych z wprowadzoną funkcją korelacji i przedziałami ufności (na poziomie ufności 95%).

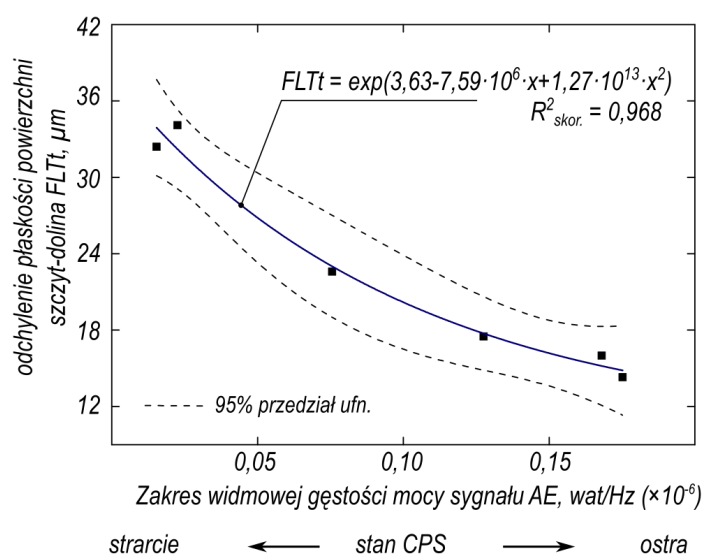


Rys. 32. Korelacja pomiędzy maksymalną wysokością chropowatości powierzchni (Sz) a skuteczną wartością sygnału emisji akustycznej (AE_{rms}) dla różnych warunków procesu AEDG (skorygowany współczynnik determinacji wynosi 0,86)

W przypadku parametru odchyłki płaskości $FLTt$ wyznaczone doświadczalnie równanie prognostyczne charakteryzuje się bardzo wysokim współczynnikiem dopasowania równym 0,968 (rys. 33). Wyraźna linia trendu i skupienie danych pomiarowych, które determinują dokładność przewidywania wartości, wskazują, że sygnał emisji akustycznej jest skorelowany ze zjawiskami zachodzącymi w strefie szlifowania i otrzymywanymi wynikami, mierzonymi jako zmiany geometryczne powierzchni obrabianej.

Najważniejsze wnioski z oceny chropowatości oraz odchyłki płaskości powierzchni obrabianej w procesie szlifowania elektroerozyjnego z zastosowaniem sygnału emisji akustycznej:

- pomimo występowania wyładowań elektrycznych w procesie szlifowania elektroerozyjnego możliwe jest określenie wyraźnej, statystycznie istotnej korelacji sygnału emisji akustycznej z niektórymi parametrami charakteryzującymi SGP przedmiotu obrabialnego;



Rys. 33. Korelacja pomiędzy odchyleniem płaskości powierzchni i rozstępem wartości dla widmowej gęstości mocy sygnału AE

- wybrane deskryptory sygnału AE są skorelowane głównie z parametrami wysokościowymi chropowatości struktury geometrycznej powierzchni obrabianego przedmiotu, co oznacza, że sygnał AE może być przyjęty, jako dobry nośnik informacji o procesach zachodzących w obszarze szlifowania elektroerozyjnego;
- modele korelacyjne z najwyższym dopasowaniem do danych eksperymentalnych, to dwa modele charakteryzujące maksymalną wysokość chropowatości powierzchni (S_z) oraz model opisujący objętość pustek dolin (V_{vv}) w funkcji wartości skutecznej sygnału AE;
- odchyłka płaskości kształtowanej powierzchni posiada wysoką korelację z sygnałem emisji akustycznej, ocenianym za pomocą widmowej gęstości mocy sygnału.

Publikacje:

1. **Sutowski P., Święcik R.:** *The estimation of machining results and efficiency of the abrasive electro-discharge grinding process of Ti6Al4V titanium alloy using the high-frequency acoustic emission and force signals.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018, 94(1-4): 1263-1282. DOI: 10.1007/s00170-017-1011-9.

3.10. Opracowanie metodyki predykcji zużycia ściernicy przy zastosowaniu wybranych deskryptorów sygnału emisji akustycznej w procesie szlifowania elektroerozyjnego

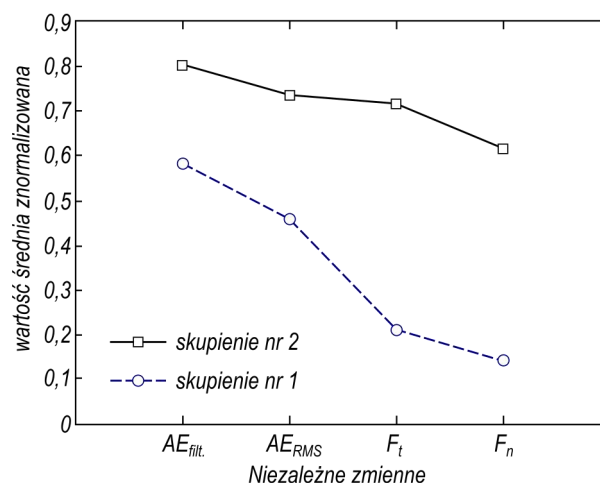
W celu opracowania klasyfikacji stopnia zużycia ściernicy w procesie AEDG przeprowadzono uogólnioną analizę skupień metodą k-średnich. Metoda ta ma na celu podział N_{obs} . obserwacji na k_s klastrów (skupień) tak, aby każda obserwacja należała do danego klastra wg kryterium najbliższej wartości średniej.

Zbiór danych do analizy zawierał zarejestrowane w trakcie pomiarów wartości składowych siły szlifowania (F_n , F_t), wartości sygnału emisji akustycznej ($AE_{filt.}$) oraz jej wartość skuteczną (AE_{rms}). Jako zmienną jakościową wprowadzono zakodowaną postać parametrów procesu AEDG.

Analizę skupień wykonano w programie Statistica (StatSoft, Inc., USA). Oprogramowanie dokonało prawidłowej identyfikacji danych wejściowych i podzieliło je na 2 niezależne skupienia (klastry) — rys. 34.

Rysunek przedstawia wykres średnich wartości zmiennych ilościowych (wartości wykreślone na rysunku są skalowane względem wszystkich wartości tych zmiennych) dla wydzielonych klastrów. Po szczegółowych analizach określono, że klaster nr 1 odpowiada wynikom otrzymanym dla procesu szlifowania ostrą ściernicą, natomiast klaster nr 2, to szlifowanie z udziałem stępionej ściernicy.

Dalsze analizy zostały wykonane przy użyciu drzewa klasyfikacyjnego. W badaniach zastosowano postępowanie, które nosi nazwę *Losowego Lasu* (ang. Random Forest[®]) i opiera się na zestawie prostych drzew decyzyjnych, określając wartość zmiennej zależnej w oparciu o wartości kilku kolejnych predyktorów (zmiennych niezależnych). Każde z drzew, tworzących *Losowy Las*, wykorzystuje losowo wybrany podzbiór wszystkich predyktorów. Algorytm oblicza ile drzew wskazuje konkretną klasę, w porównaniu do innych klas. Pozwala to nie tylko na wybór oczekiwanej klasy, ale także na określenie stopnia pewności dla tej prognozy. Wyniki tej analizy zaprezentowano w tab. 2.



Rys. 34. Wykres znormalizowanych średnich wartości zmiennych ilościowych dla wydzielonych skupień, uzyskanych za pomocą modułu Data Miner w oprogramowaniu Statistica (StatSoft, Inc., USA)

Tab. 2. Istotność oraz wpływ predyktorów dla zmiennej zależnej od stanu ściernicy, określone przez oprogramowanie Statistica (StatSoft, Inc., USA) przy użyciu algorytmu *Losowy Las* i metody MARSplines

Predyktor	$AE_{filt.}$	AE_{rms}	F_t	F_n	Parametry AEDG
Istotność ^a	0,82	0,70	1,0	0,69	0,21
Wpływ ^b	0	1	1	0	N/A

a) obliczony z zastosowaniem algorytmu *Random Forest*

b) obliczony z zastosowaniem regresji MARSplines

Biorąc pod uwagę wyniki istotności oraz wpływu poszczególnych predyktorów oraz wykorzystując nieparametryczną regresję adaptacyjną MARSplines, opracowano system równań reprezentujących model predykcyjny stanu ściernicy:

$$\text{OSTRA} = 8,95 \cdot 10^{-1} - 4,26 \cdot 10^{-3} \max(0; F_t - 2,64 \cdot 10^2) - 5,57 \cdot 10^{-1} \max(0; AE_{rms} - 4,4),$$

$$\text{STĘPIONA} = 1,05 \cdot 10^{-1} - 4,26 \cdot 10^{-3} \max(0; F_t - 2,64 \cdot 10^2) + 5,57 \cdot 10^{-1} \max(0; AE_{rms} - 4,4).$$

Warunki „ostre” i „stępienie” są określane przez dwa równania jednocześnie w zakresie od 0 do 1. Przykładowo, dla $AE_{filt.} = 1,6$ V, $AE_{rms} = 3$ V, $F_n = 240$ N oraz $F_t = 420$ N, model identyfikuje ściernicę jako ostrą, co można odczytać z wartości funkcji: OSTRA = 0,895, STĘPIONA = 0,105.

Dokładność modelu określano przez błąd w ocenie krzyżowej (ang. *generalized cross validation*, GCV), który uwzględnia nie tylko końcową sumę kwadratów reszt (ang. *residual sum of squares*, RSS), ale również złożoność modelu. W przypadku równań (3.54) i (3.55), błąd GCV wynosi 0,18 (18%). Tak więc, biorąc pod uwagę błąd, ekstremalnymi wartościami (w kierunku braku rozpoznawalności) parametrów są wartości: OSTRA = 0,715, STĘPIONA = 0,285, co nie zmienia decyzji klasyfikacyjnej.

Najważniejsze wnioski z oceny zużycia ściernicy przy zastosowaniu wybranych deskryptorów sygnału emisji akustycznej w procesie szlifowania elektroerozyjnego:

- w zależności od stopnia stępienia ściernicy, obserwowane w procesie obróbki wartości sygnału AE oraz siły szlifowania w znaczący sposób zmieniają swoje wartości, tworząc wyodrębnione grupy (skupienia);
- spośród analizowanych predyktorów najwyższą wartość wpływu na funkcję nieparametrycznej regresji adaptacyjnej posiadają parametry: wartość skuteczna sygnału emisji akustycznej oraz składowa styczna siły szlifowania;
- dzięki opracowanemu klasyfikatorowi, zdolność skrawna czynnej powierzchni ściernicy może być identyfikowana i przypisywana do grupy „stępiona” lub „ostra” w zależności od zarejestrowanych w procesie wartości parametrów AE_{rms} oraz F_t ;
- dokładność identyfikacji stępienia ściernicy przez zaproponowany klasyfikator można uznać za wysoką; błąd klasyfikacji określono na poziomie 18%.

Publikacje:

1. **Sutowski P.**, Święcik R.: *The estimation of machining results and efficiency of the abrasive electro-discharge grinding process of Ti6Al4V titanium alloy using the high-frequency acoustic emission and force signals*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018, 94(1-4): 1263-1282. DOI: 10.1007/s00170-017-1011-9.

3.11. Wyznaczenie wartości energii kinetycznej kształtek oraz określenie energii kumulowanej przez przedmiot obrabiany z zastosowaniem analizy symulacyjnej kinematyki wsadu roboczego w wygładzarce rotacyjno-kaskadowej

Obróbka powierzchni w wygładzarkach rotacyjnych odśrodkowych (ang. *centrifugal disc finishing machines*) jest bardzo efektywnym sposobem wygładzania powierzchni przedmiotów o złożonych kształtach, wykonanych z różnych gatunków materiałów.

