

Profesor
WOJCIECH
KACALAK

DOKTOR HONORIS CAUSA POLITECHNIKI POZNAŃSKIEJ

budowa
i eksploatacja maszyn

budowa
i eksploatacja
maszyn

Profesor
WOJCIECH
KACALAK

DOKTOR
HONORIS
CAUSA
POLITECHNIKI
POZNAŃSKIEJ

Poznań 2015

OPRACOWANIE
Zespół pod redakcją mgr Krystyny Długosz

OPRACOWANIE GRAFICZNE, ŁAMANIE
Piotr Gołębniak

© Politechnika Poznańska, Poznań 2015

ISBN 978-83-7775-393-4

DRUK, OPRAWA:
Agencja Reklamowa COMPRINT
60-465 Poznań, ul. Heleny Rzepeckiej 26A
tel. 61 84 22 173, tel. kom. 602 26 64 26
e-mail: comprint@comprint.com.pl
http://www.comprint.com.pl

SPIS TREŚCI

PROF. DR HAB. INŻ. TOMASZ ŁODYGOWSKI
JM REKTOR POLITECHNIKI POZNAŃSKIEJ
SŁOWO WSTĘPNE 5

PROF. DR HAB. INŻ. ADAM HAMROL
PROMOTOR
LAUDATIO 7

PROF. DR HAB. INŻ. WOJCIECH KACALAK
WYKŁAD DOKTORA HONORIS CAUSA 15

ŻYCIORYS DOKTORA HONORIS CAUSA 75

WNIOSEK O NADANIE PROFESOROWI WOJCIECHOWI KACALAKOWI TYTUŁU DOKTORA HONORIS CAUSA POLITECHNIKI POZNAŃSKIEJ 103

RECENZENCI DOKTORATU HONOROWEGO 105

UCHWAŁA SENATU POLITECHNIKI POZNAŃSKIEJ 107

DOKTORZY HONORIS CAUSA POLITECHNIKI POZNAŃSKIEJ . . 109

prof. dr hab. inż. Tomasz Łodygowski
JM Rektor Politechniki Poznańskiej

SŁOWO WSTĘPNE

Szanowni Państwo,

każdego dnia jesteśmy świadkami przemian cywilizacyjnych, które nie dokonałyby się bez udziału badaczy, naukowców przełamujących stereotypy, kreujących nowe drogi rozwoju społeczeństw. I tak jest z pewnością w przypadku działalności naukowej, dydaktycznej i organizatorskiej Profesora Wojciecha Kacalaka.

Wszechstronna, bogata i owocna działalność naukowa i dydaktyczna Laureata koncentruje się wokół takich specjalności jak: mechatronika, technologia maszyn, a zwłaszcza optymalizacja i automatyzacja procesów bardzo dokładnej obróbki ściernej oraz budowa i eksploatacja precyzyjnych urządzeń technicznych.

Profesor Wojciech Kacalak jest twórcą unikatowego w skali międzynarodowej, pakietu do modelowania i symulacji procesów obróbki ściernej, z uwzględnieniem zaawansowanych metod modelowania kształtu i położenia ziaren ściernych, probabilistycznych cech ich zużycia i wykruszeń oraz skutków złożonych mechanizmów kumulacji wielkich zbiorów zdarzeń losowych w postaci oddziaływań ziaren ściernych na warstwę wierzchnią obrabianego przedmiotu.

Profesor jest także wychowawcą i mentorem wielu pokoleń naukowców, którzy czerpali od Niego zachętę do nieustannego doskonalenia się i ciągłego poszukiwania odpowiedzi na najtrudniejsze nawet pytania. Jest prekursorem wzbogacenia procesu kształcenia studentów i inżynierów o podstawy kreatywności oraz metody innowacyjnego rozwiązywania różnorodnych problemów, jako coraz ważniejszej umiejętności, niezbędnej dla osiągania sukcesów zawodowych i uwalniania potencjału twórczego współpracowników.

Dziś w uznaniu wielu zasług Profesora Wojciecha Kacalaka dla polskiego środowiska naukowego, w tym także jego wieloletniej współpracy z naszą Uczelnią na wszystkich polach działalności akademickiej, Politechnika Poznańska nadaje Mu tytuł doktora honoris causa. Zaszczyt to dla nas i honor szczególny, że możemy w ten skromny sposób wyrazić naszą wdzięczność i szacunek.

prof. dr hab. inż. Adam Hamrol
Promotor

LAUDATIO
poświęcone Panu
prof. dr. hab. inż. Wojciechowi Kacalakowi

Czcigodny Doktorze Honoris Causa,
Magnificencjo Rektorze,
Dostojni Goście,
Wysoki Senacie, Szanowni Państwo,

Z woli Senatu Politechniki Poznańskiej przypadł mi zaszczyt pełnienia roli promotora i wygłoszenia laudacji podczas uroczystości nadania tytułu Doktora Honoris Causa Politechniki Poznańskiej, prof. dr. hab. inż. Wojciechowi Kacalakowi. Nadanie tej godności jest wyrazem uznania naszego środowiska dla wielkiego wkładu prof. Wojciecha Kacalaka w rozwój nauki, w szczególności w zakresie budowy i eksploatacji maszyn oraz mechaniki, a także w rozwój polskiego wyższego szkolnictwa technicznego.

Prof. dr hab. inż. Wojciech Kacalak urodził się 30 listopada 1945 r. w Zduńskiej Woli. Jest absolwentem Politechniki Łódzkiej. Studia ukończył w roku 1970. Został wyróżniony nagrodą tzw. „Złotej Łódki" w konkursie na najlepszego studenta łódzkiego środowiska akademickiego.

Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w Instytucie Budowy Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej w roku 1974. W tejże uczelni, już po 4 latach, w roku 1978 habilitował się na Wydziale Mechanicznym. Obie prace – zarówno doktorska jak i habilitacyjna – były wyróżnione. Tytuł naukowy profesora uzyskał w roku 1989, a w 1991 został mianowany na stanowisko profesora zwyczajnego.

