



Politechnika Koszalińska

Wydział Mechaniczny

dr inż. Dariusz Lipiński

## Autoreferat

załącznik 2a do wniosku o przeprowadzenie  
postępowania habilitacyjnego  
w dziedzinie nauk technicznych  
w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn

Koszalin, 2018

---



## Spis treści

|   |    |
|---|----|
| 1. CHARAKTERYSTYKA HABILITANTA .....  | 4  |
| 1.1. Uzyskane stopnie i tytuły zawodowe.....  | 4  |
| 1.2. Przebieg pracy zawodowej.....  | 4  |
| 2. WSKAZANIE OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO .....  | 5  |
| 2.1. Wykaz publikacji wchodzących w skład osiągnięcia .....   | 5  |
| 2.2. Syntetyczny opis osiągnięcia naukowego – rozwiązane problemy naukowe .....                                       | 9  |
| 2.3. Znaczenie poznawcze i aplikacyjne osiągnięcia naukowego.....   | 11 |
| 3. OPIS OSIĄGNIĘĆ NAUKOWO-BADAWCZYCH W ZAKRESIE ANALIZY ORAZ MODELOWANIA<br>I OPTYMALIZACJI PROCESÓW SZLIFOWANIA..... | 13 |
| 3.1. Opracowanie metodyki oceny stanu powierzchni czynnej narzędzi ściernych .....                                    | 13 |
| 3.2. Analiza wpływu właściwości geometrycznych ostrzy skrawających<br>na efektywność procesu szlifowania.....         | 23 |
| 3.3. Opracowanie systemu oceny parametrów stereometrycznych powierzchni<br>po obróbce ściernej.....                   | 35 |
| 3.4. Modelowanie procesów szlifowania z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji ....                               | 41 |
| 3.5. Optymalizacja procesów szlifowania powierzchni płaskich.....   | 56 |
| 4. POZOSTAŁE OSIĄGNIĘCIA NAUKOWO-BADAWCZE .....   | 69 |
| 5. CHARAKTERYSTYKA DZIAŁALNOŚCI NAUKOWEJ.....   | 77 |
| 6. CHARAKTERYSTYKA DZIAŁALNOŚCI DYDAKTYCZNEJ, POPULARYZATORSKIEJ<br>I ORGANIZACYJNEJ .....                            | 79 |

## 1. Charakterystyka habilitanta

### 1.1. Uzyskane stopnie i tytuły zawodowe

**2005 r. – stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn** uzyskany na Wydziale Mechanicznym Politechniki Koszalińskiej.

Tytuł rozprawy: *„Nadzorowanie jakości w procesach zautomatyzowanego szlifowania małych elementów ceramicznych z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji”*.

Promotor: prof. dr hab. inż. Wojciech Kacalak, dr h.c. multi.

Recenzenci: prof. dr hab. inż. Adam Hamrol, prof. dr hab. inż. Jarosław Plichta.

Rozprawa doktorska obroniona z wyróżnieniem.

**1999 r. – tytuł zawodowy magistra inżyniera kierunku mechanika i budowa maszyn** uzyskany na Wydziale Mechanicznym Politechniki Koszalińskiej.

Tytuł pracy: *„Minimalizacja odchyłki skoku w procesie precyzyjnego szlifowania powierzchni śrubowych ślimaków”*.

Promotor: prof. dr hab. inż. Wojciech Kacalak, dr h.c. multi.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Tomasz Krzyżyński.

### 1.2. Przebieg pracy zawodowej

**2005 r. - obecnie** – **adiunkt** w Katedrze Inżynierii Systemów Technicznych i Informatycznych, Wydział Mechaniczny Politechniki Koszalińskiej.

**1999 r. -2005 r.** – **asystent** w Katedrze Mechaniki Precyzyjnej, Wydział Mechaniczny Politechniki Koszalińskiej.

**1998 r. -1999 r.** – **asystent stażysta** w Katedrze Mechaniki Precyzyjnej, Wydział Mechaniczny Politechniki Koszalińskiej.

## 2. Wskazanie osiągnięcia naukowego

Jako osiągnięcie, zgodnie z art. 16, ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, wskazuję:

- monografię naukową,
- cykl ośmiu powiązanych tematycznie publikacji.

Wspólny tytuł osiągnięcia brzmi:

### ***Podstawy analizy, modelowania i optymalizacji procesów szlifowania***

#### 2.1. Wykaz publikacji wchodzących w skład osiągnięcia

##### **Monografia naukowa**

- A.1. **Lipiński Dariusz:** *Podstawy modelowania i optymalizacji procesów szlifowania z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji*. Monografia Wydziału Mechanicznego nr 345, Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2018, ISSN 0239-7129, ISBN 978-83-7365-484-6 (MNiSW: 25 pkt).

Wskazana autorska monografia uzyskała pozytywne recenzje wydawnicze dr hab. inż. Michała Gołąbczaka, profesora nadzwyczajnego Politechniki Łódzkiej oraz dr hab. inż. Marcina Deji, profesora nadzwyczajnego Politechniki Gdańskiej. Monografia zawiera ogółem 150 stron druku zwartej, podzielonej na 6 rozdziałów, w tym 14 tabel, 59 rysunków oraz wykaz oznaczeń i literatury liczącej 238 pozycji (w tym 25 autorskich i współautorskich pozycji literaturowych).

*Praca autorska (100% udział habilitanta).*

##### **Publikacje w recenzowanych czasopismach naukowych wyróżnionych w Journal Citation Reports® indeksowanych w Thomson Reuters® Web of Science®**

- A.2. **Lipiński Dariusz, Kacalak Wojciech, Tomkowski Robert,** *Methodology of evaluation of abrasive tool wear with the use of laser scanning microscopy*, Scanning (The Journal of Scanning Microscopies), 36, 2014, str. 53-63 (MNiSW: 20 pkt, IF: 1,891).

*Praca współautorska (75% udział habilitanta).*

Wkład habilitanta w powstanie pracy polegał na:

- opracowaniu metodologii detekcji obszarów wskazujących na zużycie powierzchni czynnej narzędzi ściernych z zastosowaniem skanera optycznego,
- opracowaniu i implementacji algorytmów oceny i klasyfikacji form zużycia powierzchni czynnej narzędzia ściernego,
- zaplanowaniu, opracowaniu oraz analizie wyników badań eksperymentalnych,
- kierowaniu projektem badawczym obejmującym badania opisane w pracy,
- opracowaniu publikacji.

- A.3. **Lipiński Dariusz**, Kacalak Wojciech, *Metrological aspects of abrasive tool active surface topography evaluation*, Metrology and Measurement Systems, 23, 2016, str. 567-577 (MNiSW: 20 pkt, IF: 1,598).

*Praca współautorska (80% udział habilitanta).*

Wkład habilitanta w powstanie pracy polegał na:

- opracowaniu metodologii oceny powierzchni czynnej narzędzia ściernego,
- opracowaniu i implementacji algorytmów detekcji ziaren ściernych na powierzchni czynnej narzędzia ściernego z zastosowaniem metod morfologicznej analizy obrazu,
- opracowaniu i implementacji algorytmów oceny topografii powierzchni czynnej narzędzia ściernego,
- zaplanowaniu, opracowaniu i interpretacji wyników badań eksperymentalnych,
- opracowaniu publikacji.

- A.4. Kacalak Wojciech, **Lipiński Dariusz**, Bałasz Błażej, Rypina Łukasz, Tandecka Katarzyna, Szafraniec Filip, *Performance evaluation of the grinding wheel with aggregates of grains in grinding of Ti-6Al-4V titanium alloy*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94, str. 301-314 (MNiSW: 25 pkt, IF: 2,209).

*Praca współautorska (35% udział habilitanta).*

Wkład habilitanta w powstanie pracy polegał na:

- współudziale w opracowaniu i interpretacji wyników badań numerycznych dotyczących wpływu parametrów geometrycznych ziaren ściernych na efektywność procesu szlifowania,
- analizie oraz opracowaniu wyników badań eksperymentalnych w zakresie wpływu zastosowań agregatów ściernych na wartości i przebiegi składowych siły szlifowania, energii właściwej procesu szlifowania, parametrów oceny topografii powierzchni czynnej narzędzia ściernego,
- współudziale w opracowaniu publikacji.

- A.5. **Lipiński Dariusz**, Bałasz Błażej, Rypina Łukasz, *Modelling of surface roughness and grinding forces using artificial neural networks with assessment of the ability to data generalisation*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94, str. 1335-1347 (MNiSW: 25 pkt, IF: 2,209).

*Praca współautorska (80% udział habilitanta).*

Wkład habilitanta w powstanie pracy polegał na:

- opracowaniu metodologii oceny i weryfikacji sieci wielowarstwowych umożliwiających wybór modelu neuronowego o wysokiej zdolności do uogólniania wiedzy eksperymentalnej,
- zaplanowaniu, opracowaniu i interpretacji wyników badań eksperymentalnych,

- opracowaniu modelu neuronowego oraz weryfikacji jego zdolności do uogólniania informacji zawartych w danych eksperymentalnych,
- kierowaniu projektem badawczym obejmującym badania opisane w pracy,
- współudziale w opracowaniu publikacji.

**Publikacje w recenzowanych materiałach konferencyjnych indeksowanych w Thomson Reuters® Web of Science®**

- A.6. **Lipiński Dariusz**, Kacalak Wojciech, *Assessment of the accuracy of the process of ceramics grinding with the use of fuzzy interference*, Adaptive and Natural Computing Algorithms ICANNGA, Lecture Notes in Computer Science 4431, 2007, str. 596-603 (MNiSW: 15 pkt).

*Praca współautorska (75% udział habilitanta).*

Wkład habilitanta w powstanie pracy polegał na:

- współudziale w opracowaniu metodologii oceny dokładności procesów szlifowania małych elementów ceramicznych z zastosowaniem logiki rozmytej,
- zaplanowaniu, opracowaniu i interpretacji wyników badań eksperymentalnych,
- opracowaniu systemu wnioskowania o stanie procesu na podstawie analizy wartości składowych sił szlifowania oraz parametrów drgań układu obróbkowego,
- opracowaniu publikacji.

- A.7. **Lipiński Dariusz**, Majewski Maciej, *System for monitoring and optimization of micro- and nano-machining processes using intelligent voice and visual communication*, The 14th International Conference on Intelligent Data Engineering and Automated Learning (IDEAL 2013), 20-23 October 2013, Hefei, Anhui, China. Lecture Notes in Computer Science Vol. 8206, Springer 2013, str.16-23 (MNiSW: 15 pkt).

*Praca współautorska (50% udział habilitanta).*

Wkład habilitanta w powstanie pracy polegał na:

- opracowaniu podstaw zastosowań adaptacyjnych modeli neuronowych w zadaniach modelowania oraz detekcji i identyfikacji przyczyn niedokładności w procesach precyzyjnego szlifowania,
- opracowaniu koncepcji współdziałania systemów monitorowania i optymalizacji procesu szlifowania z zastosowaniem technologii mobilnych,
- kierowaniu projektem badawczym obejmującym badania opisane w pracy,
- współudziale w opracowaniu publikacji.

**Publikacje w recenzowanych czasopismach naukowych wyszczególnionych na liście B wykazu czasopism publikowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego**

- A.8. **Lipiński Dariusz**, Kacalak Wojciech, Tandecka Katarzyna, *Zastosowanie systemu skanowania przestrzennego do oceny zużycia narzędzi ściernych*, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 59(11), 2013, str. 1227-1231 (MNiSW: 7 pkt).

*Praca współautorska (70% udział habilitanta).*

Wkład habilitanta w powstanie pracy polegał na:

- współudziale w opracowaniu metodologii oceny stanu oraz stopnia zużycia narzędzi ściernych z zastosowaniem systemów skanowania przestrzennego,
- zaplanowaniu, opracowaniu i interpretacji wyników badań eksperymentalnych procesu szlifowania,
- analizie i interpretacji wyników pomiarów w zakresie oceny stopnia zużycia promieniowego i kształtowego narzędzia ściernego,
- opracowaniu publikacji.

- A.9. Kacalak Wojciech, **Lipiński Dariusz**, Tomkowski Robert, *Podstawy jakościowej oceny stanu powierzchni kształtowanych z wykorzystaniem teorii zbiorów rozmytych*, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 54(4), 2008, str. 180-183 (MNiSW: 6 pkt).

*Praca współautorska (40% udział habilitanta).*

Wkład habilitanta w powstanie pracy polegał na:

- analizie zawartości informacyjnej zbioru parametrów 3D oceny topografii powierzchni obrobionych,
- opracowaniu systemu jakościowej oceny stanu powierzchni kształtowanych z zastosowaniem systemu wnioskowania rozmytego,
- współudziale w opracowaniu publikacji.

Sumaryczny impact factor publikacji wskazanych jako element osiągnięcia naukowego wynosi 7,906 (z uwzględnieniem udziału własnego 5,236)\*.

Sumaryczna liczba punktów Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego publikacji wskazanych jako element osiągnięcia naukowego wynosi 158 (z uwzględnieniem udziału własnego 110,8).

\* dla publikacji z 2018 roku przyjęto najbardziej aktualną wartość współczynnika wpływu (tj. wartość współczynnika wpływu czasopisma z 2016 roku).



## 2.2. Syntetyczny opis osiągnięcia naukowego – rozwiązane problemy naukowe

1. **Opracowanie metodyki identyfikacji cech geometrycznych ziaren ściernych na powierzchni czynnej narzędzia ściernego z zastosowaniem metod morfologii matematycznej.** Przeprowadzenie analizy wpływu parametrów detekcji wierzchołków ziaren ściernych na poprawność wyznaczania ich granic. Dokonanie eksperymentalnej weryfikacji opracowanej metodyki na przykładzie detekcji ziaren ściernych na fragmentach powierzchni czynnej ściernicy zawierającej ziarna ściernie z mikrokryształicznego spiekanego tlenku glinu.
2. **Wyznaczenie zbioru parametrów oceny cech powierzchni czynnej narzędzia ściernego** ze szczególnym uwzględnieniem parametrów opisujących geometrię ziaren ściernych i przestrzeni międzyziarnowych, ich rozmieszczenie oraz rozkład na powierzchni czynnej narzędzia ściernego. Opracowanie i implementacja algorytmów umożliwiających wyznaczenie zbioru parametrów opisujących geometrię ziaren ściernych oraz przestrzeni międzyziarnowych na podstawie analizy rzędnych powierzchni czynnej narzędzia ściernego uzyskanych między innymi z zastosowaniem systemów mikroskopii konfokalnej.
3. **Opracowanie metodyki identyfikacji i klasyfikacji form zużycia ściernego na powierzchni czynnej narzędzia ściernego.** Wyznaczenie zbioru parametrów opisujących zmiany na powierzchni czynnej narzędzia ściernego. Opracowanie i implementacja algorytmów detekcji obszarów na powierzchni czynnej narzędzia ściernego wskazujących na zużycie ściernie oraz zalepienia powierzchni czynnej. Określenie kryteriów różnicowania powierzchni zużycia ściernego i zalepień powierzchni. Dokonanie eksperymentalnej weryfikacji opracowanej metodyki na przykładzie oceny zmian na powierzchni czynnej narzędzia ściernego z zastosowaniem metod skanowania przestrzennego.
4. **Wyznaczenie wpływu parametrów geometrycznych ostrzy skrawających i ich orientacji względem kierunku posuwu wzdłużnego na efektywność procesów obróbki.** Wyznaczenie zbioru parametrów opisujących geometrię ziaren ściernych oraz agregatów ściernych w płaszczyźnie równoległej do powierzchni obrabianej. Wyznaczenie dla analizowanych ostrzy skrawających współczynnika efektywności usuwania materiału. Dokonanie analizy wpływu parametrów geometrycznych analizowanych ostrzy skrawających (zarówno ziaren ściernych jak i agregatów ściernych) na wartość współczynnika efektywności usuwania materiału.
5. **Przeprowadzenie badań eksperymentalnych tworzących podstawy oceny efektywności procesu szlifowania stopu tytanu Ti-6Al-4V ściernicami konwencjonalnymi oraz ściernicami z agregatami ściernymi** o rozwiniętej strukturze geometrycznej. Wyznaczenie wpływu parametrów obróbki oraz właściwości narzędzi ściernych na topografię powierzchni obrobionej, składowe siły szlifowania oraz energię szlifowania w obróbce stopu tytanu Ti-6Al-4V.

6. **Analiza zawartości informacyjnej oraz stopnia współzależności parametrów oceny stereometrycznej powierzchni obrobionych.** Opracowanie modeli zależności między parametrami oceny 3D geometrii powierzchni z grupy parametrów amplitudowych, przestrzennych oraz powierzchniowych i objętościowych dla licznego zbioru powierzchni. Określenie komplementarnego zbioru parametrów opisujących powierzchnię obrobioną na podstawie analizy wartości współczynnika determinacji modeli opisującego stopień współzależności między poszczególnymi parametrami oceny 3D geometrii powierzchni obrobionej.
7. **Klasyfikacja cech powierzchni po obróbce ścierniej z zastosowaniem systemów wnioskowania rozmytego oraz sieci rekurencyjnych.** Opracowanie metod normalizacji zbioru parametrów oceny powierzchni z uwzględnieniem parametrów statystycznych opisujących ich rozkład. Opracowanie podstaw zastosowań opracowanych modeli zależności między parametrami oceny geometrycznej powierzchni umożliwiającą klasyfikację powierzchni dla niepełnego i nieprecyzyjnego zbioru charakteryzującego jej powierzchnię. Opracowanie oraz implementacja systemu wnioskowania rozmytego oraz sieci rekurencyjnej umożliwiającego przypisanie analizowanej powierzchni cech charakterystycznych opisanych zarówno numerycznie jak i lingwistycznie.
8. **Modelowanie wpływu parametrów obróbki na wyniki procesu szlifowania z zastosowaniem wielowarstwowej sieci neuronowej.** Opracowanie kryterium wyboru modelu o wysokiej zdolności do uogólniania informacji zawartych w danych eksperymentalnych. Utworzenie modelu neuronowego na podstawie wyników badań eksperymentalnych obejmujących procesy szlifowania płaszczyzn dla materiałów obrabianych oraz narzędzi ściernych o odmiennych charakterystykach. Przeprowadzenie oceny modelu neuronowego w kontekście jego zdolności do uogólnienia informacji zawartych w danych eksperymentalnych oraz poprawności prognozowania wyników procesu obróbki.
9. **Opracowanie metodyki integracji danych eksperymentalnych oraz wiedzy analitycznej w procesie tworzenia modeli neuronowych.** Opracowanie podstaw zastosowań modeli symulacyjnych w procesie uczenia sieci wielowarstwowych. Opracowanie metodyki procesu uczenia i weryfikacji modeli neuronowych z zastosowaniem danych pozyskiwanych zarówno w wyniku symulacji procesu szlifowania jak i wyników eksperymentu. Dokonanie eksperymentalnej weryfikacji opracowanej metodyki na przykładzie procesu szlifowania stopu Inconel 718. Wyznaczenie zdolności do prognozowania wyników eksperymentu przez modele tworzone na podstawie wyników badań symulacyjnych.
10. **Ekstrakcja wiedzy o wpływie parametrów obróbki na wyniki procesu szlifowania z wykorzystaniem systemu wnioskowania rozmytego.** Utworzenie modelu wnioskowania rozmytego typu Takagi-Sugeno-Kang ujmującego, za pomocą reguł lingwistycznych, zależności między parametrami obróbki i jego wynikami. Zastosowanie sieci neurorozmytej do wyznaczenia parametrów modelu na przykładzie procesu

szlifowania stopu Inconel 718. Przeprowadzenie weryfikacji eksperymentalnej opracowanego modelu oraz wyznaczenie błędów prognozowania.

11. **Opracowanie podstaw wielokryterialnej optymalizacji procesu szlifowania z zastosowaniem neuronowego modelu procesu.** Opracowanie założeń do wielokryterialnej optymalizacji procesu szlifowania powierzchni płaskich z zastosowaniem modeli neuronowych. Określenie wpływu parametrów i warunków realizacji procesu na wybrane kryteria technologiczne oraz ekonomiczne procesu szlifowania z wykorzystaniem modeli analitycznych oraz neuronowych. Wyznaczenie zbioru parametrów obróbki zapewniających uzyskanie założonych kryteriów technologicznych i ekonomicznych przy równoczesnym spełnieniu ograniczeń związanych z jakością powierzchni obrobionej.
12. **Opracowanie metodyki optymalizacji sekwencyjnego procesu obróbki ścierniej z zastosowaniem logiki rozmytej i algorytmów genetycznych.** Wyznaczenie kryteriów i ograniczeń rozmytych nałożonych na proces sekwencyjnego szlifowania małych elementów ceramicznych w cyklu automatycznym. Określenie, na podstawie danych eksperymentalnych, wpływu parametrów nastawnych procesu na wielkości wynikowe w analizowanym procesie. Wyznaczenie parametrów obróbki spełniających założone kryteria i ograniczenia optymalizacyjne z zastosowaniem algorytmu genetycznego. Określenie wpływu zastosowanych t-norm do agregacji kryteriów i ograniczeń rozmytych na wyniki optymalizacji.

### 2.3. Znaczenie poznawcze i aplikacyjne osiągnięcia naukowego

Obserwowane zjawisko przenikania się i wzajemnego wykorzystywania metod i technologii związanych z procesami wytwarzania, metod automatyzacji procesów oraz metod przetwarzania i analizy danych stało się początkiem tworzenia nowych koncepcji przemysłowych. Integracja wiedzy pochodzącej z wielu źródeł oraz jej zastosowanie w przemyśle leży u podstaw tzw. czwartej rewolucji przemysłowej. Koncepcja ta zakłada pełną automatyzację, adaptacyjność oraz rekonfigurowalność elementów składowych systemu wytwarzania, jak również ich wzajemną komunikację.

Opracowane podstawy modelowania i optymalizacji procesów szlifowania, ze szczególnym uwzględnieniem zastosowań metod sztucznej inteligencji umożliwią ich:

- adaptacyjność (automatyczną reakcją na zmiany w systemie, integrację innowacyjnych technologii w celu zminimalizowania lub wykluczenia ograniczeń istniejących rozwiązań),
- informatyzację (wykorzystanie szerokiej gamy narzędzi informatycznych oraz technologii informacyjnych na każdym etapie pracy z wytwarzanym produktem, szybki transfer wiedzy eksperckiej i know-how).

W procesach wytwarzania istnieje możliwość gromadzenia dużych zbiorów danych dotyczących różnych operacji szlifowania wykonywanych na różnych obrabiarkach, z użyciem narzędzi o zróżnicowanej charakterystyce, w warunkach dużej zmienności parametrów procesu, dla szerokiego zakresu właściwości materiałów obrabianych. Zgromadzenie tak różnorodnego i obszernego zbioru danych wymaga opracowania odpowiednich procedur, umożliwiających

efektywne przetwarzanie danych wykorzystywanych do tworzenia modeli, możliwych do zastosowania w procedurach modelowania i optymalizacji procesów wytwarzania.

Opracowane procedury tworzenia modeli neuronowych, stanowiące element wskazanego osiągnięcia naukowego, umożliwiają określenie wpływu parametrów nastawnych procesu na jego wielkości wynikowe dla różnorodnych warunków realizacji obróbki. Zastosowanie opracowanych kryteriów oceny modeli neuronowych pozwala na optymalizację ich struktury oraz zapewnia ich wysoką zdolność do uogólniania wiedzy zawartej w danych eksperymentalnych.

Zmienność warunków podczas realizacji procesów obróbki ścierniej wymaga stałego nadzorowania stanu narzędzi, cech charakteryzujących dokładność obróbki oraz właściwości warstwy wierzchniej. Wykorzystanie opracowanej metodyki oceny powierzchni czynnej narzędzia ściernego umożliwia ocenę wpływu parametrów jej kształtowania na cechy stereometryczne ziaren ściernych, a w konsekwencji ich wpływ na topografię powierzchni obrobionej. Umożliwia również ocenę zmian zdolności skrawnych narzędzi ściernych pozwalając na dobór parametrów obróbki zapewniający maksymalizację potencjału obróbkowego narzędzi ściernych. Ponadto uzyskana z zastosowaniem opracowanej metodyki szczegółowa charakterystyka powierzchni czynnej narzędzia ściernego umożliwia zamodelowanie jej powierzchni z wykorzystaniem numerycznym metod symulacji, co nabiera szczególnego znaczenia w procesach projektowania nowych narzędzi ściernych.

Topografia powierzchni obrobionej stanowi istotny wskaźnik oceny jakości procesu szlifowania. W praktyce powierzchnie opisywane są określonym, różnorodnej wielkości zbiorem parametrów topografii powierzchni. Prowadzi to często do niejednoznaczności opisu stanu analizowanej powierzchni. Klasyfikacja powierzchni obrobionych z zastosowaniem opracowanego systemu wnioskowania rozmytego pozwala na uwzględnienie w procesie podejmowania decyzji nieprecyzyjnego opisu stanu powierzchni. Zastosowanie do zadań klasyfikacji powierzchni sieci rekurencyjnych umożliwia analizę jej cech poprzez odniesienie do wcześniej zdefiniowanych wzorców opisujących różne cechy eksploatacyjne powierzchni. Miara odległości od poszczególnych wzorców może być podstawą do określenia wskaźnika zgodności z wymaganiami i oceną stopnia przydatności powierzchni do jej planowanych zastosowań.

Przedstawione metodyki oraz procedury analizy oraz modelowania i optymalizacji procesów szlifowania zakładają wykorzystanie jako ich elementów składowych modeli neuronowych weryfikowanych z zastosowaniem danych eksperymentalnych. Ważną cechą systemów wyposażonych w modele neuronowe jest łatwość i szybkość tworzenia modeli zróżnicowanych zadań obróbkowych nawet w warunkach produkcji małoseryjnej. W analizowanych zagadnieniach przedstawiono przykładowe wykorzystanie modeli neuronowych do prognozowania wybranych cech charakteryzujących procesy szlifowania, takich jak siły szlifowania oraz parametry topografii powierzchni, wpływających na ocenę jakości operacji obróbki.

Z efektywnym wykorzystaniem wyników modelowania procesów wytwarzania nieodłącznie związana jest optymalizacja parametrów obróbki, dla różnych kryteriów optymalizacji, takich jak: koszt obróbki, wydajność technologiczna obróbki, dokładność obróbki oraz trwałość narzędzi. Opracowane podstawy zastosowania metod optymalizacji rozmytej w procesach sekwencyjnego szlifowania pozwalają na uwzględnienie następstw wynikających z mechanizmu kumulacji niedokładności w kolejnych następujących po sobie operacjach. Zastosowanie teorii zbiorów rozmytych do definicji celów i ograniczeń rozmytych pozwala również na uwzględnienie w procesie optymalizacji probabilistycznego charakteru procesu obróbki ścierniej, w sposób łatwy do interpretacji przez operatora procesu.

### 3. Opis osiągnięć naukowo-badawczych w zakresie analizy oraz modelowania i optymalizacji procesów szlifowania

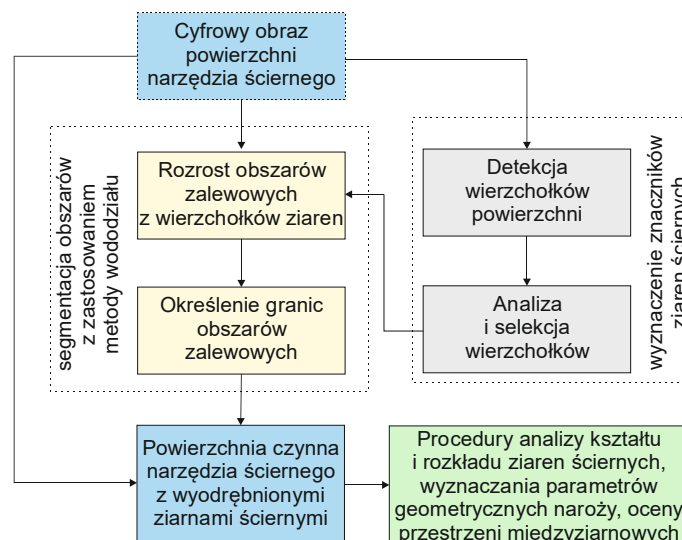
#### 3.1. Opracowanie metodyki oceny stanu powierzchni czynnej narzędzi ściernych

##### **Metodyka identyfikacji ziaren ściernych z zastosowaniem morfologii matematycznej oraz analiza położenia i właściwości geometrycznych wierzchołków ziaren ściernych na powierzchni czynnej narzędzia ściernego**

Narzędzia ścierne stosowane w procesie szlifowania charakteryzują się dużą liczbą nieregularnie ukształtowanych ziaren ściernych. Parametry opisujące kształt wierzchołków ziaren ściernych, ich liczba oraz rozmieszczenie wpływają na przebieg procesów skrawania. Wielkości opisujące kształt i rozmieszczenie ziaren ściernych ulegają istotnym zmianom w trakcie procesu szlifowania. Zmiany topografii czynnej powierzchni ściernicy (CPS) są wynikiem zużycia ściernego wierzchołków ziaren ściernych, zużycia wytrzymałościowego ziaren ściernych i spoiwa oraz zalepiania powierzchni czynnej narzędzia ściernego. Zjawiska te prowadzą do utraty zdolności skrawnej narzędzi ściernych lub zmiany ich pierwotnego kształtu. Wpływa to na jakość powierzchni obrobionej oraz dokładność wymiarów i kształtu obrabianych przedmiotów.

Analiza parametrów geometrycznych ziaren ściernych oraz wielkości charakteryzujących ich rozmieszczenie, jak również analiza zmian tych wielkości następujących w trakcie procesu szlifowania, jest podstawą szczegółowego opisu zjawisk zachodzących w trakcie obróbki. Stanowić może podstawę systemów monitorowania procesu szlifowania jak również umożliwia określenie efektywności tego procesu. Zagadnienia te nabierają szczególnego znaczenia w odniesieniu do szlifowania nowych, często trudnoobrabialnych materiałów stosowanych w przemyśle lotniczym i biomedycznym. Rozwój w tym obszarze wymusza konieczność projektowania i tworzenia nowych narzędzi o korzystnych rozkładach wartości opisujących ukształtowanie i rozmieszczenie ziaren ściernych.

Szczegółowa analiza cech stereometrycznych powierzchni czynnej narzędzia ściernego wymaga zastosowania skutecznych metod detekcji ziaren ściernych. Schemat opracowanej metodyki detekcji ziaren ściernych na powierzchni czynnej narzędzia ściernego przedstawiono na rysunku 1.

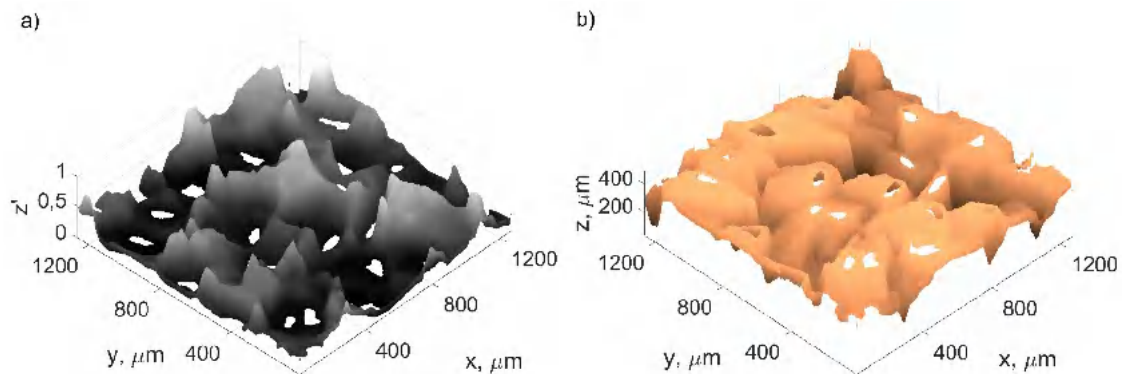


Rys. 1. Schemat metodyki wyznaczania granic ziaren ściernych

W celu detekcji ziaren ściernych na powierzchni czynnej narzędzia ściernego zastosowano segmentację wododziałową. Idea segmentacji wododziałowej została zaczerpnięta z hydrologii i wywodzi się ze sposobu określenia działów wodnych. Istotną rolę w metodzie segmentacji wododziałowej odgrywa pojęcie obszaru zalewowego. W przypadku powierzchni topograficznej, za początek obszaru zalewowego przyjmuje się regionalne minima powierzchni, bądź znaczniki wskazujące na charakterystyczne cechy obrazu.

W opracowanej metodyce za powierzchnię topograficzną przyjęto odbicie powierzchni czynnej narzędzia ściernego. Za charakterystyczne cechy powierzchni czynnej narzędzia ściernego przyjęto wierzchołki ziaren ściernych. W celu detekcji wierzchołków ziaren ściernych powierzchnię czynną narzędzia ściernego poddano szeregowi operacji morfologicznych z zastosowaniem elementu strukturalnego w kształcie dysku o średnicy  $S_B$  zależnej od wielkości ziarna ściernego.

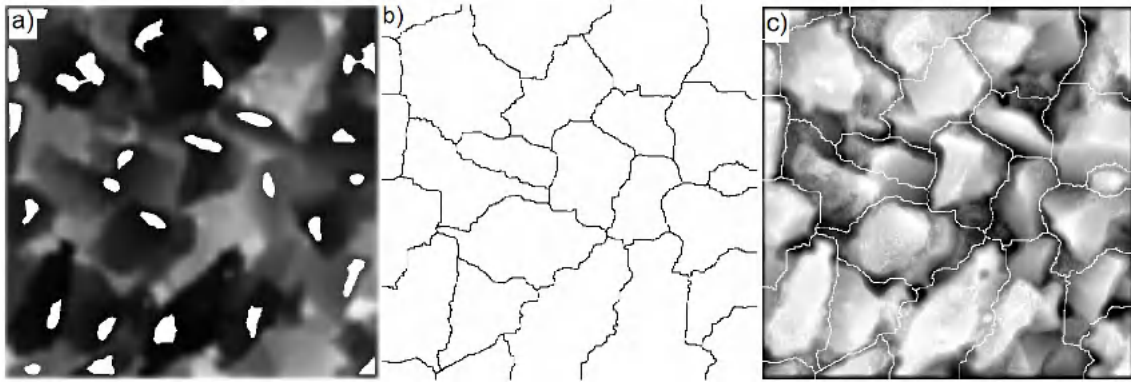
Przykład detekcji wierzchołków ziaren ściernych dla ściernicy o specyfikacji 1-35x20x10-SG/F46M7VTO zawierającej ziarna ściernie z mikrokryształicznego spiekane go tlenku glinu przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Zbiór potencjalnych wierzchołków ziaren ściernych nałożony na: powierzchnię topograficzną (a), powierzchnię czynną narzędzia ściernego (b)

Ziarna ściernie mogą charakteryzować się występowaniem na ich powierzchni kilku wierzchołków. Zwłaszcza w przypadkach operacji obróbki ścierniej w których dominującym zjawiskiem zużycia ziaren ściernych jest zjawisko wykruszania ich powierzchni. W celu minimalizacji błędów detekcji ziaren, polegających na wyodrębnieniu w obrębie jednego ziarna ściernego kilku wierzchołków, dokonano selekcji wyodrębnionych obszarów uwzględniających ich wzajemną odległość oraz różnicę rzędnych.

Z obszarów odpowiadających wyznaczonym wierzchołkom ziaren ściernych dokonano operacji rozrostu obszarów zalewowych. W wyniku segmentacji wyznaczono obszar zalewowe, które po nałożeniu na obraz powierzchni czynnej narzędzia, umożliwiły wyznaczenie granic ziaren ściernych (rys. 3).