Podczas ruchu ustalonego wsadu w komorze wygładzarki następuje równomierna obróbka przedmiotów znajdujących się we wsadzie roboczym. Jest to jednak proces długotrwały, gdyż chwilowa wartość energii roboczej działającej na powierzchnię tych przedmiotów jest zmienna.

Pomimo szerokiej wiedzy o ruchu i rozkładzie kształtek ściernych w komorze roboczej obrabiarki, głównym problemem w procesie wygładzania z użyciem rotacyjnych odśrodkowych wygładzarek pojemnikowych jest brak wiedzy o bieżącym rozkładzie energii kształtek w strumieniu obróbczym. Brak tej wiedzy skłonił autora do przeprowadzenia badań eksperymentalnych i symulacyjnych w celu wyznaczenia obszaru, w którym energia obróbki jest na tyle wysoka, że umiejscowienie przedmiotu obrabianego w tym obszarze zapewni zmniejszenie czasu obróbki, a tym samym zwiększy jej efektywność.

Posługując się podstawowymi zasadami kinematyki można ustalić, że elementy o masie m , znajdujące się we wsadzie roboczym w przestrzeni stożkowej pojemnika, są obciążane składową styczną F_t siły bezwładności F_b , której wartość jest opisana zależnością:

$$F_t = m \cdot \omega_k^2 \cdot r \cdot \sin(\gamma_k),$$

gdzie: m to masa elementu znajdującego się we wsadzie roboczym, ω_k to prędkość kątowna wirnika wygładzarki (rad/s), r to promień płaskiego dna wirnika wygładzarki, γ_k to kąt pochylenia części stożkowej wygładzarki.

Jeśli przyjmie się wsad roboczy jako jeden sztywny obiekt, obracający się z jednakową prędkością kątowną wokół stałej osi, to można wyznaczyć jego energię kinetyczną. Jej wartość można obliczyć sumując poszczególne energie kinetyczne wszystkich kształtek, z których składa się ośrodek. Pojedyncza kształtka o masie m_1 , zlokalizowana w odległości r_1 od osi obrotu, ma energię kinetyczną wyrażoną przez $m_1(v_1)^2/2$. Całkowita energia kinetyczna wsadu roboczego można być zapisana jako:

$$E_k = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^n m_i r_i^2 \right) \omega_{k(i)}^2.$$

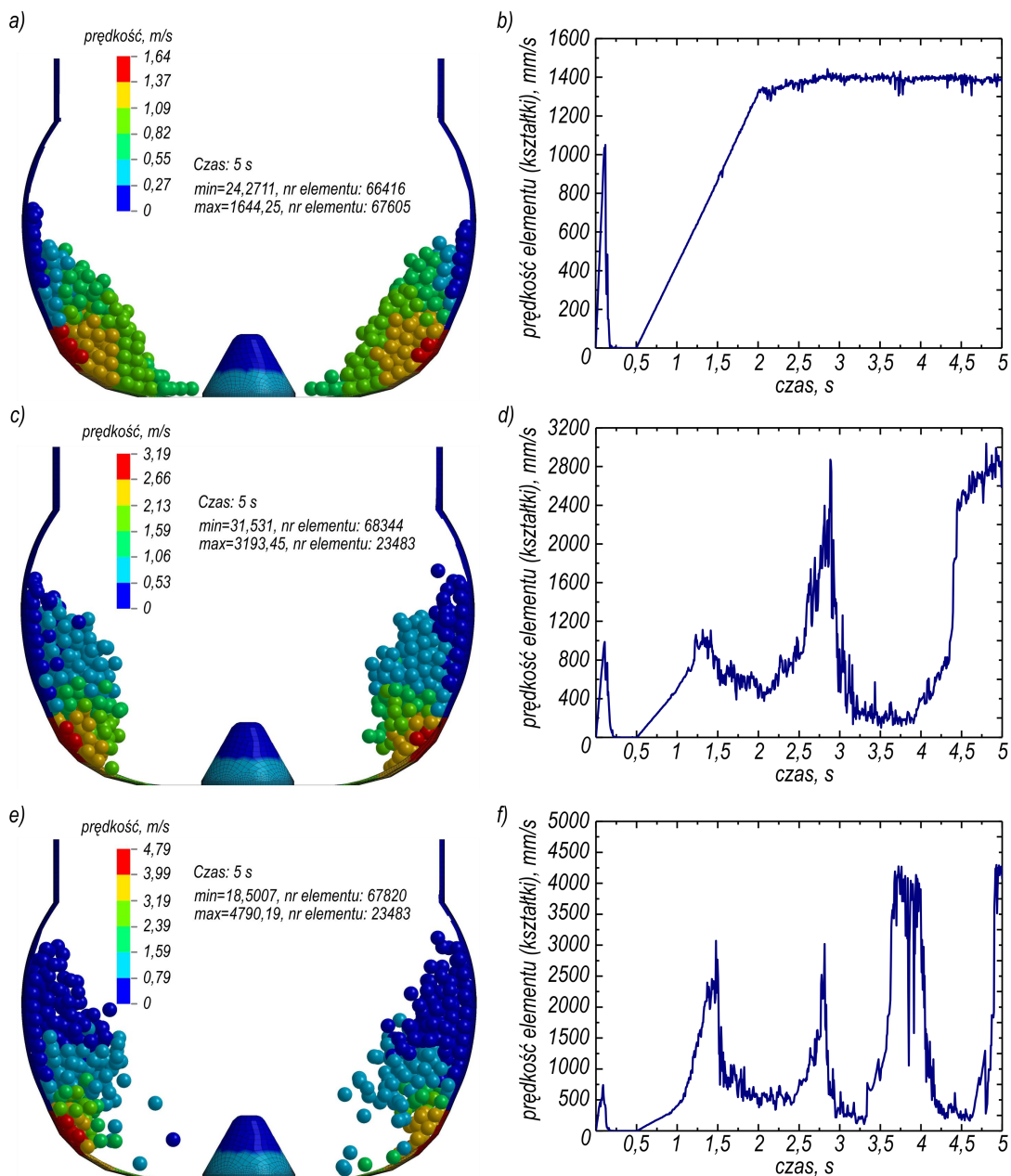
Wartości i rozkłady tej energii można określić za pomocą analiz symulacyjnych. Specyfika badanego procesu wygładzania kształtkami ściernymi zdeterminowała wybór metody numerycznej do symulacji. Ze względu na to, że w procesie symulacji należy obliczyć właściwości fizyczne dużej liczby obiektów w ruchu swobodnym, zastosowano metodę elementów dyskretnych (DEM, ang. *discrete element method*).

Wykorzystując możliwości badania dynamiki elementów za pomocą metody DEM, określono rozkład prędkości każdej pojedynczej kształtki ścierniej, co zaprezentowano na rys. 35.

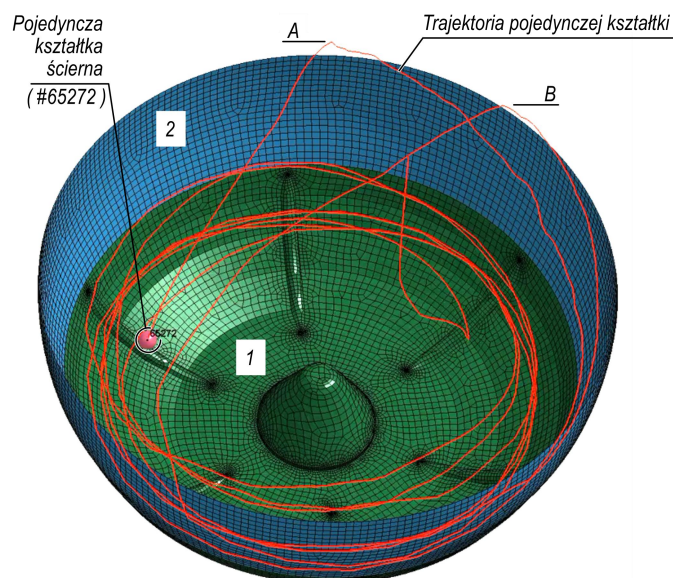
Wyniki badań symulacyjnych wykazały, że siła odśrodkowa (wywołana ruchem obrotowym wirnika) wywołuje ruch kształtek ściernych od osi obrotu w kierunku wewnętrznych ścianek komory. W zależności od prędkości obrotowej wirnika siła ta powoduje mniejsze lub większe przemieszczenie się kształtek. Skończony rozmiar komory roboczej, jak i zakrzywienie jej ścianek wewnętrznych, powoduje że kształtki przemieszczają się nie tylko w płaszczyźnie poziomej od osi obrotu na zewnątrz, ale także w płaszczyźnie pionowej. Względne przemieszczenie jest tym większe, im większa jest prędkość obrotowa wirnika, a tym samym prędkość kątowna (ω_k), która wywołuje powstanie proporcjonalnie większej siły odśrodkowej. Dla prędkości obrotowej 150 obr./min odnotowano maksymalną prędkość kształtek w ruchu po okręgu 1644,25 mm/s. Dla prędkości obrotowej dwukrotnie większej (300 obr./min), maksymalna wartość prędkości kształtek wzrosła liniowo do wartości 3193,45 mm/s. Przy 450 obr./min, prędkość maksymalna to 4790,19 mm/s. Prędkości maksymalne są osiągnięte w strumieniu tylko przez małą liczbę kształtek, które w danym momencie znajdują się po zewnętrznej stronie strumienia (są najbardziej oddalone od osi obrotu) i nie uległy znacznemu przemieszaniu w górę strumienia.

Z analizy ruchu wszystkich kształtek w strumieniu można wywnioskować, że każda z kształtek zachowuje się podobnie. W wyniku wymuszającego oddziaływania wirnika komory roboczej wygładzarki i pozostałych kształtek, uzyskuje coraz większą prędkość liniową (i energię kinetyczną), przemieszcza się wewnątrz strumienia oraz zmienia swoje położenie w wyniku zderzeń i sił tarcia (rys. 36).

Maksymalna wysokość wzniosu kształtki ukształtowana jest przez wiele czynników. Głównym czynnikiem jest tu prędkość wyjściowa nadana przez wirnik komory oraz przez swoją indywidualną historię interakcji z pozostałymi elementami. W wyniku oddziaływania siły odśrodkowej oraz energii pozyskanej ze zderzeń z innymi kształtkami każda uzyskuje swoją maksymalną prędkość, którą utrzymuje przez określony czas (jest to przypadek statystycznie często obserwowalny, dla najniższej z analizowanych prędkości obrotowych wirnika) lub traci, przemieszczając się w dół strumienia po jego wewnętrznej stronie (następuje spadek kształtki w dół komory oraz przekształcenie nabytej energii potencjalnej na energię kinetyczną).



Rys. 35. Symulacja rozkładu położenia i prędkości kształtek w komorze roboczej wygładzarki rotacyjno-kaskadowej (lewa kolumna) oraz wykres typowych zmian prędkości losowo wybranego elementu w funkcji czasu dla różnych prędkości obrotowych wirnika: a-b) $n_s = 150$ obr./min, c-d) $n_s = 300$ obr./min, e-f) $n_s = 450$ obr./min (LS-DYNA, postprocesor LS-PrePost)



Rys. 36. Tor ruchu kształtki ścierniej wyznaczony w modelu symulacyjnym z wyraźnie zarysowanymi dwoma wzniosami (A i B) do górnej strefy nieruchomego pierścienia (2) i spadkiem prędkości. Czas symulacji: 4,7 s, prędkość nominalna wirnika (1): 300 obr /min, model typu: DEM, oprogramowanie: ANSYS LS-DYNA (ANSYS, Inc., USA)

Na podstawie zebranych informacji (znana jest masa oraz prędkość każdego elementu), będących wynikiem obliczeń programu komputerowego, można określić bieżącą, średnią, czy też maksymalną wartość energii kinetycznej wsadu roboczego w każdym jego punkcie, z dokładnością do pojedynczej kształtki. Wyniki obliczeń maksymalnej energii kinetycznej, która może być uzyskana przez kształtki ściernie w komorze wygładzarki dla różnych prędkości obrotowych wirnika, zawarto w tab. 3.