Obszarem prac naukowych prof. Wojciecha Kacalaka jest mechanika precyzyjna oraz technologia maszyn, a w szczególności specjalności związane z mechatroniką, diagnostyką, optymalizacją i automatyzacją procesów mikroobróbki oraz procesów bardzo dokładnej obróbki ściernej, w tym materiałów trudno obrabialnych, a także z budową i eksploatacją precyzyjnych urządzeń technologicznych.

W latach 90-tych prof. W. Kacalak skoncentrował swoje zainteresowania naukowe na teoretycznych i doświadczalnych podstawach sztucznej inteligencji, przede wszystkim na zastosowaniach sztucznych sieci neuronowych, teorii zbiorów rozmy-

tych i logiki rozmytej, a także hybrydowych, inteligentnych systemów diagnostyki, kompensacji zakłóceń oraz optymalizacji procesów i systemów technicznych w budowie i eksploatacji maszyn.

Dorobek publikacyjny prof. Wojciecha Kacalaka, obejmuje ponad 300 pozycji, w tym 3 monografie, ponad 90 publikacji zagranicznych w czasopismach i wydawnictwach o światowym zasięgu. Warto wymienić tutaj:

- The American Society of Mechanical Engineers (ASME), Journal of Mechanisms and Robotics;
- Revue d'automatique et de productique appliquées. Journal of Automation and CIM, Hermes, Francja;
- Intelligent Engineering Systems Through Artificial Neural Networks. ASME Press, USA;
- VDI Berichte – Bearbeitung neuer Werkstoffe, VDI Verlag, Düsseldorf, Niemcy;
- Werkstatt und Betrieb – Zeitschrift für Maschinenbau, Konstruktion und Fertigung, Carl Hanser Verlag, Niemcy;
- Industrie Diamanten Rundschau – IDR Düsseldorf, Niemcy,
- Zeitschrift für Industrielle Fertigung-Spanende Fertigung, Springer-Verlag, Berlin, Heidelgerg, Nowy Jork, Tokio;
- WT Produktion und Management, Springer-Verlag, Berlin, Heidelgerg, Nowy Jork, Londyn, Paryż, Tokio;
- Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik. Gesellschaft für Angewandte Mathematik und Mechanik;
- Springer Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York;
- Advances in Soft Computing, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York;
- Engineering Mechanics International Journal for Theoretical and Applied Mechanics.

Profesor może poszczycić się osiągnięciami naukowymi, które uzyskały potwierdzenie nowości, znaczenia oraz potencjału innowacyjnego, poprzez wyróżnienia nagrodami Ministra Edukacji Narodowej oraz w konkursach krajowych lub międzynarodowych. Najważniejsze z tych osiągnięć to opracowania:

- w zakresie procesów obróbki:
  - nowych metod w pełni zautomatyzowanego, precyzyjnego szlifowania elementów z materiałów trudnoobrabialnych, stosowanych w przemyśle elektronicznym i obronnym;
  - podstaw optymalizacji procesów szlifowania i wygładzania z uwzględnieniem probabilistycznego charakteru procesów i stochastycznie zmiennych warunków realizacji;
  - niekonwencjonalnych narzędzi ściernych o budowie warstwowej i pakietowej z agregatami ściernymi oraz strefowo zróżnicowanymi właściwościami;
  - kompleksowej charakterystyki procesu mikroskrawania materiałów trudnoobrabialnych, z określeniem wpływu ekstremalnych warunków pracy ziarna,

a zwłaszcza badania procesów mikroskrawania w niskich temperaturach (do 78 K) oraz w próżni;
  - podstaw kompleksowej oceny topografii powierzchni technicznych z uwzględnieniem zdolności klasyfikacyjnej parametrów;
- w obszarze konstrukcji:
  - automatycznych wielowrzecionowych szlifierek do obróbki elementów ceramicznych i piezoceramicznych w warunkach produkcji masowej;
  - nowych metod kontroli kształtu stożkopochodnych powierzchni śrubowych;
  - teoretycznych i doświadczalnych podstaw konstrukcji i technologii precyzyjnych, bezluzowych przekładni ślimakowych (kilkanaście rozwiązań);
- w zakresie szeroko rozumianej sztucznej inteligencji:
  - nowej, efektywnej odmiany algorytmu konkurencyjnego uczenia sztucznych sieci neuronowych bez nadzorowania;
  - nowych inteligentnych systemów minimalizacji niedokładności i kompensacji zakłóceń w procesach precyzyjnego szlifowania;
  - nowych inteligentnych systemów diagnostyki w procesach precyzyjnego szlifowania, inteligentnego systemu minimalizacji odkształceń cieplnych i kompensacji odchyłek położenia ściernicy i przedmiotu w procesie precyzyjnego szlifowania długich powierzchni śrubowych;
  - inteligentnego systemu minimalizacji odkształceń mechanicznych;
  - pakietu do modelowania i symulacji procesów obróbki ściernej z uwzględnieniem zaawansowanych metod modelowania kształtu i położenia ziaren ściernych, probabilistycznych cech ich zużycia i wykruszeń, stereometrii śladów skrawania i wypływek oraz kinematyki, a także skutków różnorodnych zakłóceń;
  - podstaw budowy interaktywnych systemów wspomagania projektowania z zastosowaniem symbolicznego zapisu cech projektowanych elementów i zautomatyzowanym tworzeniem graficznej reprezentacji projektu z wykorzystaniem sztucznej inteligencji i metod twórczego rozwiązywania problemów.