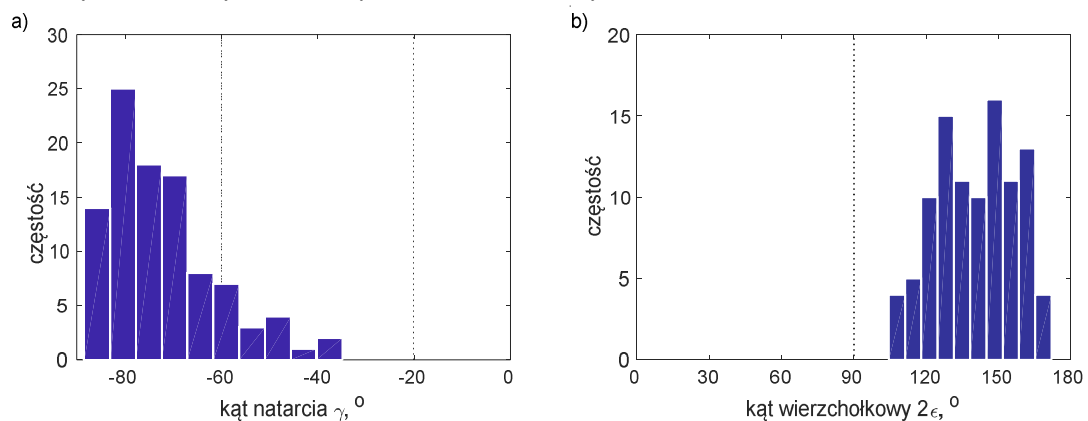


Rys.3. Wynik detekcji ziaren ściernych: powierzchnia topograficzna z markerami wierzchołków ziaren (a), wyodrębnione granice ziaren ściernych (b), granice ziaren ściernych naniesione na powierzchnię czynną narzędzia ściernego (c)

Selekcja oraz indeksacja obszarów ziaren ściernych na powierzchni czynnej narzędzia ściernego umożliwiła wyznaczenie parametrów geometrycznych tych obszarów oraz cech statystycznych opisujących ich rozkład. W celu oceny topografii powierzchni czynnej narzędzia ściernego dokonano oceny kształtu ziaren ściernych, ich rozmieszczenia na powierzchni czynnej narzędzia ściernego oraz oceny objętości przestrzeni międzyziarnowych. Wyznaczono parametry określające:

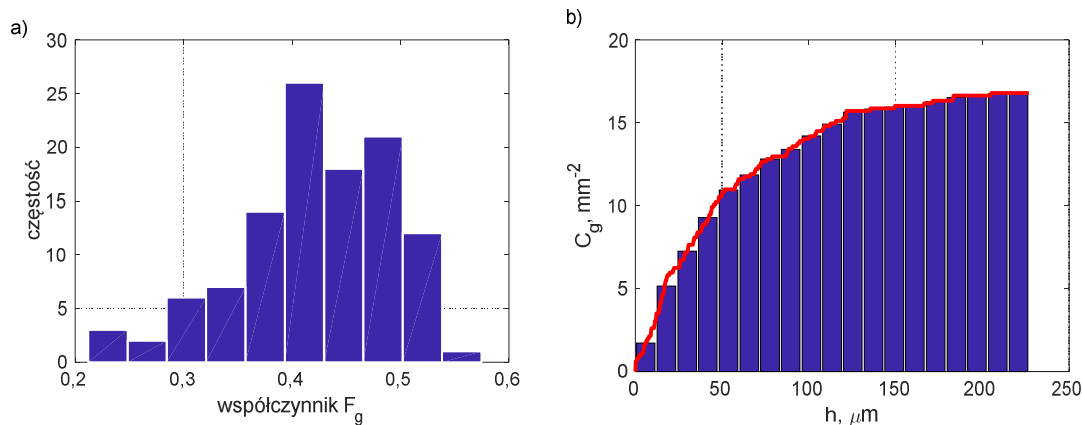
- kąty natarcia  $\gamma$  oraz kąty wierzchołkowe ziarna ściernego  $2\varepsilon$  (rys. 4),
- promień  $r$  okręgu opisanego na wierzchołku ziarna ściernego,
- współczynnik wypełnienia przestrzeni przez ziarno  $F_g$  – wartość współczynnika wskazuje na stopień wypełnienia przez ziarno objętości  $V_z$  będącej iloczynem powierzchni przekroju ziarna  $P_h$  i poziomu odcięcia  $h$  (rys. 5a),
- liczbę ziaren aktywnych na jednostkę powierzchni  $C_g$  (rys. 5b),
- średnią odległość między ziarnami  $l_{mean}$  na danym poziomie  $h$  określanym względem maksymalnej rzędnej powierzchni czynnej narzędzia ściernego (rys. 6a),
- średnią objętość przestrzeni międzyziarnowych na jednostkę powierzchni dla danego poziomu odcięcia  $h$  (rys. 6b),
- średnią objętość przestrzeni międzyziarnowych na ziarno ścierne dla danego poziomu odcięcia  $h$ .

Przykładowe wyniki analiz przedstawiono na rysunkach od 4 do 6.

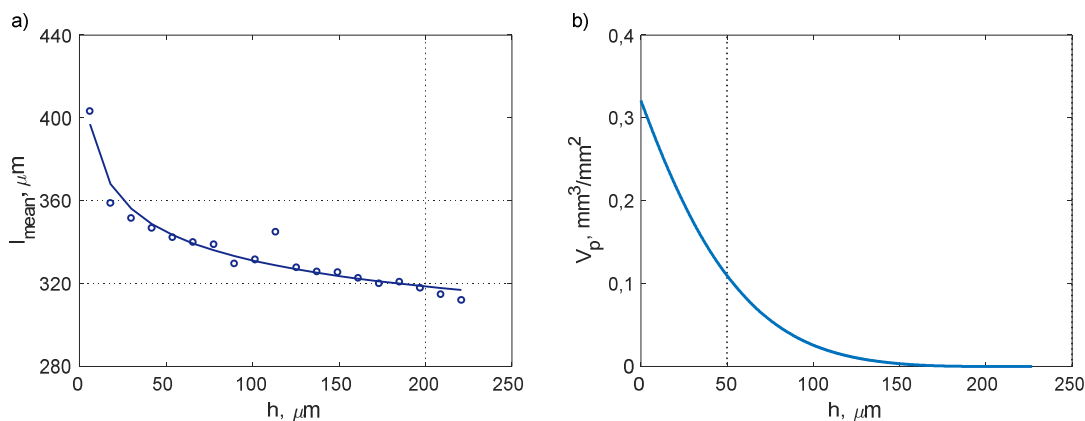


Rys. 4. Histogram: kątów natarcia  $\gamma$  (a) i kątów wierzchołkowych  $2\varepsilon$  (b) ziaren ściernych na powierzchni czynnej narzędzia ściernego dla płaszczyzny odcięcia  $h=20 \mu\text{m}$





Rys. 5. Rozkład współczynnika wypełnienia przestrzeni przez ziarno ściernie  $F_g$  (a) i średnia liczebność ziaren ściernych na jednostkę powierzchni (b) dla określonego poziomu odcięcia  $h$



Rys. 6. Średnia odległość między ziarnami ściernymi (a) oraz średnia objętość przestrzeni międzyziarnowej (b) na powierzchni czynnej narzędzia ściernego względem poziomu odcięcia  $h$

Widoczna jest wyraźnie ujemna wartości kątów natarcia ziaren ściernych typowa dla operacji obróbki ścierniej. Wartość kątów natarcia zawiera się w zakresie kątów od  $-87^\circ$  do  $-35^\circ$  (rys. 4a). W zakresie kątów wierzchołkowych od  $120^\circ$  do  $160^\circ$  zawiera się 78% wszystkich ziaren ściernych (rys. 4b). Na rysunku 5a przedstawiono rozkład współczynnika wypełnienia przestrzeni przez ziarna ściernie. Wartość współczynnika zawiera się w przedziale od 0,21 do 0,58 (z wartością średnią równą 0,42). Wartość współczynnika informuje, że pojedyncze ziarno ściernie ma potencjalnie zdolność do usunięcia około 42% objętości materiału obrabianego na nie przypadającego. Zmiana wartości współczynnika wypełnienia w trakcie obróbki, wraz ze zmianą wartości kąta wierzchołkowego ziaren ściernych oraz wartości promienia koła opisującego wierzchołek ziarna ściernego może być podstawą do oceny formy zużycia ziaren ściernych.

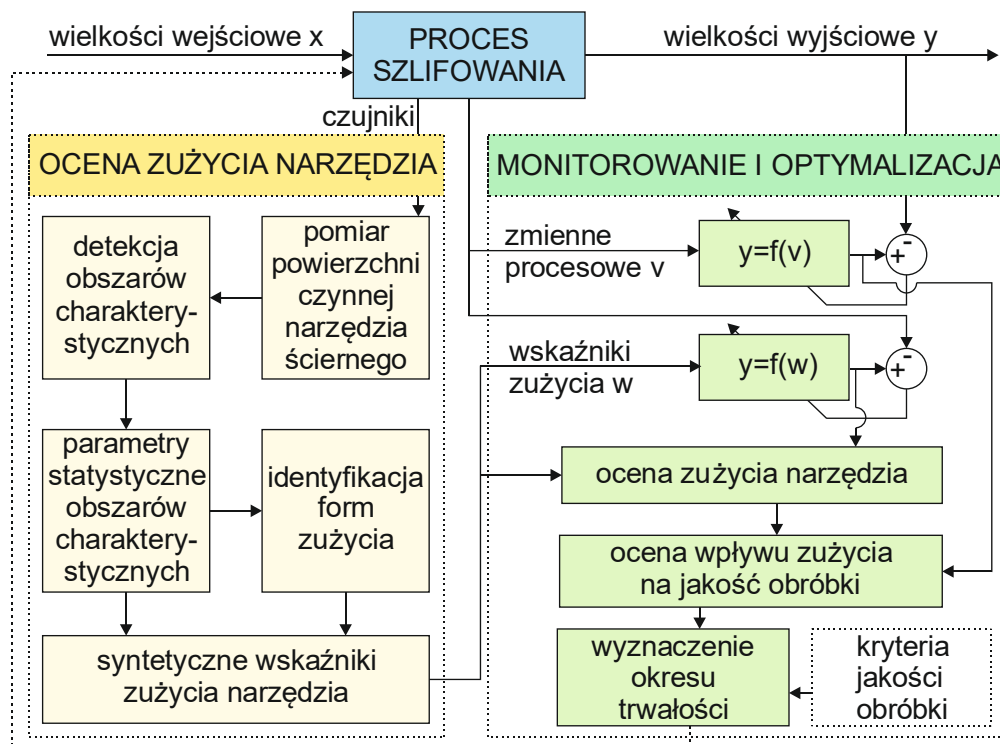
Ocena rozmieszczenia ziaren ściernych stanowi istotny parametr w analizie sił szlifowania, energii procesu szlifowania oraz efektywności procesu usuwania materiału. Podstawowym parametrem tej analizy jest informacja o liczbie ziaren aktywnych na jednostkę powierzchni  $C_g$  (rys. 5b), średniej odległości między ziarnami  $l_{mean}$  (rys. 6a) oraz średniej objętości przestrzeni międzyziarnowej (rys. 6b) na danym poziomie  $h$  określanym względem maksymalnej rzędnej powierzchni czynnej narzędzia ściernego. Widoczny jest nieliniowy wzrost liczebności ziaren ściernych na jednostkę powierzchni czynnej narzędzia ściernego, a tym samym zmniejszenie średniej odległości między ziarnami ściernymi. Wzrost liczebności ziaren ściernych dla  $h > 60$  mm



jest wynikiem odstawiania niżej położonych warstw ziaren ściernych. Z uwagi na małą wielkość, na obrazie mikroskopowym, niżej położonych ziaren ściernych dochodzić może do zwiększenia błędów detekcji ziaren ściernych i wyodrębniania mostków spoiwa.

### Identyfikacja i klasyfikacja form zużycia ściernego – określenie kryteriów różnicowania powierzchni zużycia ściernego i zalepień powierzchni

Na właściwości topografii powierzchni czynnej narzędzi ściernych wpływa z jednej strony ich charakterystyka, tzn. wielkość ziaren ściernych, struktura narzędzia, udziały objętościowe ziarna ściernego i spoiwa oraz jego rodzaj, z drugiej zaś proces kształtowania jej powierzchni czynnej. Zmiany topografii powierzchni czynnej narzędzi ściernych, następujące w wyniku obróbki, powodowane są głównie poprzez zużycie ziaren ściernych (ścierne i wytrzymałościowe) oraz zalepiania powierzchni czynnej przez wióry. Ocena stopnia zużycia narzędzi ściernych leży u podstaw monitorowania i optymalizacji procesów szlifowania (rys. 7). Stanowi również podstawę do podejmowania decyzji o odnowieniu powierzchni czynnej narzędzia ściernego.



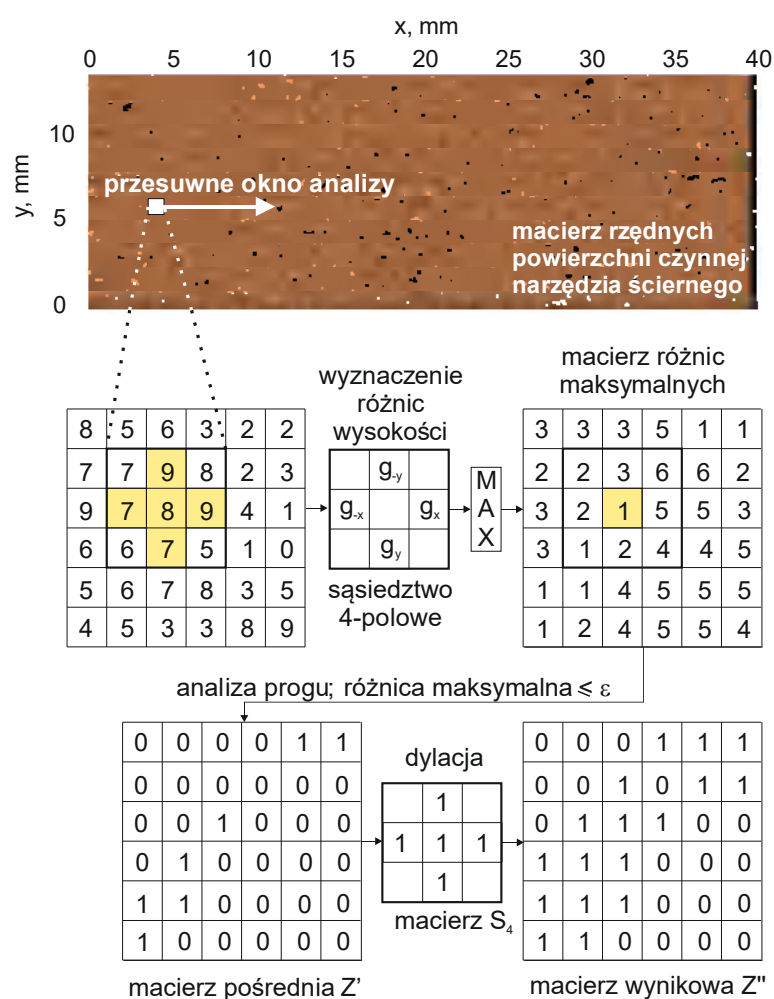
Rys. 7. Schemat postępowania przy ocenie stanu powierzchni czynnej narzędzia ściernego

Opracowana metodyka oceny stopnia zużycia ziaren ściernych oraz stopnia zalepiania powierzchni czynnej obejmuje poniższe kroki:

- Pomiar rzędnych powierzchni narzędzia ściernego  $z(x,y)$ .
- Detekcja obszarów płaskich, dla przyjętych kryteriów płaskości. Detekcja dokonywana jest z wykorzystaniem filtra morfologicznego oceniającego stopień zmienności rzędnych punktu centralnego okna analizy oraz punktów sąsiednich. Wartość progowa użyta w detekcji powiązana jest z charakterystycznymi cechami geometrycznymi ziaren ściernych. Umożliwia to zastosowanie metod detekcji do analizy powierzchni narzędzi ściernych o różnej charakterystyce.

- Wyznaczenie parametrów statystycznych obszarów uznanych za płaskie. Wyznaczone parametry umożliwiają ocenę zmian stanu narzędzia ściernego w czasie.
- Wyznaczenie syntetycznych wskaźników oceniających zużycie narzędzia ściernego. Syntetyczne wskaźniki umożliwiają podejmowanie decyzji o odnowieniu powierzchni narzędzia ściernego przez systemy monitorowania i optymalizacji procesów obróbki. Stanowiąc mogą również podstawę do tworzenia zależności między monitorowanymi zmiennymi procesu szlifowania (moc, siły, drgania, emisja akustyczna) a stanem powierzchni narzędzia ściernego a w konsekwencji dokładnością wymiarową i kształtową wytwarzanych elementów oraz cechami stereometrycznymi powierzchni obrobionych.

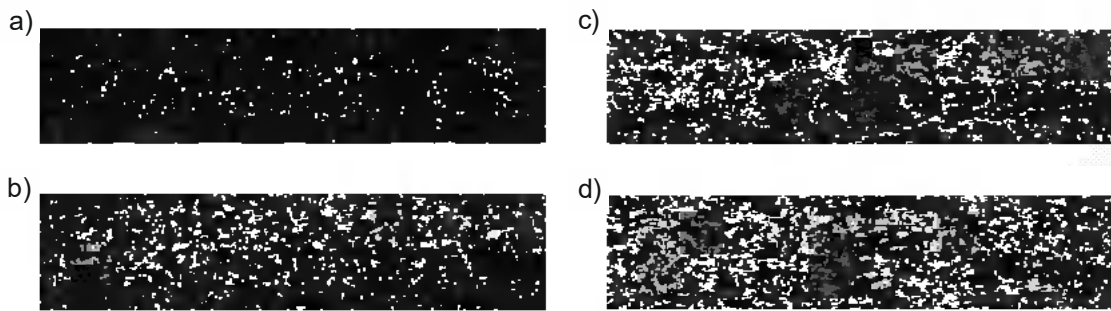
Opracowana metoda detekcji obszarów płaskich przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Schemat detekcji obszarów płaskich dla sąsiedztwa czteropolowego

Detekcji obszarów płaskich dokonano z wykorzystaniem przesuwającego okna analizy o wymiarze 3x3. W oknie analizy wyznaczono różnicę rzędnych powierzchni narzędzia ściernego dla elementu centralnego oraz elementów sąsiadujących z nim. Przyjęto ośmiopolową macierz sąsiedztwa.

Wyniki detekcji obszarów płaskich dla kolejnych stanów narzędzia ściernego przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Wyniki detekcji obszarów płaskich (kolor biały) na powierzchni narzędzia ściernego: narzędzie przed obróbką (a), po usunięciu  $2880 \text{ mm}^3$  (b),  $5760 \text{ mm}^3$  (c) i  $8640 \text{ mm}^3$  (d)

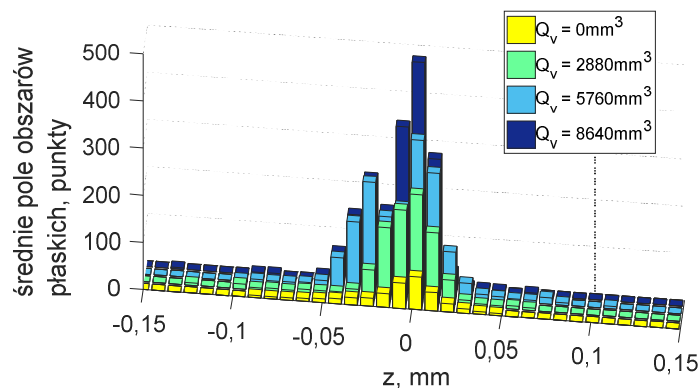
Następnie dokonano segmentacji i indeksacji obszarów płaskich. W jej wyniku wyodrębniono odpowiednio 8226, 7366, 8362 i 7473 obiektów płaskich dla kolejnych stanów narzędzia ściernego. Sumaryczna powierzchnia pól obiektów płaskich wynosiła odpowiednio 4,73%, 13,02%, 17,67% i 22,17% powierzchni narzędzia ściernego.

Detekcja obszarów płaskich umożliwiła wyodrębnienie z powierzchni narzędzia ściernego interesujących z punktu widzenia oceny stopnia zużycia narzędzia ściernego obiektów. Wyznaczenie cech statystycznych obszarów płaskich poprzedzone zostało segmentacją, polegającą na wyodrębnieniu z obrazu binarnego poszczególnych obiektów (obszarów płaskich) a następnie ich indeksacji.

Segmentacja i indeksacja obiektów płaskich na powierzchni narzędzia ściernego umożliwiła wyznaczenie parametrów geometrycznych oraz ich cech statystycznych. Wyznaczono poniższe cechy lokalne obszarów płaskich:

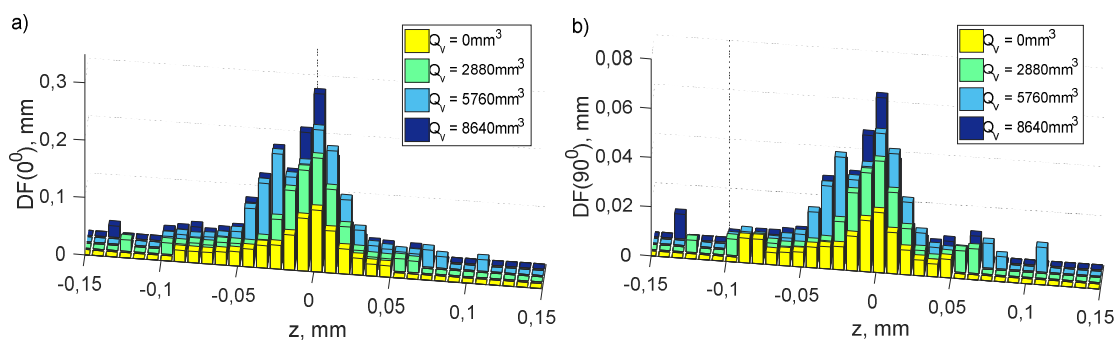
- pole powierzchni  $P_i$  – liczba punktów powierzchni należących do  $i$ -tego obiektu;
- średnice Fereta  $DF(0^\circ)$ ,  $DF(90^\circ)$  – miary rozciągłości obiektu w kierunku równoległym i prostopadłym do kierunku obróbki;
- współczynnik niecentryczności  $E$  – współczynnik charakteryzujący kształt  $i$ -tego obszaru; przyjmuje wartości równe zero dla obiektu o kształcie koła i jeden dla odcinka;
- kierunkowość obszaru  $K_i$  – kąt (w zakresie od  $-90$  do  $90$  stopni) pomiędzy kierunkiem równoległym do kierunku obróbki a osią wielką elipsy o takim samym momencie bezwładności jak analizowany obszar;
- liczbę obszarów płaskich znajdujących się w określonym przedziale rzędnych  $I(z_{\min} \leq z_i \leq z_{\max})$ ;
- sumaryczne  $p(z_{\min} \leq z_i \leq z_{\max})$  oraz średnie  $\bar{p}(z_{\min} \leq z_i \leq z_{\max})$  pole obszarów płaskich w danym przedziale rzędnych.

W wyniku przeprowadzonych analiz zauważalny jest wzrost wartości sumarycznego pola obszarów płaskich następujących wraz ze wzrostem objętości usuniętego materiału. Zmiany te są szczególnie widoczne w odniesieniu do średniego pola obszarów płaskich (rys. 10).



Rys. 10. Średnie pole obszarów płaskich w danym przedziale rzędnych

Wzrost pola powierzchni obszarów płaskich dokonuje się w wyniku wzrostu rozciągłości obszarów zarówno w kierunku zgodnym  $DF(0^\circ)$  jak i prostopadłym  $DF(90^\circ)$  z kierunkiem przesuwu przedmiotu obrabianego (rys. 11).



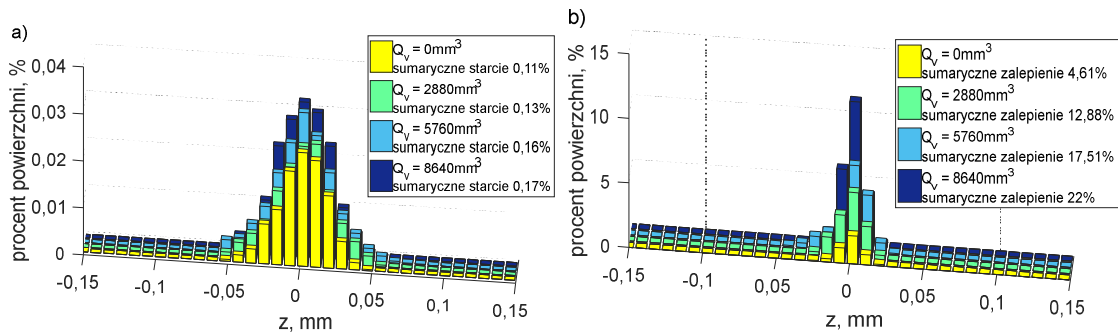
Rys. 11. Średnice Fereta obszarów płaskich w danym przedziale rzędnych w kierunku zgodnym (a) i prostopadłym (b) do kierunku posuwu wzdłużnego

Szczegółowa analiza pól obszarów płaskich oraz ich centryczności i kierunkowości wskazuje, że głównym powodem zmian analizowanego stanu narzędzia ściernego jest zalepianie przestrzeni międzyziarnowych. Powstawanie zalepień powoduje wzrost średniego pola obszarów płaskich w dolnym przedziale rzędnych narzędzia ściernego. Wzrost w tym obszarze jest większy niż wzrost średniego pola w górnym obszarze rzędnych spowodowany głównie przez starcia powierzchni aktywnych ziaren ściernych.

Wyznaczone wielkości geometryczne obszarów płaskich stały się podstawą klasyfikacji obszarów płaskich do kategorii: zużycie ściernie, zalepiania przestrzeni międzyziarnowych. Za podstawę identyfikacji obiektów płaskich typowych dla starć wierzchołków ziaren przyjęto poniższe cechy:

- miary rozciągłości obiektu płaskiego  $DF(0^\circ)$ ,  $DF(90^\circ)$  w kierunku równoległym i prostopadłym do kierunku obróbki nie większe niż maksymalne graniczne wymiary ziarna ściernego;
- położenie obiektu płaskiego względem maksymalnej rzędnej narzędzia ściernego nie niższe niż dwukrotna wartość dosuwu wglębnego narzędzia ściernego;
- współczynnik niecentryczności  $E$  – współczynnik charakteryzujący kształt obiektu w zakresie od 0 do 0,2 w zależności od kształtu narzędzia ściernego.

Wyniki identyfikacji obszarów płaskich pozwoliły na szczegółową ocenę rodzaju zużycia narzędzia ściernego (rys. 12).



Rys 12. Procentowy rozkład obszarów zidentyfikowanych jako starcia ziaren ściernych (a) oraz zalepienia powierzchni czynnej narzędzia ściernego (b)

Wyniki klasyfikacji potwierdzają, że głównym powodem zamian stanu powierzchni czynnej narzędzia ściernego są zalepienia powierzchni przez produkty ubytkowe procesu szlifowania. Pola powierzchni zidentyfikowane jako starcia są niewielkie, a ponadto w analizie głębiej położonych warstw dochodzi do błędnej identyfikacji mostków spoiwa jako powierzchni płaskich.

**Podsumowując wyniki analiz stanu powierzchni czynnej narzędzia ściernego z zastosowaniem opracowanych metodyk stwierdzić można, co następuje:**

- Zastosowanie segmentacji wododziałowej z wykorzystaniem wierzchołków ziaren ściernych jako znaczników umożliwia separację ziaren ściernych na powierzchni czynnej narzędzia ściernego.
- Selekcja oraz indeksacja obszarów ziaren ściernych na powierzchni czynnej narzędzia ściernego umożliwia wyznaczenie parametrów geometrycznych tych obszarów oraz parametrów statystycznych opisujących ich rozkład. Umożliwia to ocenę kształtu ziaren ściernych, ich rozmieszczenia na powierzchni czynnej narzędzia ściernego oraz ocenę objętości przestrzeni międzyziarnowych.
- Detekcja wierzchołków ziaren z zastosowaniem metody maksimów lokalnych z wykorzystaniem elementu strukturalnego w kształcie dysku o rozmiarze  $19\ \mu\text{m}$  (tj. 5% średniej wielkości ziarna ściernego) pozwala na wyznaczenie oczekiwanej liczby ziaren ściernych na powierzchni czynnej narzędzia ściernego.
- Agregacja sąsiednich wierzchołków ziaren ściernych dla których maksymalna różnica rzędnych powierzchni między nimi jest mniejsza niż 5% wartości parametru  $St$  powierzchni czynnej narzędzia ściernego minimalizuje zjawisko detekcji wielu wierzchołków na powierzchni jednego ziarna ściernego.
- Dla analizowanego narzędzia ściernego wartość kątów natarcia  $\gamma$  (dla  $h=20\ \mu\text{m}$ ) zawiera się w zakresie kątów od  $-87^\circ$  do  $-35^\circ$ . W zakresie kątów wierzchołkowych od  $120^\circ$  do  $160^\circ$  zawiera się 78% wszystkich ziaren ściernych.
- Z analizy kształtu ziaren ściernych wynika, że pojedyncze ziarno ściernie ma średnią zdolność do usunięcia około 42% objętości materiału obrabianego na nie przypadającego. Zmiana wartości tego współczynnika w trakcie obróbki, wraz ze zmianą wartości kąta wierzchołkowego ziaren ściernych oraz wartości promienia koła opisującego wierzchołek ziarna ściernego może być podstawą do oceny formy zużycia ziaren ściernych.
- Wykorzystanie przedstawionej metodyki do oceny powierzchni czynnej narzędzia ściernego umożliwia ocenę wpływu parametrów jej kształtowania na cechy

stereometryczne ziaren ściernych, a w konsekwencji ich wpływ na topografię powierzchni obrobionej. Umożliwia również ocenę zmian zdolności skrawnych narzędzi ściernych w trakcie procesu obróbki, co nabiera szczególnego znaczenia w procesach projektowania nowych narzędzi ściernych oraz doboru parametrów obróbki w celu maksymalizacji potencjału obróbkowego narzędzi ściernych,

- Uzyskana z zastosowaniem opracowanej metodyki szczegółowa charakterystyka powierzchni czynnej narzędzia ściernego umożliwia zamodelowanie jej powierzchni z wykorzystaniem numerycznym metod symulacji. Numeryczne odzwierciedlenie charakterystyki narzędzia ściernego umożliwia analizę i monitorowanie przebiegu chwilowych wartości w strefie obróbki.
- Opracowana metodyka oceny stanu zużycia narzędzia ściernego umożliwia ocenę zmian powierzchni narzędzia ściernego następującą w trakcie obróbki. Szczegółowa analiza zmian cech geometrycznych obszarów płaskich w całym zakresie rzędnych narzędzia ściernego umożliwia określenie dominującej formy zużycia narzędzia ściernego oraz daje podstawę do oceny jego zdolności skrawnej.
- Podstawowym problemem w ocenie stanu zużycia narzędzia ściernego jest opracowanie zbioru parametrów oceny ich struktury stereometrycznej, tworzących komplementarny zbiór, zapewniających wysoką skuteczność identyfikującą charakter zużycia narzędzia ściernego oraz łatwość interpretacji ocen.
- Opracowanie syntetycznych wskaźników oceny stanu narzędzia ściernego umożliwia włączenie systemu bezpośredniej oceny stanu narzędzia ściernego do systemów monitorowania, optymalizacji i nadzorowania procesów szlifowania. Stanowi również podstawę opracowania modeli zależności parametrów obróbki, mierzonych cech procesowych oraz monitorowanych parametrów jakości procesu obróbki.

**Szczegółową analizę powyżej opisanych zagadnień zawarto w zbiorze publikacji:**

1. **Lipiński D.**, Kacalak W., Tomkowski R., *Methodology of evaluation of abrasive tool wear with the use of laser scanning microscopy*, Scanning, 36, 2014, str. 53-63.
2. **Lipiński D.**, Kacalak W., *Metrological aspects of abrasive tool active surface topography evaluation*, Metrology and Measurement Systems, 23, 2016, str. 567-577.
3. **Lipiński D.**, Kacalak W., Tandecka K., *Zastosowanie systemu skanowania przestrzennego do oceny zużycia narzędzi ściernych*, Pomiary Automatyka Kontrola, 59, str. 1227-1231.
4. Kacalak W., Tandecka K., **Lipiński D.**, Szafraniec F., Socha E., *Metody identyfikacji zmian stanu czynnej powierzchni ściernic w wyniku starcia, zalepienia i wykruszania ziaren*, Mechanik, 9, 2014, str. 193-199.

### 3.2. Analiza wpływu właściwości geometrycznych ostrzy skrawających na efektywność procesu szlifowania

#### Wyznaczenie wpływu parametrów geometrycznych ostrzy skrawających i ich orientacji względem kierunku posuwu wzdłużnego na efektywność procesów obróbki

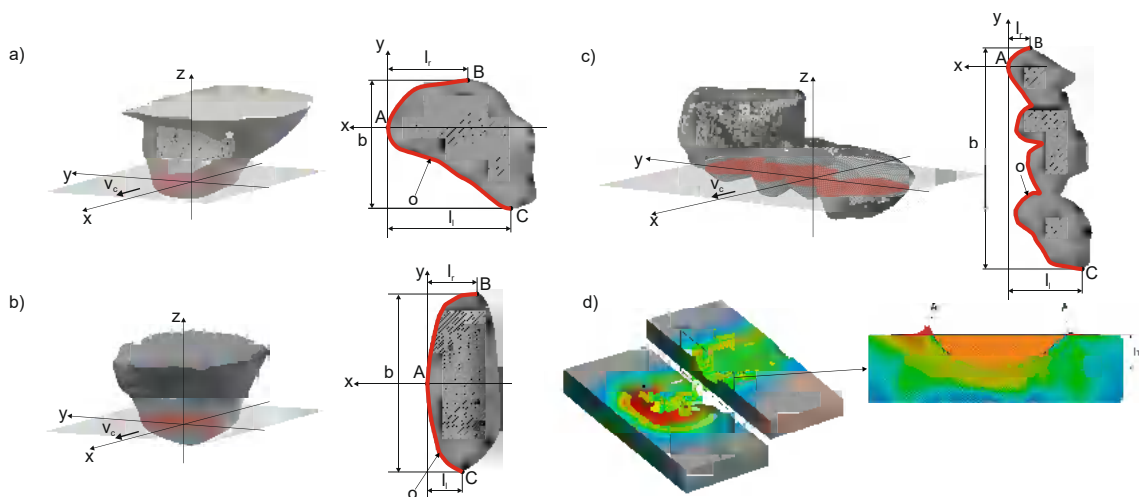
Ocenę wpływ parametrów geometrycznych wierzchołków ziaren ściernych na efektywność obróbki przeprowadzono na podstawie badań symulacyjnych z zastosowaniem metody elementów skończonych. W symulacji komputerowej zastosowano model materiałowy, posiadający właściwości stopu tytanu Ti-6Al-4V. Zastosowane w symulacji ostrza ziaren ściernych oraz agregatu ściernego charakteryzowały się zbliżonymi wartościami kątów natarcia oraz zróżnicowaną szerokością strefy kontaktu.

Dokonano analizy wpływu parametrów opisujących geometrię ziaren ściernych i agregatu ściernego w płaszczyźnie X-Y równoległej do powierzchni obrabianej wyznaczanych dla różnych poziomów odcięcia  $h$  (rys. 13a-c):

- $l_{mean}(h) = \frac{l_l(h) + l_r(h)}{2}$ ; gdzie:  $l_l(h)$ ,  $l_r(h)$  – odległość w osi X od punktu natarcia (punkt A) do najdalej wysuniętych punktów przekroju w osi Y (punkt B i C),
- $b(h)$  – szerokość przekroju strefy skrawania, odległość w osi Y pomiędzy punktem B i C,
- $o(h)$  – długość odcinka obwodu przekroju ziarna między punktami B i C,

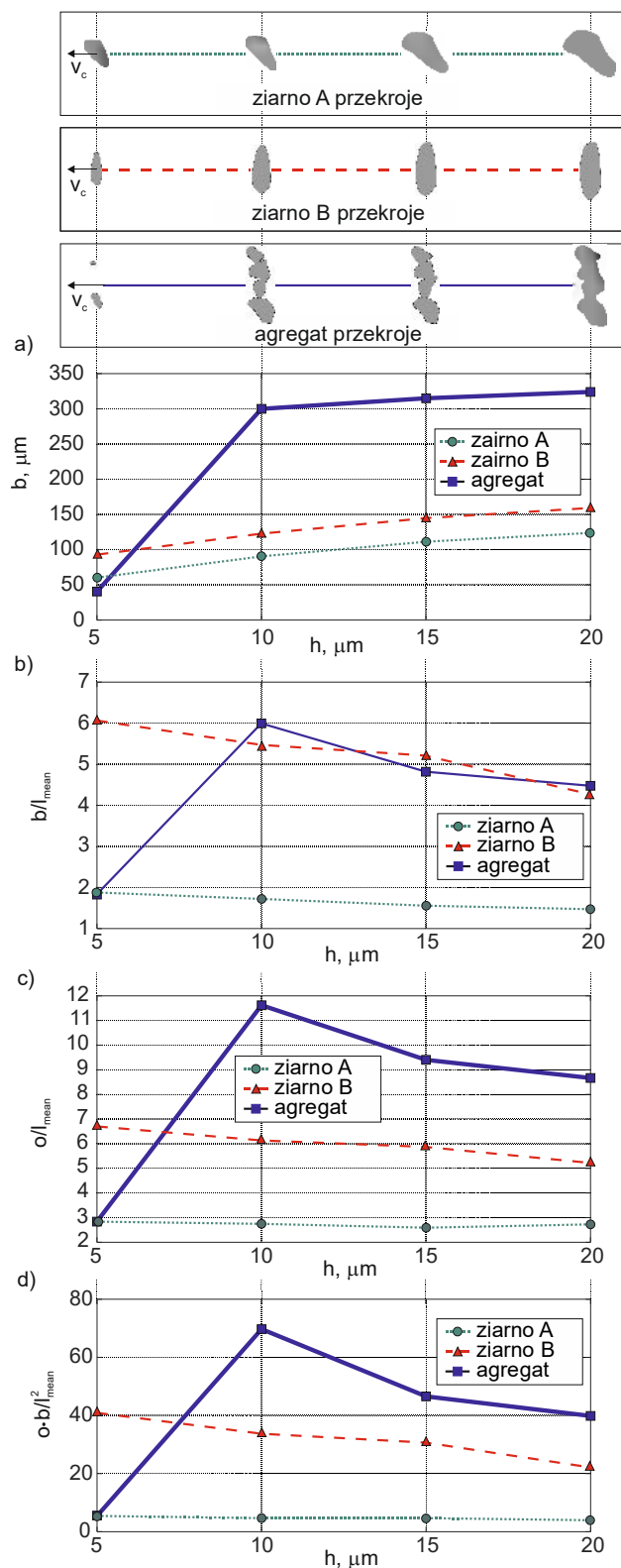
na efektywność usuwania materiału obrabianego, określanego poprzez (rys. 13d):

- $A_l(h)$ ,  $A_r(h)$  – pole powierzchni wyływek bocznych materiału,
- $A_z(h)$  – pole powierzchni materiału usuniętego przez ziarno.