Tab. 3. Zestawienie wyników symulacji prędkości i energii kinetycznej kształtek ściernych

Obroty n_s , obr./min	Max. prędkość kształtek $v_{(t=5s)}$, m/s	Szacowana energia kinetyczna E_k , mJ
150	1,644	2,8
300	3,193	5,5
450	4,790	8,3

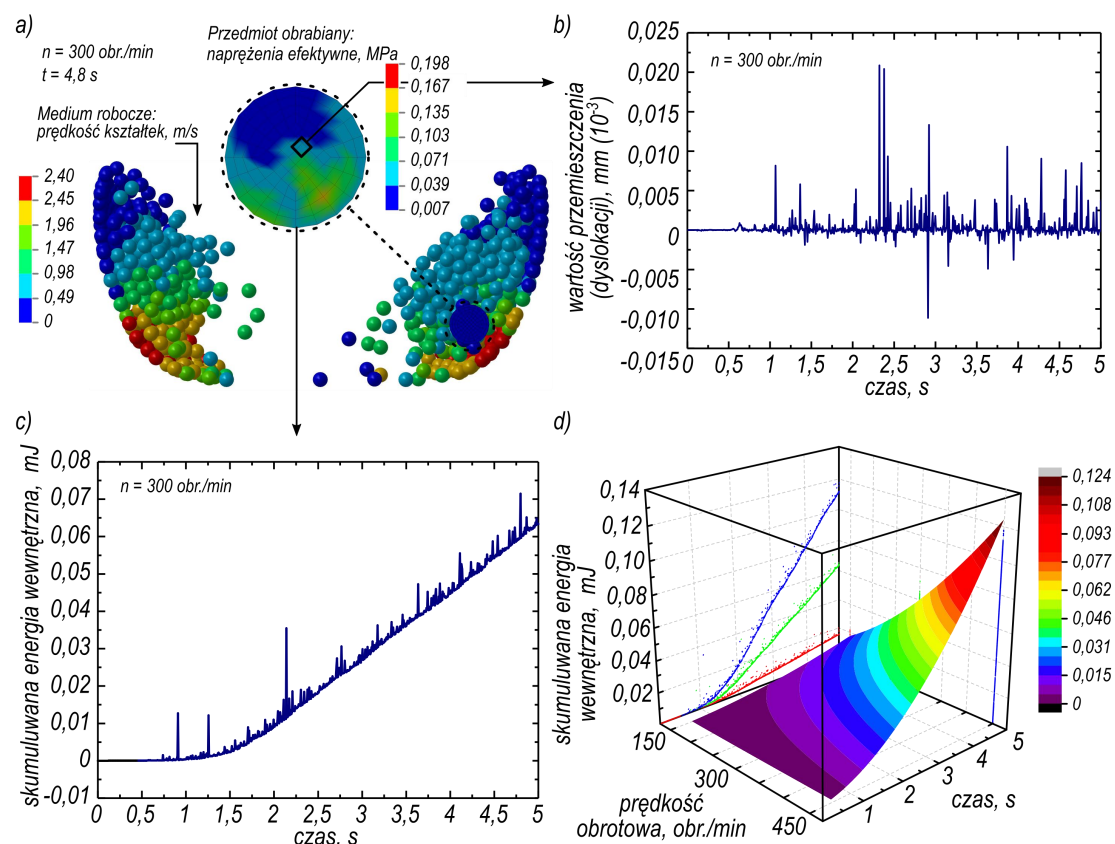
Estymowana wartość energii kinetycznej kształtek zmienia się w kwadracie zmiany prędkości i może być opisana zależnością potęgową:

$$E_k = 0,019 n_s^{0,996}$$

ze współczynnikiem determinacji bliskim jedności ($R^2_{skor.} = 0,9997$).

Oznacza to, że wraz ze wzrostem prędkości obrotowej wirnika wzrasta energia strumienia. Jest to dowód na to, że w przypadku stosowania większych prędkości obrotowych, możliwe jest skrócenie czasu obróbki elementów. Z analizy wyników badań symulacyjnych istotnym jest natomiast fakt, że powyższe stwierdzenie nie jest prawdziwe dla dowolnie wybranego obszaru strumienia. Tylko wybrane miejsca w strumieniu charakteryzują się wzrostem energii przy zwiększaniu prędkości obrotowej.

Aby określić energię pochłoniętą przez przedmiot obrabiany należy przeanalizować wzrost energii wewnętrznej ΔU_{int} w przypadku kolejnych interakcji materiału i kształtek ściernych (rys. 37).



Rys. 37. Przykładowe wyniki analizy oddziaływania strumienia kształtek ściernych na powierzchnię obrabianego przedmiotu: a) chwilowy rozkład kształtek i ich prędkości oraz mapa układu naprężeń efektywnych na powierzchni obrabianego przedmiotu, b) drgania (dyslokacje) centralnego elementu skończonego na powierzchni przedmiotu obrabianego w funkcji czasu, c) wykres kumulacji energii wewnętrznej na powierzchni przedmiotu obrabianego w funkcji czasu, d) wizualizacja modelu reprezentującego skumulowaną energię wewnętrzną

Maksymalna wartość skumulowanej energii zależy od prędkości obrotowej wornika wygładzarki oraz czasu obróbki. Jeżeli dla badań porównawczych przyjąć jednakowy czas realizacji procesu wygładzania, to wartość skumulowanej energii na powierzchni przedmiotu obrabianego będzie zależeć tylko od prędkości obrotowej i wraz z nią będzie rosła. W badaniach wykazano, że dla prędkości obrotowej 150 obr./min, energia ΔU_{int} osiąga poziom rzędu 0,015 mJ, natomiast przy prędkości 450 obr./min, niemal 10-krotnie więcej, czyli 0,115 mJ.

Zmiany wartości skumulowanej energii można opisać statystycznie modelem potęgowym:

$$\Delta U_{int} = 1,15 \cdot 10^{-7} n_s^{1,79} t^{1,8351}$$

dla skorygowanego współczynnika $R^2_{skor.} = 0,983$, gdzie zmienna t określa czas obróbki, podawany w sekundach, a n_s to prędkość obrotowa wornika komory roboczej wyrażona w obr./min. Relacja ta została również przedstawiona na rys. 37d.

Najważniejsze wnioski z zastosowania analizy symulacyjnej kinematyki wsadu roboczego w wyładowarce rotacyjno-kaskadowej:

- wyniki symulacji DEM potwierdzają zależność rozkładu prędkości kształtek ściernych i ich energii kinetycznej, w zależności od prędkości obrotowej wirnika wyładowarki rotacyjno-kaskadowej;
- rozkład energii w strumieniu wsadu roboczego, przy ustalonej prędkości obrotowej, jest zróżnicowany przestrzennie; z tego powodu intensywność oddziaływania kształtek ściernych na przedmiot obrabiany jest zmienna w zależności od chwilowego położenia przedmiotu obrabianego;
- tylko wybrane miejsca w strumieniu kształtek roboczych charakteryzują się wysokim potencjałem obróbczym, wynikającym z prędkości kształtek;
- proces obróbki, przy danej prędkości obrotowej wirnika, przebiega we względnie statycznych warunkach, co umożliwia wybór miejsca strumienia o statystycznie najkorzystniejszych (optymalnych) parametrach obróbki;
- przedmiot obrabiany powinien być umiejscowiony statycznie względem strumienia w wybranym arbitralnie położeniu, aby obróbka przebiegała efektywniej;
- oddziaływanie kształtek ściernych na powierzchnię materiału powoduje przekazywanie elementowi energii, który w wyniku posiadania właściwości sprężystych, jest efektywnym źródłem fal sprężystych, które można zmierzyć;
- przemieszczenia poszczególnych elementów skończonych, interpretowane jako ich drgania, w rzeczywistym procesie są źródłem impulsów tłumionych fal sprężystych; fale te, w postaci powierzchniowych fal Rayleigh'a, mogą być rejestrowane przez czujniki emisji akustycznej, co wykorzystano w kolejnej części prezentowanych badań.

Publikacje:

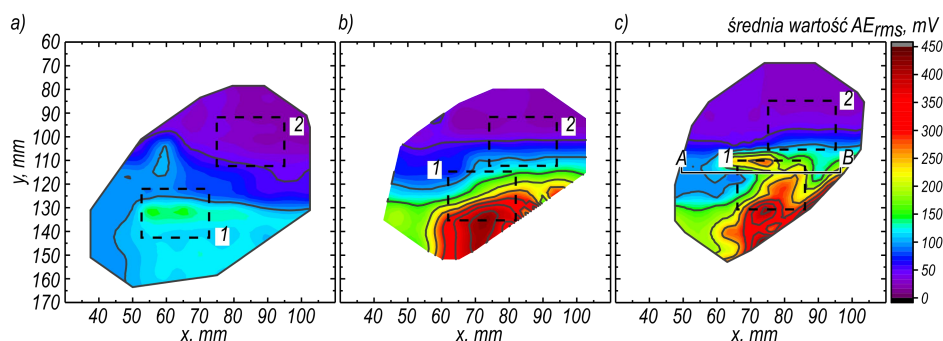
1. **Sutowski P.**, Plichta J., Kałduński P.: *Determining kinetic energy distribution of the working medium in a centrifugal disc finishing process — Part 1: Theoretical and numerical analysis with DEM method*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019 [w druku].

3.12. Opracowanie metodyki oceny energii wsadu roboczego w wyładowarce rotacyjnej za pomocą sygnału emisji akustycznej

W testach eksperymentalnych, w celu precyzyjnego przemieszczania próbki wewnątrz komory roboczej wyładowarki, wykorzystano układ umożliwiający ruch pionowy oraz poprzeczny w układzie 2D z dokładnością odpowiednio 0,01 i 0,5 mm. Próbki pomiarowe przemieszczano w obszarze roboczym wyładowarki, rejestrując energię oddziaływania wsadu roboczego w różnym położeniu względem pola przekroju wirującej strugi kształtek roboczych. Do oceny energii zastosowano wartość skuteczną sygnału AE. Na podstawie poszczególnych wartości energii sygnału AE, zarejestrowanych w kolejnych punktach pomiarowych, utworzono mapy rozkładu energii wsadu roboczego (rys. 38).

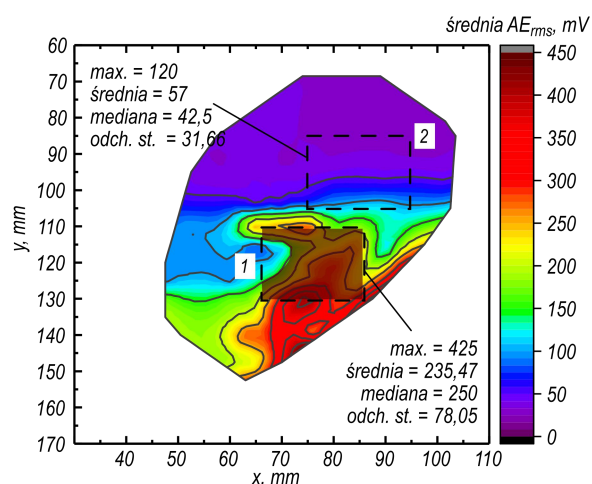
Mierzona wartość sygnału AE, określona przez pomiar wartości skutecznej sygnału napięciowego zarejestrowanego przez czujnik piezoelektryczny, zależy od energii źródła sygnału, który wytworzył poszczególny impuls, od współczynnika tłumienia ośrodka, w którym impuls się rozchodził oraz od odległości czujnika od źródła sygnału. Zarówno ośrodek rozchodzenia się fal akustycznych, jak i odległość od źródła sygnału, były niezmiennie w przyjętej metodyce badań. Przyjęto zatem, że rejestrowane wartości amplitudy

sygnału AE zależą wyłącznie od energii źródła i są do tej energii proporcjonalne — wartość skuteczną sygnału AE uznano za reprezentatywną do analizy energii kinetycznej strumienia roboczego.