Profesor współpracuje z ośrodkami naukowymi w Polsce i za granicą, w Niemczech, we Francji i na Węgrzech, a wraz ze swoimi współpracownikami utrzymuje ścisłe kontakty z ośrodkami akademickimi w Hiszpanii, Francji, Stanach Zjednoczonych, Chinach i Rosji. Szczególnie owocna jest współpraca z prof. Thomasem G. Mathia, dyrektorem naukowym zespołów „Surface Topography & Abrasion" – In Laboratory of Tribology and Dynamics of Systems, której efektem jest wiele wspólnych prac naukowych i publikacji. Wiele publikacji powstało również we współpracy z zespołami, którymi kieruje prof. dr hab. inż. Pierre Joseph Marché z Ecole Nationale d'Ingénieurs de Bourges.

Prof. Wojciech Kacalak jest promotorem 17 prac doktorskich. Prowadzone przez niego prace wyróżniają się wysokim poziomem naukowym – 14 prac doktorskich zostało wyróżnionych, a siedmiu jego wychowanków uzyskało stopnie naukowe doktora habilitowanego. Można śmiało stwierdzić, że Profesor jest twórcą szkoły

naukowej w zakresie nowych metod precyzyjnej obróbki ściernej oraz zastosowań sztucznej inteligencji w technologii maszyn. W „jego szkole" pracuje ponad 30 pracowników naukowych i doktorantów, w tym 3 profesorów, 6 doktorów habilitowanych, 12 doktorów i kilkunastu doktorantów.

Profesor jest nie tylko wybitnym teoretykiem. W Jego dorobku ważne są także wdrożenia przemysłowe. Jest m.in. autorem bądź współautorem:

- nowych metod precyzyjnego, zautomatyzowanego szlifowania małych elementów z materiałów trudno obrabialnych, w przemyśle elektronicznym;
- wielu generacji automatycznych linii do precyzyjnej obróbki ceramiki i piezoceramiki;
- hydraulicznej gładzarki do cylindrów z bezstopniową regulacją parametrów kinematycznych i nacisków roboczych;
- rodziny zasilaczy elektrohydraulicznych o ciśnieniu 63 MPa;
- szlifierki do głowic i bloków silników spalinowych;
- szlifierki do zaworów;
- pomp hydraulicznych o ciśnieniu do 63 MPa;
- pras i rozpieraczy hydraulicznych;
- sprężarki z wirującym tłokiem;
- programów obliczeniowych i narzędziowych napisanych w języku C/C++.

Profesor jest autorem bądź współautorem 81 patentów, z których ponad połowa została wdrożona. Należy podkreślić, że innowacyjne rozwiązania projektowe oraz patenty prof. Wojciecha Kacalaka są często cytowane w opisach patentowych urzędów patentowych w Stanach Zjednoczonych i Niemczech. Warto także wspomnieć, że opracował 3 normy, opublikowane przez PKN dotyczące narzędzi do obróbki ściernej i obróbki wiórowej kół zębatych.

Wiele osiągnięć naukowych oraz wdrożeniowych Profesora jest efektem współpracy z organizacjami przemysłowymi między innymi: Tyrolit Schleifmittelwerke Swarovski K.G. Austria, GHW Grote & Hartmann GmbH w Wuppertalu, Niemcy, Zakład Wytwarzania Artykułów Ściernych ANDRE ABRASIVE ARTICLES Robert Andre, Saint-Gobain Abrasives i firmą NORTON, Holdingiem ZREMB Gorzów, Zakładami Ceramiki Radiowej CERAD w Warszawie, a ponadto z licznymi zakładami i centrami badawczymi przemysłu narzędziowego, produkcji obrabiarek i urządzeń technologicznych, przemysłu obronnego, samochodowego i maszyn roboczych. Związki z organizacjami przemysłowymi w Niemczech rozwijane były również w ramach projektu DAAD obejmującego staże w zakładach grupy Volkswagena w Wolfsburgu, w zakładach Opel w Bochum, w zakładach firmy Mercedes-Benz w Stuttgarcie oraz BMW Group Research and Technology w Monachium.

Poziom pracy naukowej oraz otwartość Profesora na innych sprawiają, że jest często zapraszany do recenzowania i opiniowania dorobku naukowego. Profesor jest autorem wielu opinii dotyczących nadania tytułów i godności doktora honoris causa, ponad 80 recenzji wniosków o nadanie tytułu naukowego, nadanie stopnia naukowego doktora habilitowanego i doktora, w tym recenzji w przewodach zagranicznych,

ponad 280 recenzji dorobku naukowego, monografii, artykułów naukowych, w tym ponad 140 recenzji projektów badawczych (KBN) MNiSW.

Życie zawodowe Profesora jest od ponad 40 lat związane z Koszalinem, początkowo jako pracownika Wyższej Szkoły Inżynierskiej a następnie Politechniki Koszalińskiej. Na uczelniach tych pełnił różnorodne funkcje. W latach 1978–1981 był prorektorem ds. kształcenia. Od 1982 r. przez dwie kadencje pełnił funkcję dziekana Wydziału Mechanicznego, następnie funkcję prorektora ds. nauki. W okresie 1993–1999 był rektorem uczelni. To właśnie w tym czasie uczelnia została przekształcona w Politechnikę. W tym też okresie nastąpił jej wyjątkowo dynamiczny rozwój. Powstały nowe kierunki studiów magisterskich, utworzono nowe wydziały, powstał Park Naukowo-Technologiczny, trzykrotnie wzrosła liczba profesorów i doktorów habilitowanych, uzyskano kolejne uprawnienia do nadawania stopni naukowych. Liczba studentów wzrosła do poziomu zapewniającego możliwość silnego oddziaływania cywilizacyjnego w regionie i kraju. Politechnika uzyskała w tym czasie nie tylko status i znaczenie dobrej i dużej uczelni akademickiej, ale także uznanie wśród innych ośrodków naukowych. Bardzo korzystnie rozwinęła się naukowa i dydaktyczna współpraca międzynarodowa. Koszalin stał się miastem akademickim, a Politechnika rozwinęła swoją funkcję i rolę centrum rozwoju i współpracy regionalnej. Po zakończeniu pełnienia funkcji rektorskiej prof. Wojciech Kacalak od 1999 r. do 2005 r. był dziekanem Wydziału Mechanicznego. Obecnie kieruje Katedrą Mechaniki Precyzyjnej. Warto podkreślić, że od 2003 roku jest prezesem Koszalińskiego Towarzystwa Naukowego.