Rys. 13 Schemat wyznaczania parametrów geometrycznych przekrojów ziaren ściernych (a,b), agregatów ściernych (c) oraz przekrojów warstw skrawanych (d)

Graficzne przedstawienie wyników analiz zestawiono na rysunku 14.



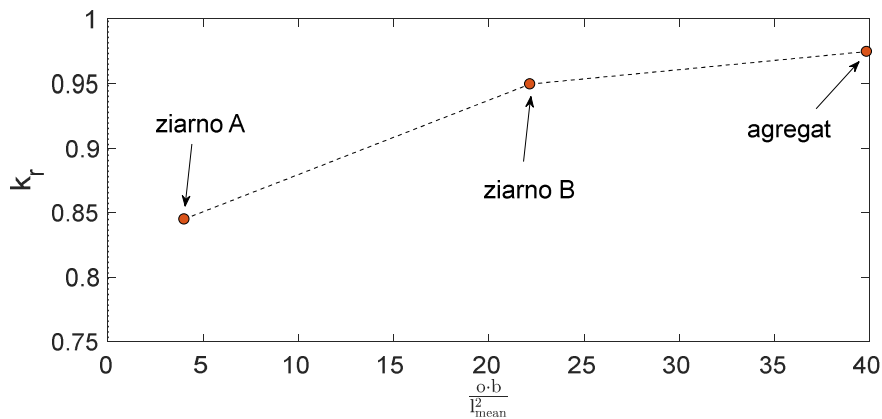
Rys. 14. Zestawienie wartości parametrów geometrycznych przekrojów ziaren ściernych dla różnych wysokości odcięcia  $h$ : szerokość strefy skrawania  $b$  (a), współczynnik szerokości strefy skrawania do jej długości  $b/l_{\text{mean}}$  (b), współczynnik rozwinięcia strefy kontaktu  $o/l_{\text{mean}}$  (c), współczynnik  $(o \cdot b)/l_{\text{mean}}^2$  (d)



Analizowane ziarna ściernie charakteryzowane są przez odmienne wartości współczynników opisujących parametry geometryczne ich przekroju w płaszczyźnie X-Y. Zauważyć należy, że w przypadku ziarna B oraz agregatu ściernego wartość wszystkich współczynników przyjmuje wartości wyższe niż w przypadku ziarna A (rys. 14a-d). Istotną cechą ziarna B oraz agregatu jest szeroka strefa skrawania. Dla agregatu ściernego cecha ta uwidacznia się wraz ze wzrostem zagłębiania w materiał obrabiany. Dużą zdolność rozróżniania charakterystycznych cech analizowanych ziaren ściernych oraz agregatu ściernego wykazuje współczynnik  $o/l_{mean}$  oraz współczynnik  $(o \cdot b)/l_{mean}^2$  (rys. 14c i d).

Na wielkość wyływek bocznych wpływają parametry geometryczne przekrojów ostrzy skrawających ziarna ściernego i agregatu ściernego. Wyznaczono dla ostrzy skrawających ziarna ściernego oraz agregatu ściernego współczynnik efektywności usuwania materiału  $k_r$ , zgodnie z zależnością:  $k_r = 1 - A'(h) = 1 - \frac{A_l(h) + A_r(h)}{A_z(h)}$ .

Analizę wpływu parametrów geometrycznych przekrojów analizowanych ostrzy skrawających opisanych przez syntetyczny współczynnik  $(o \cdot b)/l_{mean}^2$  na wartość współczynnika efektywności usuwania materiału  $k_r$  przedstawiono na rysunku 15.

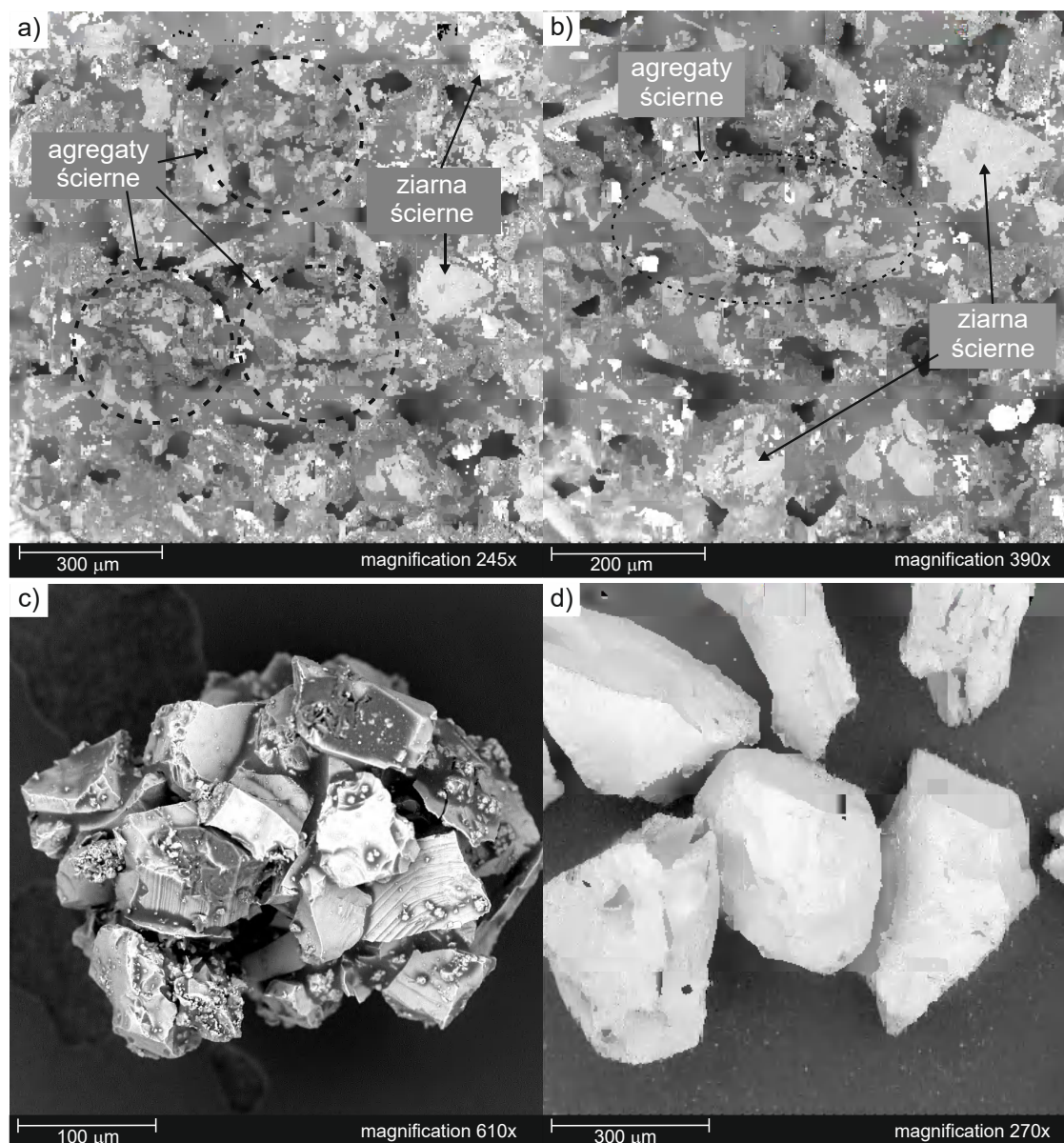


Rys. 15. Wpływ wartości współczynnika geometrii ostrzy skrawających  $(o \cdot b)/l_{mean}^2$  na wartość współczynnika efektywności usuwania materiału  $k_r$  dla zagłębiania ostrzy w materiał obrabiany  $h = 20 \mu m$

Na rysunku 15 widoczny jest monotoniczny wzrost współczynnika efektywności usuwania materiału  $k_r$  następujący wraz ze wzrostem syntetycznego współczynnika  $(o \cdot b)/l_{mean}^2$ . Ziarno ściernie typu B oraz agregat ścierny charakteryzują się większą efektywnością usuwania materiału niż ziarno ściernie typu A. Kształt ziarna ściernego typu B oraz agregatu ściernego utrudnia boczne przemieszczenia materiału, zmniejszając tym samym wielkość wyływek bocznych. Wartość współczynnika tworzenia wyływek  $k_r$  dla ostrzy skrawających agregatów ściernych przyjmuje wartości mniejsze niż dla ostrzy skrawających ziaren ściernych. Skutkuje to mniejszą powierzchnią przekroju wyływek bocznych. Agregaty ściernie charakteryzują się małą odległością między ostrzami aktywnymi. Wpływa, to na ograniczenie możliwości tworzenia wyływek, które dla większych zagłębień ziaren wchodzących w skład agregatu nie powstają wewnątrz strefy działania agregatu, a jedynie na jego obrzeżach.

**Wyznaczenie wpływu parametrów i warunków obróbki oraz właściwości narzędzi ściernych na topografię powierzchni obrobionej, siły i energię szlifowania w obróbce stopów metali lekkich, w tym z zastosowaniem innowacyjnych ściernic o budowie agregatowej**

W celu szczegółowej analizy charakterystycznych właściwości geometrycznych ziaren ściernych o szerokiej strefie skrawania, a w szczególności agregatów ściernych, przeprowadzono badania eksperymentalne procesu obwodowego szlifowania płaszczyzn ściernicami z dodatkiem agregatów ściernych. Szlifowanie prowadzono z zastosowaniem: konwencjonalnych narzędzi ściernych z elektrokorundu 99A o rozmiarze #60 spojonych żywicą oraz zmodyfikowanych narzędzi ściernych przed dodanie do bazowych ziaren ściernych agregatów ściernych o rozmiarze #46 złożonych z ziaren z elektrokorundu 99A o rozmiarze #120 (rys 16).



Rys. 16. Obrazy z mikroskopu elektronowego powierzchni czynnej ściernicy z agregatami ściernymi (a,b), agregatu ściernego (c), ziaren ściernych (d)

Na rysunku 16a i 16b widoczna jest powierzchnia czynna narzędzia ściernego z dodatkiem agregatów ściernych. W narzędziach tych obok bazowych korundowych ziaren ściernych

o określonym rozmiarze zastosowano domieszkę agregatów ściernych. Agregaty ścierne (rys. 16c) składają się z ziaren ściernych o wielkości mniejszej niż wielkość bazowych korundowych ziaren ściernych (rys 16d), zaś wielkość samych agregatów jest większa od wielkości ziaren bazowych. W wyniku badań wstępnych określono korzystny 30% wagowy udział agregatów. Analizowane narzędzia ścierne o twardości K i M wytworzone zostały przez producenta narzędzi ściernych firmę Andre Abrasive Articles.

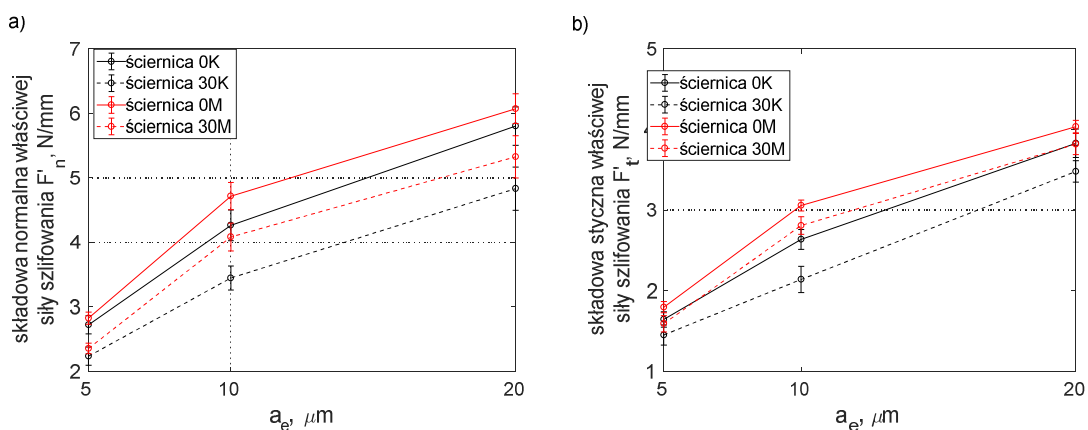
W badaniach wykorzystano próbki o wymiarach 80x13x20mm wykonane ze stopu tytanu Ti-6Al-4V. Parametry procesu kształtowania powierzchni czynnej narzędzia ściernego oraz parametry procesu szlifowania były stałe podczas wszystkich testów ( $v_c = 30$  m/s,  $v_w = 25$  m/min,  $a_e = 5, 10, 20$   $\mu\text{m}$ ). Badania przeprowadzono trzykrotnie dla tych samych parametrów obróbki w celu określenia powtarzalności uzyskiwanych wyników.

W trakcie procesu szlifowania rejestrowano wartość składowych sił szlifowania. Pomiar składowych sił szlifowania dokonano z zastosowaniem siłomierza piezoelektrycznego 9257B oraz wzmacniacza wielokanałowego 5070A12100 firmy Kistler. Dane pomiarowe rejestrowano z częstotliwością 10kHz z wykorzystaniem 16 bitowej karty pomiarowej typu 2855A4 firmy Kistler.

Do pomiarów topografii powierzchni zastosowano profilometr Talysurf CCI 6000 firmy Taylor Hobson. Zastosowano obiektyw o powiększeniu 20x umożliwiającym pomiar powierzchni o wymiarze 0,9 mm x 0,9 mm. Dla każdej ze szlifowanych próbek dokonano pomiaru trzykrotnie w losowo wybranych miejscach. Wyniki pomiarów dla każdej z analizowanych próbek uśredniono.

Pomiar morfologii powierzchni obrobionej oraz morfologii wiórów przeprowadzono z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego SEM Phenom G2 PRO firmy Phenom Word. Dokonano pomiarów szlifowanych powierzchni z powiększeniem 850x.

Wartości składowych normalnej i stycznej właściwej siły szlifowania przedstawiono na rysunku 17.

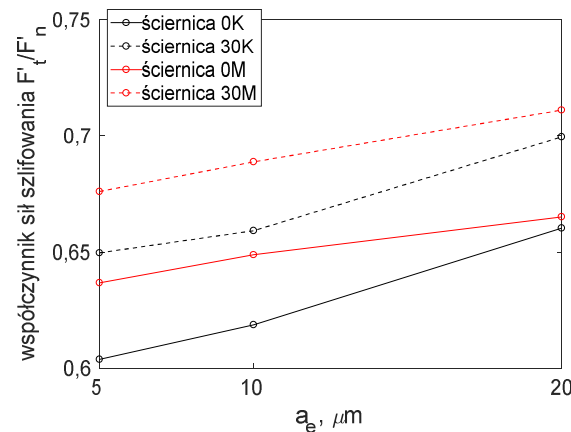


Rys. 17. Wpływ dosuwu szlifowania  $a_e$  na wartość właściwej składowej normalnej  $F_n'$  (a) oraz stycznej  $F_t'$  (b) siły szlifowania w procesie szlifowania ściernicą konwencjonalną o twardości K i M (ściernica 0K i 0M) oraz ściernicą o twardości K i M (ściernica 30K i 30M) z 30-to procentowym udziałem agregatów

Na rysunku 16 przedstawiono zmienność wartości właściwej składowej normalnej i stycznej siły szlifowania dla różnych ściernic w zależności od dosuwu szlifowania. W obu przypadkach widoczny jest wzrost wartości składowej siły szlifowania następujący wraz ze wzrostem wartości usuwanego naddatku. Zwiększenie dosuwu szlifowania powoduje wzrost zagłębienia ziaren aktywnych w materiał obrabiany oraz zwiększenie powierzchni strefy obróbki. Zmniejszenie wartości składowych sił szlifowania w przypadku ściernic z agregatami w odniesieniu do ściernic

konwencjonalnych wynika między innymi ze specyficznego procesu wykruszania ziaren z agregatu. Spoiwo agregatu ma mniejszą wytrzymałość od spoiwa łączącego agregaty i bazowe ziarna ściernic. Powoduje to, że ziarna zewnętrzne w agregacie są silniej utwardzone, a ziarna wewnętrzne słabiej. Efektem tego jest tworzenie w wyniku zużywania się narzędzi mikrowgłębień w agregatach, co zwiększa lokalnie porowatość i zmniejsza opory skrawania. Ponadto istotną rolę w zmniejszeniu wartości składowych sił szlifowania odgrywa również odmienny charakter oddziaływań agregatu ściernego z materiałem obrabianym w porównaniu do charakteru oddziaływań pojedynczego ziarna ściernego.

Zależność wartości stosunku sił szlifowania  $F_t'/F_n'$  od dosuwu szlifowania dla analizowanych narzędzi ściernych przedstawiono na rysunku 18.



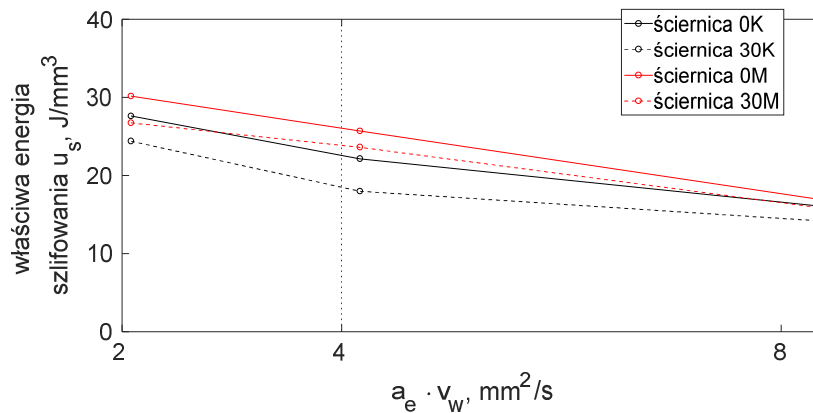
Rys. 18. Wpływ głębokości szlifowania na wartość współczynnika sił szlifowania w procesie szlifowania ściernicami o twardości K i M, konwencjonalną i ściernicą z 30-to procentowym udziałem agregatów

Wraz ze wzrostem głębokości skrawania zaobserwować można wzrost udziału wartości stosunku właściwych składowych sił szlifowania  $F_t'/F_n'$ . Wynika to ze zmian oddziaływań w strefie skrawania następujących wraz ze zmianą wielkości zagłębienia ziarna ściernego w materiał obrabiany. Dla małych głębokości skrawania w strefie obróbki dominują odkształcenia sprężyste. W fazie tworzenia rysy ziarno ściernic zagłębiając się w materiał obrabiany powoduje jego przemieszczenie przed ziarnem oraz na boki, tworząc wypływki po bokach rysy tworzonej przez ziarno. W kolejnej fazie materiał obrabiany przemieszczający się przed ziarnem ściernym oddziela się w postaci wióra. W fazie tej dochodzi do skrawania. Wzrost wartości współczynnika sił szlifowania wraz ze wzrostem głębokości skrawania następuje wskutek zwiększenia udziału procesu tworzenia wióra w odniesieniu do procesu tworzenia rys oraz odkształceń sprężystych.

Na rysunku 18 obserwowalna jest większa wartość współczynnika sił szlifowania w przypadku ściernic z agregatami niż w przypadku ściernic konwencjonalnych. Jest to wynikiem efektywnego procesu usuwania materiału w strefie oddziaływania agregatu ściernego. Agregaty ściernic utworzone są z ziaren o wymiarze mniejszym niż ziarna bazowe, a więc ziaren o mniejszych wymiarach i promieniach naroży skrawających. Powoduje to powstanie dwóch przeciwstawnych skutków oddziaływań w strefie kontaktu agregatu ściernego z materiałem obrabianym. Z jednej strony energia właściwa skrawania dla małych przekrojów warstw skrawanych jest większa niż dla dużych. Z drugiej strony w wyniku dużego upakowania ziaren w agregacie ściernym, łączny zbiór ostrzy aktywnych na jego powierzchni skrawa warstwy o dużej szerokości. Efektem tego, w strefie oddziaływania agregatu ściernego utrudnione jest przemieszczanie boczne materiału,

a co z tym idzie mniejszy jest udział odkształceń plastycznych oraz bardziej efektywny proces oddzielania wióra. Wpływa to na zmniejszenie energii właściwej procesu szlifowania.

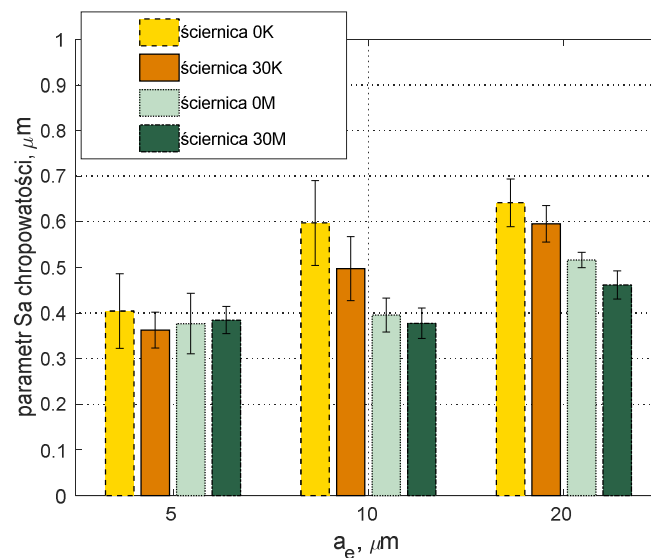
Wpływ parametrów obróbki dla różnych narzędzi ściernych na wartość właściwej energii szlifowania przedstawiono na rysunku 19.



Rys. 19. Energia właściwa procesu szlifowania w zależności od wydajności objętościowej procesu dla ściernic konwencjonalnych i agregatowych o twardości K i M

Na rysunku 19 widoczne są niższe wartości energii właściwej dla ściernic z agregatami. Oznacza to, że skutki zmniejszenia energii w wyniku zmniejszenia wyływek bocznych materiału są większe od skutków zwiększenia energii właściwej w wyniku większego udziału mniejszych przekrojów warstw skrawanych.

Dokonano porównania wartości parametrów chropowatości dla ściernic konwencjonalnych o twardości K i M oraz ściernic z 30% udziałem agregatów o twardości K i M (rys. 20).



Rys. 20. Zestawienie wpływu głębokości szlifowania na wartość parametru chropowatości Sa powierzchni obrobionej ściernicami o twardości K i M, konwencjonalną i ściernicą z 30-procentowym udziałem agregatów

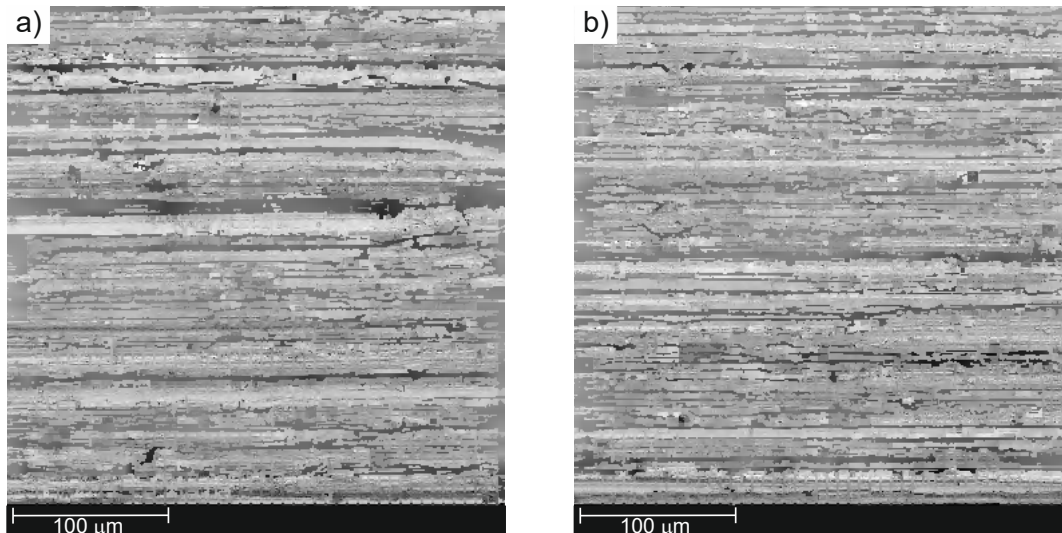
Dodatek agregatów ziaren wpłynął korzystnie na wartość parametru chropowatości Sa powierzchni obrobionej. Na rysunku 20 zaobserwować można zmniejszenie wysokości chropowatości Sa powierzchni obrobionej ściernicą z agregatami w odniesieniu do ściernicy konwencjonalnej. Niższe wartości parametru chropowatości są wynikiem korzystnego



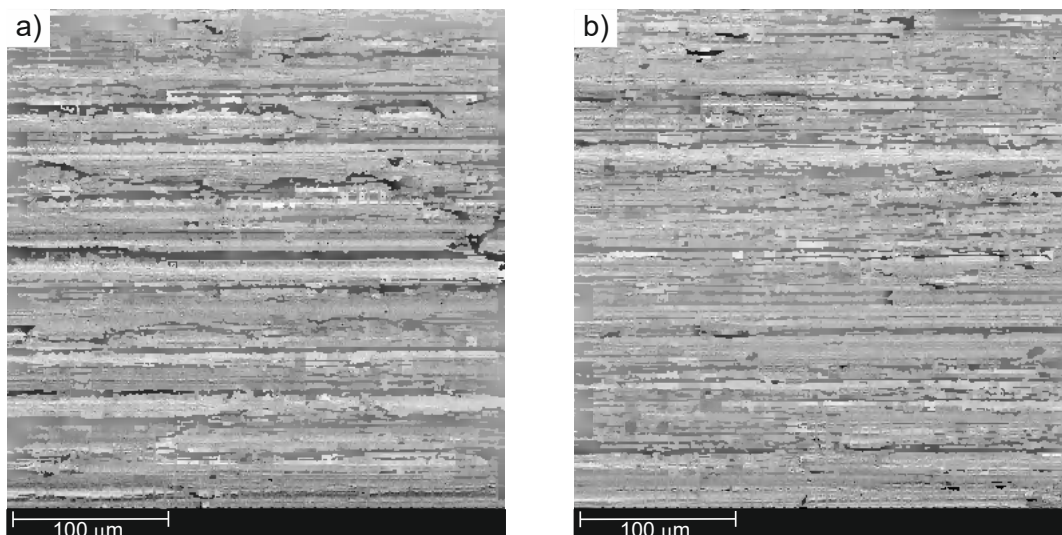
mechanizmu oddzielania materiału występującego w przypadku agregatów ściernych powodującego zmniejszenie liczby wypyłek. Skutkuje to również zmniejszeniem lokalnej zmienności parametrów chropowatości.

Wpływ korzystnego oddziaływania agregatów ściernych maleje wraz ze zmniejszeniem głębokości szlifowania do 5  $\mu\text{m}$ . Przyczyna może wynikać z mniejszych przekrojów ziaren ściernych i dominowania w tym zakresie odkształceń plastycznych.

Wizualna ocena próbek nie stwierdziła obecności pęknięć, przypaleń oraz śladów drgań na powierzchni obrobionej. Obrazy morfologii powierzchni obrobionej uzyskanej z wykorzystaniem SEM przedstawiono na rysunkach 21 i 22.



Rys. 21. Obraz SEM powierzchni szlifowanej ( $a_e = 20\mu\text{m}$ ) ściernicą konwencjonalną o twardości K (a) oraz ściernicą o twardości K z 30% dodatkiem agregatów ściernych (b)



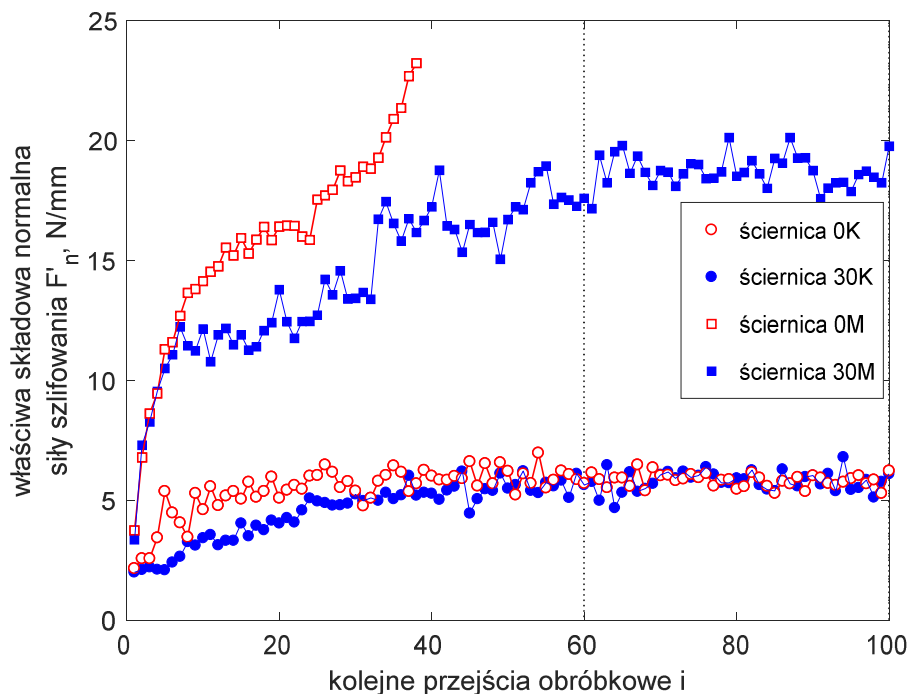
Rys. 22. Obraz SEM powierzchni szlifowanej ( $a_e = 20\mu\text{m}$ ) ściernicą konwencjonalną o twardości M (a) oraz ściernicą o twardości M z 30% dodatkiem agregatów ściernych (b)

Na obrazie SEM powierzchni obrobionej widoczne są wyraźne cechy, między innymi: powierzchnie wygładzone, zatarcia, zarysowania oraz wypywki materiału. Zarysowania widoczne są w postaci drobnych śladów skrawania tworzonych przez ziarna aktywne oraz wyraźnych żłobień będących wynikiem wgłębienia się w materiał wykruszonych fragmentów

ziaren lub całych ziaren ściernych. Widoczne na powierzchni zatarcia są wynikiem oddziaływania agregatów ściernych o dużej szerokości strefy skrawania oraz małej odległości między ostrzami aktywnymi.

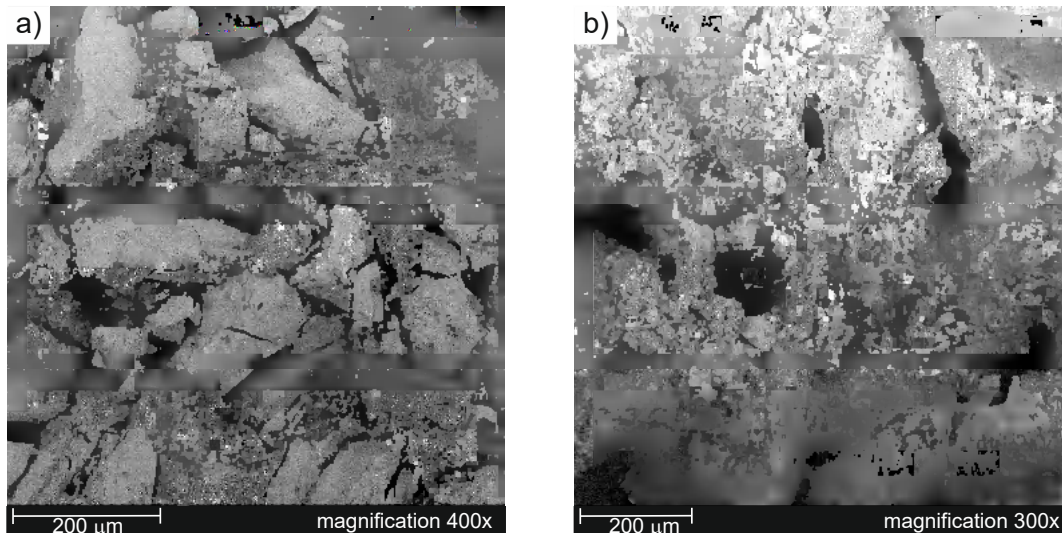
W celu analizy zmian w oddziaływania powierzchni czynnej narzędzia ściernego z materiałem obrabianym w czasie dokonano analizy przebiegu składowej normalnej siły szlifowania w trakcie 100 kolejnych przejść obróbkowych. Szerokość szlifowania  $b$  wynosiła 10 mm, naddatek na obróbkę w pojedynczym przejściu wynosił  $20 \mu\text{m}$ .

Widoczny na rysunku 23 przebieg właściwej składowej normalnej siły szlifowania, dla ściernicy o twardości K wskazuje na ustabilizowany przebieg procesu obróbki po około 40 przejściach obróbkowych. W przypadku ściernicy o twardości M wyraźnie widoczny jest wzrost sił szlifowania wynikający ze starcia wierzchołków ziaren ściernych oraz zalepień powierzchni międzyziarnowych. W przypadku procesu prowadzonego z wykorzystaniem ściernicy bez agregatów o twardości M proces po 37 przejściach zatrzymano z uwagi na utratę zdolności skrawnych narzędzia ściernego.

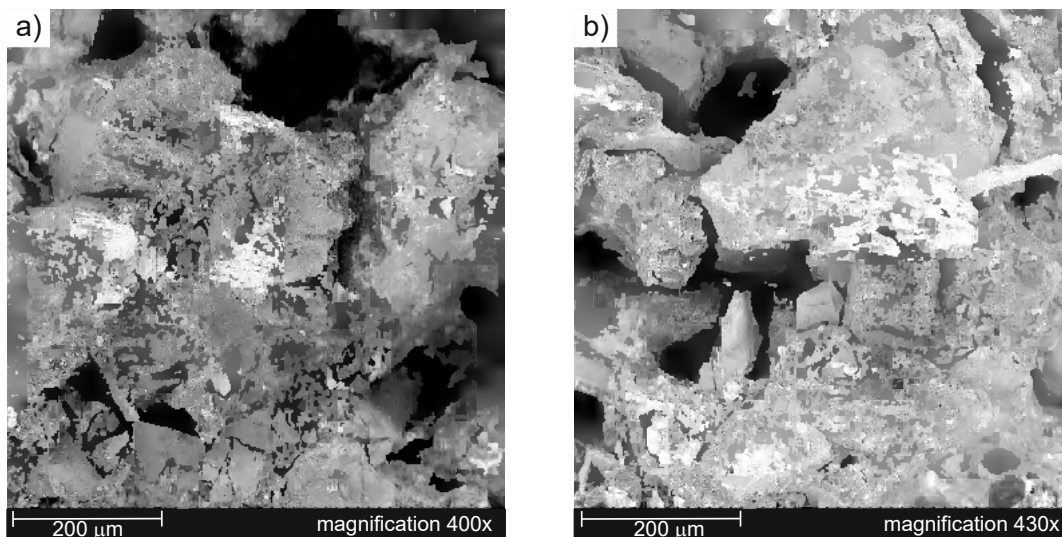


Rys. 23. Wartości składowej normalnej siły szlifowania odniesionej do szerokości ściernicy, w kolejnych przejściach dla ściernicy konwencjonalnych i z agregatami (ściernice o twardości K i M)

Analizę stanu powierzchni czynnej narzędzi ściernych przeprowadzono z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego. Przykładowe obrazy SEM powierzchni czynnych narzędzia ściernego zamieszczono na rysunkach 24 i 25.



Rys. 24. Obrazy SEM powierzchni czynnej ściernicy konwencjonalnej o twardości M



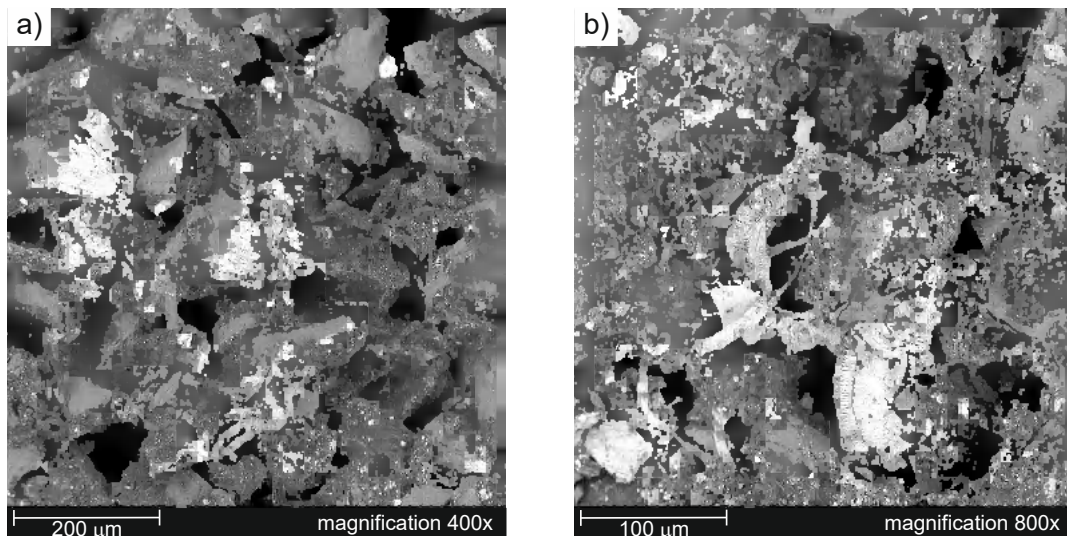
Rys. 25. Obrazy SEM powierzchni czynnej ściernicy o twardości M z 30% dodatkiem agregatów ściernych

Na powierzchni czynnej konwencjonalnego narzędzia ściernego o twardości M (rys. 24) widoczne były wyraźne cechy wskazujące na mikrowykruszenia wierzchołków ziaren aktywnych oraz zużycie wytrzymałościowe ziaren ściernych. W przestrzeniach międzyziarnowych znajdowało się wiele fragmentów ziaren ściernych. W efekcie mikrowykruszeń ziaren ściernych oraz wypełnień przestrzeni międzyziarnowych wzrosła powierzchnia kontaktu powierzchni czynnej narzędzia ściernego z materiałem obrabianym. Skutkiem tego widoczny jest wyraźny, gwałtowny wzrost przebiegu składowej siły szlifowania (rys. 23).