Rys. 38. Mapy rozkładu średnich wartości skutecznych sygnału AE w strumieniu kształtek ściernych wraz z oznaczonymi analizowanymi obszarami o niskiej (2) i wysokiej energii (1), zmierzone dla różnych prędkości obrotowych n_s : a) 150 obr./min, b) 300 obr./min, c) 450 obr./min (dokładność pomiarowa w osi X i Y: 5 mm; linia AB — reprezentuje miejsce pomiaru i wyznaczenia spektrogramu)

Metodę określenia pola powierzchni obszaru o wysokiej energii ($S_{Ener.}$) przedstawiono na rys. 39. Polegała ona na wyznaczeniu obszaru zainteresowania (ROI), a następnie jego granic, w których odnotowano wysokie wartości parametru AE_{rms} . Do obszaru ROI o wysokim potencjale obróbczym nie zaliczono miejsc, które na skali znajdowały się w obszarze koloru niebieskiego (niskie wartości deskryptora AE).



Rys. 39. Przykład wyznaczania powierzchni o wysokiej energii w obszarze zainteresowania przedstawiono dla prędkości wirnika komory roboczej 450 obr./min

Analizując udział wysokich wartości sygnału AE_{rms} w polu przekroju obszaru ROI wykazano, że wraz ze wzrostem prędkości obrotowej wirnika wyłazarki, rośnie udział wysokich wartości. Dla prędkości $n_s = 150$ obr./min jest to $75,9 \text{ mm}^2$, co stanowi zaledwie 19% powierzchni wymaganej (ze względu na wielkość próbki przyjęto wartość nominalną równą 400 mm^2). Dla prędkości 300 oraz 450 obr./min udział ten wzrasta odpowiednio do 75,9% i 87,3%. Oznacza to, że przy założeniu stałej wielkości elementów obrabianych większa prędkość obrotowa zapewnia nie tylko przekazanie większej energii na powierzchnię materiału, ale też bardziej równomierną obróbkę.

Wyniki przedstawione w tab. 4 świadczą także o dużych różnicach między wartościami deskryptorów sygnału emisji akustycznej w trakcie pomiaru w różnych miejscach strumienia kształtek ściernych.

Tab. 4. Średnie wartości cech sygnału AE określonych w domenie czasu, uzyskane podczas wygładzania powierzchni z mosiądzu w maszynie typu EC6-WET

Obroty	Sygnał rzeczywisty	Wartość skuteczna	Poziom ciśnienia akustycznego	Energia krótkookresowa	Wskaźnik przekroczenia zera
n_s , obr./min	AE_{raw} , V	AE_{rms} , V	L_p , dB _{ref. 20e-6}	E_s , 10^{-4} V ²	Z_{cr} , 10^{-3}
Obszar o niskim potencjale obróbczym					
150	0,29	0,35	28,70	6,8	19,0
300	0,52	0,88	37,28	49,3	19,8
450	0,53	0,74	33,96	22,9	21,3
Obszar o wysokim potencjale obróbczym					
150	0,71	1,32	42,33	157,9	21,4
300	1,20	1,81	45,27	310,7	19,5
450	1,57	2,94	48,80	705,0	16,3

Wartości amplitudy sygnału AE oraz parametrów powiązanych z energią tego sygnału (wartość skuteczna, energia chwilowa, poziom ciśnienia akustycznego), wyraźnie wzrastają, jeżeli obróbka odbywa się w obszarze o większym potencjale obróbczym. Oznacza to, że poszukiwanie ich największych wartości (w trakcie monitorowania procesu) może być wykorzystane do zwiększenia efektywności obróbki i skrócenia czasu jej trwania.

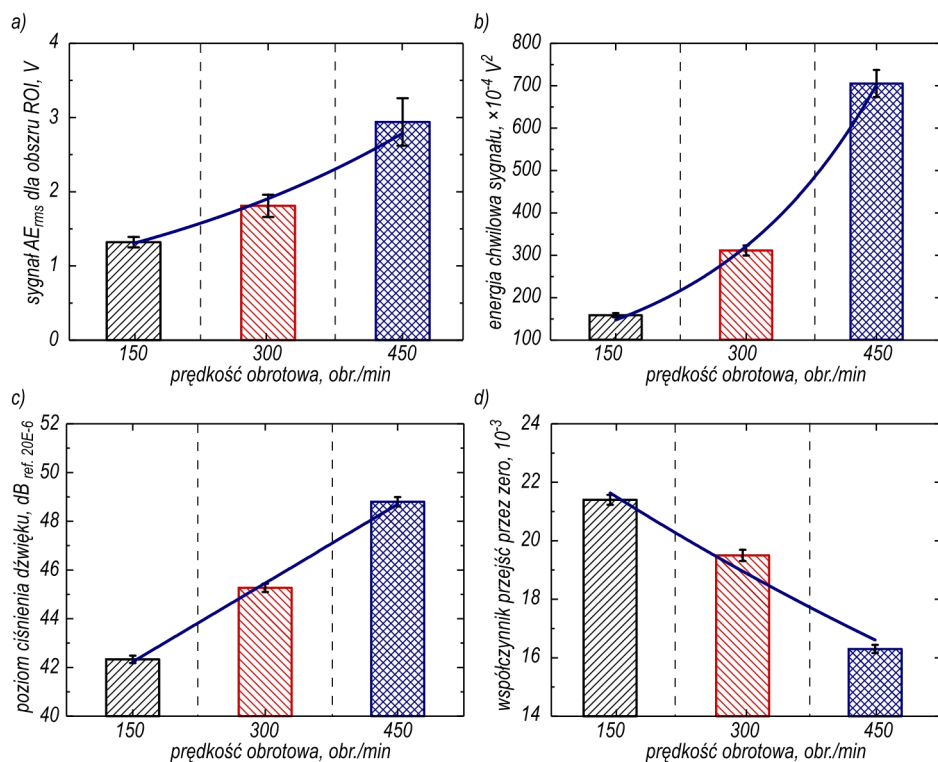
W przypadku energii sygnału (E_s) jest to największy wzrost: 23-krotnie dla prędkości $n_s = 150$ obr./min (z $6,8 \cdot 10^{-4}$ do $157,9 \cdot 10^{-4}$ V²), 6-krotnie dla prędkości 300 obr./min oraz 30-krotnie, dla najwyższej badanej prędkości wirnika komory roboczej.

Parametr Z_{cr} reprezentuje liczbę zmian wartości sygnału, od wartości dodatniej do ujemnej i odwrotnie, podzieloną przez długość ramki. Wartości tego parametru spadają, jeżeli sygnał niesie więcej informacji a mniej szumu. W przypadku przeprowadzonych badań eksperymentalnych spadek wartości współczynnika przejść przez zero jest wynikiem wzrostu zjawisk elementarnych biorących udział w kształtowaniu sygnału AE, następujących wraz ze wzrostem prędkości obrotowej wirnika wygładzarki.

Przeprowadzone analizy wykazały, że zależności między wybranymi parametrami sygnału AE a obrotami wirnika komory roboczej tworzą korelacje niemal pełne (wg klasyfikacji Guilforda) i przybierają postać funkcji zobrazowanych na rys. 40.

Najważniejsze wnioski z oceny energii wsadu roboczego w wygładzarce rotacyjnej za pomocą sygnału emisji akustycznej:

- wartości i rozkład energii kinetycznej strumienia roboczego można oszacować za pomocą pomiaru sygnału emisji akustycznej, w wyniku czego można opracować mapy energii w przekroju osiowym wsadu roboczego;
- wyniki badań eksperymentalnych dają podstawy do oszacowania położenia obszaru o największej energii kinetycznej strumienia roboczego w przestrzeni komory roboczej wygładzarki i zwiększenia wydajności procesu, co potwierdzono badaniami weryfikacyjnymi;



Rys. 40. Charakterystyka obszaru ROI o wysokim potencjale obróbczym w zależności od prędkości obrotowej wirnika wygładzarki. Średnie wartości: a) wartości skutecznej sygnału AE, b) energii krótkookresowej sygnału AE, c) poziomu ciśnienia akustycznego sygnału AE, d) wskaźnika przekroczenia zera dla sygnału AE

- wartość skuteczna, ciśnienie akustyczne oraz energia krótkookresowa sygnału emisji akustycznej są proporcjonalne do prędkości obrotowej wirnika wygładzarki rotacyjno-kaskadowej, co świadczy także o korelacji z energią kinetyczną kształtek ściernych;
- znajomość miejsc położenia i wielkość obszarów o największej energii działania może być podstawą do ich wskazania w celu prowadzenia obróbki z większą wydajnością. W takim przypadku orientacja przestrzenna przedmiotów obrabianych powinna być odpowiednio wymuszana za pomocą uchwytów, realizujących ruch ustawczy w układzie współrzędnych promieniowych i osiowych wygładzarki rotacyjno-kaskadowej. Do tego celu konieczne jest zastosowanie układu ustawczego przedmiotu, mocowanego na górnej nieruchomej części obudowy wygładzarki EC6-WET.

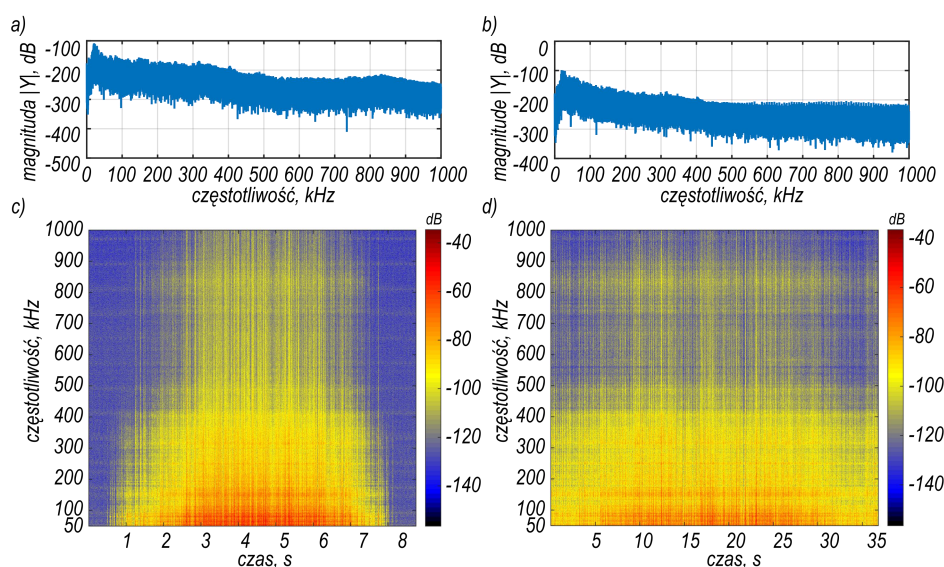
Publikacje:

1. **Sutowski P.**, Plichta J., Kałduński P.: *Determining kinetic energy distribution of the working medium in a centrifugal disc finishing process — Part 2: Experimental analysis with the use of acoustic emission signal*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019 [w druku].

3.13. Analiza i ocena zmian w widmie sygnału emisji akustycznej zarejestrowanego dla różnych prędkości obrotowych komory roboczej wykładarki, w warunkach przejścia przedmiotu obrabianego przez całą szerokość strumienia kształtek ściernych

Badania sygnału AE zrealizowano także w oparciu o analizy widmowe, które są często skuteczne w analizie sygnałów zmiennych w czasie.