Profesor Wojciech Kacalak jest aktywny w wielu gremiach ogólnokrajowych. Od 2007 roku pełni funkcję zastępcy przewodniczącego Komitetu Budowy Maszyn Polskiej Akademii Nauk. Jest członkiem Komitetu Budowy Maszyn Oddziału PAN w Poznaniu, członkiem Sekcji Technologii Maszyn i Sekcji Mechatroniki Komitetu Budowy Maszyn PAN, członkiem Polskiego Towarzystwa Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej, Polskiego Towarzystwa Informatycznego oraz uczestnikiem komitetów kilku innych stowarzyszeń naukowych. W grudniu 2012 roku prof. Wojciech Kacalak na podstawie wyników wyborów został członkiem Centralnej Komisji do Spraw Stopni i Tytułów.

Dokonania Profesora mają także swój wyraz w licznych wyróżnieniach i odznaczeniach. Najważniejsze z nich to:

- Złoty Medal Targów w Lipsku w dziedzinie zautomatyzowanych urządzeń technologicznych;
- pięć nagród Ministra za osiągnięcia w działalności naukowej, w tym dwie nagrody stopnia II;
- dwie Nagrody Ministra za osiągnięcia w działalności dydaktycznej;
- pięć Nagród Ministra za osiągnięcia organizacyjne związane z rozwojem Politechniki Koszalińskiej;
- tytuł I Wicemistrza Techniki NOT w krajowym konkursie „na wybitne osiągnięcia w dziedzinie techniki";
- dwukrotne wyróżnienie „za wybitne osiągnięcia wynalazcze" – Złota Odznaka 'DEDAL,;

- nagroda Prezydenta Miasta Koszalina za osiągnięcia w rozwoju regionu i miasta;
- wyróżnienie „Menadżer Pomorza Środkowego";
- dziewięć nagród w regionalnych konkursach NOT w zakresie wdrożeń nowej techniki, dotyczących nowych metod precyzyjnego szlifowania elementów ceramicznych, automatycznych urządzeń technologicznych, nowych narzędzi oraz metod pomiarowych i systemów kontroli jakości;
- wyróżnienie tytułem „Człowiek roku" na Pomorzu Środkowym;
- wyróżnienia w konkursach studenckich na najlepszego dydaktyka.

Profesor Wojciech Kacalak jest blisko związany z Politechniką Poznańską. Współpracuje z nami od niepamiętnych czasów, wspierając nas zwłaszcza w rozwoju kadry naukowej oraz bierze czynny udział w realizacji grantów i projektów dla przemysłu. Gościł często na Wydziale Budowy Maszyn i Zarządzania jako recenzent dorobku naukowego naszych pracowników. Każdy Jego pobyt wnosił coś nowego – prowadzone z nim dyskusje były dla wielu naszych pracowników naukowych inspiracją do dalszych badań i projektów. W ostatnim czasie razem z zespołami z Wydziału bierze udział w projektach dotyczących: „Zastosowania rozszerzonej rzeczywistości, interaktywnych układów i głosowego interfejsu operatora w sterowaniu urządzeniami dźwigowymi" oraz zastosowania inteligentnych systemów wizyjnych do nadzorowania i sterowania procesów obróbki skrawaniem". Przez wiele lat był przewodniczącym rady naukowej Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Obrabiarek i Urządzeń Specjalnych w Poznaniu, z którym Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania ściśle współpracował.

Magnificencjo Rektorze, Wysoki Senacie. Przedstawione przeze mnie dokonania prof. Wojciecha Kacalaka pozwalają uznać Go za wzór uczonego, inżyniera, nauczyciela i wychowawcy. Profesor był zawsze postrzegany, jako człowiek obdarzony pasją do szukania nowych możliwości zastosowania w naukach technicznych oraz w praktyce przemysłowej, osiągnięć nauk podstawowych, wyróżniając się przy tym nieprzeciętnym, błyskotliwym umysłem. Korzystając ze swojego przygotowania matematycznego opierał swoje prace na szerokiej i głębokiej analizie teoretycznej. Był prekursorem stosowania w pracach z zakresu symulacji procesów – zwłaszcza mikroskrawania – metod z zakresu informatyki. Jego osiągniecia sprawiają, że cieszy się uznaniem i autorytetem całego środowiska związanego z szeroko rozumianą budową maszyn.

Z racji wysokiego poziomu swoich prac naukowych, otwartości w dzieleniu się przemyśleniami i osiągnięciami, prof. Wojciech Kacalak od wielu lat jest uważany w środowisku naukowym inżynierów reprezentujących dyscyplinę „budowa i eksploatacja maszyn" za mentora.

Wypada mi zatem zwrócić się do Jego Magnificencji z prośbą o przeprowadzenie promocji i nadanie w obecności wszystkich zgromadzonych profesorowi Wojciechowi Kacalakowi godności Doktora Honoris Causa Politechniki Poznańskiej za znaczący wkład w rozwój polskiej nauki i technologii w zakresie budowy maszyn oraz za istotny wkład w rozwój kadry naukowej.

Q.F.F. F.Q.S.