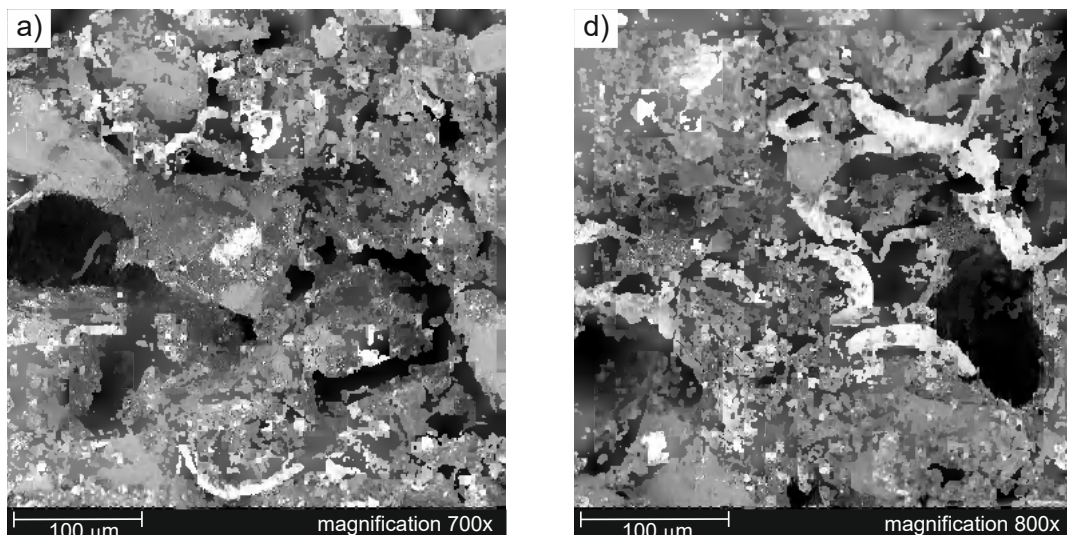
W przypadku obróbki ściernicą o twardości M z udziałem agregatów ściernych zauważalny jest mniejszy wzrost wartości składowej normalnej siły szlifowania. Wzrost składowej siły szlifowania spowodowany jest głównie przez starcia wierzchołków ziaren ściernych oraz wzrost powierzchni oddziaływania ziaren aktywnych z przedmiotem obrabianym następujący w wyniku adhezji materiału obrabianego do wierzchołków tych ziaren (rys. 25). Wzrost powierzchni oddziaływania narzędzia ściernego z materiałem obrabianym prowadzi do wykruszeń ziaren ściernych, głównie tych wchodzących w skład agregatów ściernych. Skutkuje to bardziej otwartą



strukturą narzędzia ściernego, mniejszą skłonnością do zalepień, a tym samym dłuższym okresem trwałości w odniesieniu do narzędzi ściernych bez agregatów ściernych.



Rys. 26. Obrazy SEM powierzchni czynnej ściernicy konwencjonalnej o twardości K



Rys. 27. Obrazy SEM powierzchni czynnej ściernicy o twardości K z 30% dodatkiem agregatów ściernych

Powierzchnia czynna narzędzi ściernych o twardości K ma odmienny charakter od powierzchni czynnej narzędzi o twardości M. Widoczne są na niej liczne wyrwania ziaren ściernych (rys. 26 i 27). W przypadku ściernicy konwencjonalnej zauważalne są liczniejsze starcia wierzchołków ziaren ściernych, niż w przypadku ściernicy z udziałem agregatów ściernych. Z przebiegu składowej normalnej siły szlifowania wynika, że w trakcie procesu następowało silne samoostrzenie narzędzia ściernego. Zużycie promieniowe ściernic o twardości K było prawie dwukrotnie wyższe niż ściernicy o twardości M.

**W wyniku przeprowadzonych badań eksperymentalnych oraz analiz numerycznych procesu szlifowania stopu tytanu ściernicami z agregatami stwierdzić można:**

- Analizując mechanizm oddzielania materiału oraz bocznych jego przemieszczeń można stwierdzić, że orientowanie ziarna względem kierunku posuwu wzdłużnego

zwiększające szerokość warstwy skrawanej jest jednym ze sposobów zmniejszenia niekorzystnych bocznych przepływów materiału.

- Dużą zdolność rozróżniania charakterystycznych cech geometrycznych analizowanych przekrojów ziaren ściernych oraz agregatu ściernego wykazuje współczynnik  $(o \cdot b)/l_{mean}^2$ . Wzrost wartości współczynnika  $(o \cdot b)/l_{mean}^2$  powoduje wzrost wskaźnika efektywności usuwania materiału  $k_r$  przez ostrza skrawające.
- Zastosowanie w procesie obróbki ścierniej stopu tytanu Ti-6Al-4V ściernic z agregatami znacząco podwyższa efektywność procesu usuwania obrabianego materiału. Agregaty ściernic posiadają korzystne parametry geometryczne, które w znaczny sposób zwiększają szerokość strefy kontaktu, a zatem i długość drogi bocznych przepływów materiału, wpływając tym samym na ich ograniczenie.
- Zastosowanie ściernic z agregatami do szlifowania stopu tytanu Ti-6Al-4V pozwala na uzyskanie korzystnego przebiegu procesu szlifowania wynikającego ze stabilnych warunków pracy wzdłuż toru poszczególnych agregatów ściernych.
- Proces szlifowania agregatami ściernymi charakteryzuje się niższymi wartościami sił i energii szlifowania uzyskiwanych w wyniku efektywnego mikroostrzenia oraz tworzenia mikrowgłębień na powierzchni agregatów ściernych.
- Zastosowanie 30% udziału agregatów ściernych przyczynia się do uzyskania powierzchni obrobionej o korzystniejszych wartościach parametrów stereometrycznych w odniesieniu do powierzchni uzyskanej w wyniku szlifowania ściernicą konwencjonalną.
- Zastosowanie ściernic z agregatami ściernymi umożliwia obniżenia przyrostu sił szlifowania wraz z upływem czasu obróbki, co oznacza zwiększenie trwałości narzędzi ściernych.

**Szczegółową analizę powyżej opisanych zagadnień zawarto w zbiorze publikacji:**

5. Kacalak W., Lipiński D., Bałasz B., Rypina Ł., Tandecka K., Szafraniec F., *Performance evaluation of the grinding wheel with aggregates of grains in grinding of Ti-6Al-4V titanium alloy*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94, str. 301-314.
6. Kacalak W., Lipiński D., Rypina Ł., Szafraniec F., *Analiza szlifowania stopu tytanu Ti-6Al-4V ściernicami z agregatami ściernymi*, Mechanik, 8-9, 2016, str.1150-1151.
7. Kacalak W., Rypina Ł., Lipiński D., Bałasz B., *Analiza wpływu cech geometrycznych strefy mikroskrawania pojedynczym ostrzem ściernym na proces oddzielania obrabianego materiału*, Inżynieria Maszyn, 20, 2015, str. 7-18.

### 3.3. Opracowanie systemu oceny parametrów stereometrycznych powierzchni po obróbce ścierniej

#### Analiza zawartości informacyjnej oraz stopnia współzależności parametrów oceny stereometrycznej powierzchni obrobionych

Ocenę stanu powierzchni w układzie 3D przeprowadzać można obecnie z wykorzystaniem kilkudziesięciu parametrów. Parametry ujmujące w sposób ogólny stan powierzchni są ze sobą często silnie skorelowane. Natomiast parametry szczegółowe stosowane są w wąskim zakresie, związanym najczęściej z oceną określonej właściwości eksploatacyjnej powierzchni.

Zawartość informacyjna poszczególnych parametrów SGP jest wyraźnie zróżnicowana. Wiele parametrów w danej grupie jak również między grupami jest silnie skorelowana. Korelację analizowanych parametrów dla 60 powierzchni przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Współczynniki korelacji parametrów topografii powierzchni kształtowanych (kolorem szarym wyróżniono współczynniki korelacji liniowej  $\geq 0,9$ )

|      | parametry amplitudowe |       |       |       |       |       |       |       | parametry przestrzenne |       |       |      |       | parametry powierzchniowe i objętościowe |      |      |  |
|------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------------|-------|-------|------|-------|---|------|------|--|
|      | Sa                    | Sq    | Sp    | Sv    | St    | Ssk   | Sku   | Sz    | Spc                    | Sds   | Str   | Sal  | Std   | SHTp                                    | Smmr | Smvr |  |
| Sa   | 1,00                  |       |       |       |       |       |       |       |                        |       |       |      |       |   |      |      |  |
| Sq   | 0,99                  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |                        |       |       |      |       |   |      |      |  |
| Sp   | 0,93                  | 0,94  | 1,00  |       |       |       |       |       |                        |       |       |      |       |   |      |      |  |
| Sv   | 0,89                  | 0,90  | 0,97  | 1,00  |       |       |       |       |                        |       |       |      |       |   |      |      |  |
| St   | 0,92                  | 0,93  | 0,99  | 0,99  | 1,00  |       |       |       |                        |       |       |      |       |   |      |      |  |
| Ssk  | 0,07                  | 0,08  | 0,10  | -0,01 | 0,05  | 1,00  |       |       |                        |       |       |      |       |   |      |      |  |
| Sku  | -0,12                 | -0,12 | -0,11 | -0,05 | -0,08 | -0,57 | 1,00  |       |                        |       |       |      |       |   |      |      |  |
| Sz   | 0,94                  | 0,95  | 0,99  | 0,99  | 0,99  | 0,06  | -0,09 | 1,00  |                        |       |       |      |       |   |      |      |  |
| Spc  | 0,37                  | 0,36  | 0,52  | 0,58  | 0,55  | -0,15 | 0,00  | 0,51  | 1,00                   |       |       |      |       |   |      |      |  |
| Sds  | -0,20                 | -0,20 | -0,19 | -0,14 | -0,17 | -0,45 | 0,55  | -0,17 | -0,05                  | 1,00  |       |      |       |   |      |      |  |
| Str  | -0,02                 | -0,01 | 0,06  | 0,11  | 0,08  | -0,31 | 0,38  | 0,06  | 0,27                   | 0,04  | 1,00  |      |       |   |      |      |  |
| Sal  | 0,01                  | 0,03  | 0,05  | 0,03  | 0,04  | 0,07  | -0,15 | 0,03  | -0,07                  | -0,24 | 0,04  | 1,00 |       |   |      |      |  |
| Std  | 0,00                  | 0,00  | 0,04  | 0,07  | 0,05  | 0,00  | 0,11  | 0,06  | 0,07                   | 0,03  | 0,33  | 0,24 | 1,00  |   |      |      |  |
| SHTp | 1,00                  | 0,99  | 0,91  | 0,87  | 0,90  | 0,08  | -0,12 | 0,92  | 0,31                   | -0,20 | -0,05 | 0,01 | -0,02 | 1,00                                    |      |      |  |
| Smmr | 0,88                  | 0,89  | 0,95  | 0,98  | 0,97  | -0,01 | -0,06 | 0,97  | 0,57                   | -0,13 | 0,08  | 0,01 | 0,06  | 0,85                                    | 1,00 |      |  |
| Smvr | 0,92                  | 0,93  | 0,99  | 0,96  | 0,99  | 0,10  | -0,10 | 0,98  | 0,51                   | -0,18 | 0,07  | 0,05 | 0,05  | 0,90                                    | 0,95 | 1,00 |  |

Analiza współczynników korelacji liniowej poszczególnych parametrów topografii powierzchni prowadzi do stwierdzenia wyraźnej korelacji parametrów wewnątrz grupy parametrów amplitudowych (z wyłączeniem parametrów Ssk i Sku) i grupy parametrów powierzchniowych i objętościowych jak również między poszczególnymi parametrami z tych grup.

W celu szczegółowej analizy współzależności parametrów oceny topografii powierzchni dokonano estymacji parametrów modeli liniowych oraz potęgowych między poszczególnymi parametrami oceny topografii powierzchni. Poniżej zostały przedstawione wyniki analiz, dotyczących współzależności różnych parametrów służących do oceny topografii powierzchni. Do analiz wykorzystano ponad 390 powierzchni, uzyskanych w wyniku zrealizowanych procesów obróbki, zweryfikowanych procesów modelowania i symulacji obróbki ścierniej (szlifowania, wygładzania i polerowania) oraz obróbki elektroerozyjnej. Dla opracowanych modeli

wyznaczono wartość współczynnika determinacji  $R^2$ , na którego podstawie wybrano model zależności między zmiennymi.

Wartość współczynników determinacji poszczególnych modeli wraz z określeniem postaci modelu zawarto w tabeli 2.

Tabela 2. Współczynniki determinacji  $R^2$  opracowanych modeli (kolorem szarym oznaczono modele potęgowe, kolorem białym – modele liniowe)

|      | Sa   | Sq   | Sp   | Sv   | St   | Ssk  | Sku  | Sdc  | Sbi  | Sdr  | Sdq  | Sds  | Sk   | Spk  | Svk  | Smmr | Smvr |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Sa   | 1,00 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Sq   | 1,00 | 1,00 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Sp   | 0,96 | 0,96 | 1,00 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Sv   | 0,98 | 0,98 | 0,94 | 1,00 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| St   | 0,97 | 0,98 | 1,00 | 0,97 | 1,00 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Ssk  | 0,62 | 0,64 | 0,69 | 0,53 | 0,65 | 1,00 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Sku  | 0,48 | 0,50 | 0,60 | 0,48 | 0,58 | 0,81 | 1,00 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Sdc  | 1,00 | 1,00 | 0,95 | 0,98 | 0,97 | 0,55 | 0,46 | 1,00 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Sbi  | 0,19 | 0,19 | 0,33 | 0,22 | 0,27 | 0,22 | 0,44 | 0,20 | 1,00 |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Sdr  | 0,99 | 0,99 | 0,96 | 0,98 | 0,97 | 0,56 | 0,50 | 0,99 | 0,22 | 1,00 |      |      |      |      |      |      |      |
| Sdq  | 0,99 | 0,99 | 0,96 | 0,98 | 0,97 | 0,56 | 0,50 | 0,99 | 0,18 | 1,00 | 1,00 |      |      |      |      |      |      |
| Sds  | 0,39 | 0,38 | 0,34 | 0,36 | 0,35 | 0,15 | 0,07 | 0,40 | 0,02 | 0,22 | 0,38 | 1,00 |      |      |      |      |      |
| Sk   | 0,99 | 0,99 | 0,95 | 0,97 | 0,97 | 0,55 | 0,46 | 1,00 | 0,19 | 0,98 | 0,99 | 0,37 | 1,00 |      |      |      |      |
| Spk  | 0,94 | 0,94 | 1,00 | 0,93 | 0,99 | 0,65 | 0,63 | 0,93 | 0,40 | 0,93 | 0,94 | 0,36 | 0,93 | 1,00 |      |      |      |
| Svk  | 0,84 | 0,85 | 0,77 | 0,94 | 0,83 | 0,36 | 0,41 | 0,83 | 0,19 | 0,78 | 0,86 | 0,17 | 0,84 | 0,81 | 1,00 |      |      |
| Smmr | 0,98 | 0,98 | 0,94 | 1,00 | 0,97 | 0,50 | 0,47 | 0,98 | 0,20 | 0,98 | 0,98 | 0,28 | 0,97 | 0,93 | 0,95 | 1,00 |      |
| Smvr | 0,96 | 0,96 | 1,00 | 0,95 | 1,00 | 0,63 | 0,61 | 0,95 | 0,35 | 0,95 | 0,96 | 0,38 | 0,96 | 1,00 | 0,85 | 0,95 | 1,00 |

Na podstawie informacji o wartości współczynników determinacji  $R^2$  wyznaczonych modeli możliwe jest wyznaczenie komplementarnego zbioru parametrów opisujących analizowaną powierzchnię. W postępowaniu tym wybierane są parametry skorelowane z jak największym zbiorem pozostałych parametrów (zbiorem parametrów, dla których współczynnik determinacji z analizowanym parametrem, jest wyższy od założonej wartości progowej). W kolejnym kroku parametry skorelowane uzupełniane są o zbiory parametrów o niskim skorelowaniu dla których, współczynnik determinacji modelu jest mniejszy od ustalonej wartości progowej. Dysponując zbiorem parametrów komplementarnych oraz modelami relacji możliwe jest wyznaczenia wartości pozostałych parametrów.

Przykładowy zbiór parametrów komplementarnych wyznaczonych dla analizowanych powierzchni (z założeniem progowej wartości współczynnika determinacji  $R^2 = 0,98$ ), zawiera parametry: Sa (wysoki stopień korelacji z parametrami: Sq, Sv, Sdc, Sdr, Sdq, Sk, Smmr), Smvr (wysoki stopień korelacji z parametrami: Sp, St, Spk), Svk, Sku, Sbi, Sds.

Wyznaczone współzależności parametrów stanowią źródło wiedzy i podstawę wnioskowania w zakresie tworzenia zbiorów parametrów do kompleksowej oceny tak, aby parametry zbioru charakteryzowały się:

- niskim stopniem wzajemnej zależności, co zwiększa wartość informacyjną zbioru,
- wysokim współczynnikiem zdolności klasyfikacyjnej, co pozwala lepiej różnicować powierzchnie o podobnych wartościach innych parametrów,
- możliwością interpretacji ich wartości poprzez odniesienie do ukształtowania powierzchni i elementów jej topografii,

- wysoką przydatnością do określania nastaw, doboru parametrów i warunków lub sterowania procesami wytwarzania elementów, których powierzchnie są kształtowane w danym procesie,
- możliwością wykorzystywania do diagnostyki procesów obróbki,
- możliwością prognozowania cech eksploatacyjnych powierzchni w określonych zastosowaniach.

Określenie postaci zależności oraz estymacji parametrów modeli zależności umożliwia wyznaczenie wartości określonych parametrów na podstawie parametrów należących do zbioru oceny kompleksowej. Potwierdzono również niezależność wielu parametrów od innych, co oznacza możliwość ich grupowania w jednym zbiorze.

Brak współzależności pewnych parametrów od innych nie jest oczywiście wystarczającą przesłanką do włączenia ich do grupy tworzącej komplementarny zbiór, zapewniający kompleksową ocenę. Wskazane jest sprawdzenie, czy spełnione są pozostałe, wymienione powyżej wymagania.

### **Klasyfikacja powierzchni po obróbce ścierniej z zastosowaniem systemów wnioskowania rozmytego oraz sieci rekurencyjnych**

Analiza topografii powierzchni technicznych i ocena ich właściwości stereometrycznych jest coraz powszechniejszym zadaniem, w ocenie jakości procesów obróbki oraz w ocenie jakości produktów i prognozowaniu ich właściwości eksploatacyjnych.

Struktura geometryczna powierzchni ma znaczny wpływ między innymi na procesy tarcia i zużycia skojarzonych powierzchni, współpracujących tocznie i ślizgowo, na odkształcenia i sztywność stykową, koncentrację naprężeń i wytrzymałość zmęczeniową, odporność na oddziaływanie korozyjne, na tłumienie drgań, szczelność połączeń, rezystancję stykową, stykowe przewodnictwo ciepła, właściwości magnetyczne, zjawiska odbicia, pochłaniania i przenikania fal (światlnych, elektromagnetycznych itp.), procesy nanoszenia, przyczepność i wytrzymałość powłok uszlachetniających, właściwości aero- i hydrodynamiczne, na subiektywne wrażenia dotyczące wyglądu, a także na preferencje nabywców określonych produktów.

Klasyfikacja powierzchni kształtowanych na podstawie wartości parametrów oceny jej topografii może być prowadzona z zastosowaniem metod jakościowych oraz ilościowych. W przypadku klasyfikacji z zastosowaniem ocen jakościowych poszczególne klasy powierzchni mogą być opisane symbolicznie lub słownie. Taka ocena może być następnie podstawą do określenia wskaźnika zgodności z wymaganiami i oceną stopnia przydatności powierzchni do jej planowanych zastosowań. Zwiększa to możliwości oceny topografii powierzchni, która nie jest wyłącznie opisana przez szereg często uwikłanych parametrów.

Do jakościowej oceny stanu powierzchni wykorzystano teorię zbiorów rozmytych. Pozwala ona na ujęcie w modelu nieprecyzyjnego opisu stanu powierzchni. W praktyce powierzchnie opisywane są określonym różnorodnej wielkości zbiorem parametrów opisujących topografię powierzchni. Prowadzi to często do niejednoznaczności opisu stanu analizowanej powierzchni. Model rozmyty określać może wpływ wszystkich istotnych parametrów do oceny określonych parametrów powierzchni. Dysponując wcześniej określonymi modelami współzależności parametrów oceny topografii powierzchni, klasyfikacja tego typu może być przeprowadzona dla niepełnego i nieprecyzyjnego zbioru charakteryzującego jej strukturę. Ponadto zastosowanie zbiorów rozmytych pozwala na wprowadzenie do systemu klasyfikacji nie tylko wiedzy eksperymetalnej, ale również wiedzy eksperckiej. Wiedza ta przedstawiona jest w sposób

jawny, w postaci reguł: jeżeli ... to. W konsekwencji działania takiego systemu na podstawie jakościowej oceny parametrów topografii powierzchni otrzymujemy zorientowany językowo opis stanu analizowanej powierzchni.

Przykładowy zbiór reguł rozmytych umożliwiających przypisanie analizowanej powierzchni do wcześniej zdefiniowanych klas przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wybrane reguły opisujące klasy powierzchni obrobionych

|        | Wartość parametru<br>(poprzedniki reguł lingwistycznych) |          |      | Klasy powierzchni<br>(następniki reguł lingwistycznych) |                                 |
|--------|--|----------|------|---|---------------------------------|
|        | Sz   | Ssk      | Sku  |   |                                 |
| Jeżeli | mała   | ujemna   | -    | to  | bardzo duża nośność powierzchni |
| Jeżeli | mała   | ujemna   | duża | to  | duża nośność powierzchni        |
| Jeżeli | mała   | dodatnia | -    | to  | średnia nośność powierzchni     |
| ...    |  |          |      |   |                                 |
| Jeżeli | mała   | dodatnia | duża | to  | duża nośność powierzchni        |
| Jeżeli | średnia  | zerowa   | mała | to  | mała nośność powierzchni        |
| Jeżeli | duża   | dodatnia | mała | to  | bardzo mała nośność powierzchni |

Podstawą określenia bazy reguł dla analizowanego przypadku jest stosunek powierzchni nośnej do powierzchni resztkowej (nośność powierzchni). W rezultacie działania przedstawionego systemu wnioskowania otrzymuje się opisową charakterystykę stanu powierzchni. Powyższy przykład dotyczy oceny na podstawie wybranego zbioru parametrów amplitudowych. Rozszerzenie systemu wnioskowania o reguły analizujące cechy powierzchni, opisane przez inne grupy parametrów lub kombinacje parametrów z różnych grup, a nawet relacje między różnymi parametrami umożliwia wzbogacenie opisowej charakterystyki stanu powierzchni.

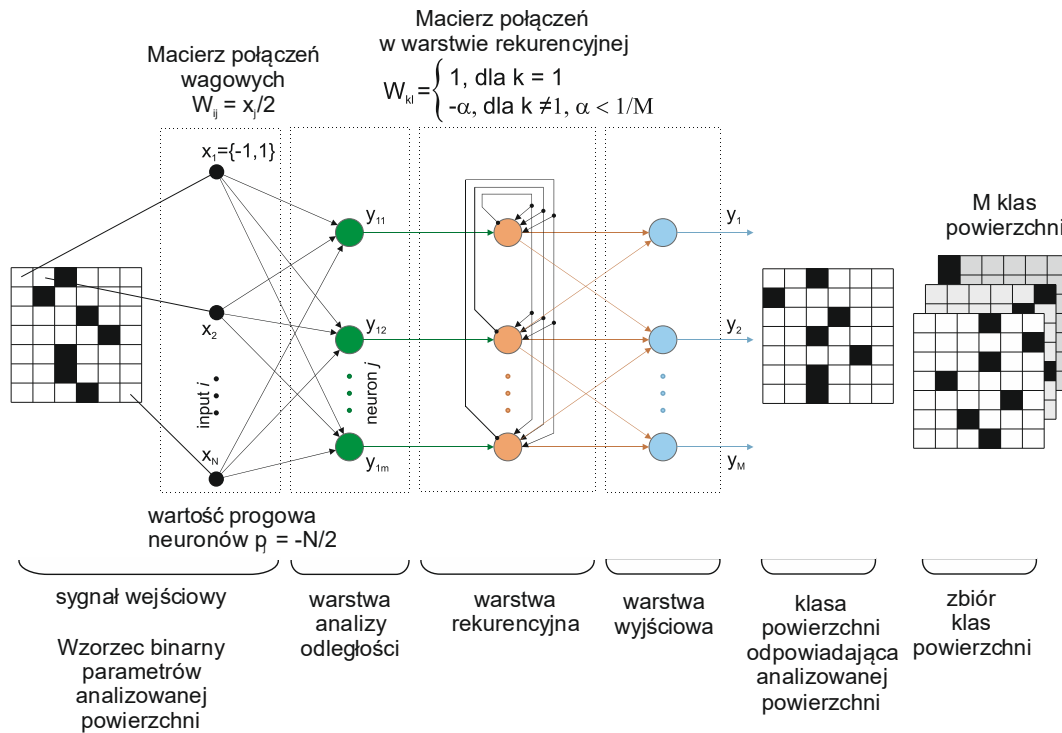
Opisana metoda pozwala również na wprowadzenie do systemu wnioskowania reguł informujących nie tylko o cechach analizowanych powierzchni. Możliwe jest wprowadzenie do systemu szczegółowych informacji o znanym wpływie parametrów struktury geometrycznej powierzchni na cechy eksploatacyjne powierzchni.

Klasyfikacji powierzchni kształtowanych może być również dokonywana z zastosowaniem metod ilościowych, opartych głównie na analizie odległości sygnału wejściowego (zbioru wartości parametrów oceny topografii powierzchni) od wzorca (klasy powierzchni). Zagadnienie tego typu może być realizowane z zastosowaniem sieci rekurencyjnych.

Klasyfikacja powierzchni na podstawie wartości parametrów oceny topografii powierzchni z zastosowaniem sieci rekurencyjnej Hamminga wymaga przeprowadzenia poniższych etapów:

- określenie zbioru różnych zastosowań i warunków pracy powierzchni,
- określenie zbioru parametrów o wysokiej zdolności informacyjnej, zdolnej do rozróżniania klas powierzchni,
- określenie wzorców powierzchni, na podstawie znormalizowanych parametrów powierzchni wyznaczonych dla zbiorów powierzchni testowych, typowych dla określonych zastosowań, wymagań i warunków pracy,
- klasyfikacja z zastosowaniem sztucznej sieci neuronowej Hamminga, ocena odległości w przestrzeni N-wymiarowej przestrzeni parametrów oceny topografii powierzchni między analizowaną powierzchnią a daną klasą powierzchni.

Przykładowy schemat sieci rekurencyjnej Hamminga do klasyfikacji powierzchni z zastosowaniem wzorców binarnych przedstawiono na rysunku 28.



Rys. 28. Schemat sieci rekurencyjnej Hamminga do klasyfikacji binarnych wzorców powierzchni

Sieć Hamminga jest stanowi realizację sieci autoasocjacyjnej. Zadaniem sieci jest zapamiętanie wzorców binarnych reprezentujących określone klasy powierzchni. Po zapamiętaniu klas powierzchni, przy prezentacji wartości parametrów topografii analizowanej powierzchni sieć odpowiada na wyjściu wzorcem najbliższym w sensie odległości Hamminga sygnałowi wejściowemu. W rezultacie działania sieci analizowanej powierzchni, na podstawie jej wartości parametrów topografii, przypisywany jest określony wyróżnik klasyfikacyjny.

Wyboru wzorca dokonuje pierwsza warstwa sieci neuronowej. Najsilniejszy sygnał występuje na wyjściu neuronu, który jest reprezentantem klasy dla której odległość Hamminga pomiędzy sygnałem wejściowym a wzorcem klasy jest najmniejsza. Warstwa rekurencyjna tłumi sygnały wyjściowe wszystkich neuronów tej warstwy oprócz neuronu o najsilniejszym sygnale wejściowym. Warstwa wyjściowa przypisuje określonemu wzorcowi podanemu na wejście sieci neuronowej odpowiedni wyróżnik klasyfikacyjny zgodny z wcześniej zdefiniowanym wzorcem parametrów geometrycznych powierzchni.

**W wyniku przeprowadzonych analiz obejmujących ocenę zawartości informacyjnej parametrów oceny topografii powierzchni kształtowanych oraz metod klasyfikacji powierzchni, stwierdzić można co następuje:**

- Zawartość informacyjna poszczególnych parametrów oceny topografii powierzchni jest wyraźnie zróżnicowana. Wiele parametrów w grupie parametrów amplitudowych oraz powierzchniowych i objętościowych jest ze sobą silnie skorelowanych.
- Na podstawie informacji o wartości współczynników determinacji  $R^2$  wyznaczonych modeli liniowych oraz potęgowych określających relację pomiędzy poszczególnymi parametrami oceny topografii powierzchni możliwe jest wyznaczenie komplementarnego zbioru parametrów opisujących analizowaną powierzchnię. Ponadto na podstawie opracowanych modeli i wiedzy o wartościach parametrów ze

zbioru komplementarnego możliwe jest oszacowanie wartości parametrów skorelowanych.

- Klasyfikacja powierzchni z zastosowaniem systemu wnioskowania rozmytego pozwala na ujęcie w modelu nieprecyzyjnego opisu stanu powierzchni. W praktyce powierzchnie opisywane są określonym, różnorodnej wielkości zbiorem parametrów topografii powierzchni. Prowadzi to często do niejednoznaczności opisu stanu analizowanej powierzchni. Model rozmyty określać może wpływ wszystkich istotnych parametrów do oceny określonych parametrów powierzchni. Dysponując wcześniej określonymi modelami współzależności parametrów oceny topografii powierzchni, klasyfikacja tego typu może być przeprowadzona dla niepełnego i nieprecyzyjnego zbioru charakteryzującego jej strukturę.
- Zastosowanie zbiorów rozmytych umożliwia wprowadzenie do systemu klasyfikacji nie tylko wiedzy eksperymentalnej, ale również wiedzy eksperckiej. Wiedza ta bowiem przedstawiona jest w sposób jawny, w postaci reguł: jeżeli ... to ... .
- Klasyfikacja powierzchni z zastosowaniem sieci rekurencyjnej umożliwia jej ocenę poprzez odniesienie do wcześniej zdefiniowanych wzorców opisujących różne cechy eksploatacyjne powierzchni. Miara odległości od poszczególnych wzorców może być podstawą do określenia wskaźnika zgodności z wymaganiami i oceną stopnia przydatności powierzchni do jej planowanych zastosowań. Zwiększa to możliwości oceny topografii powierzchni.

**Szczegółową analizę powyżej opisanych zagadnień zawarto w zbiorze publikacji i opracowań:**

8. **Lipiński D.**, i inni, *Hybrydowy system monitorowania, optymalizacji i prognozowania jakości w procesach precyzyjnego szlifowania z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji do integracji wiedzy operatorów i danych diagnostycznych*. Raport końcowy z realizacji projektu badawczego własnego NN 503 557940, Politechnika Koszalińska, 2014.
9. Kacalak W., **Lipiński D.**, Tomkowski R., *Podstawy jakościowej oceny stanu powierzchni kształtowanych z wykorzystaniem teorii zbiorów rozmytych*, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 54, 2008, str. 180-183.
10. Kacalak W., **Lipiński D.**, Bałasz B., Królikowski T., Bernat A., Tomkowski R., Szafraniec F.: *Wybrane problemy w pomiarach nierówności, ocenie chropowatości i klasyfikacji topografii powierzchni na podstawie ich cech stereometrycznych*. Tendencje rozwoju metrologii i aparatury naukowej, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 2010, str. 7-64.

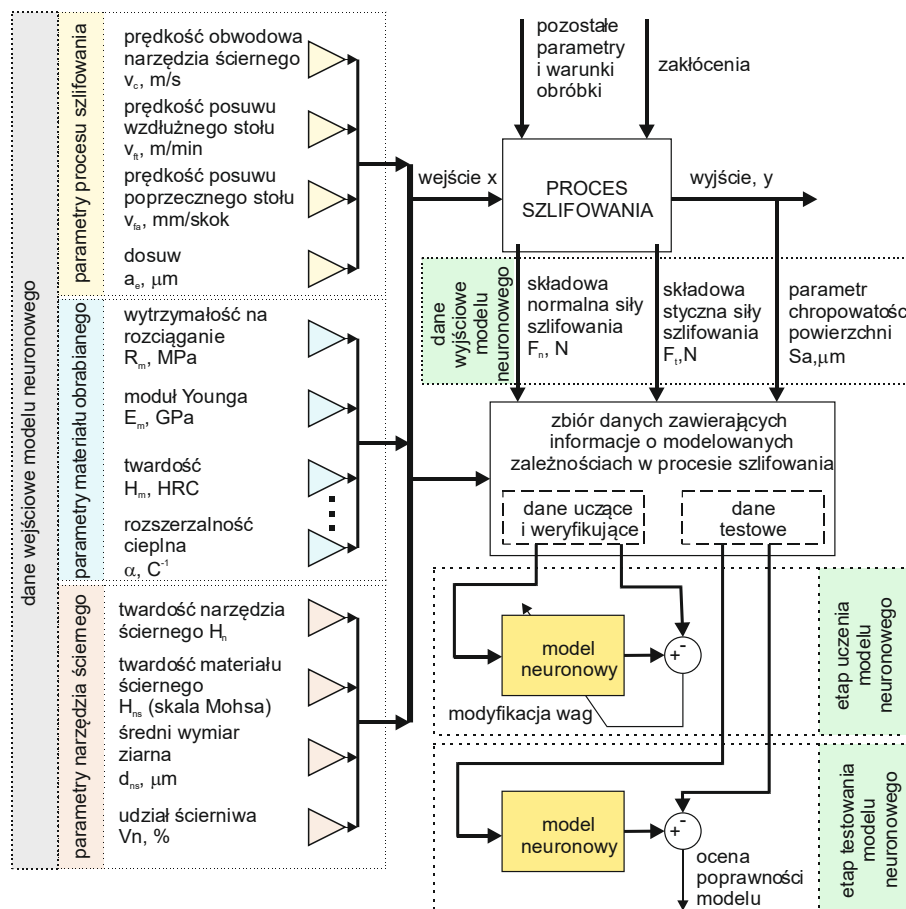


### 3.4. Modelowanie procesów szlifowania z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji

#### Modelowanie wpływu parametrów obróbki na wyniki procesu szlifowania z zastosowaniem sieci wielowarstwowej – określenie kryteriów wyboru modelu o wysokiej zdolności do uogólniania informacji zawartych w danych eksperymentalnych

Opracowano model neuronowy procesu szlifowania powierzchni płaskich opisujący zależności występujące między parametrami procesu szlifowania (dla określonych parametrów i właściwości materiału obrabianego i narzędzia ściernego) a chropowatością powierzchni obrobionej oraz składowymi siły szlifowania.

Metodykę tworzenia modelu neuronowego przedstawiono na rys. 29.



Rys. 29. Schemat metodyki tworzenia i oceny poprawności modelu neuronowego procesu szlifowania płaszczyzn

Dane do procesu uczenia i oceny poprawności modelu neuronowego uzyskano w wyniku eksperymentu. Proces szlifowania płaszczyzn prowadzono z wykorzystaniem szlifierki do płaszczyzn SPG 25x60 firmy FAS-Głowno oraz szlifierki SPC Jotes. Realizowano szlifowanie współbieżne obwodem ściernicy dla różnych par: przedmiot obrabiany - narzędzie. Szlifowaniu poddano próbki w kształcie prostopadłościanu o wymiarach 80×20×20 mm, wykonane ze: stali łożyskowej 100Cr6 (ŁH15) po hartowaniu (twardość 65HRC); stopu tytanu Ti-6Al-4V; stopu Inconel 718. Próbki szlifowano ściernicami z ziarnami ściernymi z elektrokorundu szlachetnego 99A o wymiarze 120 o twardości K (ściernica 1), M (ściernica 2) oraz P (ściernica 3).