Przykładowe sygnały emisji akustycznej, wyrażone w domenie częstotliwości, dla najwyższej prędkości obrotowej wirnika komory roboczej (450 obr./min), zarejestrowane w obszarze o niskim i wysokim potencjale obróbczym strumienia kształtek ściernych oraz widmo sygnału AE pochodzącego z obszaru o wysokim potencjale obróbczym dla zmiennej prędkości obrotowej komory roboczej przedstawiono na rys. 41.



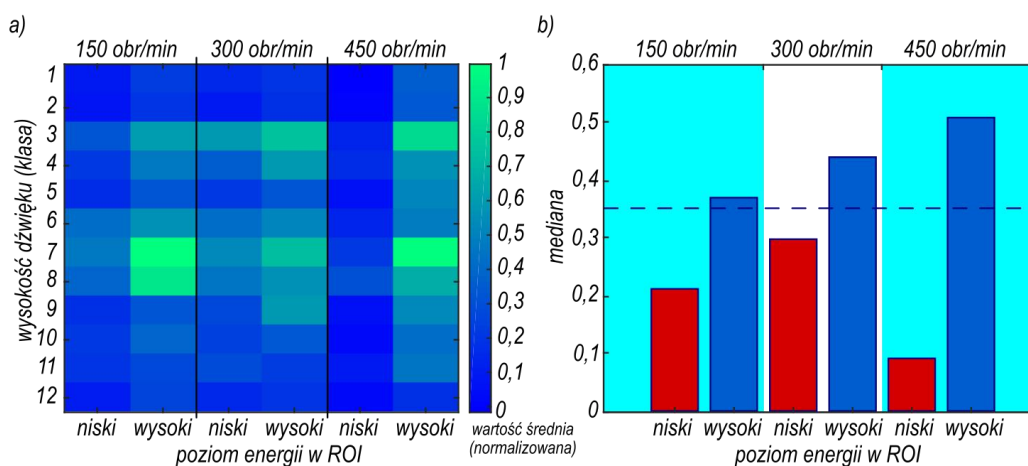
Rys. 41. Przykładowe sygnały emisji akustycznej w domenie częstotliwości dla prędkości wirnika komory roboczej 450 obr./min: a) widmo sygnału w obszarze o niskiej energii strumienia kształtek ściernych, b) widmo sygnału w obszarze o względnie wysokiej energii strumienia, c) spektrogram sygnału AE w przekroju strumienia (wyznaczony w linii AB z rys. 38) kształtek ściernych; d) spektrogram sygnału AE w obszarze o wysokim potencjale obróbczym zarejestrowany przy zmiennej prędkości obrotowej (od 150 do 450 obr /min oraz przeciwnie)

Rozkład harmonicznym w sygnale (rys. 41a i 41b) jest typowy dla otrzymanych wyników w badaniach eksperymentalnych. Zmiana położenia próbki wykazuje jedynie wzrost magnitudy. Nie odnotowano natomiast, zmian w rozkładzie poszczególnych częstotliwości.

Rys. 41c przedstawia zmiany w widmie sygnału AE zarejestrowanego dla stałej prędkości obrotowej wirnika wykładarki, w przypadku przejścia przez całą szerokość strumienia kształtek ściernych, od krawędzi wewnętrznej strumienia do zewnętrznej i z powrotem. W widmie sygnału wyraźnie widać zmiany magnitudy poszczególnych harmonicznym, trudno jednak wskazywać na pojawienie się charakterystycznych częstotliwości dla któregoś z obszarów strumienia. Podobne wnioski otrzymano w wyniku analizy widma sygnału AE przedstawionego na rys. 41d.

Szczegółowa analiza sygnałów o złożonym charakterze wymagała dalszych analiz, związanych z określeniem środka ciężkości i entropii widma oraz intensywności dźwięku.

Dla środka ciężkości i entropii widma udało się opracować istotne statystycznie związki korelacyjne z prędkością obrotową wirnika komory roboczej wygładzarki, natomiast w przypadku parametru wyrażającego intensywność dźwięku — opracowano metodykę identyfikacji obszaru o wysokim potencjale obróbczym. W metodzie tej widmo sygnału jest konwertowane z dziedziny częstotliwości do dziedziny wysokości dźwięku (ang. pitch), przez zastosowanie transformacji logarytmiczno-częstotliwościowej. Rozkład energii wzdłuż dwunastu możliwych klas wysokości dźwięku, nazywany chromagramem (w analogii do spektrogramu) i został on przedstawiony na rys. 42a.



Rys. 42. Analiza intensywności dźwięku użyta do rozpoznania różnic w sygnałach AE: a) chromagram uzyskany z dwóch odmiennych obszarów energetycznych strumienia kształtek ściernych (dla każdej prędkości obrotowej), b) wartość mediany dla wszystkich 12-stopniowych klas dla różnych prędkości obrotowych oraz pozycji w strumieniu (wraz z zaznaczoną wartością graniczną)

Wyniki wykazują, że zmiana położenia próbki w kierunku obszaru o większej efektywności obróbki zwiększa intensywność niektórych klas. Wysokość dźwięku zwiększa się przede wszystkim w klasie 7., ale wzrost jest widoczny także w klasach 2, 4 oraz 8.

Aby zwiększyć percepcję rozpoznawania różnicy między wzorcami sygnałów, można analizować medianę energii we wszystkich 12 klasach jednocześnie, co przedstawiono na rysunku 42b. Na wykresie wyraźnie widać wzrost intensywności widma wraz ze zmianą położenia próbki z miejsca obróbki z niskiej energii do miejsca o wyższej energii. Zmiana prędkości obrotowej wirnika zmienia w sposób liniowy intensywność widma tylko w przypadku miejsc o dużym potencjale obróbczym. Analiza ta pozwala dodatkowo określić wartość graniczną intensywności widma, której przekroczenie może świadczyć o obróbce w korzystnym obszarze strumienia kształtek ściernych, niezależnie od prędkości obrotowej wirnika wygładzarki. W zaprezentowanym przypadku poziom graniczny wyznaczono na wysokości 0,35.

Najważniejsze wnioski z analizy i oceny zmian w widmie sygnału emisji akustycznej zarejestrowanego dla różnych prędkości obrotowych bębna wygładzarki, w warunkach przejścia przedmiotu obrabianego przez całą szerokość strumienia kształtek ściernych:

- analiza widma sygnał AE wskazuje na różną energię sygnału w zależności od miejsca rejestracji w strumieniu roboczym kształtek ściernych;
- charakter uśrednionego widma nie wykazuje różnic w odniesieniu do udziału harmonicznych charakteryzujących sygnał emisji akustycznej w różnych miejscach strumienia roboczego kształtek ściernych;

- zmiana prędkości obrotowej komory roboczej wygładzarki tylko nieznacznie wpływa na charakter widma sygnału AE, zmieniając przede wszystkim magnitudę poszczególnych składowych sygnału; im wyższa prędkość, tym większa gęstość widmowa mocy sygnału;
- wartości wybranych deskryptorów sygnału emisji akustycznej w domenie częstotliwości, posiadają wysoki stopień korelacji w odniesieniu do prędkości obrotowej wirnika wygładzarki rotacyjno-kaskadowej oraz energii strumienia roboczego;
- dla parametrów charakteryzujących środek ciężkości oraz entropię widma można wskazać na istotne statystycznie związki korelacyjne z prędkością obrotową wirnika komory roboczej wygładzarki, natomiast w przypadku parametru wyrażającego intensywność dźwięku — opracowano metodykę identyfikacji obszaru o wysokim potencjale obróbczym, która może stanowić procedurę dwustanowej diagnostyki sygnału.

Publikacje:

1. **Sutowski P.**, Plichta J., Kałduński P.: *Determining kinetic energy distribution of the working medium in a centrifugal disc finishing process — Part 2: Experimental analysis with the use of acoustic emission signal*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019 [w druku].

3.14. Wyznaczenie wpływu energii kinetycznej oraz potencjału obróbczego strumienia kształtek roboczych w procesie wygładzania kształtkami ściernymi na parametry mikronierówności i izotropowość powierzchni po obróbce

Doświadczalnie potwierdzono, że obróbka w procesie rotacyjno-kaskadowego wygładzania odbywa się z większą intensywnością w regionie o wysokim poziomie energetycznym, określonym na podstawie pomiaru energii sygnału emisji AE.

Porównując wyniki geometryczne obróbki (realizowanej w ciągu 15 minut z prędkością obrotową wirnika 300 obr./min) można zauważyć, że powierzchnia jest bardziej wygładzona w przypadku umieszczenia przedmiotu obrabianego w obszarze o wysokim potencjale obróbczym (regionie zainteresowania, ROI), czyli także względnie wysokiej energii kinetycznej medium roboczego (rys. 43).

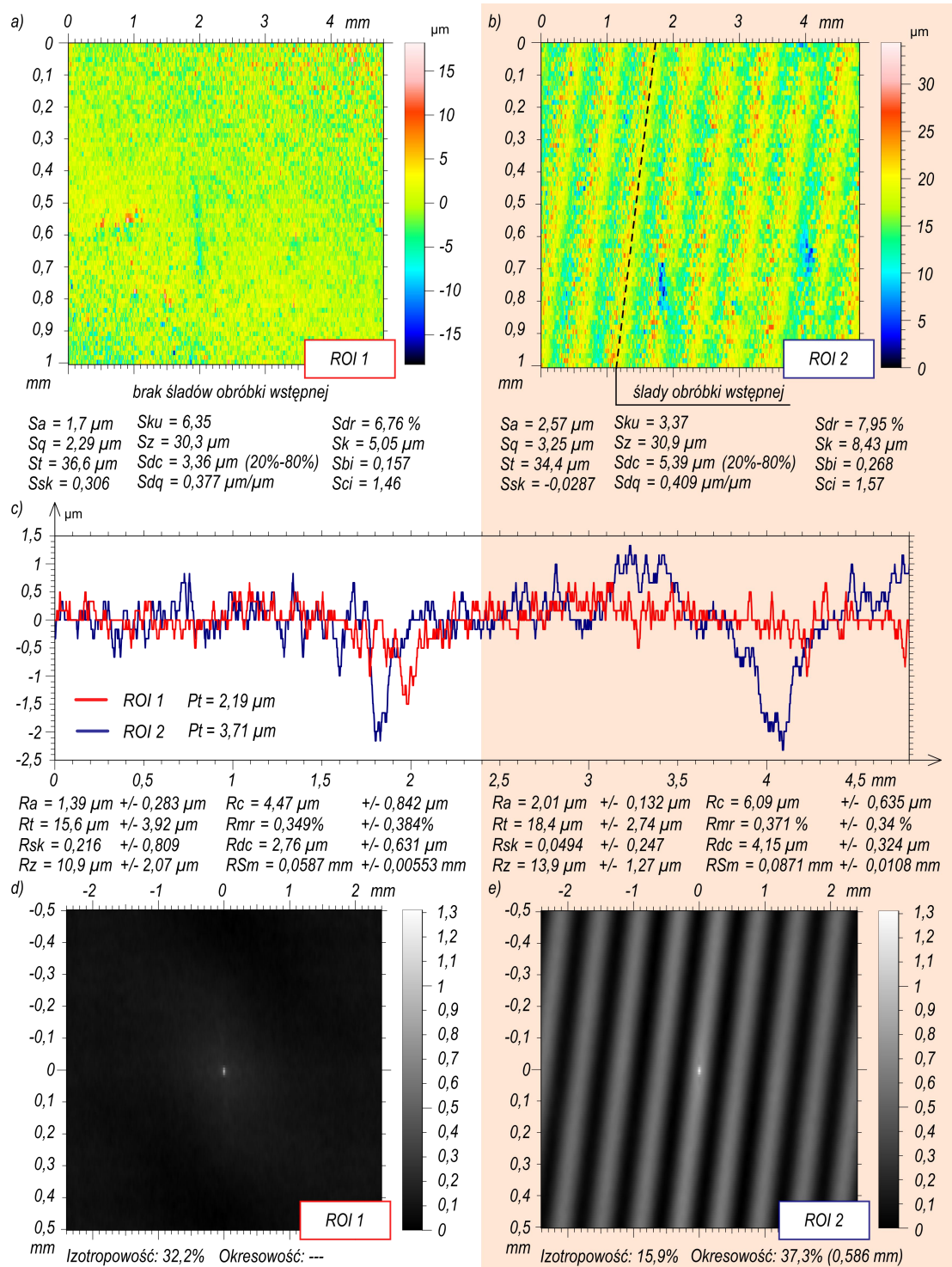
Stałe usytuowanie przedmiotu obrabianego w regionie wyznaczonym za pomocą sygnału AE skutkuje szybkim usuwaniem śladów obróbkowych powstałych podczas obróbki wstępnej (przykładowy ślad zaznaczony jest linią przerywaną na rys. 43b).