W IMIENIU RZECZYPOSPOLITEJ POLSKIEJ
MY
REKTOR I SENAT POLITECHNIKI POZNAŃSKIEJ
ORAZ
DZIEKAN WYDZIAŁU BUDOWY MASZYN I ZARZĄDZANIA
I PROMOTOR PRAWNIE USTANOWIONY
ZA WSPÓLNĄ ZGODĄ SENATÓW
POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ I POLITECHNIKI ŁÓDZKIEJ
ORAZ ZACHODNIOPOMORSKIEGO UNIWERSYTETU TECHNOLOGICZNEGO W SZCZECINIE

N A D A L I Ś M Y

PROFESOROWI DOKTOROWI HABILITOWANEMU INŻYNIEROWI

W O J C I E C H O W I K A C A L A K O W I

WYBITNEMU SPECJALIŚCIE
W DZIEDZINIE BUDOWY I EKSPLOATACJI MASZYN

W UZNANIU OSIĄGNIĘĆ NAUKOWO-TECHNICZNYCH,
ZASŁUG W PRACY NAUKOWEJ I PEDAGOGICZNEJ
ORAZ ZASŁUG DLA ROZWOJU NAUKI I TECHNIKI

ZASZCZYTNY TYTUŁ, PRAWA I PRZYWILEJE Z NIM ZWIĄZANE

D O K T O R A H O N O R I S C A U S A

I W DOWÓD WIARYGODNOŚCI TEGO WYDARZENIA NINIEJSZY DYPLOM
OPATRZONY PIECZĘCIĄ POLITECHNIKI POZNAŃSKIEJ WYSTAWILIŚMY

POZNAŃ, DNIA 21 PAŹDZIERNIKA 2015 ROKU

TOMASZ ŁODYGOWSKI
REKTOR

OLAF CISZAK
DZIEKAN

ADAM HAMROL
PROMOTOR

Q.F.F.



F.Q.S.

SUMMIS AUSPICIIS SERENISSIMAE REI PUBLICAE POLONORUM

NOS

POLYTECHNICAE POSNANIENSIS RECTOR ET SENATUS

ET

FACULTATIS MACHINARUM AEDIFICANDARUM ATQUE ARTIS MODERANDI DECANUS

ET

PROMOTOR RITE CONSTITUTUS

COMMUNI CONSENSU SENATUUM POLYTECHNICAE CRACOVIENSIS
POLYTECHNICAE LODZENSIS
UNIVERSITATIS TECHNOLOGICAE POMERANIAE OCCIDENTALIS STETINENSIS

IN

VIRUM CLARISSIMUM AC DOCTISSIMUM

PROFESSOREM DOCTOREM HABILITATUM AC MACHINATOREM

ADALBERTUM KACALAK

VIRUM IN ARTE MACHINAS AEDIFICANDI ATQUE UTENDI
ERUDITISSIMUM ET PERITISSIMUM
QUI IN DISCIPLINIS ET ARTIBUS TECHNICIS MAGNOS HABUIT SUCCESSUS
QUI AD SCIENTIARUM STUDIA ET ARTEM DIDACTICAM PROMOVENDAM MULTUM VALUIT
QUI DE SCIENTIIS ET ARTE TECHNICA PROMOVENDA OPTIME EST MERITUS

HONORIS CAUSA DOCTORIS

NOMEN ET HONORES IURA ET PRIVILEGIA CONTULIMUS
IN EIUSQUE REI FIDEM HASCE LITTERAS POLYTECHNICAE POSNANIENSIS SIGILLO
SANCIENDAS CURAVIMUS

DATUM POSNANIAE DIE XXI MENSIS OCTOBRIS ANNO MMXV

THOMAS ŁODYGOWSKI
H. T. RECTOR

OLAVUS CISZAK
H. T. DECANUS

ADAMUS HAMROL
PROMOTOR

Wojciech Kacalak
Politechnika Koszalińska

METODYKA BADAŃ I ANALIZ ORAZ PODSTAWY MODELOWANIA I SYMULACJI PROCESÓW OBRÓBKI ŚCIERNEJ

Teoria jest siłą napędową na drodze rozwoju cywilizacji,
a empiryzm jest uzupełnianiem materiałów do budowy tej drogi,
lub niekiedy jeszcze, sposobem na sprawdzanie jej jakości.

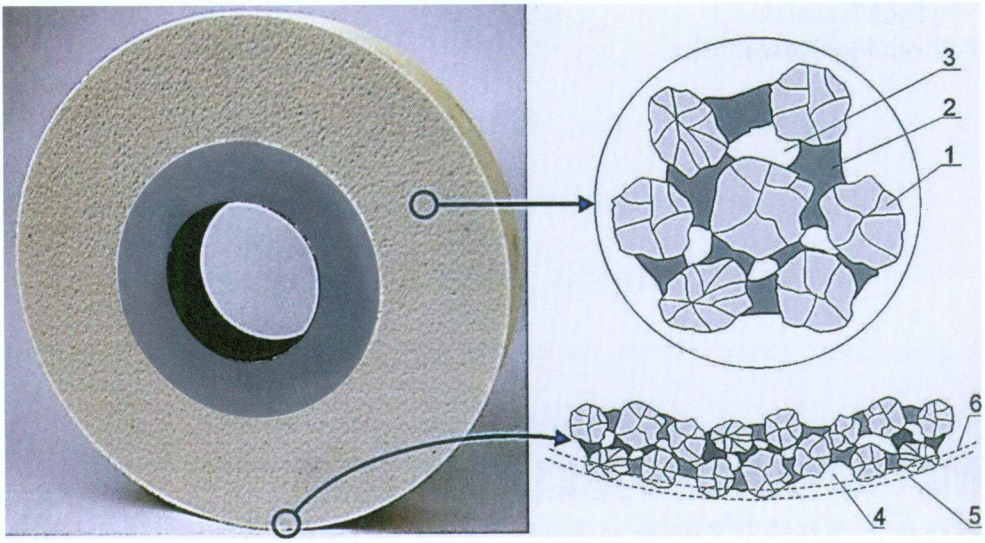
1. WPROWADZENIE

Teza, jaką przedstawiam powyżej, jest uzasadnieniem dla wyboru tematyki poniższego opracowania.