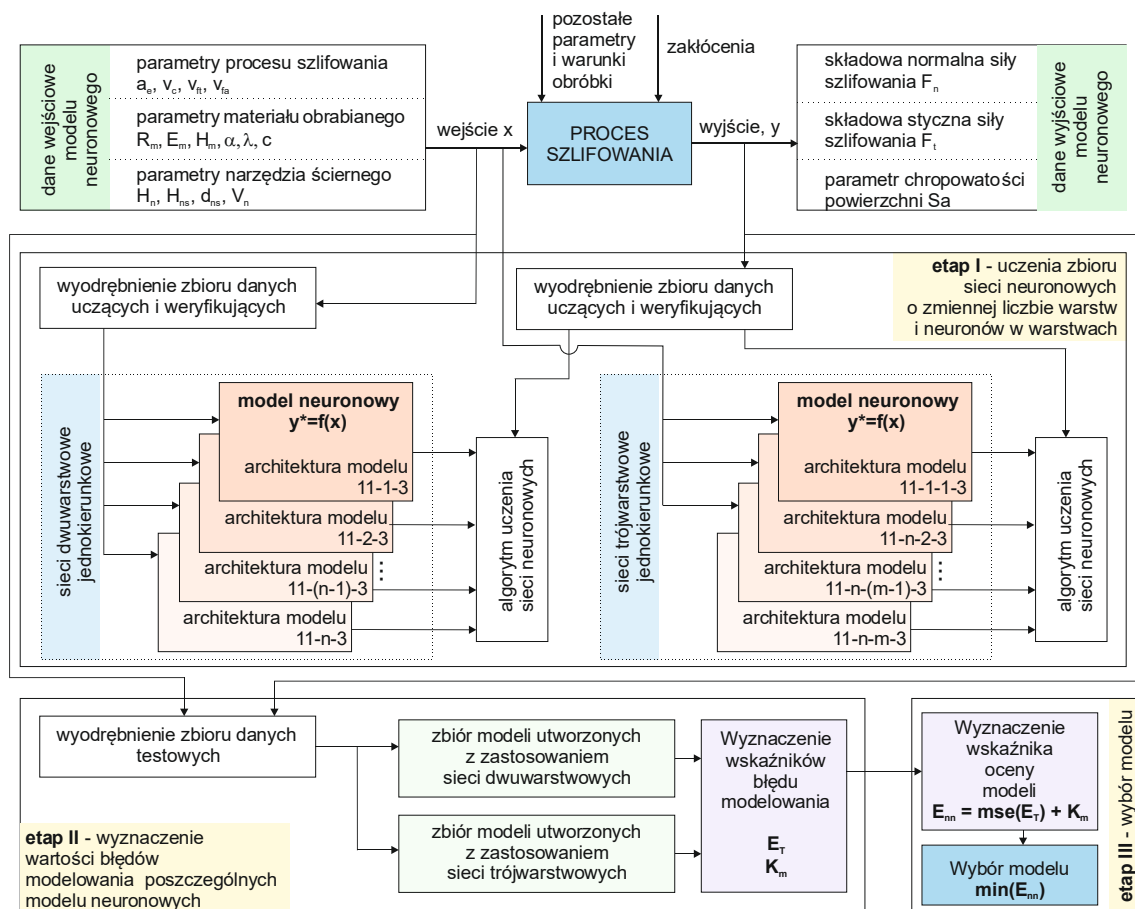
Dla każdej z pary narzędzie ściernie-przedmiot obrabiany zastosowano kompletny plan badań. Zakres zmienności parametrów nastawnych procesu obróbki zestawiono w tabeli 4.

Tabela. 4. Zestawienie parametrów i warunków obróbki

|   | Parametry procesu obróbki poszczególnych materiałów |                                  |                                     |
|---|---|----------------------------------|-------------------------------------|
|   | 100Cr6 (ŁH15)                                       | Ti-6Al-4V                        | Inconel 718                         |
| ściernica                                     | ściernica nr 1<br>ściernica nr 3                    | ściernica nr 1<br>ściernica nr 2 | ściernica nr 1                      |
| prędkość obwodowa narzędzia ściernego $v_c$   | 30 m/s  |                                  |                                     |
| prędkość przesuwu wzdłużnego stołu $v_{ft}$   | 5 m/min<br>15 m/min<br>25 m/min                     | 25 m/min                         | 2 m/min<br>3 m/min<br>4 m/min       |
| prędkość przesuwu poprzecznego stołu $v_{fa}$ | 3 mm/skok   | -                                | 1 mm/skok<br>2 mm/skok<br>4 mm/skok |
| dosuw $a_e$                                   | 5, 10, 20 $\mu\text{m}$                             |                                  |                                     |

Stanowisko badawcze wyposażono w tor pomiarowy umożliwiający rejestrowanie składowych siły szlifowania. Pomiaru składowych siły szlifowania dokonywano z zastosowaniem siłomierza piezoelektrycznego 9257B oraz wzmacniacza wielokanałowego 5070A12100 firmy Kistler. Topografię powierzchni obrobionej analizowano z zastosowaniem profilometru Talysurf CCI 6000.

Do poszukiwania optymalnej struktury modelu neuronowego zastosowano metodykę przedstawioną na rys. 30.



Rys. 30. Metodyka optymalizacji struktury modelu neuronowego

Ocenę modeli neuronowych prowadzono między innymi z zastosowaniem autorskiego wskaźnika pełniącego funkcję kary w analizie odpowiedzi modelu:

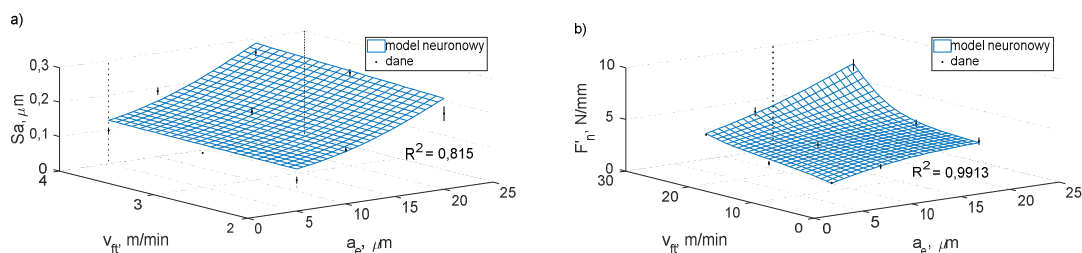
$$K_m = \frac{\text{numel}(\nabla Y \leq 0)}{\text{numel}(\nabla Y)}$$

gdzie:  $\nabla Y$ - gradient wartości modelowanej wyznaczany dla danej pary przedmiot obrabiany – narzędzie,  $\text{numel}(\cdot)$  – liczba elementów w zbiorze danych.

Wyniki modelowania z wykorzystaniem sieci trójwarstwowych wskazują na poprawność odwzorowania monotonicznych zależności dla poszczególnych par przedmiot obrabiany – narzędzie. W wyniku analizy odpowiedzi modelu neuronowego stwierdzono wysoką zdolność modelu do odwzorowania danych testowych. Najniższą wartość dopasowania odpowiedzi modelu neuronowego zaobserwowano dla wartości parametru  $Sa$  chropowatości powierzchni obrobionej.

Na niższą zdolność odwzorowania przez model neuronowy wartości parametrów  $Sa$  chropowatości powierzchni obrobionej wpływa fakt, że na jej wartość, oprócz wielkości ujętych jako wielkości wejściowe w opracowanym modelu, wpływają jeszcze wielkości związane ze zmianą stanu powierzchni czynnej narzędzia ściernego. Główną przyczyną zmian stanu powierzchni czynnej narzędzia ściernego są procesy zużycia narzędzia ściernego (wykruszenia ziaren ściernych lub ich fragmentów, starcia wierzchołków ziaren ściernych) oraz zjawiska zalepiania powierzchni czynnej narzędzia ściernego przez produkty ubytkowe procesu szlifowania. Wpływ tych czynników na wartość parametrów chropowatości powierzchni obrobionej nie jest ujęty w opracowanym modelu neuronowym, a charakter tych oddziaływań może być w nim określony jedynie pośrednio, poprzez zależność zmian powierzchni czynnej narzędzia ściernego od przyjętych parametrów i warunków obróbki.

Graficzną prezentację przykładowych wyników modelowania wpływu parametrów obróbki na wartość parametru  $Sa$  chropowatości oraz składową normalną właściwej siły szlifowania  $F_n'$  przedstawiono na rys. 31.



Rys. 31. Model neuronowy określający zależność między parametrami obróbki a wartościami: parametru  $Sa$  chropowatości powierzchni dla pary: stop Inconel 718 – ściernica 1 (a), składowej normalnej siły szlifowania  $F_n'$  dla pary: stal łóżyskowa 100Cr6 – ściernica 3 (b)

Dokładność modelowania wpływu parametrów i warunków obróbki na wartość parametru  $Sa$  chropowatości powierzchni obrobionej jest zróżnicowana. Dla różnych par przedmiot obrabiany – narzędzie ściernie jakość modelu cząstkowego określona wartością współczynnika  $R^2$  przyjmuje wartości od 0,7557 do 0,9956. Wartość współczynnika determinacji  $R^2$  modeli cząstkowych opisujących wpływ parametrów i warunków obróbki na składową właściwej siły szlifowania mieści się w zakresie od 0,91 do 0,99.

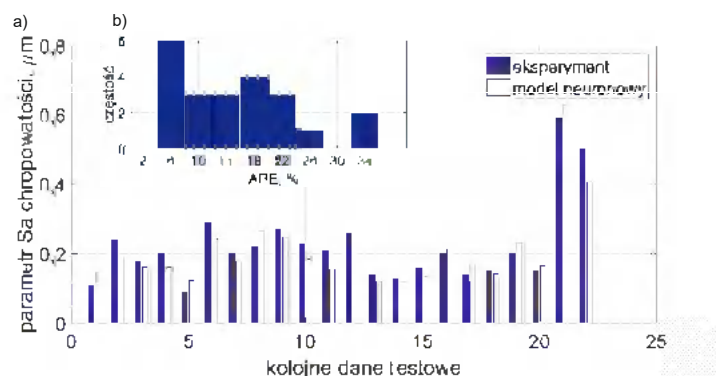
Wartość funkcji kary  $K_m$  dla modeli uzyskanych z zastosowaniem sieci trójwarstwowych przyjmuje wartości zerowe. Zastosowanie do oceny poprawności modelowania funkcji kary  $K_m$  powoduje, że opracowane modele cząstkowe mają postać funkcji ciągłej o wartościach

rosnących wraz ze wzrostem wartości parametrów obróbki. Odpowiada to charakterowi zależności zawartych w danych eksperymentalnych.

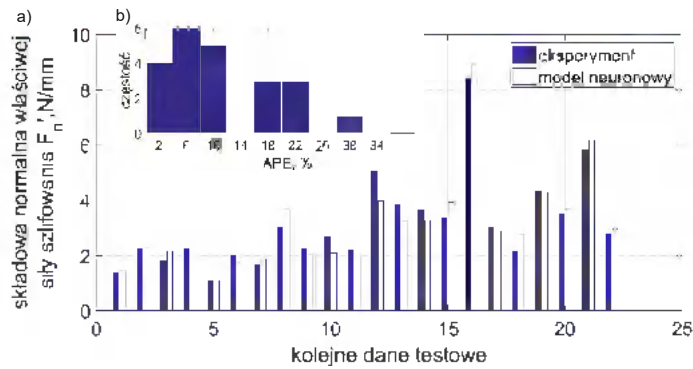
Zakres zastosowań modelu neuronowego może obejmować zadania związane z optymalizacją procesów obróbki ściernej oraz jego monitorowaniem. Skuteczność wypracowanych, w tym obszarze, decyzji zależy od zdolności modelu neuronowego do uogólniania wiedzy zawartej w danych uczących. Przedstawiona powyżej metodyka procesu uczenia modeli neuronowych oraz metodyka wyboru struktury sieci neuronowej ukierunkowana była na zapewnienie wysokiej zdolności do generalizowania wiedzy przez opracowany model neuronowy. W celu oceny tej zdolności przeprowadzono analizę modelu neuronowego w zakresie:

- zgodności odpowiedzi modelu neuronowego z wartością parametru  $Sa$  powierzchni obrobionej oraz wartościami składowych właściwej sił szlifowania  $F_n'$  i  $F_t'$  uzyskanymi w wyniku eksperymentu dla parametrów i warunków obróbki nieujętych w zbiorze uczącym;
- poprawności przebiegu opracowanych zależności opisujących wpływ parametrów obróbki na modelowane wielkości wyjściowe pomiędzy punktami eksperymentu (zdolność do poprawnej interpolacji danych);
- poprawności przebiegu opracowanych zależności opisujących wpływ parametrów obróbki na modelowane wielkości wyjściowe poza zakresem eksperymentu (zdolność do poprawnej ekstrapolacji danych).

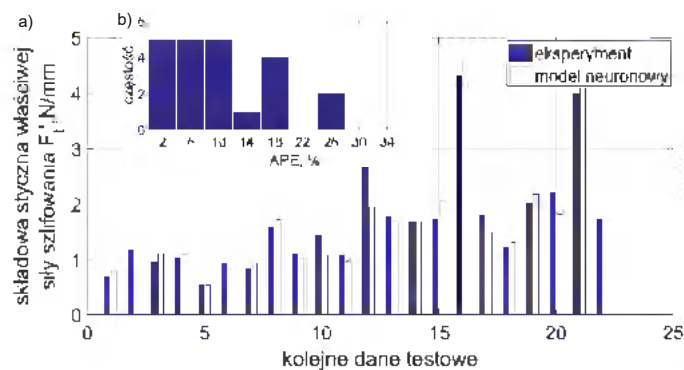
Ocena zgodności odpowiedzi modelu neuronowego na prezentację nowych danych została opracowana dla danych testowych, które nie były prezentowane sieci neuronowej w procesie jej uczenia. W celu określenia zdolności do predykcji opracowanego modelu neuronowego porównano wartości odpowiedzi modelu oraz wartości eksperymentalnych (rys. 32, 33 i 34). Wyznaczono również wartość procentowego błędu predykcji danych APE.



Rys. 32. Ocena zdolności do predykcji modelu neuronowego: wartości parametru  $Sa$  chropowatości dla danych eksperymentalnych oraz ich predykcja przez model neuronowy (a), rozkład wartości bezwzględnego procentowego błędu predykcji (b)



Rys. 33. Ocena zdolności do predykcji modelu neuronowego: wartości składowej normalnej właściwej  $F_n'$  siły szlifowania dla danych eksperymentalnych oraz ich predykcja przez model neuronowy (a), wartość bezwzględna procentowego błędu predykcji (b)

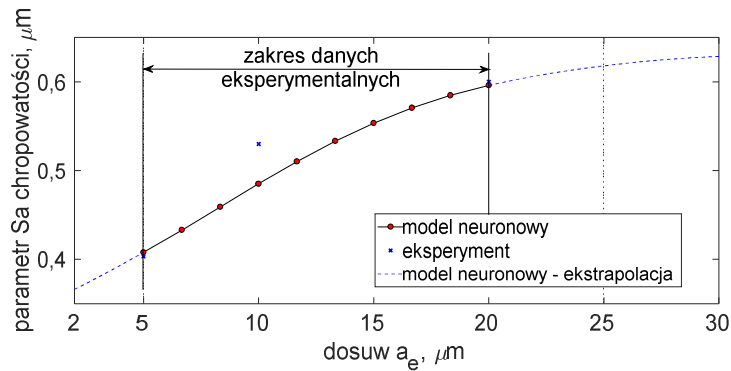


Rys. 34. Ocena zdolności do predykcji modelu neuronowego: wartości składowej stycznej właściwej siły szlifowania  $F_t'$  dla danych eksperymentalnych oraz ich predykcja przez model neuronowy (a), wartość bezwzględna procentowego błędu predykcji (b)

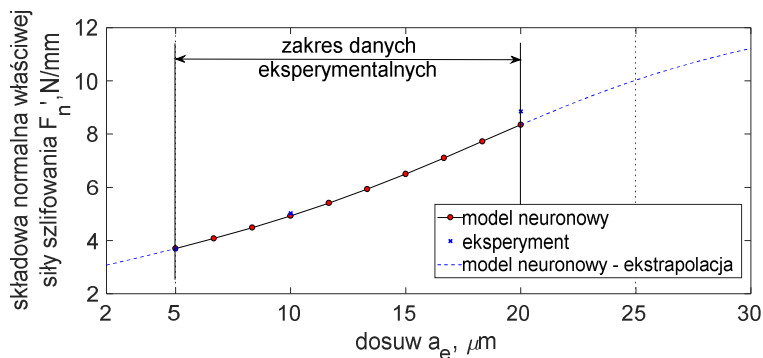
Opracowany model neuronowy charakteryzuje się dobrą zgodnością odpowiedzi modelu z wynikami eksperymentu dla danych nieujętych w zbiorze uczącym i mieszczących się w zakresie eksperymentu. Różnica wartości modelowych i rzeczywistych w przypadku modelowania wpływu parametrów obróbki na wartość parametru  $Sa$  chropowatości powierzchni obrobionej wynosi maksymalnie  $0,09 \mu\text{m}$  (rys. 32a). Wartość procentowego błędu predykcji danych wynosi średnio 16%, sięgając wartości maksymalnych wynoszących 34% (rys. 32b).

Poprawność odpowiedzi modelu neuronowego w przypadku modelowania wartości składowych właściwej siły szlifowania  $F_n'$  i  $F_t'$  kształtuje się na wyższym poziomie. Różnica wartości modelowych i rzeczywistych dla składowej normalnej właściwej siły szlifowania wynosi  $1,1 \text{ N/mm}$  (rys. 33a), natomiast wartość procentowego błędu predykcji danych wynosi średnio 11% (rys. 33b). Różnica wartości modelowych i rzeczywistych dla składowej stycznej właściwej siły szlifowania wynosi  $0,7 \text{ N/mm}$  (rys. 34a), natomiast wartość procentowego błędu predykcji danych wynosi średnio 10% (rys. 34b).

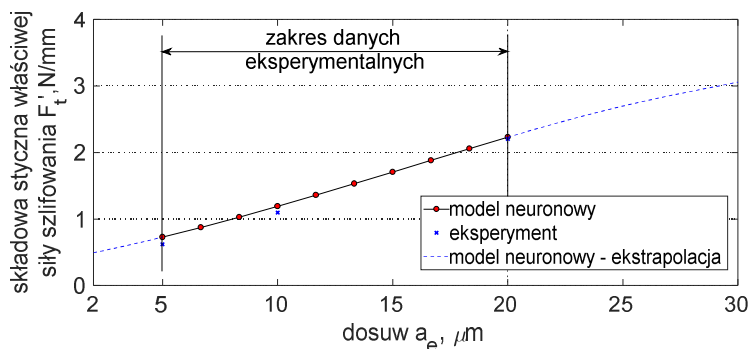
Istotnym czynnikiem wskazującym na zdolność do uogólniania wiedzy zawartej w danych eksperymentalnych jest poprawność przebiegu modelowanych wartości zarówno w zakresie objętym eksperymentem (zdolność do interpolacji danych) jak również dla danych wejściowych wykraczających poza zakres objęty eksperymentem (zdolność do ekstrapolacji danych). Przykładową analizę oceny wpływu parametrów obróbki na modelowane parametry wyjściowe przedstawiono na rys. 35, 36 i 37.



Rys. 35. Ocena zdolności do ekstrapolacji modelu dla parametru  $S_a$  chropowatości powierzchni; materiał obrabiany: stop Ti6Al4V, ściernica 2,  $v_{ft} = 25$  m/min,  $v_c = 30$  m/s



Rys. 36. Ocena zdolności do ekstrapolacji wartości składowej normalnej właściwej siły szlifowania  $F_n'$  przez opracowany model neuronowy; materiał obrabiany: stal tożyskowa 100Cr6, ściernica 3,  $v_{ft} = 25$  m/min,  $v_c = 30$  m/s



Rys. 37. Ocena zdolności do ekstrapolacji wartości składowej stycznej właściwej siły szlifowania  $F_t'$  przez opracowany model neuronowy; materiał obrabiany Inconel 718, ściernica 1,  $v_{ft} = 4$  m/min,  $v_c = 30$  m/s

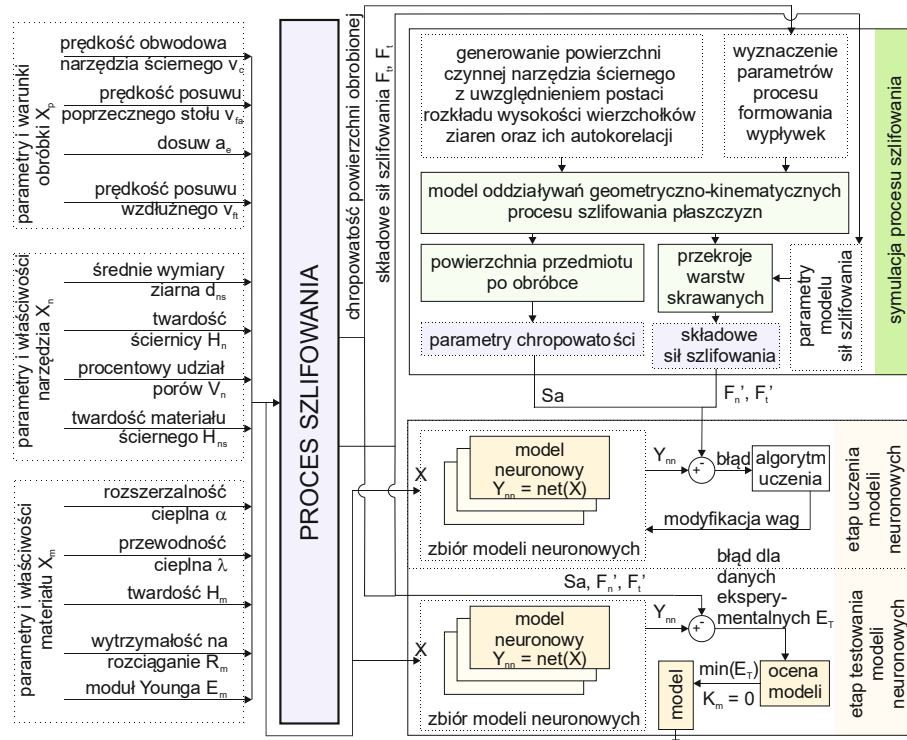
Utrata zdolności do uogólniania wiedzy zawartej w danych eksperymentalnych objawia się dobrym dopasowaniem odpowiedzi modelu neuronowego do danych eksperymentalnych oraz dużą zmiennością przebiegu modelowych zmiennych pomiędzy punktami ujętymi w planie eksperymentu. Odpowiedzi model neuronowego na prezentacje nowych danych nie wskazują na występowanie gwałtownych zmian w przebiegach modelowanych zależności wynikających z nadmiernego dopasowania do danych uczących. Zarówno przebiegi wartości parametru  $S_a$  chropowatości powierzchni (rys. 35) jak i wartości składowych właściwej siły szlifowania  $F_n'$  (rys. 36) i  $F_t'$  (rys. 37) nie wskazują na zmianę charakteru i siły wpływu wielkości

wyjściowych zarówno w zakresie objętym eksperymentem jak i poza nim. Wysoka zdolność do interpolacji i ekstrapolacji danych jest wynikiem zastosowanego kryterium wyboru struktury sieci neuronowej obejmującego analizę charakteru i siły wpływu wielkości wyjściowych modelu dla danej pary przedmiot obrabiany - narzędzie.

### Integracja danych eksperymentalnych oraz wiedzy analitycznej z wykorzystaniem modeli neuronowych

Tworzenie uniwersalnych systemów wspomagających proces automatyzacji obróbki ściernej wymaga opracowania metod dostosowania postaci modelu procesu oraz optymalizacji jego parametrów. Jak wskazano w powyższym podpunkcie efektywnym rozwiązaniem, jest w takim przypadku tworzenie modelu z zastosowaniem sieci neuronowych. Jednakże stosowanie modeli neuronowych wymaga przeprowadzenia szeregu eksperymentów w celu uzyskania zbioru danych wykorzystywanych do uczenia, weryfikacji i testowania modelu neuronowego. Zwiększenie uniwersalności modeli neuronowych oraz zwiększenie zakresu ich użytkowania możliwe jest przez wykorzystanie wyników symulacji procesu szlifowania. Modele zawarte w procedurach symulacyjnych stanowią połączenie zarówno modeli analitycznych jak i doświadczalnych, a same procedury symulacyjne umożliwiają uzyskanie informacji o wielu niemierzalnych parametrach procesu obróbki. Ponadto modele symulacyjne pozwalają na prowadzenie badań nad procesem szlifowania równocześnie dla szerokiego zakresu parametrów wejściowych.

Metodykę tworzenia modelu neuronowego z zastosowaniem symulacji procesu szlifowania przedstawiono na rys. 38.



Rys. 38. Schemat procesu uczenia i testowania modelu neuronowego z zastosowaniem danych eksperymentalnych oraz symulacji procesu szlifowania

Parametry procesu symulacji dobrano tak, aby zapewnić zgodność parametrów i warunków obróbki z wynikami procesu określonymi zarówno poprzez wartości monitorowanych zmiennych procesowych (np. składowe siły szlifowania) jak i przez wartości nadzorowanych



parametrów stereometrycznych powierzchni obrobione (np. parametr  $Sa$  chropowatości powierzchni obrobionej).

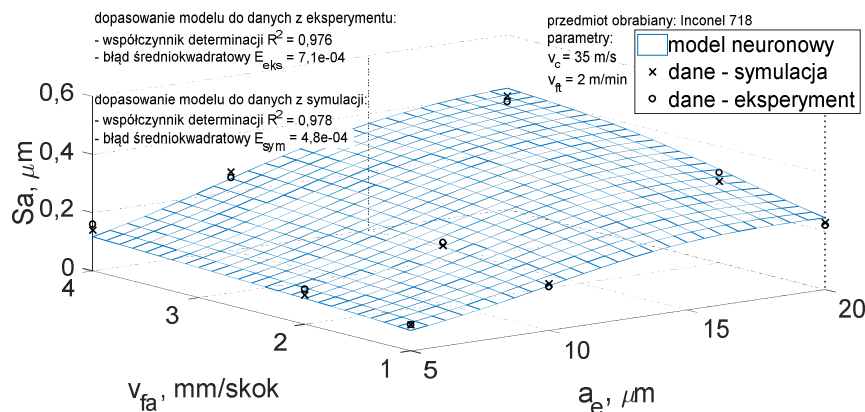
Procedura strojenia parametrów procedur symulacyjnych zakłada określenie między innymi:

- parametrów opisujących kształtu ziaren ściernych oraz parametrów rozkładu rozmieszczenia ziaren ściernych na powierzchni czynnej narzędzia ściernego;
- parametrów opisujących efektywność usuwania materiału przez ziarno ściernie (ze szczególnym uwzględnieniem wielkości wypływek bocznych materiału).

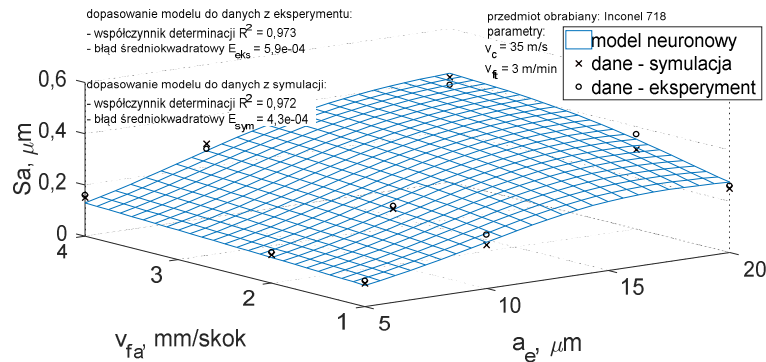
Wyniki kolejnych symulacji procesu szlifowania wykorzystano w procesie tworzenia modelu neuronowego. Analiza poprawności opracowanego modelu neuronowego została przeprowadzona na podstawie wyników eksperymentu procesu szlifowania. Badania procesu szlifowania współbieżnego obwodem ściernicy przeprowadzono na szlifierce do płaszczyzn SPG 25×60 CNC firmy FAS–Główno. Szlifowano próbki o wymiarach 80×20×15 mm wykonane ze stopu Inconel 718. Materiał szlifowano z zastosowaniem ściernicy elektrokorundowej o oznaczeniu 99A120K7VE01 firmy Andre Abrasive Articles. Badania przeprowadzono dla stałej wartości prędkości obwodowej ściernicy  $v_c = 35$  m/s. Wartość dosuwu  $a_e$  przyjęto w zakresie od 5  $\mu\text{m}$  do 20  $\mu\text{m}$ , prędkość posuwu wzdłużnego  $v_{ft}$  w zakresie od 2 m/min do 4 m/min, prędkość posuwu poprzecznego  $v_{fa}$  od 1 mm/skok do 4 mm/skok.

Powierzchnie obrobione poddano analizie z zastosowaniem systemu pomiarowego Talysurf CCI 6000 firmy Taylor Hobson. Pomiary przeprowadzono z zastosowaniem powiększenia 20x. Mierzono fragmenty powierzchni o wymiarze 0,899 x 0,899 mm. Powierzchnię wynikową uzyskano przez uśrednianie wyników dwóch kolejnych pomiarów tego samego fragmentu powierzchni. Do oceny parametrów geometrycznych powierzchni obrobionych zastosowano oprogramowanie TalyMap.

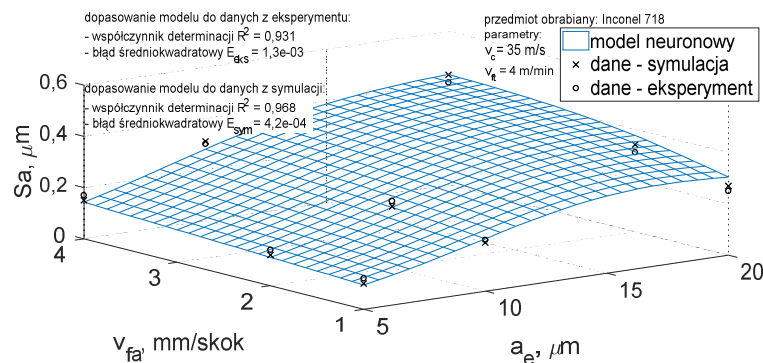
Przykładowe zależności określające wpływ wartości dosuwu  $a_e$ , prędkości przesuwu poprzecznego  $v_{fa}$  oraz prędkości przesuwu wzdłużnego  $v_{ft}$  na wartość parametru  $Sa$  powierzchni obrobionej przedstawiono na rysunkach 39, 40 i 41.



Rys. 39. Wyniki modelowania wpływu parametrów obróbki na parametr  $Sa$  chropowatości powierzchni obrobionej dla stopu Inconel 718 ( $v_{ft} = 2$  m/min)



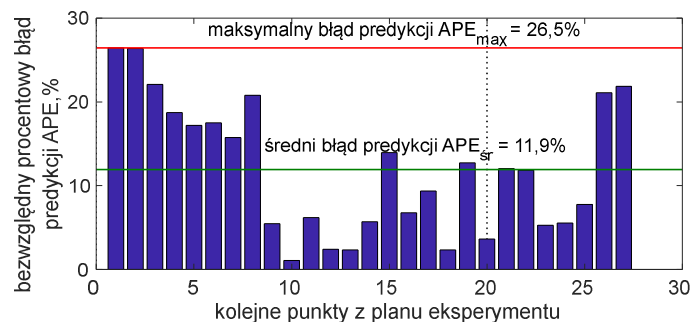
Rys. 40. Wyniki modelowania wpływu parametrów obróbki na parametr  $Sa$  chropowatości powierzchni obrabianej dla stopu Inconel 718 ( $v_{ft} = 3$  m/min)



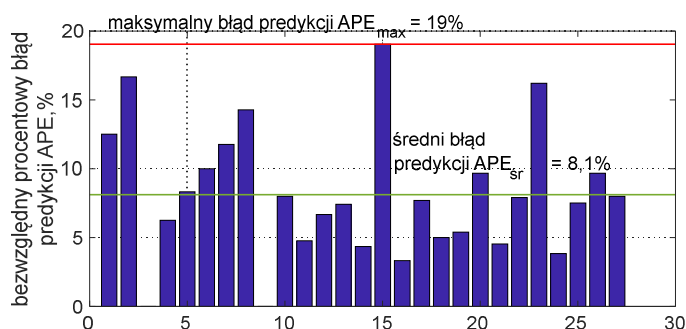
Rys. 41. Wyniki modelowania wpływu parametrów obróbki na parametr  $Sa$  chropowatości powierzchni obrabianej dla stopu Inconel 718 ( $v_{ft} = 4$  m/min)

W opracowanych zależnościach zauważalny jest znaczący wpływ wielkości usuwanego nadatku  $a_e$  na wartość parametru  $Sa$  chropowatości powierzchni. Wpływ wartości prędkości posuwu poprzecznego  $v_{fa}$  wzrasta wraz ze wzrostem wielkości nadatku, zmieniając swój charakter z liniowego na potęgowy. Model neuronowy, z uwagi na niejawną postać modelowanych zależności ujętą w wartościach połączeń wagowych, umożliwia uwzględnienie zmiany tego charakteru.

Zbliżony stopień dopasowania modelu zarówno do danych pochodzących z symulacji procesu szlifowania jak i do danych eksperymentalnych wskazuje na brak efektu przeczenia sieci. W celu szczegółowej analizy oceny dokładności dopasowania modelu wyznaczono bezwzględny błąd procentowy odpowiedzi modelu neuronowego oraz wyników symulacji procesu obróbki w odniesieniu do danych eksperymentalnych. Wyniki analiz zestawiono na rysunkach 42 i 43.



Rys. 42. Bezwzględny procentowy błąd predykcji wartości parametru  $Sa$  chropowatości powierzchni dla modelu neuronowego



Rys. 43. Bezwzględny procentowy błąd predykcji wartości parametru  $S_a$  chropowatości powierzchni dla symulacji procesu szlifowania

Średni błąd predykcji wartości parametru  $S_a$  chropowatości powierzchni modelu neuronowego wynosi około 12% (rys. 42). Poprawność odwzorowania danych eksperymentalnych modelu wynika głównie ze zgodności odpowiedzi modelu symulacyjnego z danymi eksperymentalnymi, dla których średni błąd predykcji wynosi około 8% (rys. 43). Problemem w osiągnięciu wysokich zgodności parametrów chropowatości powierzchni uzyskanej w wyniku symulacji oraz powierzchni rzeczywistej, jest dokładne odwzorowanie struktury stereometrycznej powierzchni przed obróbką oraz powierzchni czynnej narzędzia ściernego. Dokładność odwzorowania wymagana jest nie tylko w sensie statystycznym, ale przede wszystkim pod względem odwzorowania cech stereometrycznych decydujących o liczbie oraz rodzaju kontaktów ziaren ściernych z powierzchnią obrabianą. Problem ten nabiera decydującego znaczenia w przypadku obróbki z niewielkim dosuwem oraz małą prędkością przesuwu stycznego stołu skutkującymi małymi przekrojami warstw skrawanych. Ponadto rozbieżności między wartościami parametrów  $S_a$  chropowatości powierzchni rzeczywistych i modelowych może być spowodowana brakiem implementacji w modelach komputerowych zjawiska wykruszania ziaren ściernych i ich oddziaływań w strefie obróbki.

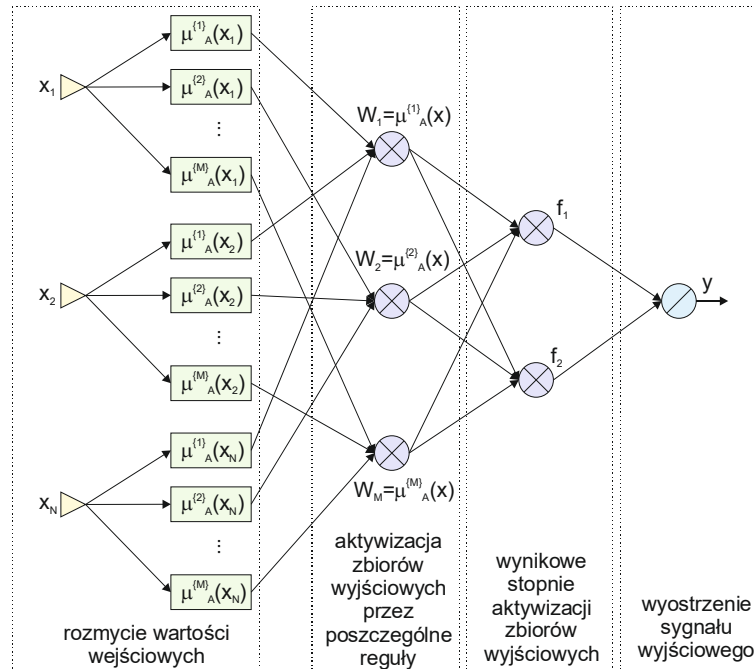
Problemem w opracowaniu zależności neuronowych dla szerokiego zakresu parametrów i warunków obróbki jest konieczność posiadania pełnego zestawu danych umożliwiającego przeprowadzenie procesu uczenia sieci. Zastosowanie systemów symulacji procesów szlifowania oraz opracowanie procedur strojenia parametrów symulacji na podstawie danych eksperymentalnych umożliwia analizę wpływu parametrów i warunków obróbki na wyniki procesu szlifowania. Wykorzystując procedury symulacji procesu szlifowania możliwe jest uzyskanie danych na podstawie wybiórczego planu eksperymentu, którego wyniki zostaną wykorzystane w procesie uczenia sieci neuronowej.

Integracja źródeł informacji (pochodzących z systemów symulacji procesów szlifowania oraz danych eksperymentalnych) umożliwia uzyskanie efektu synergii zapewniającego opracowanie modeli dla szerokiego zakresu zastosowań. Zastosowanie metod symulacji numerycznych procesu szlifowania oraz metod sztucznej inteligencji umożliwia prognozowanie stanu procesu, stanowić może również podstawę oceny skutków technologicznych wypracowanych decyzji optymalizacyjnych.

### Ekstrakcja wiedzy o wpływie parametrów obróbki na wyniki procesu szlifowania

Zaletą wykorzystania modeli wnioskowania rozmytego do modelowania procesów obróbki ścierniej jest łatwość interpretacji zależności opisujących wpływ wielkości nastawnych procesu na jego wielkości wynikowe. Zaletą tą wynika z zapisu sposobu działania modeli rozmytych, który to przedstawiony jest w postaci prostych do interpretacji reguł lingwistycznych.