Jednocześnie uzyskuje się znaczne zmniejszenie średniego odchylenia arytmetycznego chropowatości powierzchni (Sa : z 2,57 do 1,7 μm) oraz średnie odchylenie arytmetyczne profilu powierzchni (Ra : z 2,01 do 1,39 μm) (rys. 43a do 43c). Istotnie zmienia się również forma funkcji autokorelacji powierzchniowej, co potwierdza eliminację okresowych składowych w strukturze geometrycznej powierzchni i ujednoczenie jej struktury.

Najważniejsze wnioski z badania wpływu energii kinetycznej i potencjału obróbczego strumienia kształtek roboczych w procesie wygładzania na parametry mikronierówności i izotropowość powierzchni po obróbce:

- w przypadku realizacji procesu wygładzania w obszarze strumienia kształtek ściernych o wysokiej energii kinetycznej, którego położenie określono na podstawie sygnału AE,

wzrasta wydajność procesu, chropowość powierzchni obrabianej maleje, a jej izotropowość rośnie;



Rys. 43. Porównanie wyników obróbki (15 minut, 300 obr./min) w regionie o wysokim i niskim potencjale energetycznym: SGP w regionie o wysokim (a) i niskim (b) potencjale, c) średnie profile chropowości dla różnych obszarów energetycznych, funkcja autokorelacji i parametry izotropowe powierzchni dla regionów o wysokim (d) oraz niskim (e) potencjale

- w badaniach eksperymentalnych uzyskano wzrost izotropii dla powierzchni obrabianej w wysokoenergetycznym rejonie (z 15,9% do 32,2%). Z tego powodu można argumentować, że wzrost intensywności procesu obróbki skrawaniem w regionie o wysokiej energii kinetycznej przyczynia się do wzrostu efektywności obróbki skrawaniem w rozpatrywanym stałym czasie realizacji procesu (w opisanym przypadku równym 15 minut);
- wraz ze wzrostem czasu obróbki wysoka wartość energii zgromadzonej na stosunkowo małej powierzchni przedmiotu obrabianego może zwiększyć jej chropowatość w wyniku zjawiska kraterowania. Dlatego też, aby zapewnić niską chropowatość powierzchni, w tego typu procesie obróbki wykończeniowej należy zmniejszyć prędkość roboczą medium lub przedmiot przemieścić do regionu o niższej energii kinetycznej, co można ocenić na podstawie pomiaru sygnału AE.

Publikacje:

1. **Sutowski P.**, Plichta J., Kałduński P.: *Determining kinetic energy distribution of the working medium in a centrifugal disc finishing process — Part 2: Experimental analysis with the use of acoustic emission signal*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019 [w druku].

4. Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze

Zainteresowania naukowe Autora, obok zagadnień będących elementem wskazanego osiągnięcia naukowego, obejmują tematykę badawczą dotyczącą:

- w zakresie zastosowania sygnału emisji akustycznej do oceny procesów obróbki ubytkowej:
 - **Badania wpływu parametrów technologicznych na jakościowe rezultaty obróbki w procesie przecinania wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną z zastosowaniem analizy sygnału emisji akustycznej.** Wyznaczenie zależności między płaskością, falistością oraz chropowatością powierzchni przecięcia a głównymi parametrami technologicznymi procesu. Wyznaczenie grupy parametrów sygnału AE, umożliwiających przeprowadzenie skutecznej diagnostyki jakości struktury geometrycznej powierzchni kształtowanych w procesie przecinania wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną. Wyznaczenie modelu korelacyjnego, który może posłużyć do sterowania prędkością posuwu głowicy tnącej w procesie przecinania stopu aluminium wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną, uwzględniającego bieżącą wartość sygnału AE do szacowanej jakości geometrii kształtowanej powierzchni przecięcia.

Publikacje:

1. **Sutowski P.**, Sutowska M., Kapłonek W., *The use of high-frequency acoustic emission analysis for in-process assessment of the surface quality of aluminium alloy 5251 in abrasive waterjet machining*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2018, 232(14): 2547-2565. DOI: 10.1177/0954405417703428.

2. **Sutowski P.**, Sutowska M.: *Zastosowanie analizy sygnału emisji akustycznej do oceny jakości powierzchni uzyskiwanej w procesie przecinania strugą wodno-ścierną*. *Mechanik*, 2016, 89(8-9): 1046-1047. DOI: 10.17814/mechanik.2016.8-9.240.
- **Opracowanie metodyki oceny procesu szlifowania wewnętrznych powierzchni walcowych z zastosowaniem bezstykowych, hydroakustycznych czujników sygnału emisji akustycznej.** Opracowanie metodyki analizy sygnału AE zarejestrowanego za pomocą hydrofonu akustycznego i jednostki monitorującej SEM-Module (Nordmann GmbH & Co.). Określenie możliwości zastosowania metody śledzenia zmian zachodzących w obrazie do analizy sygnału emisji akustycznej. Określenie parametru charakteryzującego sygnał emisji akustycznej, który posiada wysoką korelację z czasem szlifowania i postępującym stopniem ściernicy, a także z rejestrowaną mocą szlifowania w procesie jednoprzęściowego szlifowania stali 100Cr6. Opracowanie korelacji między sygnałem emisji akustycznej a wybranymi parametrami struktury geometrycznej powierzchni.

Publikacje:

1. **Sutowski P.**, Nadolny, Kapłonek W.: *Monitoring of cylindrical grinding processes by use of a non-contact AE system*. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2012, 13(10): 1737-1743. DOI: 10.1007/s12541-012-0228-7.
2. Plichta J., Nadolny K., Musiał W., **Sutowski P.**: *Wysoko efektywne szlifowanie materiałów trudno skrawalnych*. Monografia Wydziału Mechanicznego nr 225, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2012.
3. Plichta J., Nadolny K., **Sutowski P.**, Musiał W.: *Możliwości monitorowania jednoprzęściowego szlifowania otworów za pomocą sygnału emisji akustycznej (EA)*. [W:] Oczóś K., Burek J. (red.) *Podstawy i technika obróbki ściernej*. Monografia, Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2007, 291-300. ISBN: 978-83-7199-448-7.
4. **Sutowski P.**: *System diagnostyki i sterowania procesem jednoprzęściowego szlifowania otworów*. [W:] Nadolny K., Plichta J. (red.) *Jednoprzęściowe szlifowanie otworów ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie*. Monografia nr 158 Wydziału Mechanicznego, Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2008, 199-230. ISSN: 0239-7129.
5. **Sutowski P.**, Nadolny K.: *Zastosowanie sygnału emisji akustycznej przenoszonego za pomocą strumienia cieczy chłodzącej do oceny przebiegu procesu szlifowania otworów*. [W:] Gołąbczak A., Kruszyński B. (red.) *Podstawy i technika obróbki ściernej*. Pod patronatem Sekcji Podstaw Technologii Komitetu Budowy Maszyn Polskiej Akademii Nauk, Łódź 2010, 269-278. ISBN 83-920269.
6. **Sutowski P.**, Musiał W., Nadolny K.: *Możliwości monitorowania, diagnostyki i sterowania procesami szlifowania materiałów trudno skrawalnych*. [W:] Plichta J., et al. (red.) *Wysoko efektywne szlifowanie materiałów trudno skrawalnych*. Monografia nr 225, Wydział Mechaniczny, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2012, 274-306. ISSN 0239-7129.

- **Opracowanie systemu diagnostyki procesu jednoprzęściowego szlifowania otworów.** Wskazanie na metodę monitorowania procesu szlifowania, która umożliwiłaby bezpośrednio na stanowisku roboczym ocenę zarówno aktualnego stanu zużycia czynnej powierzchni ściernicy, jak i ocenę jakości powierzchni przedmiotu obrabianego. Wytypowanie zbioru deskryptorów sygnału emisji akustycznej do oceny postępującego stępienia ściernicy. Określenie korelacji między sygnałem emisji akustycznej a mocą szlifowania, odchyłką kształtu ściernicy oraz zmianą chropowatości powierzchni szlifowanej.

Publikacje:

1. Plichta J., Nadolny K., Musiał W., **Sutowski P.:** *Wysoko efektywne szlifowanie materiałów trudno skrawalnych.* Monografia Wydziału Mechanicznego nr 225, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2012.
2. **Sutowski P.:** *System diagnostyki i sterowania procesem jednoprzęściowego szlifowania otworów.* [W:] Nadolny K., Plichta J. (red.) *Jednoprzęściowe szlifowanie otworów ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie.* Monografia nr 158 Wydziału Mechanicznego, Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2008, 199-230. ISSN: 0239-7129.

- w zakresie zastosowania teorii zbiorów rozmytych, uczenia maszynowego oraz sztucznej inteligencji w analizie sygnału emisji akustycznej:

- **Klasyfikacja parametrów wyładowań elektrycznych w procesie szlifowania elektroerozyjnego (AEDG)** z użyciem maszyny wektorów nośnych (ang. *support vector machines*, SVM) będącej elementem uczenia maszynowego. Wyznaczenie grupy predyktorów i struktury klasyfikatora. Określenie zestawu reguł do diagnostycznych do klasyfikacji parametrów wyładowań elektrycznych.

Publikacje:

1. **Sutowski P., Święcik R.:** *The estimation of machining results and efficiency of the abrasive electro-discharge grinding process of Ti6Al4V titanium alloy using the high-frequency acoustic emission and force signals.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018, 94(1-4): 1263-1282. DOI: 10.1007/s00170-017-1011-9.

- **Oszacowanie stopnia zużycia ściernicy z wykorzystaniem teorii zbiorów rozmytych.** Wybór zbioru deskryptorów sygnału emisji akustycznej reprezentatywnych dla oszacowania zdolności skrawnej ściernicy. Określenia funkcji przynależności etykiet lingwistycznych oraz ustalenia bazy reguł decyzyjnych dla odpowiednio wybranego zbioru czynników charakteryzujących proces szlifowania. Opracowanie klasyfikatora stanu zużycia ściernicy, wykorzystującego pojęcie rozmyte. Analiza dokładności aproksymacji systemu informacyjnego i optymalizacja tablicy decyzyjnej.

Publikacje:

1. **Sutowski P.:** *Oszacowanie stopnia zużycia ściernicy z wykorzystaniem sygnału emisji akustycznej oraz teorii zbiorów rozmytych.* Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, 2010, 30(4): 47-56.

2. **Sutowski P.**, Musiał W., Nadolny K.: *Możliwości monitorowania, diagnostyki i sterowania procesami szlifowania materiałów trudno skrawalnych*. [W:] Plichta J., *et al.* (red.) Wysoko efektywne szlifowanie materiałów trudno skrawalnych. Monografia nr 225, Wydział Mechaniczny, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2012, 274-306. ISSN 0239-7129.
 3. **Sutowski P.**: *Wykorzystanie wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej oraz metod sztucznej inteligencji do oceny zużycia ściernicy*. *Pomiary Automatyka Kontrola*, 2009, 55(4): 255-258.
 4. **Sutowski P.**: *System diagnostyki i sterowania procesem jednoprzęciowego szlifowania otworów*. [W:] Nadolny K., Plichta J. (red.) Jednoprzęciowe szlifowanie otworów ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie. Monografia nr 158 Wydziału Mechanicznego, Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2008, 199-230. ISSN: 0239-7129.
- **Opracowanie podstaw systemu oceny procesu szlifowania wewnętrznych powierzchni walcowych na podstawie sygnału emisji akustycznej z zastosowaniem sieci neuronowych.** Opracowanie struktury sieci neuronowej zdolnej do oszacowania wyników obróbki w postaci średniej arytmetycznej rzędnych profilu powierzchni obrabianej, maksymalnej odchyłki okrągłości szlifowanej powierzchni oraz przyrostu mocy prądu elektrowrzeciona ściernicy.