Procesy obróbki ściernej znajdują powszechnie zastosowanie w produkcji precyzyjnych elementów maszyn i urządzeń, w przemyśle budowy maszyn, stoczniowym, samochodowym, lotniczym, kosmicznym, wojskowym, a także w budownictwie, w górnictwie, medycynie i w wielu innych [Kac2009].

Obrabiane materiały stanowią bardzo różnorodny zbiór – są to stale i stopy innych metali, w tym stopy metali lekkich, a także ceramika, węgliki spiekane, materiały kompozytowe, minerały między innymi takie jak granit i bazalt, szkło, beton, drewno, tworzywa sztuczne, a także kryształy kamieni szlachetnych takich jak diament, rubin, szafir, szmaragd, ponadto monokryształy krzemu i wiele innych materiałów o wysokiej twardości i odporności na ścieranie.

Odpowiednio do powszechności zastosowań i różnorodności obrabianych materiałów produkuje się narzędzia o bardzo zróżnicowanej budowie i struktu-



Rys. 1. Budowa narzędzi ściernych spojonych: 1 – ziarna ścierne, 2 – spoiwo, 3 – pory, 4 – przestrzeń między wierzchołkami ziaren, 5 – nominalna zewnętrzna powierzchnia ściernicy

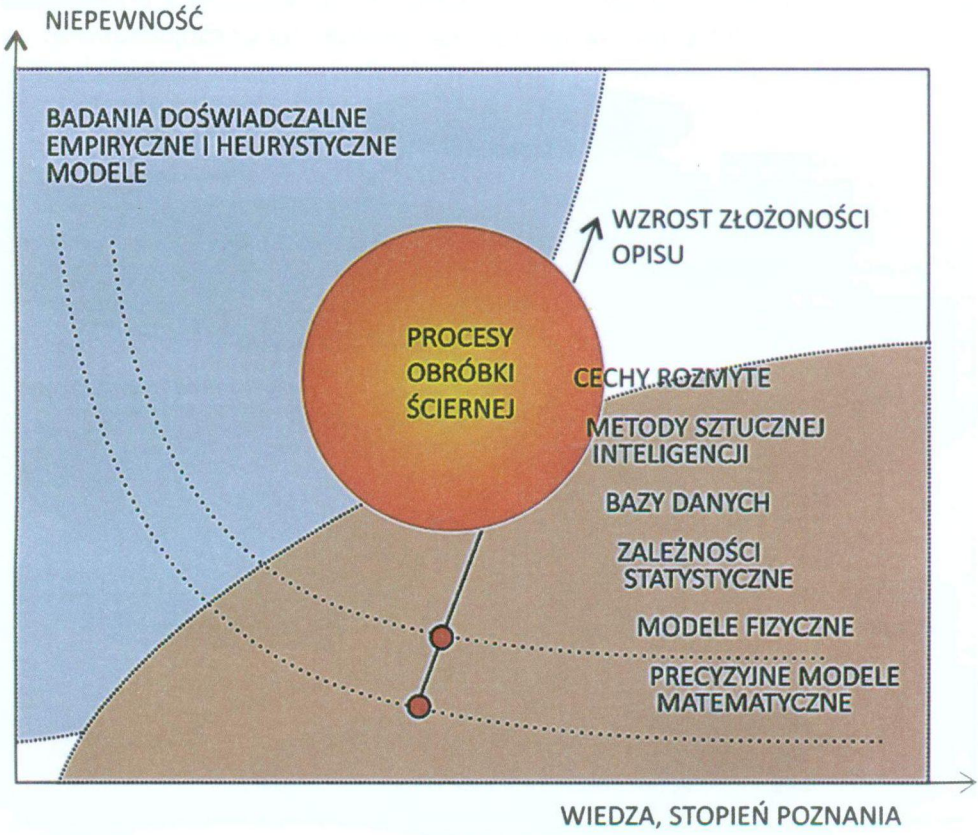
rze, z zastosowaniem różnych materiałów ściernych oraz różnorodnych spoiw [Ocz1986]. Materiały ścierne wykorzystywane są również w obróbce strumieniowo-ściernej oraz w obróbkach ścierno-erozyjnych i hybrydowych. Powszechnie stosowane są narzędzia zawierające ziarna diamentowe i z regularnego azotku boru [Kac2000, Lia2000, Mam2002, Gaw2014/1, Gaw2014/2]. Często wykorzystywane są również narzędzia z różnych odmian elektrokorundów mono- i polikrystalicznych, elektrokorundów spiekanych oraz z węglika krzemu [Bor1979, Bor1990].

Rozmiary ziaren ściernych najczęściej zawierają się w zakresie od 0,5μm (folie ścierne, pasty do docierania i polerowania) do 300μm (ściernice do wydajnego szlifowania dokładnego). Liczba ziaren w objętości 1 mm^3 zawiera się w zakresie od 3^3 do 10^6.

Energia właściwa w procesach obróbki ściernej i erozyjnej wynosi zazwyczaj od 10–1000 J/mm3 [Kac1997, Kac2000/6, Kac2014/3]. Temperatura przekracza w mikroobiętościach 1200°C, gradienty temperatur sięgają do 10^6 °C/s i 10^3 °C/mm. Skutkiem wysokiej energochłonności procesów wytwarzania są znaczne siły oraz zjawiska termiczne, powodujące odkształcenia przedmiotu, narzędzia i systemu obróbkowego. Na niedokładność wytwarzania ma wpływ nie tylko energochłonność procesów i moc obróbki, ale także koncentracja lokalna energii oraz kształt i położenie strefy obróbki [Kac1994, Kac2000/4, Kac2014/1]. Zjawiska zachodzące w strefie szlifowania, są opisywane przez cechy o krótkim czasie występowania (około kilku milisekund) i obejmują obszary o małych powierzchniach lokalnych oddziaływań (o wielkości kilkunastu μm^2) oraz występują z wielką częstotliwością (0,3–10 MHz), co sprawia, że są trudne do eksperymentalnego obserwowania.