Tworzenie modelu rozmytego dla systemu z wieloma wejściami, o dużej liczbie reguł, jest procesem złożonym ze względu na wzrastającą liczbę parametrów takiego modelu. Dlatego coraz częściej do modelowania stosuje się sieci neurorozmyte pozwalające na wyznaczenie parametrów modelu rozmytego z zastosowaniem algorytmów uczenia sieci neuronowych. Sieci neurorozmyte umożliwiają automatyzację procesu tworzenia modelu Takagi-Sugeno-Kang. Typową strukturę sieci neurorozmytej o  $M$  regułach i  $N$  wejściach przedstawiono na rys. 44.



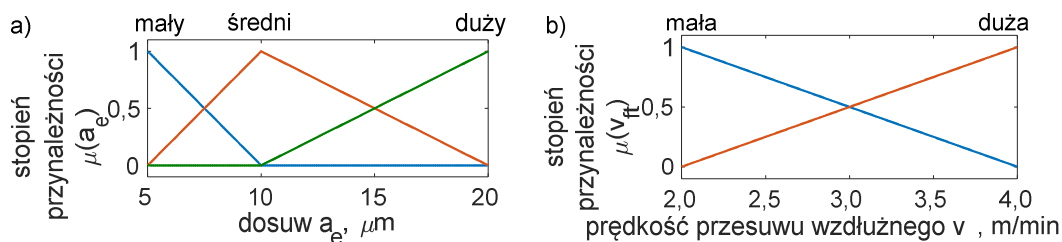
Rys. 44. Struktura sieci neurorozmytej

Rozmyte modele neuronowe łącząc w sobie zalety obu metod umożliwiają wprowadzenie do struktury modelu posiadanej wiedzy eksperckiej o modelowanym procesie. Dobór parametrów funkcji przynależności w modelowaniu rozmytym następuje z wykorzystaniem metod powszechnie dostępnych przy uczeniu sztucznych sieci neuronowych.

Wykorzystując wyniki badań eksperymentalnych zawierających informacje o wpływie dosuwu  $a_e$ , prędkości posuwu wzdłużnego  $v_{ft}$  oraz prędkości posuwu poprzecznego  $v_{fa}$  na wartość parametru  $Sa$  chropowatości powierzchni obrabianej stopu Inconel 718 opracowano model typu Takagi-Sugeno-Kang opisujący te zależności.

Z uwagi na czytelność reguł modelu zastosowano trójkątne oraz trapezowe funkcje przynależności  $\mu$  przyporządkowujące każdemu elementowi przestrzeni numerycznej zmiennych wejściowych stopień przynależności do poszczególnych kategorii w przestrzeni lingwistycznej. Założono rozkład funkcji przynależności w przestrzeni numerycznej zmiennych z zachowaniem reguły, że suma wartości funkcji przynależności w dowolnym punkcie przestrzeni numerycznej daje wartość równą 1. Wartości węzłowe funkcji przynależności przyjęto zgodnie z planem eksperymentu.

Graficzne przedstawienie funkcji przynależności wybranych wielkości wejściowych do poszczególnych kategorii przedstawiono na rys. 45.



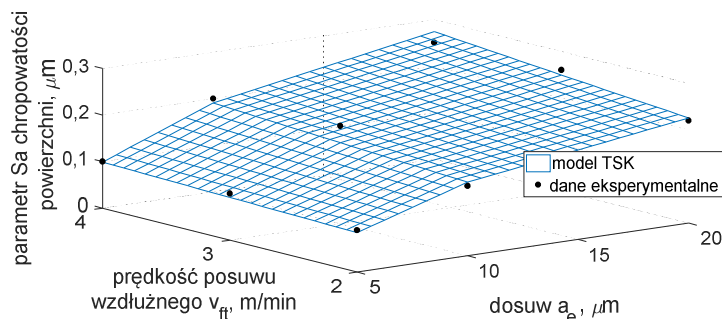
Rys. 45. Rozkład funkcji przynależności w przestrzeni numerycznej zmiennej wejściowej dla: dosuwu  $a_e$  (a) oraz prędkości przesuwu wzdłużnego  $v_{ft}$  (b)

Utworzono sieć neuronową o 12 neuronach w warstwie ukrytej. Liczba neuronów w warstwie ukrytej odpowiadała liczbie reguł rozmytych wynikających z iloczynu liczby kategorii rozmytych poszczególnych wejść modelu. W wyniku procesu uczenia modelu otrzymano poniższy wynikowy zestaw reguł (tab. 5).

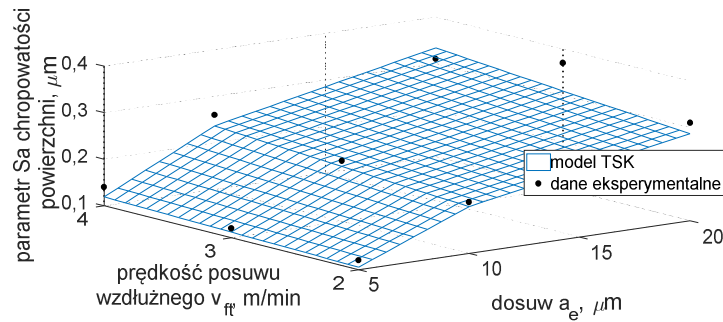
Tab. 5. Wynikowy zestaw reguł modelu rozmytego typu Takagi-Sugeno-Kang

| Reguła     | Wejście modelu |   |                |   |                |    | Wyjście modelu |  |
|------------|----------------|---|----------------|---|----------------|----|----------------|--|
| 1. Jeżeli  | $a_e$ =mały    | i | $v_{ft}$ =mała | i | $v_{fa}$ =mała | to | $S_a=0,085$    |  |
| 2. Jeżeli  | $a_e$ =mały    | i | $v_{ft}$ =mała | i | $v_{fa}$ =duża | to | $S_a=0,143$    |  |
| 3. Jeżeli  | $a_e$ =mały    | i | $v_{ft}$ =duża | i | $v_{fa}$ =mała | to | $S_a=0,099$    |  |
| 4. Jeżeli  | $a_e$ =mały    | i | $v_{ft}$ =duża | i | $v_{fa}$ =duża | to | $S_a=0,155$    |  |
| 5. Jeżeli  | $a_e$ =średni  | i | $v_{ft}$ =mała | i | $v_{fa}$ =mała | to | $S_a=0,157$    |  |
| 6. Jeżeli  | $a_e$ =średni  | i | $v_{ft}$ =mała | i | $v_{fa}$ =duża | to | $S_a=0,276$    |  |
| 7. Jeżeli  | $a_e$ =średni  | i | $v_{ft}$ =duża | i | $v_{fa}$ =mała | to | $S_a=0,191$    |  |
| 8. Jeżeli  | $a_e$ =średni  | i | $v_{ft}$ =duża | i | $v_{fa}$ =duża | to | $S_a=0,319$    |  |
| 9. Jeżeli  | $a_e$ =duży    | i | $v_{ft}$ =mała | i | $v_{fa}$ =mała | to | $S_a=0,225$    |  |
| 10. Jeżeli | $a_e$ =duży    | i | $v_{ft}$ =mała | i | $v_{fa}$ =duża | to | $S_a=0,396$    |  |
| 11. Jeżeli | $a_e$ =duży    | i | $v_{ft}$ =duża | i | $v_{fa}$ =mała | to | $S_a=0,274$    |  |
| 12. Jeżeli | $a_e$ =duży    | i | $v_{ft}$ =duża | i | $v_{fa}$ =duża | to | $S_a=0,442$    |  |

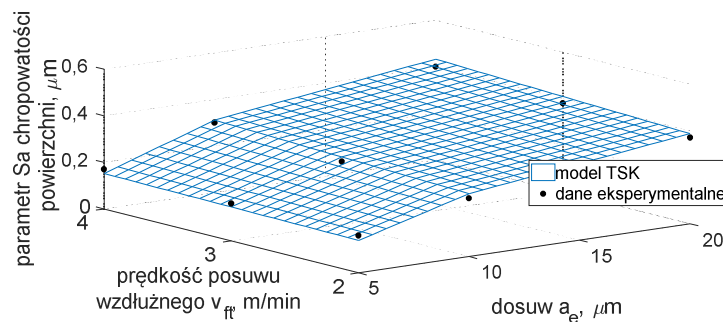
Przykładowe wyniki modelowania wpływu parametrów nastawnych procesu na wartość parametru  $S_a$  chropowatości powierzchni z zastosowaniem powyższych reguł przedstawiono na rysunkach 46, 47 i 48.



Rys. 46. Wyniki modelowania, z zastosowaniem modelu TSK, wpływu parametrów obróbki na parametr  $S_a$  chropowatości powierzchni obrobionej dla stopu Inconel 718 ( $v_{ft} = 2 \text{ m/min}$ )



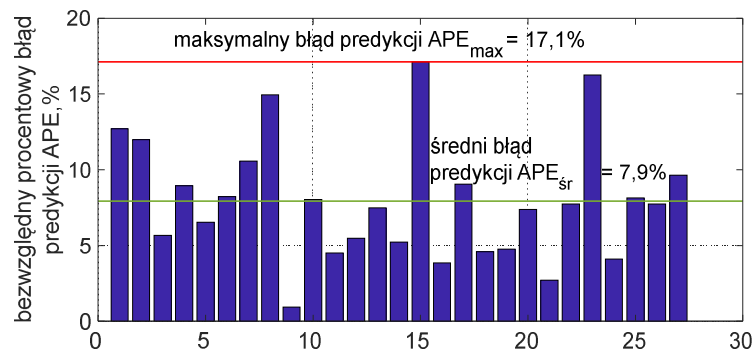
Rys. 47. Wyniki modelowania, z zastosowaniem modelu TSK, wpływu parametrów obróbki na parametr  $S_a$  chropowatości powierzchni obrabianej dla stopu Inconel 718 ( $v_{ft} = 3 \text{ m}/\text{min}$ )



Rys. 48. Wyniki modelowania, z zastosowaniem modelu TSK, wpływu parametrów obróbki na parametr  $S_a$  chropowatości powierzchni obrabianej dla stopu Inconel 718 ( $v_{ft} = 4 \text{ m}/\text{min}$ )

Zmienność parametru  $S_a$  chropowatości powierzchni następująca wraz ze zmianą parametrów nastawnych procesu jest wyjaśniona w około 95% przez opracowany model TSK (średnia wartość współczynniki determinacji  $R^2 = 0,95$ ). Wpływ wartości dosuwu  $a_e$ , prędkości przesuwu wzdłużnego  $v_{ft}$  oraz poprzecznego stołu  $v_{fa}$  na wartość parametru  $S_a$  chropowatości powierzchni opisany jest prostym w interpretacji zbiorem reguł. Otrzymany zbiór reguł ma charakter uniwersalny. Jego dostosowanie do modelowania procesów obróbki materiałów o odmiennej charakterystyce wymaga zmiany następników reguł lingwistycznych i może być dokonane przez operatora na podstawie wyników badań eksperymentalnych.

Błąd predykcji wartości parametru  $S_a$  chropowatości powierzchni wynosi średnio około 8% (rys. 49).



Rys. 49. Bezwzględny procentowy błąd predykcji, przez model TSK, wartości parametru  $S_a$  chropowatości powierzchni

Odpowiedź modelu TSK stanowi funkcję odcinkami liniową. Zatem jej zgodność w obszarach nieujętych w zbiorze uczącym może odbiegać od wartości rzeczywistych w zależności od stopnia odstępstwa przebiegu rzeczywistego od modelu liniowego. Problem ten może być zminimalizowany przez zwiększenie liczby kategorii rozmytych w definicji wielkości wejściowych i wyjściowych modelu. Skutkuje, to jednakże zwiększeniem liczby reguł modelu, a tym samym pogarsza jego czytelność oraz łatwość interpretacji.

**W wyniku przeprowadzonych badań i analiz dotyczących modelowania procesów obróbki ścierniej z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji sformułowano poniższe wnioski:**

- Ocena poprawności modelu neuronowego na podstawie wyłącznie wartości błędu wyznaczonego dla zbioru danych testowych nie pozwala na pełną ocenę poprawności odwzorowania zależności występujących w zbiorze danych eksperymentalnych. Pomimo wysokiego stopienia dopasowania modelu do danych zawartych w zbiorze testowych, charakter przebiegu zależności między punktami ujętymi w planie eksperymentu może mieć charakter wskazujący na efekt przeuczenia sieci neuronowej.
- Wprowadzenie do oceny modelu neuronowego zaproponowanej funkcji kary  $K_m$  określającej poprawność odwzorowania charakteru wpływu parametru obróbki na modelowane wartości wynikowe umożliwia wybór ze zbioru modeli neuronowych modelu o wysokiej zdolności do uogólniania informacji zawartych w zbiorze danych uczących.
- Utworzony, z zastosowaniem opracowanej metodyki, model neuronowy opisujący wpływ parametrów obróbki (dosuwu  $a_e$ , prędkości przesuwu wzdłużnego stołu  $v_{ft}$  oraz prędkości przesuwu poprzecznego stołu  $v_{fa}$ ) na wielkości wynikowe procesu (parametr  $Sa$  chropowatości powierzchni oraz wartości składowych właściwej siły szlifowania  $F_n'$  i  $F_t'$ ) dla różnych właściwości przedmiotów obrabianych oraz narzędzi ściernych charakteryzuje się wysokim stopniem dopasowania do danych eksperymentalnych (średnia wartość współczynnika regresji  $R = 0,985$ , wartość funkcji kary  $K_m = 0$ ).
- Zmienność składowych właściwej siły szlifowania  $F_n'$  i  $F_t'$  została w 97% procentach wyjaśniona przez opracowany model neuronowy (średnia wartość współczynnika determinacji  $R^2 = 0,97$ ). Zmienność wartości parametru  $Sa$  chropowatości została wyjaśniona w 87% procentach (średnia wartość współczynnika determinacji  $R^2 = 0,87$ ). Mniejsza zdolność modelu do odwzorowania wpływu przyjętych parametrów i warunków obróbki na wartość  $Sa$  chropowatości powierzchni jest związana z mnogością czynników wpływających na parametry chropowatości powierzchni oraz złożonym mechanizmem kumulacji skutków ich oddziaływań.
- Średni bezwzględny błąd prognozowania opracowanego modelu neuronowego wynosi: dla wartości parametru  $Sa$  chropowatości powierzchni 16%, dla wartości składowych właściwej siły szlifowania odpowiednio 11% i 10%.
- Proces uczenia sieci neuronowej może być wspomagany przez wykorzystanie danych pochodzących z symulacji procesu obróbki ścierniej. Wymaga to przeprowadzenia procesu doboru parametrów modeli symulacyjnych, tak aby zapewnić wysoką zgodność wyników eksperymentu numerycznego z wynikami badań eksperymentalnych.



- Integracja danych pochodzących z badań eksperymentalnych oraz wiedzy analitycznej ujętej w procedurach symulacji procesu obróbki ścierniej pozwala na uzyskanie zbioru danych pełniej opisującego charakter modelowanych zależności. Zastosowanie powyższej procedury umożliwiło opracowanie modelu opisującego wpływ parametrów nastawnych procesu szlifowania stopu Inconel 718 na wartość parametru  $Sa$  chropowatości powierzchni o wyższym (o około 9%) stopniu dopasowania do danych eksperymentalnych niż w przypadku modelu opracowanego wyłącznie na podstawie danych eksperymentalnych. Opracowany model charakteryzował się również mniejszym o 6% bezwzględnym błędem prognozowania wartości parametru  $Sa$  chropowatości powierzchni.
- Zastosowanie modeli rozmytych typu Takagi-Sugeno-Kang pozwoliło na określenie zależności występujących między parametrami nastawnymi procesu (dosuwem  $a_e$ , prędkością przesuwu wzdłużnego  $v_{ft}$  i poprzecznego  $v_{fa}$ ) a jego wielkościami wyjściowymi (wartością parametru  $Sa$  chropowatości powierzchni) w formie reguł lingwistycznych. Zastosowanie w modelu jako funkcji przynależności funkcji odcinkami liniowych oraz wyznaczenie ich parametrów z zachowaniem tzw. reguły jedyńki (suma funkcji przynależności dla dowolnej wartości z przestrzeni numerycznej zmiennej wynosi 1) pozwala na łatwą interpretację zależności występujących w modelu bez istotnego pogorszenia stopnia dopasowania modelu do danych eksperymentalnych (wartość współczynnika determinacji modelu rozmytego  $R^2 = 0,95$ , wartość współczynnika determinacji modelu neuronowego  $R^2 = 0,96$ ). Opracowane reguły lingwistyczne umożliwiają ich interpretację i modyfikację przez operatora procesu.

**Szczegółową analizę powyżej opisanych zagadnień zawarto w zbiorze publikacji:**

11. **Lipiński D.**, *Podstawy modelowania i optymalizacji procesu szlifowania powierzchni płaskich z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji*, Monografia Wydziału Mechanicznego, Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2018, ISSN 0239-7129, ISBN 978-83-7365-484-6.
12. **Lipiński D.**, Bałasz B. Rypina Ł., *Modelling of surface roughness and grinding forces using artificial neural networks with assessment of the ability to data generalisation*, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 94, str. 1335-1347.
13. **Lipiński D.**, Kacalak W., Szafraniec F., Tomkowski R., *Metodyka tworzenia modeli neuronowych procesu szlifowania z wykorzystaniem wiedzy analitycznej i doświadczalnej*, *Mechanik*, 8-9, 2014, str. 255-260.

### 3.5. Optymalizacja procesów szlifowania powierzchni płaskich

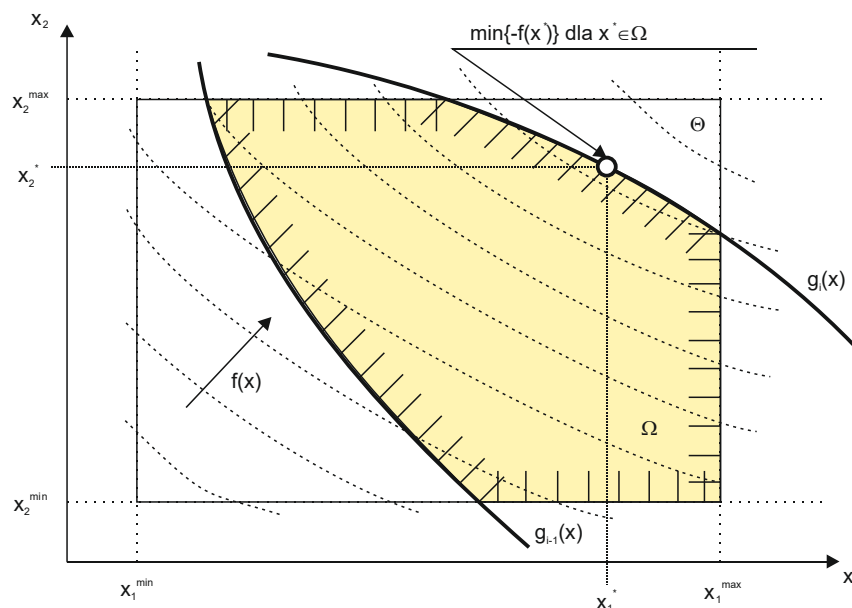
Zagadnienia optymalizacji procesów wytwarzania stanowią jeden z podstawowych problemów w obszarze planowania i sterowania procesami produkcyjnymi. Wynika to zarówno z potrzeby wyznaczenia parametrów obróbki zapewniających uzyskanie określonych wielkości wynikowych procesu, jak również z potrzeby aktywnego nadzorowania procesów obróbki w cyklu automatycznym.

Zagadnienie optymalizacji procesu obróbki ścierniej, w sposób ogólny można przedstawić jako problem minimalizacji wartości przyjętych kryteriów oceny:  $\min\{f(x)\}$ , gdzie:  $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$  to parametry nastawne procesu,  $n$  – liczba parametrów nastawnych procesu,  $f(\cdot)$  – kryterium oceny określające wpływ parametrów nastawnych procesu na wielkości wynikowe procesu.

Ocenę procesów szlifowania można prowadzić z uwzględnieniem szeregu kryteriów związanych z oceną parametrów jakościowych wytwarzanych elementów, oceną wielkości ekonomicznych, czy też energetycznych związanych z procesem obróbki.

Ograniczenia  $g$  nałożone na proces szlifowania wynikają najczęściej z właściwości urządzeń technologicznych oraz narzędzia ściernego, jak również z wpływu parametrów obróbki na wzrost skutków niekorzystnych dla jakości obróbki.

Ogólne ujęcie problemu optymalizacji procesów obróbki ścierniej przedstawiono na rysunku 50.



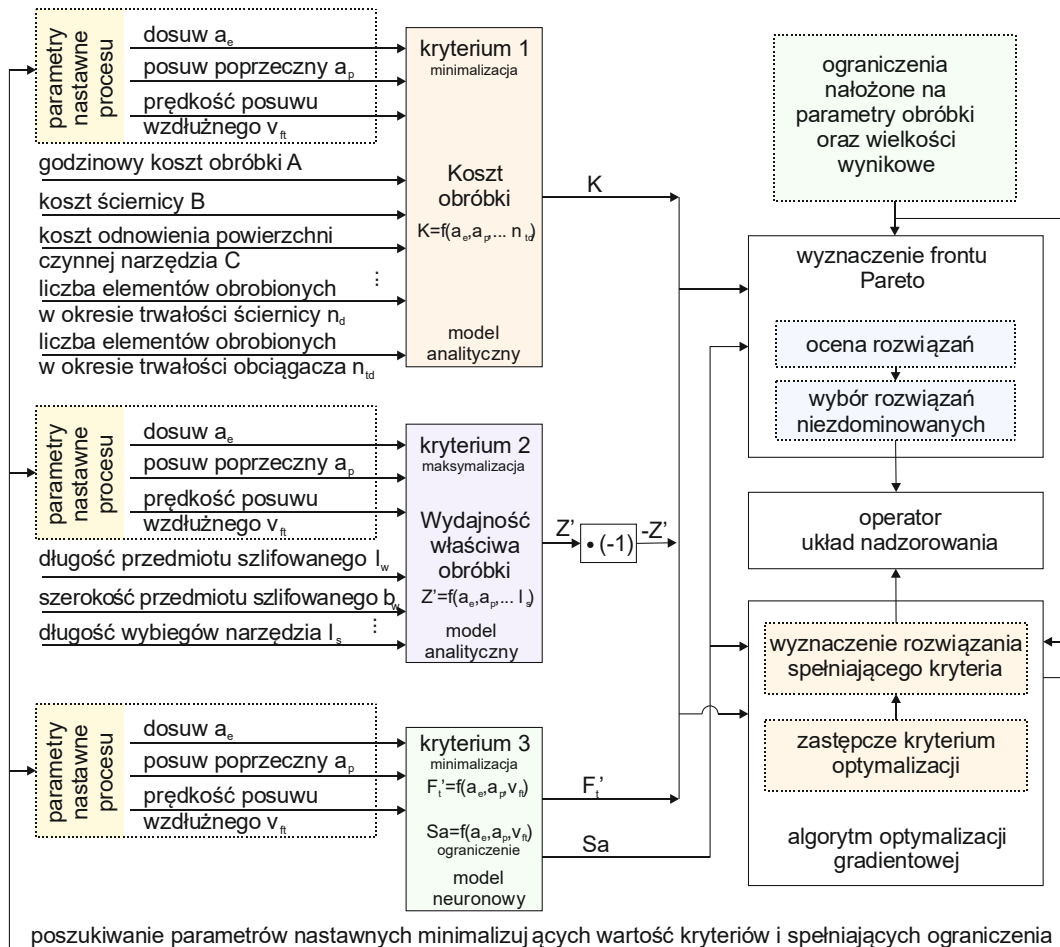
Rys. 50. Schemat ogólny do zagadnień optymalizacji procesów szlifowania

W procedurze optymalizacji procesu szlifowania poszukiwane są parametry nastawne procesu  $x$  w pewnej  $n$ -wymiarowej przestrzeni  $\Theta$  wyznaczonej przez ograniczenia górne  $x_{\max} = [x_{1\max}, x_{2\max}, \dots, x_{n\max}]$  i ograniczenia dolne  $x_{\min} = [x_{1\min}, x_{2\min}, \dots, x_{n\min}]$ . W przestrzeni  $\Theta$  wyodrębnić można zbiór  $\Omega$  dopuszczalnych parametrów spełniających wszystkie ograniczenia  $g(x)$  nałożone na proces obróbki. W zbiorze  $\Omega$  poszukuje się parametrów obróbki  $x^*$ , które pozwalają na uzyskanie najniższych wartości zadanej kryterium obróbki  $f(x^*)$  lub  $-f(x^*)$ .

## Wielokryterialna optymalizacja procesu szlifowania stopu Inconel 718 z zastosowaniem modelu neuronowego procesu

Opracowany i opisany w poprzednim podpunkcie model neuronowy procesu szlifowania płaszczyzn umożliwia określenie wpływu parametrów nastawnych procesu szlifowania (dosuwu  $a_e$ , wielkości przesuwu poprzecznego  $a_p$  oraz prędkości przesuwu wzdłużnego  $v_{ft}$ ) na jego wielkości wynikowe (parametr  $Sa$  chropowatości powierzchni oraz składowe siły szlifowania  $F_n$  i  $F_t$ ).

Wykorzystując opracowany model określono założenia optymalizacji procesu szlifowania na przykładzie stopu Inconel 718 (rys. 51).



Rys. 51. Założenia do optymalizacji procesu szlifowania stopu Inconel 718 z wykorzystaniem modeli analitycznych oraz neuronowych

Optymalizacja procesu szlifowania stopu Inconel 718 zakładała określanie parametrów obróbki  $x = [a_e, v_{ft}, v_{fa}]$  zapewniających:

- maksymalizację średniej wydajności objętościowej szlifowania  $Z'$ ;
- minimalizację kosztów wytwarzania  $K$ ;
- minimalizację wartości składowej stycznej siły szlifowania  $F_t$ .

Parametry procesu  $x$  poszukiwane były w 3-wymiarowej przestrzeni parametrów nastawnych procesu  $\Theta$  wyznaczonej przez ograniczenia górne  $x_{max} = [20 \ 4 \ 4]$  oraz dolne  $x_{min} = [5 \ 2 \ 1]$ . Parametry obróbki powinny zapewniać uzyskanie powierzchni obrobionej, o wartości parametru  $Sa$  chropowatości powierzchni mniejszej niż założona wartość graniczna  $Sa_{gr} = 0,18 \ \mu\text{m}$ .

Zależności umożliwiające określenie wpływu parametrów procesu  $x$  na powyższe kryteria przedstawiono poniżej:

- koszt obróbki  $K$ :

$$K(a_e, a_p, v_{ft}) = A \left( \frac{l_g \cdot b_g}{a_p \cdot v_{ft}} \right) + B \left( \frac{a_p \cdot a_e \cdot l_p}{n \cdot G(v_{ft})} + \frac{\pi \cdot b_s \cdot a_d (d_s - a_d)}{n_d} \right) + \frac{C}{n_{td}}, [\text{zł/sztuka}]$$

gdzie:  $A$  – koszt maszynowy,  $B$  – koszt narzędzia ściernego,  $C$  – koszt narzędzia do procesu kształtowania powierzchni czynnej narzędzia ściernego,  $n$  – liczba jednocześnie szlifowanych elementów,  $l_g$  – droga ściernicy z wybiegami w czasie jednego skoku,  $b_g$  – szerokość wybiegu narzędzia,  $G$  – wskaźnik szlifowania,  $b_s$  – wysokość ściernicy,  $a_d$  – dosuw obciążacza,  $d_s$  – średnica ściernicy,  $n_d$  – liczba elementów obrobionych w okresie trwałości narzędzia,  $n_{td}$  – liczba elementów obrobionych w okresie trwałości obciążacza.

Powyższa zależność uwzględnia wpływ obciążenia ściernicy na wielkość zużycia objętościowego narzędzia ściernego, a tym samym wskaźnik szlifowania:

$$G(v_{ft}) = G_0 \cdot v_{ft}^{k_1}, \text{ przy czym } k_1 = 1 - n, \text{ gdzie } n > 1$$

Wielkość zużycia narzędzia ściernego zależna jest również od współczynnika sprężystości wzdłużnej ściernicy oraz wartości sił szlifowania. Jednakże minimalizacja wartości zużycia narzędzia ściernego (a tym samym kosztów związanych z narzędziem ściernym) może być częściowo uwzględniona przez spełnienie kolejnego kryterium optymalizacji jakim jest minimalizacja wartości siły szlifowania.

- średnia wydajność objętościową szlifowania  $Z'$ :

$$Z'(a_e, a_p, v_{ft}) = a_e \cdot a_p \cdot v_{ft} \cdot \frac{l_w}{l_s} \cdot \frac{b_w}{b_s} \cdot \frac{1}{2}, [\text{mm}^3/\text{s}]$$

gdzie:  $l_w$  – długość przedmiotu obrabianego,  $b_w$  – szerokość szlifowanego elementu.

Wartość składowej stycznej właściwej siły szlifowania  $F_t'$  oraz wartość parametru  $Sa$  chropowatości powierzchni obrobionej określono na podstawie modelu neuronowego:

$$F_t' = f_{NN}(a_e, a_p, v_{ft})$$

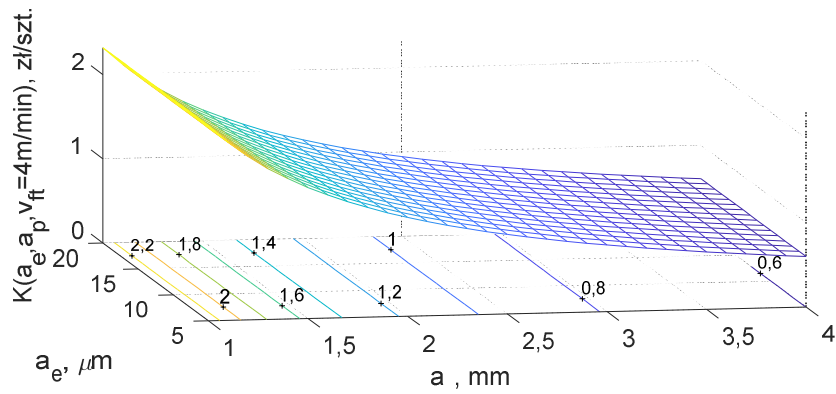
$$Sa = f_{NN}(a_e, a_p, v_{ft})$$

gdzie:  $f_{NN}$  - model neuronowy ujmujących wpływ parametrów obróbki na wartość składowej stycznej właściwej siły szlifowania  $F_t'$  oraz parametru  $Sa$  chropowatości powierzchni obrobionej.

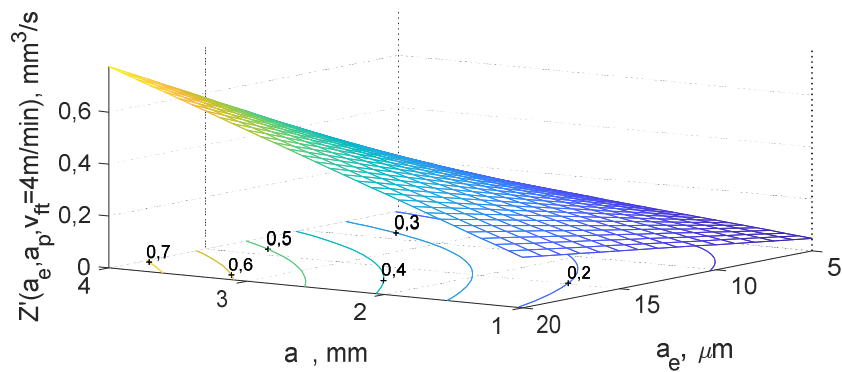
Przykłady poszczególnych kryteriów optymalizacyjnych w funkcji parametrów procesu przedstawiono na rysunkach 52, 53 i 54.

W optymalizowanym procesie wyznaczono zbiór niezdominowanych, w sensie założonych kryteriów, parametrów obróbki (tzw. front Pareto). Parametry obróbki  $x_1$  nie są zdominowane przez inne rozwiązania  $x_i$  jeżeli:

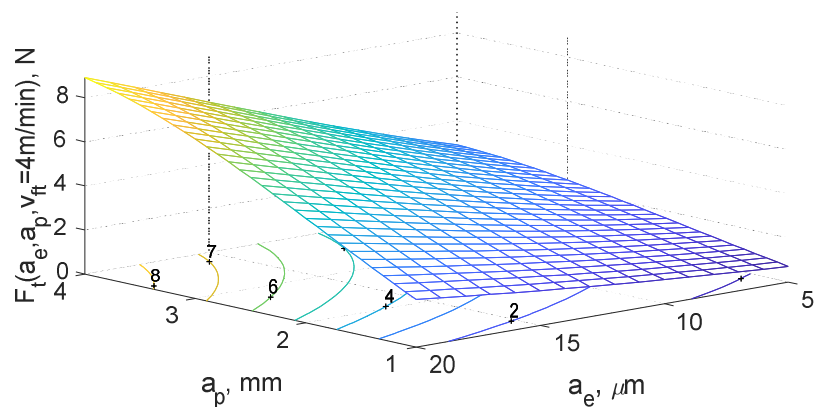
$$x_1 > x_i \Leftrightarrow \exists_i f_i(x_1) < f_i(x_i)$$



Rys. 52. Koszty obróbki w funkcji parametrów procesu

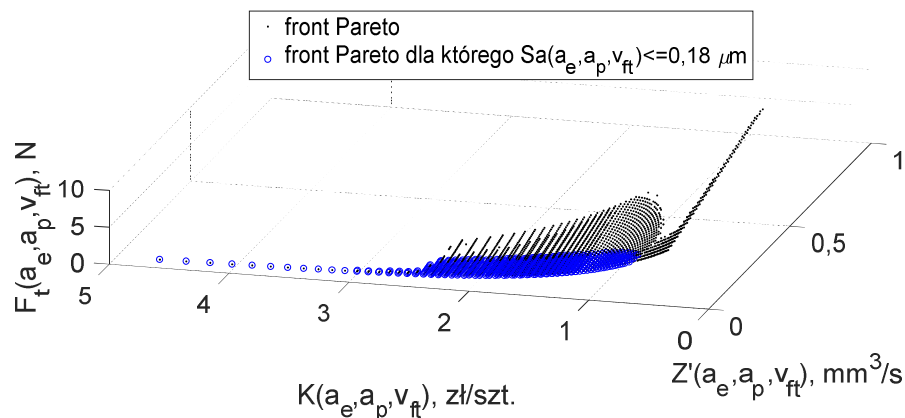


Rys. 53. Wydajność obróbki w funkcji parametrów procesu



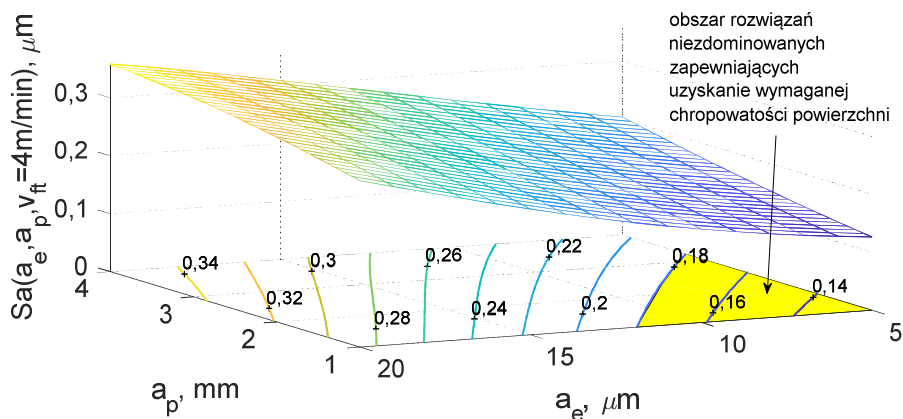
Rys. 54. Wartość składowej stycznej siły szlifowania w funkcji parametrów obróbki

Zbiór rozwiązań niezdominowanych dla  $x \in \Theta$  wskazuje na wyraźną przeciwstawność kryterium związanego z maksymalizacją wydajności procesu obróbki oraz kryterium minimalizującym wartości składowej normalnej siły szlifowania (rys. 55).



Rys. 55. Zbiór rozwiązań niezdominowanych w przestrzeni kryteriów optymalizacyjnych

Ponadto, ograniczenia nałożone na wartość parametru  $Sa$  chropowatości powierzchni obrabianej powodują istotne ograniczenie zakresu dopuszczalnych parametrów obróbki (rys. 56).



Rys. 56. Zbiór rozwiązań dopuszczalnych optymalizacji procesu szlifowania płaszczyzn stopu Inconel 718

Spełnienie ograniczeń związanych z chropowatością powierzchni możliwe jest dla wartości dosuwu  $a_e$  w zakresie od 5  $\mu\text{m}$  do 13  $\mu\text{m}$  oraz wartości przesuwu poprzecznego  $a_p$  w zakresie od 1 mm do 3,4 mm. Przy założeniu, że wraz ze wzrostem wartości dosuwu  $a_e$  następuje zmniejszenie wartości przesuwu poprzecznego  $a_p$ . Konieczność spełnienia kryterium związanego z maksymalizacją wydajność procesu powodować będzie wzrost wartości posuwu wzdłużnego  $v_{ft}$ .

Wyniki optymalizacji procesu szlifowania stopu Inconel 718, z uwagi na zastosowanie zbioru przeciwstawnych kryteriów optymalizacyjnych, nie wskazują na jedno optymalne rozwiązanie zapewniające spełnienie wszystkich kryteriów. W wyniku optymalizacji otrzymano zbiór rozwiązań kompromisowych, wskazujących operatorowi procesu zbiór możliwych nastaw procesu.