Publikacje:

1. **Sutowski P.**: *System diagnostyki i sterowania procesem jednoprzęciowego szlifowania otworów*. [W:] Nadolny K., Plichta J. (red.) Jednoprzęciowe szlifowanie otworów ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie. Monografia nr 158 Wydziału Mechanicznego, Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2008, 199-230. ISSN: 0239-7129.
 2. **Sutowski P.**, Musiał W., Nadolny K.: *Możliwości monitorowania, diagnostyki i sterowania procesami szlifowania materiałów trudno skrawalnych*. [W:] Plichta J., *et al.* (red.) Wysoko efektywne szlifowanie materiałów trudno skrawalnych. Monografia nr 225, Wydział Mechaniczny, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2012, 274-306. ISSN 0239-7129.
- w zakresie oceny i regeneracji czynnej powierzchni ściernicy:
 - **Opracowanie metodyki oceny stanu powierzchni ściernic po procesach szlifowania stopów niklu i tytanu.** Doświadczalne zweryfikowanie metodyki podczas oceny stanu powierzchni ściernic ceramicznych 1-35×10×10SG/F46G10VTO (impregnowanych i nie impregnowanych substancjami antyadhezyjnymi), zalepionych materiałem obrabianym (stop Titanium Grade 2®) po procesie szlifowania prostoliniowo-zwrotnego walcowych powierzchni wewnętrznych pierścieni łożyskowych, realizowanej w stanie statycznym na zestawionym stanowisku badawczym. Wyznaczenie wartości wybranych parametrów geometrycznych i fotometrycznych oraz przeprowadzenie analiz densytometry-

cznych dla ocenianych powierzchni ściernic na podstawie zarejestrowanych obrazów cyfrowych rozkładu natężenia światła rozproszonego. Określenie najkorzystniejszej do zastosowania (w kontekście przeprowadzonych prac badawczych) substancji impregnujących oraz zweryfikowanie poprawności jej wprowadzenia w strukturę narzędzia ściernego.

Publikacje:

1. Kapłonek W., Nadolny K., **Sutowski P.**: *Zastosowanie technik mikroskopowych do weryfikacji poprawności wprowadzenia substancji impregnującej w strukturę ściernic z ziarnami SGTM i SiCg*. Mechanik, 2016, 89(8-9): 1070-1071. DOI: 10.17814/mechanik.2016.8-9.252.
2. Plichta J., Nadolny K., **Sutowski P.**, Sienicki W., Wojtewicz M.: *Modyfikacje ściernic konwencjonalnych przeznaczonych do szlifowania materiałów trudno skrawalnych*. [W:] Plichta J., et al. (red.) *Wysoko efektywne szlifowanie materiałów trudno skrawalnych*. Monografia nr 225, Wydział Mechaniczny, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2012, 82-102. ISSN 0239-7129.

- **Opracowanie metodyki regeneracji ściernic po procesach szlifowania stopu tytanu przez erodowanie czynnej powierzchni ściernicy za pomocą wysokociśnieniowej strugi cieczy.** Charakterystyka oddziaływania wysokociśnieniowej strugi cieczy na czynną powierzchnię ściernicy. Dobór parametrów regeneracji czynnej powierzchni ściernicy w celu uzyskania efektu kilkukrotnego zwiększenia liczby wierzchołków czynnej powierzchni ściernicy, bez konieczności usuwania ziaren ściernych i mostków spoiwa. Weryfikacja doświadczalna efektów procesu oczyszczenia CPS z rozległych zalepień wierzchołków aktywnych ziaren ściernych i przestrzeni międzyziarnowych.

Publikacje:

1. Nadolny K., Plichta J., **Sutowski P.**: *Regeneration of grinding wheel active surface using high-pressure hydro-jet*. Journal of Central South University, 21(8): 3107-3118. DOI: 10.1007/s11771-014-2282-z.
2. Plichta J., Nadolny K., **Sutowski P.**: *Regeneracja czynnej powierzchni ściernicy wysokociśnieniową strugą cieczy*. [W:] Plichta J., et al. (red.) *Wysoko efektywne szlifowanie materiałów trudno skrawalnych*. Monografia nr 225, Wydział Mechaniczny, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2012, 256-273. ISSN 0239-7129.

- **Ocena stanu czynnej powierzchni ściernicy z wykorzystaniem elektronowej mikroskopii skaningowej oraz technik przetwarzania i analizy obrazu.** Opracowanie metodyki analizy danych pochodzących z obrazów mikroskopowych SEM czynnej powierzchni ściernicy.

Publikacje:

1. Kapłonek W., Nadolny K., **Sutowski P.**: *Zastosowanie technik mikroskopowych do weryfikacji poprawności wprowadzenia substancji impregnującej w strukturę ściernic z ziarnami SGTM i SiCg*. Mechanik, 2016, 89(8-9): 1070-1071. DOI: 10.17814/mechanik.2016.8-9.252.

2. Kapłonek W., Nadolny K., **Sutowski P.**: *Ocena stanu czynnej powierzchni ściernicy z wykorzystaniem elektronowej mikroskopii skaningowej oraz technik przetwarzania i analizy obrazu.* [W:] Barylski A. (red.) *Obróbka ścierna. Współczesne problemy.* Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2011, 29-38. ISBN: 9788388579721.

- w zakresie zastosowania metod rozpraszania światła do oceny struktury geometrycznej powierzchni:

- **Opracowanie i konstrukcja hybrydowego systemu pomiarowego wykorzystującego obrazowanie i analizę światła rozproszonego do oceny stanu powierzchni szlifowanych.** Opracowanie koncepcji stanowisk badawczych oraz przyjęcie założeń do ich technicznej realizacji. Zaprojektowanie konfiguracji, dobranie elementów składowych i ich zestawienie. Doświadczalne zweryfikowanie poprawności realizowanych procedur pomiarowych.

Publikacje:

1. Kapłonek W., **Sutowski P.**, Łukianowicz Cz., Tomkowski R. (2014). *Laserowa metoda aktywnej kontroli struktury geometrycznej precyzyjnie obrobionych powierzchni wykorzystująca obrazowanie i analizę światła rozproszonego.* Raport końcowy z realizacji projektu badawczego własnego N N505 486940. Wydział Mechaniczny Politechniki Koszalińskiej, Koszalin.
2. Kapłonek W., **Sutowski P.**, Łukianowicz Cz.: *Zastosowanie systemu zautomatyzowanej inspekcji wizyjnej do pomiarów i analiz rozpraszania światła na powierzchniach porównawczych wzorców chropowatości.* *Mechanik*, 2014, 87(8-9): 146-155.
3. Kapłonek W., **Sutowski P.**, Nadolny K.: *Zastosowanie hybrydowego systemu pomiarowego wykorzystującego obrazowanie i analizę światła rozproszonego do oceny stanu powierzchni szlifowanych.* *Inżynieria Maszyn*, 2015, 20(1): 89-103.

- **Opracowanie metodyki oceny stanu powierzchni metali i ich stopów po procesach szlifowania w stanie statycznym i w ruchu.** Dobór modeli matematycznych do analizy parametrów chropowatości powierzchni w skaterometrycznych pomiarach wzorców porównawczych. Doświadczalne zweryfikowanie poprawności metodyki podczas oceny stanu powierzchni próbek płaskich (stal C45, pomiar w stanie statycznym) i walcowych (stal NC6, pomiar w ruchu) realizowanej na zestawionym stanowisku badawczym będącym komponentem eksperymentalnego hybrydowego systemu pomiarowego do aktywnej kontroli SGP. Opracowanie procedur akwizycji i przetwarzania danych za pomocą programu pomiarowego opracowanego w środowisku programistycznym CV-H3N 2.1 firmy Keyence. Wyznaczenie wartości wybranych parametrów chropowatości dla ocenianych powierzchni na podstawie analizy obrazów rozkładu natężenia światła rozproszonego.

Publikacje:

1. Kapłonek W., **Sutowski P.**, Łukianowicz Cz., Tomkowski R. (2014). *Laserowa metoda aktywnej kontroli struktury geometrycznej precyzyjnie obrobionych powierzchni wykorzystująca obrazowanie i analizę światła rozproszonego.*

Raport końcowy z realizacji projektu badawczego własnego N N505 486940.
Wydział Mechaniczny Politechniki Koszalińskiej, Koszalin.

2. Kapłonek W., **Sutowski P.**, Łukianowicz Cz.: *Zastosowanie systemu zautomatyzowanej inspekcji wizyjnej do pomiarów i analiz rozpraszania światła na powierzchniach porównawczych wzorców chropowatości*. Mechanik, 2014, 87(8-9): 146-155..
3. Kapłonek W., **Sutowski P.**: *Dobór modeli matematycznych do analizy parametrów chropowatości powierzchni w skaterometrycznych pomiarach wzorców porównawczych*. Pomiary Automatyka Kontrola, 2014, 60(10): 904-908.
4. Kapłonek W., **Sutowski P.**, Nadolny K.: *Zastosowanie hybrydowego systemu pomiarowego wykorzystującego obrazowanie i analizę światła rozproszonego do oceny stanu powierzchni szlifowanych*. Inżynieria Maszyn, 2015, 20(1): 89-103.

- w zakresie modyfikacji narzędzi ściernych:

- **Opracowanie modyfikacji ściernic konwencjonalnych przeznaczonych do szlifowania materiałów trudno skrawalnych.** Impregnowanie ściernic pierwiastkami niemetalicznymi (siatka, alotropowe odmiany węgla), co zapobiega przede wszystkim adhezji wiórów materiału obrabianego do czynnej powierzchni narzędzia ściernego i ogranicza jego zalepianie. Kształtowanie mikronieciągłości na czynnej powierzchni ściernic w celu zwiększenia zdolności skrawnej ściernicy poprzez lepsze doprowadzenie płynu chłodząco-smarującego do strefy obróbki oraz lepsze odprowadzenie z niej wiórów, co w efekcie pozwala na znaczące wydłużenie okresu trwałości ściernicy. Wykonanie dodatkowych kanałów (za pomocą wysokociśnieniowej strugi wodno-ściernej) w ściernicy doprowadzających płyn chłodząco-smarujący do strefy szlifowania. Optymalizacja liczby, średnic i rozmieszczenia kanałów w celu zapewnienia wysokiej skuteczności docierania płynu chłodząco-smarującego do strefy szlifowania.

Publikacje:

1. **Sutowski P.**, Nadolny K., Plichta J., Kapłonek W.: *Wpływ sposobu podawania płynu chłodząco-smarującego w procesie szlifowania otworów na efektywność obróbki stopu INCONEL alloy 600®*. Mechanik, 2013, 86(8-9): 377-390.
2. Plichta J., Nadolny K., **Sutowski P.**, Sienicki W., Wojtevicz M.: *Modyfikacje ściernic konwencjonalnych przeznaczonych do szlifowania materiałów trudno skrawalnych*. [W:] Plichta J., et al. (red.) *Wysoko efektywne szlifowanie materiałów trudno skrawalnych*. Monografia nr 225, Wydział Mechaniczny, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2012, 82-102. ISSN 0239-7129.