2. LICZBY ZDARZEŃ LOSOWYCH W JEDNOSTCE CZASU

Modelowanie i symulacja procesów obróbki ściernej jest złożonym zadaniem ze względu na potrzebę generowania w czasie rzeczywistym modeli geometrycznych ziaren ściernych w ilości, zależnie od rozmiarów ziaren oraz rozmiarów strefy szlifowania, od 10^6 do 10^{10} ziaren na jedną sekundę realnego procesu. Złożoność zjawisk towarzyszących procesom oddziaływania ziaren ściernych na materiał obrabiany oraz procesów zużywania się narzędzi powoduje, że w tworzeniu podstaw modelowania wykorzystuje się wiele różnych metod analizy (rys. 2, 3).

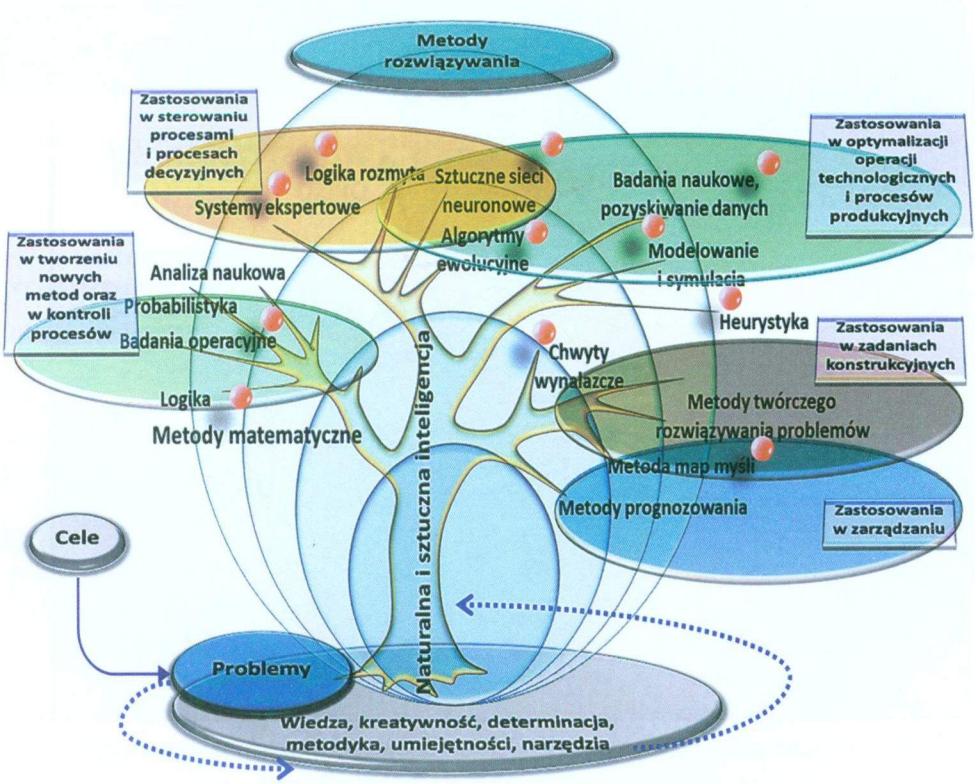


Rys. 2. Metody badań, analiz i modelowania w zależności od stopnia niepewności opisu oraz stopnia poznania problemu

Dla przykładowych danych: średnica ściernicy $D = 400$ mm, wysokość ściernicy $H = 50$ mm, rozmiar ziarna $a_z = 120$ μm, na powierzchni ściernicy znajduje się około $3 \cdot 10^6$ ziaren ściernych. Dla folii ściernych z ziarnami diamentowymi o wymiarze 0,5 μm, na powierzchni o wymiarach 500×20 mm znajduje się 10^{10} ziaren.

Każde z tych ziaren w procesie symulacji charakteryzowane jest przez powierzchnię utworzoną ze zbioru wielu punktów i musi spełniać warunki dotyczące rozkładu rzędnych i autokorelacji wierzchołków, dla kształtu typowego dla określonego materiału ściernego. Następnie można tworzyć model śladu obróbkowego i wypływek bocznych zależnych od warunków mikroskrawania, występujących jako skutek bocznych przemieszczeń obrabianego materiału.

Analizując liczby zdarzeń w jednostce czasu, można zauważyć, że dla powyższego przykładu ściernicy, gdy prędkość obwodowa wynosi 60 m/s, to liczba ziaren przemieszczających się nad powierzchnią przedmiotu w czasie jednej sekundy przekracza $1{,}5 \cdot 10^7$. W czasie obróbki trwającej 60 sekund nad powierzchnią przedmiotu przemieszcza się około miliarda ziaren. Dla ziaren o rozmiarze $a_z = 45$ μm, trzeba powyższe wartości jeszcze powiększyć dziesięciokrotnie.