Wyznaczenie ze zbioru rozwiązań niezdominowanych optymalnych wartości parametrów obróbki wymaga wyznaczenia kryterium zastępczego, uwzględniającego wpływ poszczególnych kryteriów cząstkowych.

Dla powyższego procesu optymalizacji kryterium zastępcze sformułowano w postaci sumy ważonej oraz iloczynu ważonego znormalizowanych kryteriów cząstkowych:

$$F_{sum}(x) = w_1 \cdot K_{norm}(x) + w_2 \cdot F_{t\_norm}(x) + w_3 \cdot Z_{norm}(x)$$

$$F_{prod}(x) = K_{norm}^{w_1}(x) \cdot F_{t\_norm}^{w_2}(x) \cdot Z_{norm}^{w_3}(x)$$

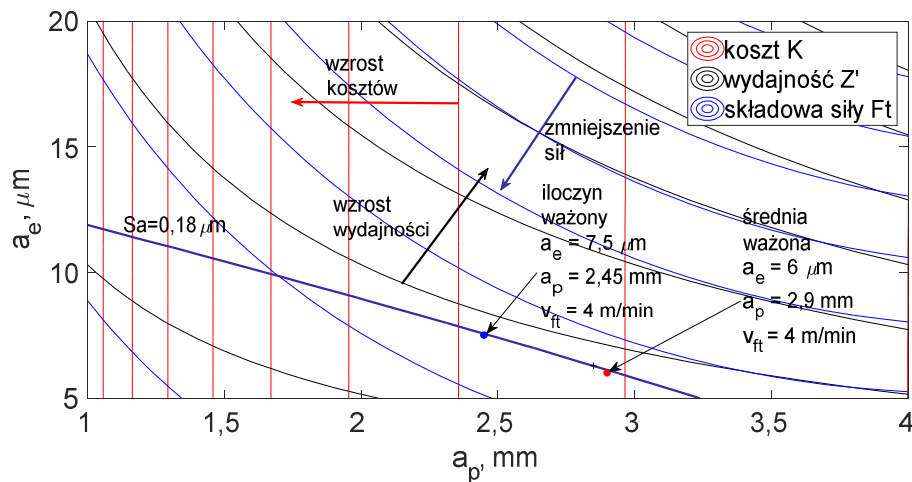
gdzie:  $w_i$  – wagi przypisane poszczególnym kryteriom cząstkowym, takie że  $\sum w_i = 1$ ;  $K_{norm}$ ,  $F_{t\_norm}$ ,  $Z_{norm}$  – znormalizowane kryteria cząstkowe dotyczące kosztów obróbki, wartości składowej stycznej siły szlifowania oraz wydajności objętościowej procesu.

Normalizację kryteriów dotyczących przeprowadzono zgodnie z zależnością:

$$f_{norm}(x) = \frac{f(x) - \min(f(x))}{\max(f(x)) - \min(f(x))}$$

gdzie:  $f_{norm}(x)$ ,  $f(x)$  – odpowiednio unormowana i nieunormowana wartość kryterium procesu związana z kosztami obróbki, średnią wydajnością objętościową oraz wartościami składowej stycznej siły szlifowania.

Poszczególne znormalizowane kryteria cząstkowe pozwoliły na utworzenie kryterium zastępczego, które następnie poddano optymalizacji. Wartości wag kryteriów cząstkowych przyjęto jako:  $w_i = 1/n$  (gdzie:  $n$  – liczba kryteriów cząstkowych). W wyniku przeprowadzonej optymalizacji wyznaczono w zbiorze rozwiązań niezdominowanych rozwiązanie parametru obróbki  $x^*$  zapewniające minimalizację kryterium zastępczego (rys. 57).



Rys. 57. Wyniki optymalizacji z zastosowaniem kryteriów zastępczych

Otrzymane w wyniku optymalizacji, z zastosowaniem sumy ważonej do wyznaczenia kryterium zastępczego, parametry obróbki (dosuw  $a_e = 6 \mu\text{m}$ , posuw poprzeczny  $a_p = 2,9 \text{ mm}$  oraz prędkość posuwu wzdłużnego  $v_{ft} = 4 \text{ m/min}$ ) pozwalają na uzyskanie średniej wydajności objętościowej obróbki  $Z' = 0,17 \text{ mm}^3/\text{s}$ , kosztów obróbki wynoszących  $5,1 \text{ zł}/\text{dm}^2$  oraz wartości składowej stycznej siły obróbki wynoszącej  $F_t = 2,6 \text{ N}$ . Parametry obróbki wyznaczone z zastosowaniem iloczynu ważonego do wyznaczenia kryterium zastępczego (dosuw  $a_e = 7,5 \mu\text{m}$ , posuw poprzeczny  $a_p = 2,45 \text{ mm}$ ) umożliwiają uzyskanie średniej wydajności objętościowej obróbki  $Z' = 0,18 \text{ mm}^3/\text{s}$ , kosztów obróbki na poziomie  $6 \text{ zł}/\text{dm}^2$  oraz wartości składowej stycznej siły szlifowania  $F_t = 2,5 \text{ N}$ . Stosując parametry obróbki wyznaczone z wykorzystaniem sumy ważonej możliwe jest prowadzenie procesu ze średnią wydajnością objętościową niższą o około 6% przy niższych kosztach, o około 18% w odniesieniu do parametrów obróbki uzyskanych w wyniku zastosowania średniej ważonej do wyznaczenia kryterium zastępczego.



Przeprowadzona optymalizacja wielokryterialna zakładała równorzędność wszystkich kryteriów cząstkowych. Zmiana istotności poszczególnych kryteriów cząstkowych może być uwzględniana poprzez zmianę wag  $w_i$  w zastępczym kryterium optymalizacyjnym. W przypadku, gdy wartość jednego lub kilku kryteriów optymalizacyjnych musi przyjmować wartość nie mniejszą niż pewna założona wartość graniczna, możliwe jest również przeprowadzenie procesu optymalizacji z uwzględnieniem dodatkowych ograniczeń nierównościowych nałożonych na te kryteria.

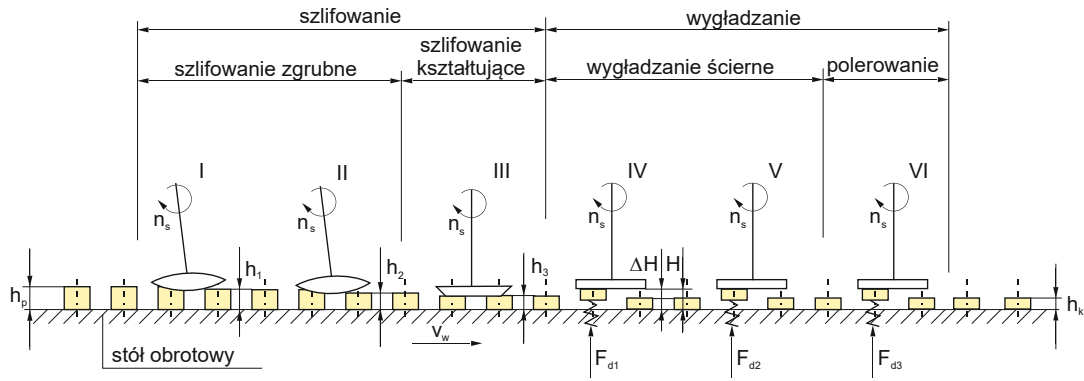
### **Optymalizacja sekwencyjnego procesu obróbki ścierniej w środowisku rozmytym**

Równoczesne spełnienie wielu kryteriów optymalizacji, w przypadku, gdy zbiory parametrów obróbki umożliwiające ich spełnienie nie są zbiorami łącznymi, wymaga zastosowania stopniowości w ocenie spełnienia poszczególnych kryteriów. Stosowane dotychczas metody optymalizacji procesów szlifowania zakładały ostrą definicję celów i ograniczeń obróbki. W tego rodzaju podejściu, przejście ze zbioru dopuszczalnych parametrów obróbki do zbioru parametrów niedopuszczalnych odbywa się w sposób skokowy. Wprowadzenie stopniowości w opisie celów i ograniczeń nie może być ujęte przez zastosowanie tradycyjnej teorii mnogości i wymusza zastosowanie teorii zbiorów rozmytych.

Ponadto mnogość czynników wpływających na wynik procesu obróbki ścierniej oraz zmienność ich wpływu w trakcie procesu obróbki skłania do zastosowania metod logiki rozmytej w definicji celów i ograniczeń obróbki. Ma to szczególne znaczenie w przypadkach obróbki sekwencyjnej o skumulowanym wpływie niedokładności pojedynczych operacji na wynik procesu.

Podejmowanie decyzji w środowisku rozmytym wymaga zdefiniowania celów oraz ograniczeń rozmytych. Definicja rozmytych celów obróbki wymaga określenia funkcji przynależności przyporządkowującej każdemu elementowi z przestrzeni wielkości wyjściowych  $Y$  procesu wartość z zakresu  $[0,1]$  informującej o stopniu przynależności  $\mu$  elementu  $y$  do danego celu  $G$  lub ograniczenia  $C$ . Cele i ograniczenia nałożone na proces obróbki wynikają głównie z wymagań nałożonych na wielkości wynikowe procesu szlifowania (np. oczekiwana wartość parametru chropowatości  $S_a$  powierzchni obrobionej, dopuszczalna odchyłka kształtu i wymiarów) oraz wymagań ekonomicznych (np. właściwa wydajność szlifowania, koszt szlifowania). W przypadku procesu obróbki, funkcje przynależności określające stopień przynależności wielkości wyjściowych procesu  $y$  do danego celu lub ograniczenia, mogą być interpretowane jako funkcje określające poziom zadowolenia z uzyskania danego wyniku obróbki.

Optymalizację z zastosowaniem zbiorów rozmytych do definicji celów i ograniczeń obróbki przeprowadzono dla procesu sekwencyjnego szlifowania małych elementów ceramicznych. Proces ten zakłada realizację szeregu operacji szlifowania w jednym przejściu. Całkowity naddatek obróbkowy  $a_e$  dzielony jest między kilka ściernic rozmieszczonych na obwodzie stołu obrotowego z umieszczonymi na nim przedmiotami (rys. 58). Przedmioty przemieszczają się wraz ze stołem przechodząc pod kolejnymi ściernicami, zbierającymi kolejne wielkości naddatku. Elementy ceramiczne, umieszczone w gniazdach stołu obrotowego, są kolejno szlifowane i wygładzane. Podczas obróbki ścierniej elementy są ustalane na powierzchni stołu obrotowego, a podczas obróbki wykańczającej są unoszone i elastycznie dociskane do czynnych powierzchni narzędzia wygładzających i polerujących.



Rys. 58. Schemat metody zintegrowanej obróbki małych elementów ceramicznych w cyklu automatycznym

Obróbka zgrubna, której celem jest usunięcie dużych nadatków obróbkowych prowadzona jest z użyciem ściernic pochylonych względem płaszczyzny toru przedmiotów. Zastosowana metoda dzięki odpowiedniej kinematyce układu obróbkowego i pochyleniu narzędzia, pozwala na dokładną i wydajną obróbkę przedmiotów, poruszających się po torze przesuniętych względem środka ściernicy.

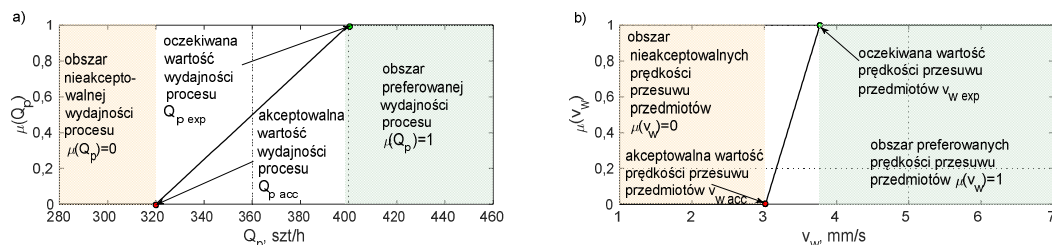
W tak realizowanym układzie kinematycznym podstawowym kryterium ekonomicznym procesu obróbki jest jego wydajność objętościowa. Wydajność objętościowa procesu szlifowania elementów ceramicznych w cyklu automatycznym określona została zgodnie z zależnością:

$$Q_v = V_w \cdot Q_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot a_e \cdot \frac{v_w}{T_o}$$

gdzie:  $V_w$  – objętość usuwanego materiału,  $Q_p$  – wydajność procesu obróbki,  $d$  – średnica przedmiotów obrabianych,  $v_w$  – prędkość przesuwu przedmiotów,  $T_o$  – podziałka obwodowa rozmieszczenia przedmiotów na stole obrotowym,  $a_e = \sum_{i=1}^N a_i$ ,  $N$  - liczba wrzecienników,  $a_i$  – wielkość nadatku dla  $i$ -tego wrzeciennika.

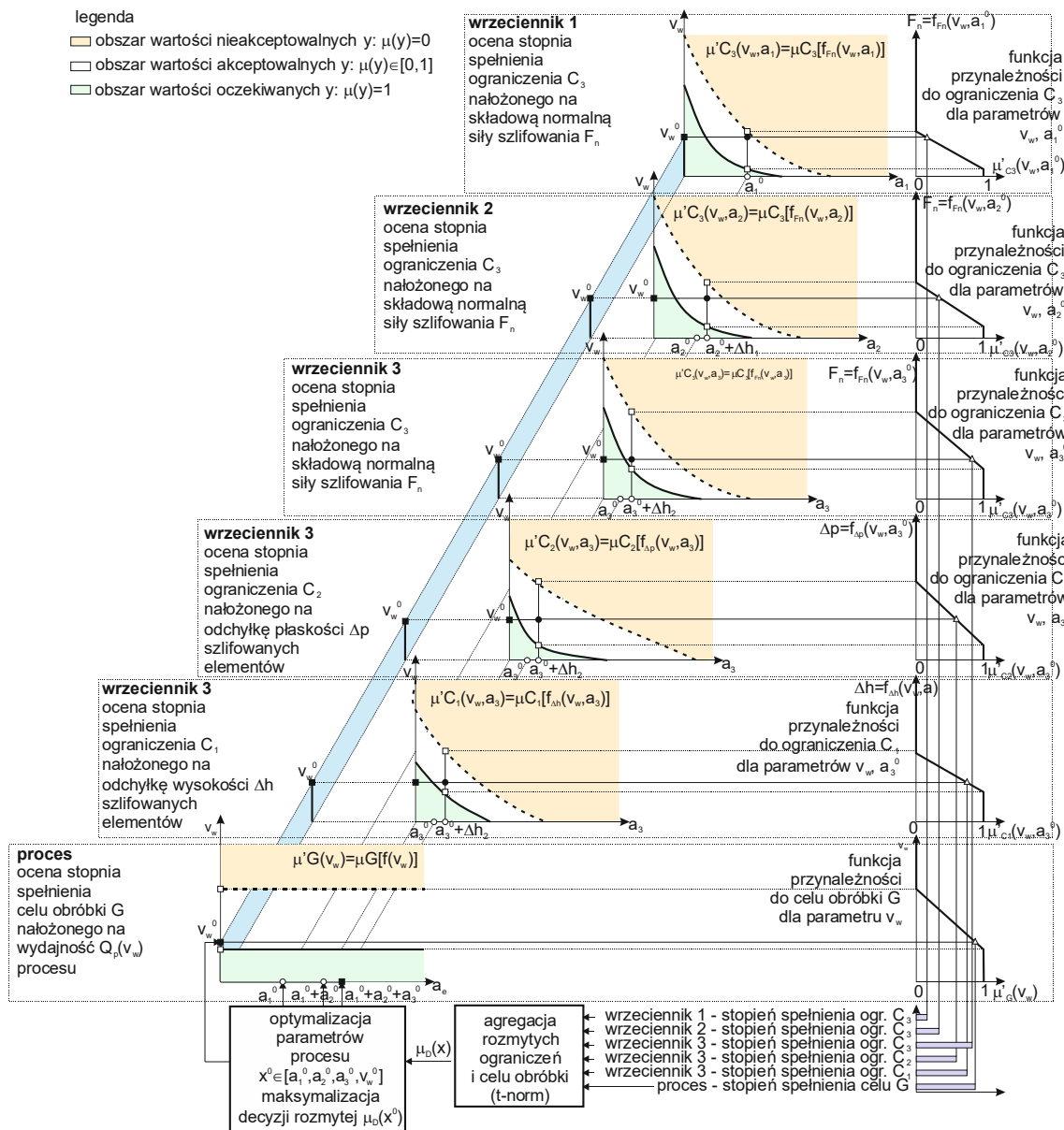
Z powyższej zależności wynika, że aby zwiększyć wydajność objętościową procesu należy zwiększyć prędkość przesuwu przedmiotów. Zatem, za nadrzędny cel optymalizacji można przyjąć kryterium największej prędkości przesuwu przedmiotów, która to wielkość jest jednocześnie parametrem sterowalnym procesu.

Rozmytą funkcję przynależności do celu obróbki zdefiniowano w formie funkcji trapezoidalnej. Przykładowe przedstawienie przebiegu funkcji przynależności do celu obróbki  $\mu_G(Q_p)$  w przestrzeni parametrów wyjściowych oraz nastawnych przedstawiono na rysunku 59.



Rys. 59. Przebieg funkcji przynależności do celu obróbki dla:  $Q_{p\_exp} = 400$  sztuk/godzinę,  $Q_{p\_acc} = 320$  sztuk/godzinę zdefiniowane w przestrzeni parametrów wyjściowych (a) i wejściowych (b)

Schematycznie założenia optymalizacji procesu sekwencyjnego szlifowania małych elementów ceramicznych w środowisku rozmytym przedstawiono na rysunku 60.



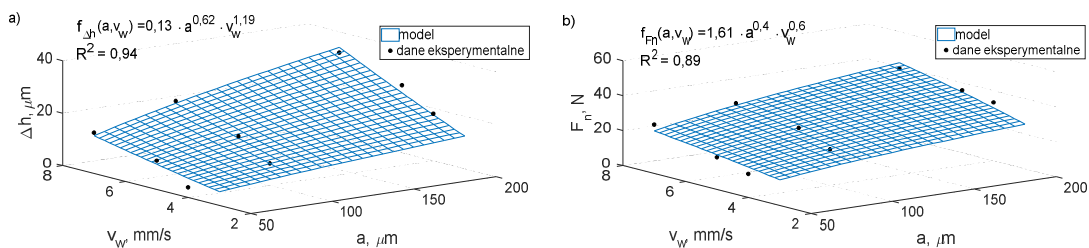
Rys. 60. Schemat strategii optymalizacji rozmytej w procesie sekwencyjnego szlifowania małych elementów ceramicznych w cyklu automatycznym

Możliwy zakres zmian parametrów nastawnych procesu zależy jest od ograniczeń związanych z obrabiarką, przedmiotem obrabianym i ściernicą. Ze względu na fakt, iż w rozpatrywanym procesie szlifowania wymiary elementów i moc szlifowania wymagana do usunięcia nadmiaru są niewielkie, nie występuje ograniczenie związane z mocą obrabiarki. Istnieją jednakże ograniczenia związane z dokładnością kształtu i wymiaru obrabianych elementów. Obrobione elementy stanowią parę współpracującą ślizgowo oraz muszą zapewniać odpowiednią szczelność połączeń. W związku z powyższym parametry procesu obróbki powinny zapewniać spełnienie, na końcowym wrzecienniku szlifującym ograniczeń związanych z wartością akceptowalnej oraz oczekiwanej odchyłką wysokości  $\Delta h$  i płaskości  $\Delta p$ . Ponadto w procesie szlifowania elementów ceramicznych dochodzi do wykruszeń oraz uszkodzeń na

powierzchni obrobionej w przypadkach, gdy dominującym zjawiskiem usuwania materiału jest kruche pękanie. Zapewnienie odpowiedniej jakości powierzchni współpracujących elementów wymaga nałożenia ograniczeń na wartość składowej normalnej siły szlifowania, której przekroczenie powoduje wzrost uszkodzeń powierzchni materiału obrabianego.

Wyznaczenie optymalnych wartości parametrów obróbki wymaga określenia zależności między parametrami obróbki (głębokością szlifowania  $a$  oraz prędkością przesuwu przedmiotów  $v_w$ ) a odchyłkami kształtu (odchyłką płaskości  $\Delta p$ ) oraz wymiaru (odchyłką wysokości  $\Delta h$ ) szlifowanych eksperymentów. Na podstawie wyników badań eksperymentalnych wyznaczono zależności opisujące wpływ prędkości przesuwu przedmiotów  $v_w$  oraz wielkości usuwanego nadatku  $a$  na analizowane wielkości wyjściowe procesu: odchyłkę wysokości  $\Delta h$ , odchyłkę płaskości  $\Delta p$  oraz składową normalną siłę szlifowania  $F_n$ .

Do opisu powyższych zależności zastosowano model potęgowy. Przykładowe wyniki przedstawiono na rysunku 61.



Rys. 61. Wpływ prędkości przesuwu przedmiotów  $v_w$  oraz wielkości nadatku  $a$  na odchyłkę wysokości  $\Delta h$  (a) i składową normalną siłę szlifowania (b) w procesie szlifowanych elementów ceramicznych

Opracowane modele charakteryzują się dobrym dopasowaniem do danych eksperymentalnych. Średnia wartość współczynnika determinacji  $R^2$  dla opracowanych modeli wynosi  $= 0,93$ . Średnia wartość bezwzględnego błędę prognozy MAPE wynosi  $12,2\%$  ( $19,6\%$  dla odchyłki wysokości,  $6,5\%$  dla odchyłki płaskości oraz  $10,5\%$  dla składowej normalnej siły szlifowania).

Do optymalizacji parametrów procesu sekwencyjnego szlifowania małych elementów ceramicznych zastosowano algorytm genetyczny. Parametry obróbki  $x = [a_1, a_2, a_3, v_w]$  optymalizowano tak, aby maksymalizować wartość decyzji rozmytej  $\mu_D(x)$ . Optymalizację przeprowadzono z zastosowaniem środowiska Matlab® 2016b, dla poniższych parametrów:

- rozmiar populacji początkowej: 500;
- liczba populacji: 20;
- kryterium zatrzymania: zmiana wartości funkcji celu w kolejnych krokach algorytmu mniejsza niż  $\tau = 1 \cdot 10^{-10}$ ;
- minimalna różnica między oczekiwaną i dopuszczalną wartości ograniczeń:  $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-10}$ .

Dokonano analizy wyników optymalizacji dla dwóch przypadków, różniących się definicją celów obróbki:

- przypadek 1:  $Q_{p\_acc} = 230$  szt./h,  $Q_{p\_exp} = 286$  szt./h;
- przypadek 2:  $Q_{p\_acc} = 275$  szt./h,  $Q_{p\_exp} = 400$  szt./h.

W obu przypadkach ograniczenia związane z dokładnością wymiarów i kształtu obrabianych elementów oraz jakością powierzchni obrabianej przyjęto na tym samym poziomie:

- odchyłka wymiaru:  $\Delta h_{acc} = 8 \mu\text{m}$ ,  $\Delta h_{exp} = 10 \mu\text{m}$ ;
- odchyłka płaskości:  $\Delta p_{acc} = 1,5 \mu\text{m}$ ,  $\Delta p_{exp} = 1,8 \mu\text{m}$ ;
- składowa normalna siły szlifowania:  $F_{n\_acc} = 30\text{N}$ ,  $F_{n\_exp} = 35\text{N}$ .

Ocena stopnia spełnienia celu oraz ograniczeń rozmytych dokonywana jest poprzez agregację rozmytych funkcji przynależności.

W procedurze optymalizacji rozmytej założono wykorzystanie poniższych t-norm:

- minimum:  $t_{min}(a, b) = \min(a, b)$ ;
- iloczyn:  $t_{prod}(a, b) = a \cdot b$ ;
- Łukasiewicz t-norm:  $t_{Luk}(a, b) = \max(0, a + b - 1)$ ;
- iloczyn Hamacher'a:  $t_H(a, b) = \begin{cases} 0 & \text{if } a = b = 0 \\ \frac{a \cdot b}{a + b - a \cdot b} & \text{poza tym} \end{cases}$ .

Wyniki optymalizacji sekwencyjnego procesu szlifowania małych elementów ceramicznych w środowisku rozmytym przedstawiono w tabeli 6.

Tab. 6. Wyniki optymalizacji rozmytej

|          | rodzaj t-normy     | wartość stopnia spełnienia poszczególnych celów i ograniczeń obróbki dla parametrów obróbki x |                  |             |             |             |            | parametry procesu x |                       |                       |                       |
|----------|--------------------|---|------------------|-------------|-------------|-------------|------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|          |                    | $\mu_{\Delta h}$  | $\mu_{\Delta p}$ | $\mu_{Fn1}$ | $\mu_{Fn2}$ | $\mu_{Fn3}$ | $\mu_{Qp}$ | $v_w$ , mm/s        | $a_1$ , $\mu\text{m}$ | $a_2$ , $\mu\text{m}$ | $a_3$ , $\mu\text{m}$ |
| przyp. 1 | minimum            | 0,83  | 1,00             | 0,83        | 1,00        | 1,00        | 0,83       | 4,83                | 157,42                | 117,79                | 24,79                 |
|          | iloczyn            | 1,00  | 1,00             | 1,00        | 1,00        | 1,00        | 0,81       | 4,81                | 148,16                | 130,07                | 21,77                 |
|          | Łukasiewiczza      | 1,00  | 1,00             | 1,00        | 1,00        | 1,00        | 0,81       | 4,81                | 148,15                | 130,07                | 21,78                 |
|          | iloczyn Hamacher'a | 1,00  | 1,00             | 1,00        | 1,00        | 1,00        | 0,81       | 4,81                | 148,16                | 130,07                | 21,77                 |
| przyp. 2 | minimum            | 0,36  | 0,54             | 0,36        | 0,36        | 1,00        | 0,36       | 5,58                | 153,02                | 130,91                | 16,07                 |
|          | iloczyn            | 1,00  | 1,00             | 0,70        | 0,64        | 1,00        | 0,16       | 5,16                | 150,57                | 134,75                | 14,68                 |
|          | Łukasiewiczza      | brak możliwości oceny, $\mu_D(x) = 0, \forall x \in X$  |                  |             |             |             |            |                     |                       |                       |                       |
|          | iloczyn Hamacher'a | 1,00  | 1,00             | 0,50        | 0,50        | 1,00        | 0,25       | 5,34                | 154,64                | 133,86                | 11,50                 |

Zwiększenie wymagań dotyczących wydajności obróbki powoduje zmniejszenie uzyskiwanych wartości decyzji rozmytej. Jest to wynikiem konieczności uwzględniania konsensusu pomiędzy przeciwstawnymi wymaganiami nałożonymi na proces obróbki. W tym przypadku zastosowanie do agregacji celów i ograniczeń rozmytych t-normy Łukasiewiczza powoduje, że wartość decyzji rozmytej dla dowolnych wartości parametrów obróbki przyjmuje wartość równą 0. Wynika to z konieczności obniżenia uzyskiwanych wartości funkcji przynależności celów i ograniczeń rozmytych. W efekcie w przypadku, gdy suma wartości dwóch dowolnych funkcji przynależności nie daje wartości większej od jedności, to wartość funkcji decyzji rozmytej przyjmuje wartość 0. Skutkuje to brakiem możliwości oceny poszczególnych rozwiązań.

W przypadku mniejszych wymagań nałożonych na wydajność obróbki, dla t-norm: iloczyn, iloczyn Hamacher'a oraz t-normy Łukasiewiczza, uzyskano zbliżone wartości stopnia spełnienia ograniczeń i celów obróbki oraz odpowiadających im parametrów obróbki (tab. 6). Zastosowanie do agregacji funkcji Łukasiewiczza prowadzi do poszukiwania parametrów obróbki, które umożliwiają w stopniu pełnym (wartość funkcji przynależności równa 1) spełnianie jak

największej liczby ograniczeń i celów rozmytych. Jednakże w przypadku, gdy na wydajność obróbki nałożono zwiększone wymagania, nie ma możliwości pełnego spełnienia większości ograniczeń rozmytych oraz celu rozmytego. Skutkuje to przyjęciem przez funkcję Łukasiewicza wartości równych zero dla wszystkich parametrów obróbki, co w praktyce uniemożliwia ocenę kolejnych rozwiązań generowanych przez algorytm genetyczny. Zastosowanie funkcji iloczyn oraz iloczyn Hamacher'a skutkuje uzyskaniem pośrednich wyników, między ostrym oczekiwaniem pełnego spełnienia jak największej liczby ograniczeń i celów obróbki (t-norma Łukasiewicza) a maksymalizacją wartości minimalnego spełnienia przeciwstawnych wymagań (t-norma minimum).

Dla obniżonych wymagań dotyczących wydajności obróbki nie obserwuje się znaczących, z technologicznego punktu widzenia, różnic w wartościach parametrów obróbki uzyskanych dla różnych t-norm. Największą wydajność uzyskano w przypadku zastosowania t-normy minimum. Zwiększenie wymagań dotyczących wydajności obróbki, powoduje znaczne zróżnicowanie wyników optymalizacji. Jest to wynikiem braku możliwości pełnego spełnienia nałożonych na proces ograniczeń. Wzrasta przez to przestrzeń parametrów obróbki, dla których następuje jedynie częściowe spełnienie ograniczeń i celów obróbki. Najlepsze wyniki optymalizacji uzyskano w przypadku zastosowania do agregacji wymagań nałożonych na wyniki obróbki funkcji minimum. Wartość prędkości przesuwu stołu wyniosła w tym przypadku  $v_w = 5,58$  mm/s. Prowadzenie obróbki z wyznaczoną prędkością przesuwu przedmiotów zapewnia uzyskanie wydajności obróbki na poziomie 320 sztuk na godzinę.

**W wyniku przeprowadzonych badań i analiz dotyczących optymalizacji procesów obróbki ściernej z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji sformułowano poniższe wnioski:**

- Wykorzystanie w zadaniach optymalizacji procesów obróbki ściernej modeli neuronowych (w przypadku modelowania zależności o niejawnym mechanizmie kumulacji skutków oddziaływań) oraz modeli analitycznych, daje podstawy do poszukiwania nastaw procesu zapewniających spełnienie oczekiwanych skutków technologicznych, ekonomicznych i energetycznych procesów obróbki ściernej;
- Modele neuronowe określające wpływ parametrów nastawnych procesu szlifowania (wielkości dosuwu  $a_e$ , posuwu poprzecznego  $a_p$  oraz prędkości przesuwu wzdłużnego  $v_{ft}$ ) na jego wielkości wynikowe (wartość parametru  $Sa$  powierzchni obrobionej oraz wartość składowej stycznej właściwej siły szlifowania  $F_t'$ ) umożliwiają ich zastosowanie jako funkcji celu oraz funkcji ograniczeń w zagadnieniach optymalizacji procesów obróbki ściernej;
- Wyznaczone, z zastosowaniem jako kryterium optymalizacji sumy ważonej kryteriów cząstkowych, parametry procesu szlifowania stopu Inconel 718 ( $a_p = 2,9$  mm,  $a_e = 6$   $\mu$ m i  $v_{ft} = 4$  m/min) zapewniają zmniejszenie kosztów obróbki o około 18%, przy niższej średniej wydajności objętościowej procesu o około 6% w stosunku do parametrów wyznaczonych z zastosowaniem iloczynu ważonego. Zapewniają również uzyskanie wymaganej wartości parametru  $Sa$  chropowatości powierzchni ( $Sa = 0,18$   $\mu$ m);
- Zastosowanie logiki rozmytej do definicji celów i ograniczeń rozmytych pozwala, w procesie podejmowania decyzji o doborze parametrów i warunków obróbki, na kontrolowanie stopnia spełnienia poszczególnych celów i ograniczeń nałożonych na proces obróbki oraz umożliwia uwzględnienie zmienności warunków dla kolejnych operacji obróbki.

- Opracowanie zależności opisujących wpływ wielkości naddatku  $a_i$  na poszczególnych wrzeciennikach oraz prędkości przesuwu przedmiotów  $v_w$  na odchyłkę wysokości  $\Delta h$ , odchyłkę płaskości  $\Delta p$  i składową normalną siłę szlifowania  $F_n$ , dla rozpatrywanego układu technologicznego, umożliwia wyznaczenie zagregowanej funkcji decyzji rozmytej w przestrzeni parametrów nastawnych procesu;
- Wynik optymalizacji rozmytej w znaczący sposób zdeterminowany jest przez t-normę zastosowaną do agregacji ograniczeń i celu obróbki. Przy czym, im większy jest dopuszczalny obszar wartości parametrów obróbki, w którym zagregowana wartość decyzji rozmytej przyjmuje wartości różne od 0 lub 1, tym większe zróżnicowanie wyników doboru parametrów obróbki;
- W przypadku sekwencyjnego szlifowania małych elementów ceramicznych zastosowanie do agregacji celu i ograniczeń obróbki t-normy typu minimum pozwala na wyznaczenie parametrów obróbki, zapewniających uzyskanie największej wydajności obróbki wynoszącej 320 sztuk na godzinę;
- Parametry obróbki uzyskane w wyniku zastosowania do agregacji decyzji rozmytej t-normy minimum zapewniają wyższą wydajność obróbki odpowiednio o 4,5% oraz 8% w odniesieniu do zastosowań t-norm iloczyn i iloczyn Hamacher'a.

**Szczegółową analizę powyżej opisanych zagadnień zawarto w zbiorze publikacji:**

14. **Lipiński D.**, *Podstawy modelowania i optymalizacji procesu szlifowania powierzchni płaskich z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji*, Monografia Wydziału Mechanicznego, Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2018, ISSN 0239-7129, ISBN 978-83-7365-484-6.
15. **Lipiński D.**, Kacalak W., *Assessment of the accuracy of the process of ceramics grinding with the use of fuzzy interference*, Adaptive and Natural Computing Algorithms ICANNGA, Lecture Notes in Computer Science 4431, 2007, str. 596-603.
16. **Lipiński D.**, Kacalak W.: *Zastosowanie rozmytych ocen jakości obróbki do wielokryterialnej optymalizacji parametrów procesu zautomatyzowanego szlifowania*, Pomiar Automatyka Kontrola, 5/2010, str. 180-186.
17. **Lipiński D.**, Majewski M., *Interactive hybrid system for monitoring and optimization of micro- and nano-machining processes*, 20th International Conference on Neural Information Processing (ICONIP 2013), Lecture Notes in Computer Science, 8227, 2013, str. 360-367.



#### 4. Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze

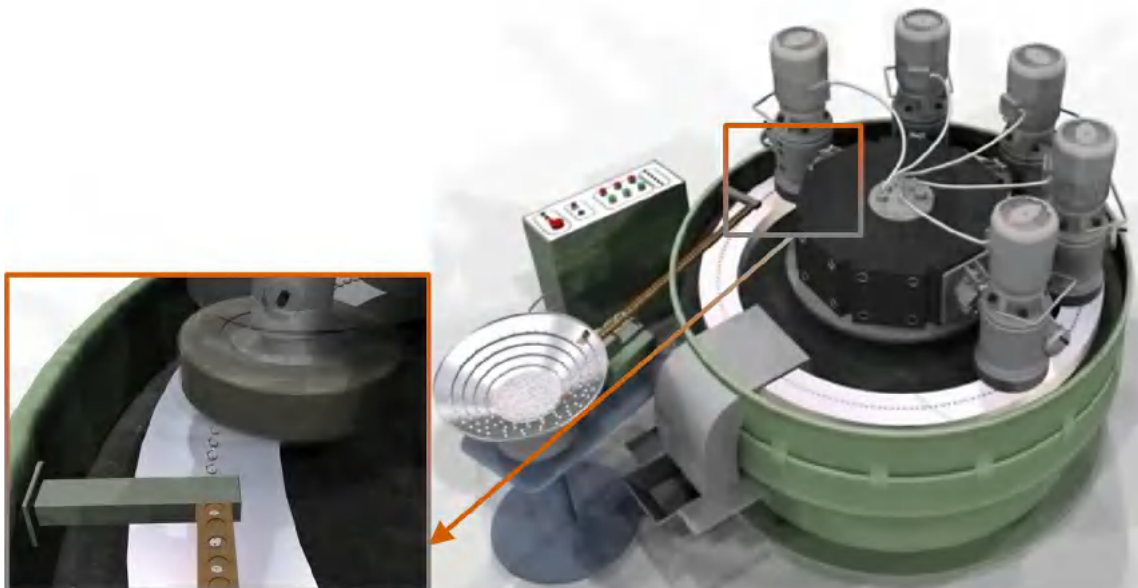
Zainteresowania naukowe autora, obok zagadnień będących elementem wskazanego osiągnięcia naukowego, obejmują tematykę badawczą dotyczącą podstaw minimalizacji i kompensacji skutków niedokładności w procesach obróbki ściernej oraz zastosowań metod sztucznej inteligencji w zagadnieniach monitorowania i prognozowania jakości procesów precyzyjnej obróbki ściernej oraz modelowania i prognozowania wyników procesów obróbek powierzchniowych.

##### **Podstawy minimalizacji niedokładności oraz kompensacji zakłóceń w procesach precyzyjnego szlifowania**

Operacja obróbki ściernej jako operacja końcowa w całym procesie obróbki w zasadniczym stopniu decyduje o ostatecznych właściwościach użytkowych wyrobu. Dokładność wymiarów i kształtu obrabianych elementów odgrywa istotną rolę w wypadku kojarzenia elementów współpracujących ślizgowo, tocznie lub spoczynkowo zapewniając uzyskanie odpowiedniego luzu, wcisku lub też szczelności połączenia.