- **Opracowanie budowy systemu odśrodkowego doprowadzenia płynu chłodząco-smarującego do strefy szlifowania z zastosowaniem przedłużki wrzeczona ściernicy.** Przedmiotem wynalazku jest sposób doprowadzenia chłodziwa do strefy szlifowania z zastosowaniem przedłużki wrzeczona ściernicy w ściernicach walcowych, przeznaczonych do szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych.

Patent:

1. Plichta J., Nadolny K., **Sutowski P.**: *Sposób doprowadzenia chłodziwa do strefy szlifowania z zastosowaniem przedłużki wrzeciona ściernicy*. Patent Nr 230989 (decyzja UP z dnia 31.01.2019).
- w zakresie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych w dyscyplinie inżynierii mechanicznej:
 - **Opracowanie autorskiej metodyki estymacji zgodności zmian zachodzących w wielkościach wyjściowych procesu szlifowania.** Analiza metod określania związków przyczynowo-skutkowych między porównywanymi wielkościami. Opracowanie podstaw autorskiej strategii ilościowej oceny podobieństwa zmian zachodzących między dwoma dowolnymi zmiennymi, niezależnie od tego, czy reprezentują one sygnały zarejestrowane na wejściu, czy na wyjściu dowolnego procesu. Określenie wskaźnika metody i zakresu jego zmienności. Weryfikacja doświadczalna metody.

Publikacje:

1. **Sutowski P.**: *Alternatywna metoda estymacji zgodności zmian zachodzących w wielkościach wyjściowych procesu szlifowania*. [W:] Plichta J. (red.) Współczesne problemy obróbki ściernej. Monografia Wydziału Mechanicznego nr 167, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2009, s. 379-390. ISSN: 0239-7129.
 2. **Sutowski P.**: *Metoda oceny zgodności zmian zachodzących między sygnałami wyjściowymi w analizie wyników badań eksperymentalnych*. *Pomiary Automatyka Kontrola*, 2010, 56(5): 471-474.
- **Opracowanie techniki obróbki wykończeniowej wielkogabarytowych powierzchni kształtowych.** Opracowanie rozwiązań konstrukcyjnych oraz metodyki badań eksperymentalnych w zakresie wygładzania wielkogabarytowych powierzchni kształtowych za pomocą jednowarstwowych dysków ściernych Trizact™ z zastosowaniem autorskiej wielonarzędziowej głowicy szlifiersko-polskiej.

Publikacje:

1. Baran J., Plichta J., **Sutowski P.**, Tandecka K.: *Analiza wygładzania powierzchni za pomocą jednowarstwowych dysków ściernych Trizact™*. *Mechanik*, 2014, 87(8-9): 719. [Dokument elektroniczny, K 018, s. 18-21].
 2. Baran J., Rypina Ł., **Sutowski P.**: *Budowa wielonarzędziowej głowicy szlifiersko-polskiej oraz wyznaczenie charakterystyki technicznej wrzeciona napędowego za pomocą szybkościowej kamery PHANTOM v210*. *Mechanik*, 2014, 87(8-9): 719. [Dokument elektroniczny, K 022, s. 22-25].
- **Analiza kierunków najnowszych badań eksperymentalnych i symulacyjnych z zakresu stosowania cieczy magnetoreologicznych do obróbki wykończeniowej.** Opracowanie konstrukcji oraz budowa stanowiska do polerowania w polu

magnetycznym. Badanie procesu polerowania z zastosowaniem cieczy magneto-reologicznej.

Publikacje:

1. Sutowska M., **Sutowski P.**: *Contemporary applications of magnetoreological fluids for finishing process*. Journal of Mechanical and Energy Engineering, 2017, 1/41(2): 141-152.

- **Opracowanie metodyki precyzyjnych pomiarów wielkogabarytowych powierzchni części maszyn i urządzeń przemysłu spożywczego technikami profilometrycznymi.** Dobór aparatury, uchwytów pomiarowych oraz czujników. Weryfikacja doświadczalna metodyki.

Publikacje:

1. Kapłonek W., Ungureanu M., Nadolny K., **Sutowski P.**: *Stylus Profilometry in Surface Roughness Measurements of the Vertical Conical Mixing Unit Used in a Food Industry*. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 47(1): 1-8. DOI: 10.3329/jme.v47i1.35352.

- w zakresie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych w inżynierii produkcji:

- **Opracowanie koncepcji oraz modeli komputerowych mobilnych, zrobotyzowanych urządzeń transportu wewnątrzzakładowego.** Opracowanie założeń eksploatacyjnych oraz konstrukcyjnych. Wykonanie modeli CAD oraz analiza symulacyjna realizacji zadań transportowych.

Publikacje:

1. Musiał W. Knap J. **Sutowski P.**: *Projekt autonomicznego robota transportowego wykonany z wykorzystaniem systemu CAD*. Mechanik, 2016, 89(5-6): 480-481. DOI: 10.17814/mechanik.2016.5-6.97.

- **Analiza i optymalizacja zagadnień transportowych z zastosowaniem modeli symulacyjnych.** Modelowanie, analiza oraz optymalizacja czasu realizacji zadań transportowych.

Publikacje:

1. **Sutowski P.**, Sutowska M.: *Modele symulacyjne zagadnień transportowych w programie Arena*. Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe 2017, 18(7-8): 262-266.
2. **Sutowski P.**, Sutowska M.: *Możliwości wykorzystania modeli symulacyjnych do rozwiązywania zagadnień transportowych*. Logistyka, 2015, 4: 5879-5888.

- **Analiza i optymalizacja strumienia wartości dodanej w procesie produkcyjnym.** Mapowanie ciągłych i dyskretnych procesów produkcji w przemyśle spożywczym na podstawie dokumentacji technologicznej oraz obserwacji procesu. Analiza i wytypowanie wąskich gardeł systemu produkcyjnego. Implementacja usprawnień w mapie strumienia wartości. Obliczenia wskaźników wydajności i produktywności linii produkcyjnej.

Publikacje:

1. Romanowski M., Nadolny K., Sutowski P.: *Value stream mapping of the production process of tankers for the transport of liquid food products*. Journal of Mechanical and Energy Engineering, 2017, 1/41(2): 123-128.

5. Charakterystyka działalności naukowej

Szczegółową charakterystykę osiągnięć naukowo-badawczych zawarto w **Załączniku 4**.

Problematyka badawcza poruszana w dorobku naukowo-badawczym i publikacyjnym (po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych) jest skoncentrowana na zagadnieniach związanych z monitorowaniem, analizą i oceną procesów obróbki ścierniej oraz erozyjnej. W szczególności obejmuje ona zagadnienia z zakresu opisanego w pkt. 3 i 4 niniejszego autoreferatu.

Głównym celem prowadzonych badań było opracowanie podstaw oceny procesów przez wyznaczenie zbioru deskryptorów sygnału emisji akustycznej, właściwych do diagnostyki cech powierzchni czynnej narzędzi ściernych oraz powierzchni obrabianych w zakresie obróbki ścierniej i ścierno-erozyjnej, co zawarto w przedłożonej monografii.

W ramach swojej działalności naukowo-badawczej opracowałem szereg metodyk identyfikacji zmian w strukturze geometrycznej czynnej powierzchni ściernic oraz przedmiotów obrabianych, a także oceny zdolności skrawnej zarówno pojedynczych ziaren ściernych, jak i kompletnych narzędzi. Wiele z przeprowadzonych badań zakończono opracowaniem klasyfikatorów stanu czynnej powierzchni ściernic, realizowanych z zastosowaniem sygnału emisji akustycznej, a także technik sztucznej inteligencji.

Całokształt działalności naukowej, realizowanej od uzyskania stopnia doktora nauk technicznych, wykraczał poza wyżej przytoczony zakres, obejmując zagadnienia inżynierii mechanicznej, w tym inżynierii produkcji.

Poniżej przedstawiam syntetyczną charakterystykę osiągnięć naukowo-badawczych.

Ilościowy wykaz najważniejszych osiągnięć naukowo-badawczych			
Wykaz osiągnięć	Przed doktoratem	Po doktoracie	Łącznie
Publikacji ogółem	6	39	45
Publikacje w czasopismach naukowych i naukowo-technicznych wyróżnionych w Journal Citation Reports® indeksowanych przez Web of Science™ Clarivate Analytics	—	6	6
Publikacje w czasopismach naukowych i naukowo-technicznych znajdujących się na liście B wykazu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego	2	18	20
Publikacje naukowe publikowane w krajowych wydawnictwach monograficznych (w języku polskim)	1	9	10
Publikacje naukowe publikowane w materiałach konferencyjnych (konferencje międzynarodowe)	1	1	2

Ilościowy wykaz najważniejszych osiągnięć naukowo-badawczych			
Wykaz osiągnięć	Przed doktorem	Po doktoracie	Łącznie
Publikacje naukowe publikowane w materiałach konferencyjnych (konferencje krajowe)	2	1	3
Autorstwo i redakcja monografii	—	2	2
Patenty i zgłoszenia patentowe	—	1	1
Recenzje w czasopismach naukowych i naukowo-technicznych indeksowanych w Web of Science™ i wyróżnionych w Journal Citation Reports®	—	5	5
Recenzje w krajowych czasopismach naukowych i naukowo-technicznych	—	2	2
Udział w naukowych konferencjach międzynarodowych / wygłoszone referaty	1 / 1	1 / 1	2 / 2
Udział w naukowych konferencjach krajowych/wygłoszone referaty	3 / 3	9 / 14	12 / 14
Członkostwo w komitetach naukowych konferencji międzynarodowych / krajowych	—	1 / 3	1 / 3
Członkostwo w komitetach organizacyjnych konferencji międzynarodowych / krajowych	—	3 / 4	3 / 4
Udział w krajowych projektach badawczych (Projekty badawcze MNiSW)	1	4	5
Zagraniczne staże naukowe	1	1	2
Nagrody organizacji technicznych	—	1	1
Nagrody konferencji naukowych	—	1	1
Nagrody i wyróżnienia za działalność naukową (nagrody Rektora Politechniki Koszalińskiej)	—	2	2

6. Charakterystyka działalności dydaktycznej oraz organizacyjnej

Szczegółową charakterystykę działalności dydaktycznej i organizacyjnej przedstawiam w **Załączniku 5**.

Ilościowy wykaz najważniejszych osiągnięć dydaktycznych i organizacyjnych			
Wykaz osiągnięć	Przed doktorem	Po doktoracie	Łącznie
Uczestnictwo w programach europejskich oraz innych programach międzynarodowych lub krajowych	1	6	7
Udział w międzynarodowych/krajowych konferencjach naukowych	1 / 3	1 / 9	2 / 12
Udział w komitetach naukowych krajowych konferencji naukowych	—	3	3
Udział w komitetach organizacyjnych krajowych konferencji naukowych	—	4	4

Wykaz osiągnięć	Przed doktoratem	Po doktoracie	Łącznie
Recenzowanie publikacji w czasopismach międzynarodowych/krajowych	—	5 / 2	5 / 2
Staż dydaktyczne w zagranicznych ośrodkach naukowych lub akademickich	—	5	5
Pełnione funkcje organizacyjne	—	5	5
Nagrody i wyróżnienia w zakresie dorobku dydaktycznego, popularyzatorskiego i organizacyjnego	—	3	3
Członkostwo w stowarzyszeniach i towarzystwach naukowych	—	3	3

Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze promotora pomocniczego	
Obszar	Liczba osiągnięć
Promotorstwo pomocnicze w realizowanych przewodach doktorskich	1
Promotorstwo pomocnicze w zakończonych przewodach doktorskich	1
Opieka naukowa nad studentami i udział w procesie dyplomowania	
Obszar	Liczba osiągnięć
Wypromowane prace magisterskie	2
Wypromowane prace inżynierskie	16
Recenzje prac magisterskich i inżynierskich	5

12.04.2019

data

P. Sutowski

dr inż. Paweł Sutowski