Minimalizacja oddziaływań wpływających niekorzystnie na dokładności obróbki, wynikających ze zjawisk typowych dla procesów szlifowania, nie stanowi warunku wystarczającego w procesach obróbki precyzyjnej. Wynika to z faktu, iż wielu niekorzystnych zjawisk, takich jak na przykład zmienne przyrosty temperatur przedmiotu i obrabiarki, odkształcenia układu obróbkowego, nie można wyeliminować, a jedynie ograniczyć. Ograniczanie skutków tych zjawisk jest konieczne, jednak w wielu przypadkach nie jest to wystarczające, gdyż nie jest możliwe ich całkowite wyeliminowanie. Minimalizacja wpływu tych zjawisk na proces szlifowania wyznacza granice obecnie osiągniętej dokładności.

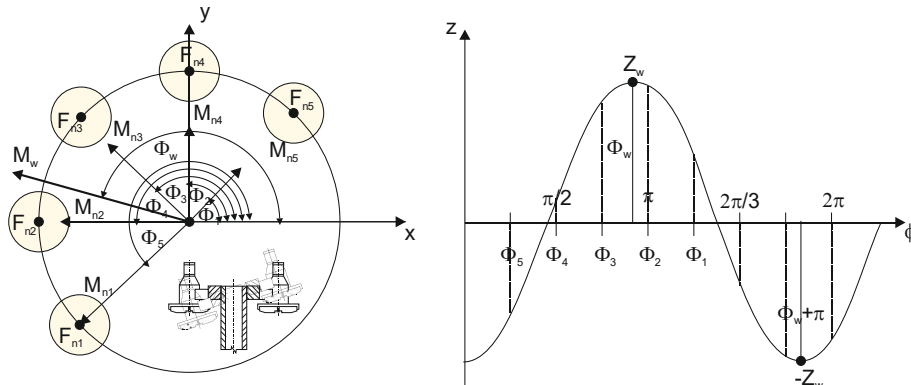
W ramach realizowanych prac badawczych autor zajmował się zagadnieniami minimalizacji i kompensacji odkształceń mechanicznych układu  $n$  wrzecienników w zautomatyzowanym procesie sekwencyjnej obróbki małych elementów ceramicznych (rys. 62).



Rys. 62. Wizualizacja procesu sekwencyjnego szlifowania małych elementów ceramicznych w cyklu automatycznym

Przeprowadzono analizy umożliwiające określenie wielkości odkształceń układu obróbkowego w zależności od wielkości naddatku na poszczególnych wrzeciennikach oraz określono miejsca zamocowań wrzecienników realizujących obróbkę końcową, decydującą o dokładności wymiarowej obrabianych elementów. Opracowane zależności umożliwiają przeprowadzenie optymalizacji rozkładu naddatku sumarycznego na poszczególne wrzecienniki, tak aby kompensować odkształcenia układu wywołane siłami szlifowania.

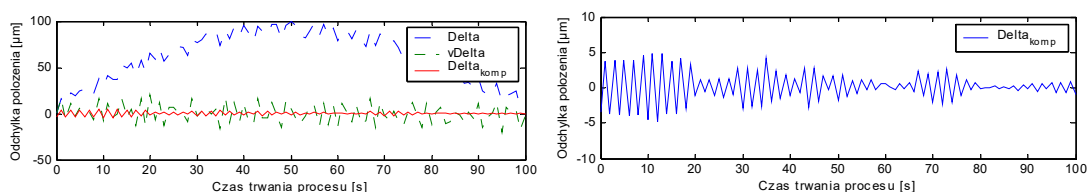
Przykładowy schemat do analizy odkształceń układu obróbkowego oraz wyniki prowadzonych analiz przedstawiono na rysunku 63.



Rys.63. Schemat przyjęty do obliczeń odkształceń układu wrzecienników oraz ich elementów nośnych

Istotnym elementem opracowanego systemu jest układ kompensacji odkształceń mechanicznych opracowany z zastosowaniem systemu wnioskowania rozmytego. Układ kompensacji umożliwia wyznaczenie korekt położenia ściernicy względem przedmiotu na podstawie analizy chwilowej wartości odchyłki położenia ściernicy od płaszczyzny nominalnej.

Przykładowe wyniki analiz numerycznych ilustrujących zachowanie układu przedstawiono na rysunku 64.

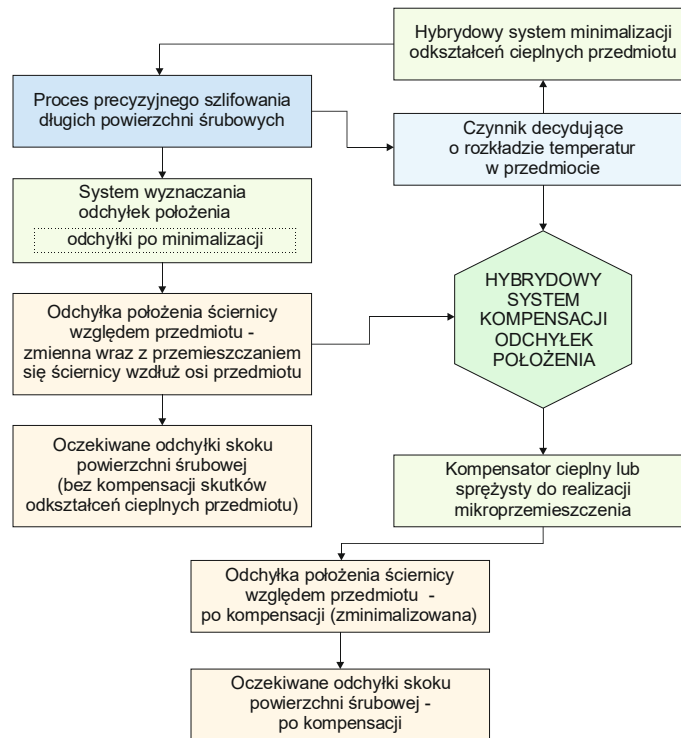


Rys. 64. Wybrane przykłady kompensacji odchyłki położenia ściernicy w procesie zautomatyzowanego szlifowania małych elementów ceramicznych dla różnych poziomów i charakterystyk zakłóceń (Delta – odchyłka bez kompensacji, vDelta – prędkość zmian odchyłki, Delta<sub>komp</sub> – odchyłka po kompensacji)

Badania autora dotyczyły również zagadnień związanych z opracowaniem i analizą systemów wnioskowania rozmytego umożliwiających minimalizację odkształceń w procesie szlifowania długich powierzchni śrubowych. Opracowano system kompensacji rozmytej, który na podstawie analizy rozkładu temperatur w szlifowanych śrubach (określonych dla zewnętrznych, poruszających się źródeł ciepła o zmiennej wydajności i w zmiennych warunkach chłodzenia) pozwala na wyznaczenie wartości korekt układu kompensowania odchyłek względnego położenia przedmiotu i narzędzia.

Odchyłka względnego położenia przedmiotu i narzędzia zależna jest od położenia strefy szlifowania, przemieszczającej się wzdłuż szlifowanej powierzchni śrubowej. Analizowano dwie

strategie sterowania mikroprzemieszczeniami przedmiotu, różniące się przeznaczeniem i dokładnością kompensacji (rys. 65).



Rys. 65. Schemat kompensacji odkształceń cieplnych szlifowanej powierzchni śrubowej [19]

Minimalizacja odkształceń cieplnych, której efektem ma być zmniejszenie odchyłek skoku, może być realizowana w systemie automatycznego monitorowania procesu obróbki, co zapewnia dobór parametrów procesu szlifowania oraz parametrów układu chłodzenia przedmiotu za strefą źródła ciepła.

**Powyższa tematyka badawcza została szerzej omówiona między innymi w poniższych publikacjach:**

18. Kacalak W., Lipiński D., Bałasz B., Ściegienka R., *Analiza odkształceń mechanicznych automatycznej szlifierki z układem n wrzecienników do obróbki małych elementów ceramicznych*, Inżynieria Maszyn, 20, 2015, str. 41-49.
19. Kacalak W., Lipiński D., Karaś D., *System minimalizacji odkształceń cieplnych i kompensacji odchyłek położenia ściernicy i przedmiotu w procesie precyzyjnego szlifowania długich powierzchni śrubowych*, Monografia Instytutu Technicznego PWSZ w Gorzowie Wielkopolskim, 2012, str. 47-59.
20. Kacalak W., Majewski M., Lipiński D., *Minimalizacja odkształceń cieplnych i kompensacji odchyłek położenia ściernicy i przedmiotu w procesie szlifowania długich powierzchni śrubowych*, Mechanik Zeszyt: 1, 2014, str. 36-40.
21. Kacalak W., Bałasz B., Królikowski T., Lipiński D., *Podstawy precyzyjnego szlifowania oraz minimalizacji niedokładności i kompensacji zakłóceń w procesach precyzyjnego szlifowania*, Monografia, Koszalin 2013, str. 1-181.

## **Opracowanie podstaw interaktywnego systemu monitorowania i prognozowania jakości w procesach precyzyjnego szlifowania z zastosowaniem technologii mobilnych i komunikacji głosowej między operatorem a urządzeniem technologicznym**

Przyczyną zbyt powolnego postępu w tworzeniu i zastosowaniach hybrydowych systemów wnioskujących zarówno na podstawie wiedzy operatora procesu (wiedzy a-priori) jak i wiedzy będącej wynikiem analizy danych diagnostycznych oraz wyników symulacji uwzględniających aktualny stan procesu (wiedzy a-posteriori), jest fakt, iż najtrudniejszym zadaniem jest integracja systemów monitorowania i przetwarzania danych z procesów wytwarzania z wykorzystaniem wielu czujników, analizy skutków technologicznych wypracowanych decyzji, wniosków z działania podsystemów diagnostycznych oraz doświadczenia operatorów.

Integracja ta wymaga zastosowania nowej generacji systemów diagnostyki stanu oraz unikatowych algorytmów i oprogramowania, zależnych od cech danego zadania technologicznego.

W wyniku prac badawczych realizowanych między innymi w ramach projektu badawczego, pt. *Kompleksowy system nadzorowania procesów szlifowania z komunikacją głosową układu obróbkowego i operatora* (kierownik projektu: prof. dr hab. inż. Wojciech Kacalak) oraz projektu *Hybrydowy system monitorowania, optymalizacji i prognozowania jakości w procesach precyzyjnego szlifowania z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji do integracji wiedzy operatorów i danych diagnostycznych* (kierownik projektu dr inż. Dariusz Lipiński) opracowano podstawy zastosowań metod sztucznej inteligencji (między innymi: wnioskowania rozmytego, sztucznych sieci neuronowych oraz algorytmów genetycznych) do budowy systemów monitorowania, prognozowania jakości obróbki oraz wspomagania decyzji operatora z uwzględnieniem komunikacji zdalnej między elementami systemu.

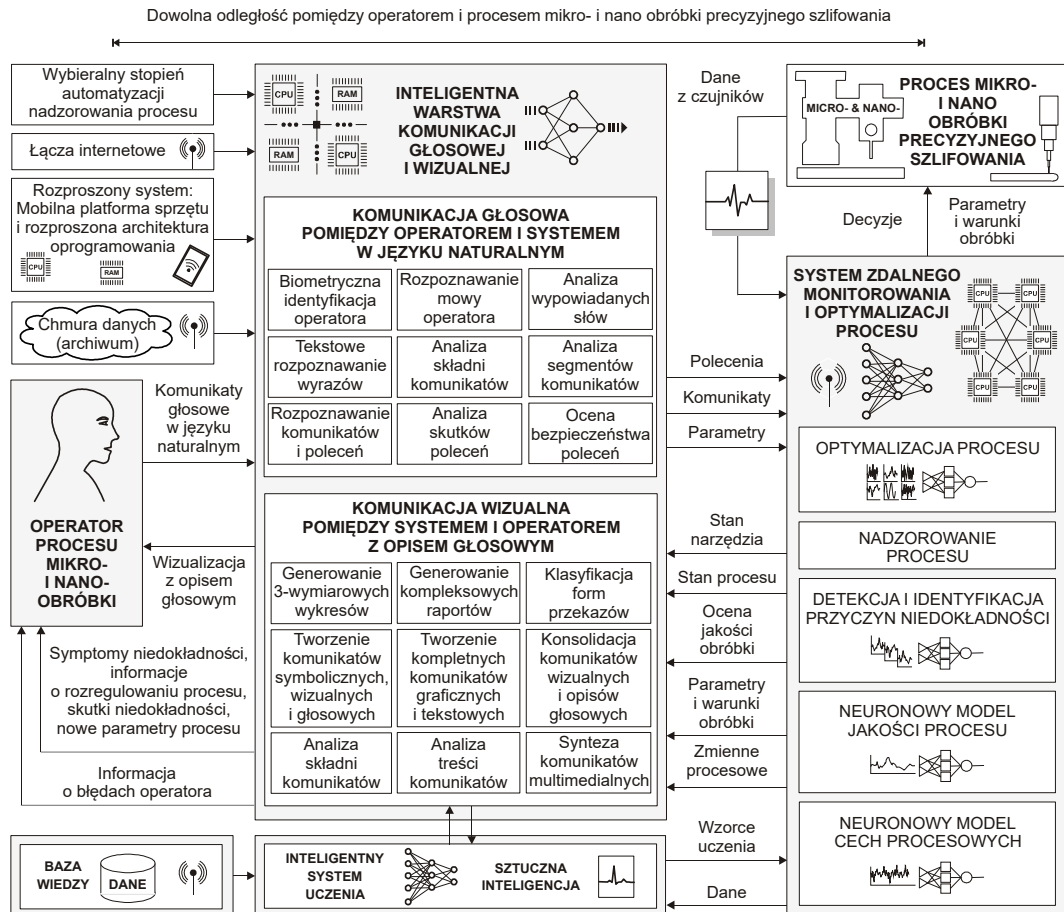
Połączenie w systemach monitorowania, optymalizacji i prognozowania jakości procesów precyzyjnego szlifowania technologii mobilnych oraz metod sztucznej inteligencji tworzy nową wyższą jakość, zwłaszcza w warunkach, gdy konieczne jest wykorzystywanie takich cech operatora jak: uwzględnianie odległych skutków i powiązań decyzji oraz heurystycznych przesłanek decyzyjnych lub nagłych zmian warunków, przy czym wykorzystanie tej wiedzy może odbywać się w procesie zdalnego komunikowania.

W ramach wyżej wymienionych projektów opracowano założenia, prowadzące do zapewnienia jakości w złożonych procesach precyzyjnego szlifowania oraz procesach mikro i nanoszlifowania dzięki wykorzystaniu systemu, którego istotną i nową cechą jest:

- integracja wielu źródeł wiedzy i danych, pochodzących zarówno od operatorów procesu, monitorowanych zmiennych diagnostycznych jak i symulacji procesów precyzyjnego szlifowania,
- mobilność jako cecha systemu ułatwiająca jego zastosowanie w elastycznych systemach produkcyjnych,
- możliwość realizacji zadań zdalnie zarówno przez operatora jak system przetwarzania i analizy danych diagnostycznych,
- normalizacja zmiennych diagnostycznych z wykorzystaniem zbiorów rozmytych zapewniająca równoczesną ocenę stopnia istotności wpływu danej zmiennej na monitorowany wskaźnik jakości,
- optymalizacja decyzji o zmianie parametrów procesu, jak również ocena stopnia wpływu skumulowanych skutków niekorzystnych oddziaływań na jakość procesu dokonywana w środowisku rozmytym,

- ocena dokładności obróbki w procesach precyzyjnego szlifowania na podstawie zbioru parametrów o wysokiej zdolności klasyfikacyjnej,
- symulacja wyników procesu precyzyjnego szlifowania umożliwiającą prognozowanie skumulowanego oddziaływania niedokładności występujących w procesie na jakość powierzchni.

Według opracowanej koncepcji procesy precyzyjnego szlifowania mogą być realizowane z zastosowaniem hybrydowego systemu monitorowania, optymalizacji i prognozowania jakości procesów obróbki wyposażonego w warstwę zdalnej, głosowej i wizualnej komunikacji operatora i systemu (rys. 66).



Rys. 66. Koncepcja zdalnej, głosowej i wizualnej komunikacji operatora i systemu monitorowania i optymalizacji procesów mikro- i nano obróbki [22]

W założeniach opracowanej koncepcji pozyskiwanie i przekazywanie danych procesowych, obserwacja, nadzorowanie oraz sterowanie procesem, podejmowanie decyzji, przekazywanie uprawnień i dostępu do środków materialnych, inicjowanie przedsięwzięć oraz operacji technologicznych, a także prognozowanie wyników, może odbywać się bez ograniczeń, dotyczących przemieszczeń oraz położenia operatorów i urządzeń technologicznych.

Wykorzystywanie technologii mobilnych w systemach produkcyjnych umożliwi sprawne projektowanie i optymalizację procesu wytwarzania, monitorowanie przepływu elementów oraz wykorzystywania zasobów, nadzorowanie procesów, wizualizację oraz prognozowanie wyników. Technologie mobilne stają się platformą umożliwiającą zarządzanie rozproszonym systemem produkcyjnym, nastawionym na szybką reakcję na zmieniające się wymagania rynku i klienta.

Zastosowanie technologii mobilnych umożliwia zdalną kontrolę jakości procesu produkcji przez operatora znajdującego się w dowolnej odległości. Ma to duże znaczenie dla rozwoju nowych, efektywnych i elastycznych metod produkcji oraz może przyczynić się do wzrostu wydajności i obniżenia kosztów procesów produkcji. Opracowane rozwiązanie może należeć do prób stworzenia standardu aplikacji mobilnych do monitorowania, optymalizacji i prognozowania jakości procesów wytwarzania z wykorzystaniem obustronnej głosowej i wizualnej komunikacji operatora z urządzeniem technologicznym. Tematyka ta wkrótce stanie się jedną z najważniejszych dla postępu technologicznego.

**Wykaz publikacji dotyczących powyższych zagadnień:**

22. **Lipiński D.**, Majewski M.: *Intelligent Monitoring and Optimization of Micro- and Nano-Machining Processes*. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2014, 317, str. 101-110. ISSN 2194-5357
23. **Lipiński D.**, Majewski M.: *Interactive Hybrid Systems for Monitoring and Optimization of Micro- and Nano-machining Processes*. The 20th International Conference on Neural Information Processing (ICONIP 2013), 3-7 November 2013, Daegu, Korea. Lecture Notes in Computer Science Vol. 8227, 2013, Springer 2013, str. 360-367.
24. **Lipiński D.**, Majewski M.: *Koncepcja zdalnej, głosowej i wizualnej komunikacji operatora i systemu monitorowania i optymalizacji procesów mikro- i nanoobróbki*. Pomiar Automatyka Kontrola. PAK vol. 59, nr 7/2013, str. 648-651,
25. **Lipiński D.**, Kacalak W.: *Ocena wpływu wybranych zmiennych procesu szlifowania na dokładność obróbki z wykorzystaniem wnioskowania rozmytego*, XXIX Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Sekcja Podstaw Technologii Komitetu Budowy Maszyn PAN, Dział Wydawnictw Akademii Morskiej w Gdyni, ISBN 83-88579-66-5, Gdańsk-Jurata 2006, str. 153-156.
26. Kacalak W., Tomkowski R., **Lipiński D.**, Szafraniec F., *System oceny struktury geometrycznej powierzchni po obróbce ściernej*, Mechanik, Tom: 87 Zeszyt: 8-9, 2014.
27. Kacalak W., **Lipiński D.**, Bałasz B., Królikowski T., Bernat A., Tomkowski R., Szafraniec F.: *Wybrane problemy w pomiarach nierówności, ocenie chropowatości i klasyfikacji topografii powierzchni na podstawie ich cech stereometrycznych*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2010 , str. 7-64

## Modelowanie i prognozowanie rozkładu mikrotwardości w warstwie azotowanej z zastosowaniem sieci wielowarstwowych

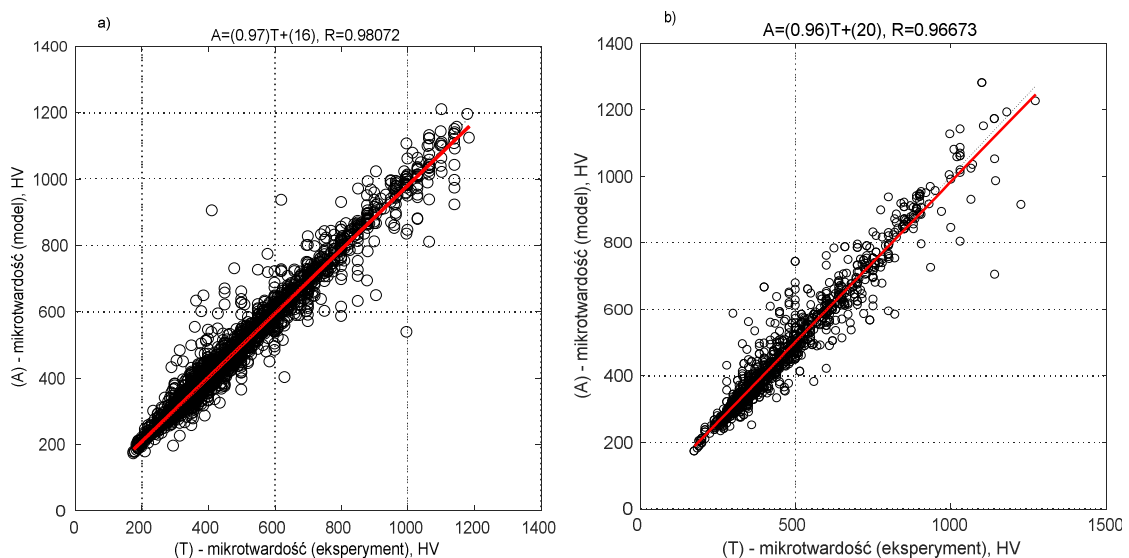
Badania naukowe dotyczące zagadnień modelowania procesów autor prowadził również w odniesieniu do obróbek cieplno-chemicznych stopów żelaza. W ramach prowadzonych badań naukowych autor realizował zadania dotyczące modelowania i prognozowania rozkładu mikrotwardości w warstwie azotowanej.

Prowadzone prace badawcze były realizowane we współpracy z prof. dr hab. inż. Jerzym Ratajskim z Instytutu Mechatroniki, Nanotechnologii i Techniki Próżniowej (obecnie Wydział Technologii i Edukacji) Politechniki Koszalińskiej kierującym zadaniem pt. *Rozwój inteligentnych narzędzi dla procesów obróbek powierzchniowych* w ramach prowadzonego przez Instytut Technologii Eksploatacji w Radomiu programu wieloletniego pt. *Doskonalenie systemów rozwoju innowacyjności w produkcji i eksploatacji w latach 2004-2008*.

Kontrolowanie procesu azotowania stali możliwe jest między innymi poprzez określenie wpływu parametrów procesu na strukturę warstwy dyfuzji. Złożona zależność między parametrami procesu azotowania, składem chemicznym azotowanej stali a rozkładem mikrotwardości w warstwie przypowierzchniowej skłania do zastosowania sieci neuronowych w zagadnieniach ich modelowania.

Do modelowania procesu mikrotwardości wykorzystano wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych w ostatnich kilkunastu latach na Politechnice Koszalińskiej i Instytucie Technologii Eksploatacji w Radomiu. Określały one wpływ głównych parametrów procesu (temperatury  $T$ , czasu  $t$  i potencjału azotowego  $K_H$ ) oraz wielkości opisujących skład chemiczny stali (stężenie atomowe 11 pierwiastków azotkotwórczych) na rozkład mikrotwardości

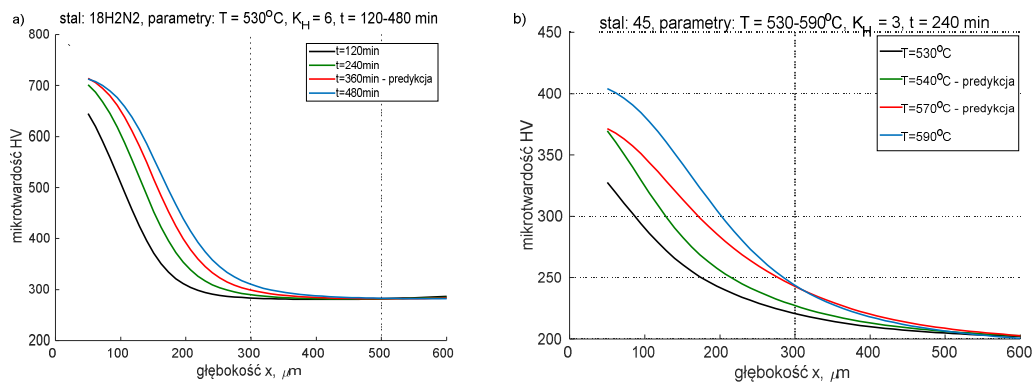
Na podstawie wyznaczonych wartości błędów predykcji modelu dla danych testowych dokonano wyboru struktury sieci neuronowej o najmniejszych wartościach błędu. Poprawność odwzorowania danych ze zbioru uczącego i testowego opracowanego modelu przedstawiono na rysunku 67.



Rys 67. Poprawność odwzorowania danych ze zbioru uczącego (a) i testowego (b) dla sieci neuronowej o strukturze 19-18-3-1



Dokonano weryfikacji eksperymentalnej opracowanego modelu oraz określono jego zdolność do prognozowania (rys. 68).



Rys. 68. Przykładowe wyniki predykcji rozkładu mikrotwardości w warstwie przypowierzchniowej z zastosowaniem modelu neuronowego dla: stali 18H2N2, parametrów:  $T=530^{\circ}\text{C}$ ,  $K_H = 6$  (a); stali 45, parametrów:  $K_H = 3$ ,  $t = 240$  min (b)

W efekcie prowadzonych prac badawczych opracowano model neuronowy umożliwiający określenie wartości przyrostu mikrotwardości  $\Delta HV$  w odległości  $x$  od powierzchni przedmiotu. Opracowany model prawidłowo opisuje rozkład mikrotwardości w warstwie azotowanej i może być wykorzystywany zarówno do prognozowania mikrotwardości w warstwach przypowierzchniowych jak i do doboru gatunku stali oraz parametrów procesu azotowania zapewniających oczekiwany rozkład mikrotwardości w strefie dyfuzji.

#### Szczegółowe wyniki prowadzonych w tym zakresie prac badawczych zawarto w zbiorze publikacji:

28. Lipiński D., Ratajski J., *Modeling of microhardness profile in nitriding processes using artificial neural network*, International Conference on Intelligent Computing ICIC 2007: Advanced Intelligent Computing Theories and Applications, Lecture Notes in Computer Science, 4682, 2007, str. 245-252.
29. Ratajski J., Lipiński D., Suszko T., Dobrodziej J., Michalski J., *Artificial neural network prediction of the microhardness profile in the nitrided layers*, Problemy Eksploatacji, 2, 2006, str. 139-148.
30. Ratajski J., Lipiński D., Suszko T., Dobrodziej J., Michalski J., *Zastosowanie sztucznej sieci neuronowej do prognozowania profili twardości w warstwie azotowanej*, Inżynieria Materiałowa, 3, 2006, str. 516-518.
31. Olik R., Ratajski J., Suszko T., Dobrodziej J., Lipiński D., Michalski J., *Projektowanie i monitorowanie procesu azotowania gazowego*, Problemy Eksploatacji, 1, 2009, str. 145-156.
32. Olik R., Ratajski J., Dobrodziej J., Suszko T., Michalski J., Lipiński D., *Projektowanie, kontrola i wizualizacja in-situ procesu azotowania gazowego*, Inżynieria Materiałowa, 6, 2008, str. 839-842.

## 5. Charakterystyka działalności naukowej

| <b>Ilościowy wykaz najważniejszych osiągnięć naukowo-badawczych</b><br>(szczegółowy wykaz osiągnięć zawarto w załączniku nr 4)   |                             |                          |                  |
|--|-----------------------------|--------------------------|------------------|
| <b>Wykaz osiągnięć</b>   | <b>Przed<br/>doktoratem</b> | <b>Po<br/>doktoracie</b> | <b>Łącznie</b>   |
| Publikacji ogółem  | 18                          | 69                       | 87               |
| Publikacje w czasopismach naukowych,<br>naukowo-technicznych oraz materiałach<br>konferencyjnych indeksowanych w <i>Web of<br/>Science</i> <sup>™</sup>                          | 1                           | 8                        | 9                |
| w tym publikacje w czasopismach<br>naukowych i naukowo-technicznych<br>wyróżnionych w <i>Journal Citation Reports</i> <sup>®</sup>   | –                           | 4<br>IF = 7,906*         | 4<br>IF = 7,906* |
| Publikacje w czasopismach naukowych i<br>naukowo-technicznych znajdujących się na liście<br>B wykazu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa<br>Wyższego                                | –                           | 35                       | 35               |
| Autorstwo monografii   | –                           | 1                        | 1                |
| Publikacje naukowe publikowane w krajowych<br>wydawnictwach monograficznych  | 5                           | 12                       | 17               |
| Publikacje naukowe publikowane w materiałach<br>konferencyjnych konferencji międzynarodowych   | 9                           | 10                       | 19               |
| Publikacje naukowe publikowane w materiałach<br>konferencyjnych konferencji krajowych  | 3                           | 3                        | 6                |
| Cytowania / index Hirscha według <i>Web of<br/>Science</i> <sup>™</sup> (stan na dzień 18-04-2108)   | – / –                       | 21 / 3                   | 21 / 3           |
| Cytowania / index Hirscha według <i>Scopus</i> <sup>®</sup><br>(stan na dzień 18-04-2018)  | – / –                       | 24 / 3                   | 24 / 3           |
| Cytowania / index Hirscha według <i>Google<br/>Scholar</i> <sup>®</sup><br>(stan na dzień 18-04-2018)  | – / –                       | 106 / 7                  | 106 / 7          |
| Recenzje w czasopismach naukowych i naukowo-<br>technicznych indeksowanych w <i>Web of Science</i> <sup>™</sup><br>i wyróżnionych w <i>Journal Citation Reports</i> <sup>®</sup> | –                           | 2                        | 2                |
| Recenzje w krajowych czasopismach naukowych<br>i naukowo-technicznych  | –                           | 16                       | 16               |
| Udział w naukowych konferencjach<br>międzynarodowych / wygłoszone referaty   | 4 / 4                       | 2 / 2                    | 6 / 6            |
| Udział w naukowych konferencjach<br>krajowych/wygłoszone referaty  | 1 / 1                       | 3 / 4                    | 4 / 5            |
| Członkostwo w komitetach naukowych<br>konferencji krajowych  | –                           | 1                        | 1                |

|   |   |   |   |
|---|---|---|---|
| Udział w międzynarodowych projektach badawczych | – | 1 | 1 |
| Kierowanie krajowymi projektami badawczymi      | – | 1 | 1 |
| Udział w krajowych projektach badawczych        | 1 | 8 | 9 |
| Zlecone prace badawcze na rzecz przemysłu       | – | 6 | 6 |
| Zagraniczne staże naukowe                       | – | 1 | 1 |
| Nagrody i wyróżnienia za działalność naukową    | – | 3 | 3 |

\* dla publikacji z 2018 roku przyjęto najbardziej aktualną wartość współczynnika wpływu (tj. wartość współczynnika wpływu czasopisma z 2016 roku).

Problematyka badawcza poruszana w dorobku publikacyjnym (po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych) jest skoncentrowana na zagadnieniach związanych z analizą, modelowaniem i optymalizacją procesów obróbki ścierniej. W szczególności obejmuje ona:

- analizę i ocenę form oraz stopnia zużycia narzędzi ściernych z zastosowaniem metod morfologii matematycznej;
- analizę wpływu właściwości geometrycznych ostrzy skrawających, ze szczególnym uwzględnieniem agregatów ściernych, na efektywność procesu szlifowania;
- ocenę i klasyfikację powierzchni po obróbce ścierniej z zastosowaniem metod jakościowych i ilościowych;
- modelowanie, prognozowanie wyników obróbki oraz optymalizację parametrów i warunków procesu szlifowania.

Dorobek naukowo-badawczy publikowany był między innymi w poniższych czasopismach naukowych o zasięgu międzynarodowym i krajowym:

- czasopisma posiadające współczynnik wpływu IF indeksowane w Web of Science™
  - International Journal of Advanced Manufacturing Technology;
  - Metrology and Measurement Systems;
  - Scanning;
- materiały konferencyjne indeksowane w Web of Science™
  - Advances in Intelligent Systems and Computing;
  - Lecture Notes in Computer Science;
  - Proceedings of the European Simulation Multiconference;
- czasopisma nieposiadające współczynnika wpływu IF nieindeksowane w Web of Science™:
  - Inżynieria Maszyn;
  - Inżynieria Materiałowa;
  - Journal of Machine Engineering;
  - Mechanik;
  - Pomiary, Automatyka, Kontrola;
  - Problemy Eksploatacji.

## 6. Charakterystyka działalności dydaktycznej, popularyzatorskiej i organizacyjnej

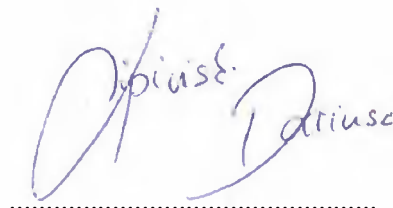
| <b>Ilościowy wykaz najważniejszych osiągnięć dydaktycznych, popularyzatorskich i organizacyjnych</b><br>(szczegółowy wykaz osiągnięć zawarto w załączniku nr 5) |                         |                |
|---|-------------------------|----------------|
| <b>Wykaz osiągnięć</b>  | <b>Liczba osiągnięć</b> | <b>Łącznie</b> |
| Uczestnictwo w programach europejskich oraz innych programach międzynarodowych i krajowych  | 4                       | 4              |
| Udział w międzynarodowych/krajowych konferencjach naukowych   | 6 / 4                   | 10             |
| Udział w komitetach naukowych krajowych konferencji naukowych   | 1                       | 1              |
| Udział w komitetach organizacyjnych krajowych konferencji naukowych   | 4                       | 4              |
| Udział w konsorcjach i sieciach badawczych  | 1                       | 1              |
| Recenzowanie publikacji w czasopismach międzynarodowych/krajowych   | 2 / 16                  | 18             |
| Stáže dydaktyczne w zagranicznych ośrodkach naukowych lub akademickich  | 4                       | 4              |
| Promotorstwo pomocnicze w realizowanych/zakończonych przewodach doktorskich   | 2 / 1                   | 3              |
| Promotorstwo / recenzowanie prac dyplomowych inżynierskich i magisterskich  | 27 / 18                 | 45             |
| Prowadzone przedmioty i formy dydaktyczne   | 9                       | 9              |
| Opracowania dla potrzeb dydaktyki   | 16                      | 16             |
| Pełnione funkcje organizacyjne  | 17                      | 17             |
| Nagrody i wyróżnienia w zakresie dorobku dydaktycznego, popularyzatorskiego i organizacyjnego   | 10                      | 10             |

Realizowana przeze mnie działalność dydaktyczna, popularyzatorska oraz organizacyjna jest między innymi konsekwencją prowadzonej działalności badawczej (uczestnictwo w dziewięciu grantach badawczych i rozwojowych). Istotnym elementem tej działalności było prezentowanie wyników prac badawczych na międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych oraz międzynarodowa współpraca naukowo-dydaktyczna (między innymi z: VŠB-TU Ostrava, Czechy; Technical University in Košice, Faculty of Manufacturing Technologies in Presov, Słowacja).

Prowadzona działalność naukowa znajduje swe odzwierciedlenie w opiece naukowej i dydaktycznej nad doktorantami i studentami. Decyzją Rady Wydziału Mechanicznego pełniłem funkcję promotora pomocniczego w trzech przewodach doktorskich, w tym jednym zakończonym i obronionym z wyróżnieniem. Pełniłem również funkcję promotora lub recenzenta w 45 pracach dyplomowych inżynierskich i magisterskich.

W okresie po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych pełniłem wiele funkcji organizacyjnych w tym kilka pochodzących w wyboru członków społeczności akademickiej: prodziekan ds. nauczania (*kadencja 2008-2012*), prodziekan ds. kształcenia (*kadencja 2012-2016*), członek Senatu Politechniki Koszalińskiej (*kadencja 2008-2012, kadencja 2012-2016, kadencja 2016-2020*), członek Rady Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej (*kadencja 2008-2012, kadencja 2012-2016, kadencja 2016-2020*), elektor w Kolegium Elektorów Politechniki Koszalińskiej (*kadencja 2008-2012, kadencja 2012-2016, kadencja 2016-2020*), elektor w Kolegium Elektorów Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej (*kadencja 2012-2016, kadencja 2016-2020*).

Pełniąc funkcję prodziekana odpowiedzialnego za proces kształcenia, prowadziłem i koordynowałem realizację szeregu programów, finansowanych ze środków europejskich i krajowych, wspierających i modernizujących proces kształcenia oraz wspomagających dostosowanie programów kształcenia do wymagań rynku pracy. W tym czasie liczba kierunków prowadzonych przez Wydział Mechaniczny Politechniki Koszalińskiej wzrosła z dwóch (Mechanika i Budowa Maszyn, Technika Rolnicza i Leśna) do sześciu (Mechanika i Budowa Maszyn, Technika Rolnicza i Leśna, Transport, Technologia Żywności i Żywnienie Człowieka, Zarządzanie i Inżynieria Produkcji, Energetyka).

A handwritten signature in blue ink, reading "Dariusz Lipiński". The signature is written in a cursive style. Below the signature is a horizontal dotted line.

dr inż. Dariusz Lipiński