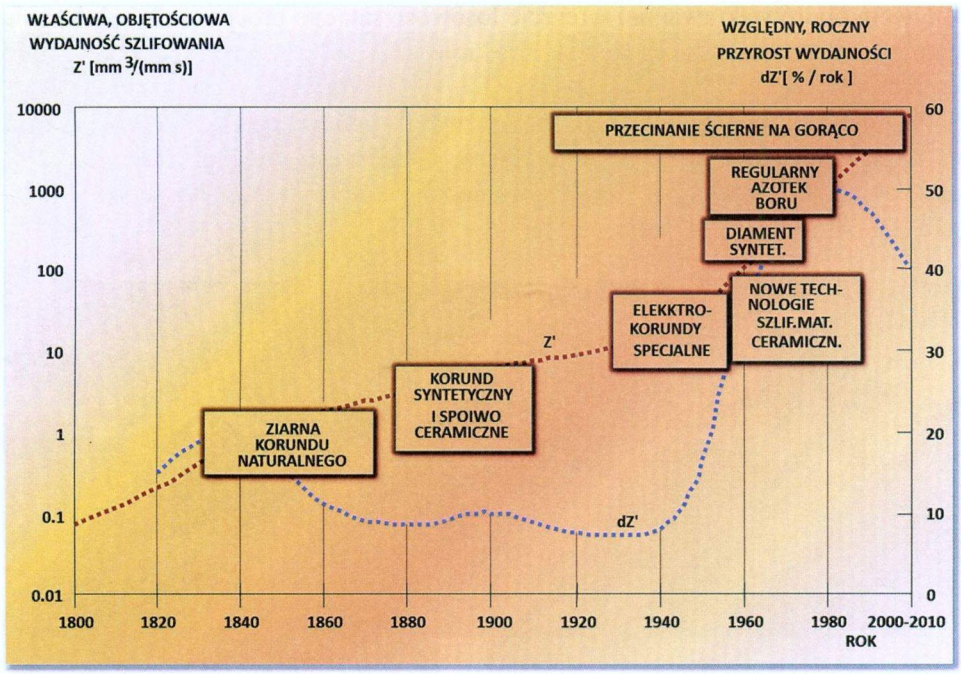
Rys. 3. Metody stosowane w analizie i modelowaniu procesów obróbki ściernej

To stwarza olbrzymie zapotrzebowanie na moc obliczeniową i pamięć operacyjną. Szacowana liczba operacji zmiennoprzecinkowych podczas jednej symulacji wynosi 10^{12}–10^{15}. Optymalizacja algorytmów ma wówczas wielkie znaczenie, zarówno w odniesieniu do liczby operacji, jak i do czasu ich wykonania oraz w zakresie zapotrzebowania na pamięć do przechowania danych.

Porównując wymagania dotyczące liczby operacji obliczeniowych można zauważyć, że liczba zapytań z całego świata do serwisu Google wynosi tylko $7{,}5 \cdot 10^4$ na sekundę.

Analizując obszary różnych metod obróbki można zauważyć, iż obecne zakresy precyzyjnego szlifowania, docierania oraz obróbki foliami ściernymi, przesuwają się w kierunku obszaru, który wcześniej nazywany był nanoobróbką ścierną i traktowany jako zakres zastosowań dla przyszłych technologii [Kac2000/3, Kac2012/3, Kac2014/3].

W okresie od 1800 roku do 2014 nastąpił wzrost wydajności obróbki ściernej o 100 000 razy, przy czym względne roczne przyrosty wydajności wynosiły 10–50%. W tym okresie wzrost prędkości obwodowej ściernic był prawie 300 krotny, przy czym względne przyrosty roczne wynosiły kilka procent. Nie oznacza to jednak ciągłości w rozwoju technologii, można bowiem wyróżnić wiele etapów, których efektem był skokowy wzrost prędkości szlifowania (rys. 4).



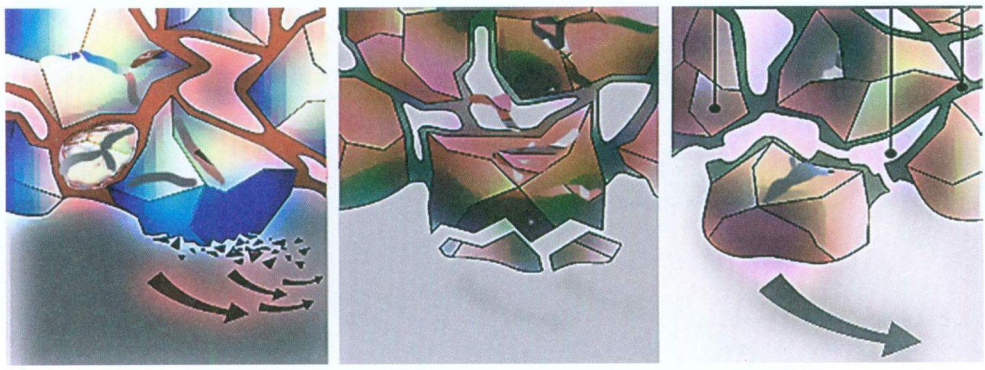
Rys. 4. Rozwój technologii szlifowania

3. PROBABILISTYCZNE CECHY PROCESÓW I KUMULOWANIE ZAKŁÓCEŃ

W rozwiązywaniu wielu zadań z wykorzystaniem modeli określonego procesu obróbki ściernej, ze względu na duży stopień losowości, ważnym zagadnieniem jest poszukiwanie modelu najbardziej zgodnego z mechanizmem zmienności analizowanych wielkości wejściowych i wyjściowych. Ma to duże znaczenie dla diagnostyki procesów i prognozowania ich wyników [Ham2000].

W procesach mikroskrawania, zwłaszcza w obróbce bardzo dokładnej, wiele zjawisk i czynników nabiera znaczenia decydującego o wynikach procesu. Są nimi: losowe rozmiary i ukształtowanie ziaren ściernych, losowe ich rozmieszczenie na powierzchni narzędzia, złożone procesy zużywania się wierzchołków i całych ziaren ściernych (rys. 5), nieciągłość procesu tworzenia mikrowiórów (w mikro- i submikroskali), lokalne cieplne i mechaniczne odkształcenia narzędzi i materiału obrabianego, a zwłaszcza liniowe i kątowe przemieszczenia ziaren ściernych pod wpływem oporów skrawania i wreszcie losowość samego procesu mikroskrawania, tym wyższa, im mniejsze są średnie przekroje warstw skrawanych poszczególnymi ostrzami [Kac2014/3].

W mikroobróbce ściernej, a także w różnych odmianach precyzyjnego szlifowania, zagłębienie ostrza w materiał obrabiany, jest znacznie mniejsze od promieni zaokrąglenia jego naroży i jest porównywalne z wysokością nierówności powierzchni w strefie obróbki.

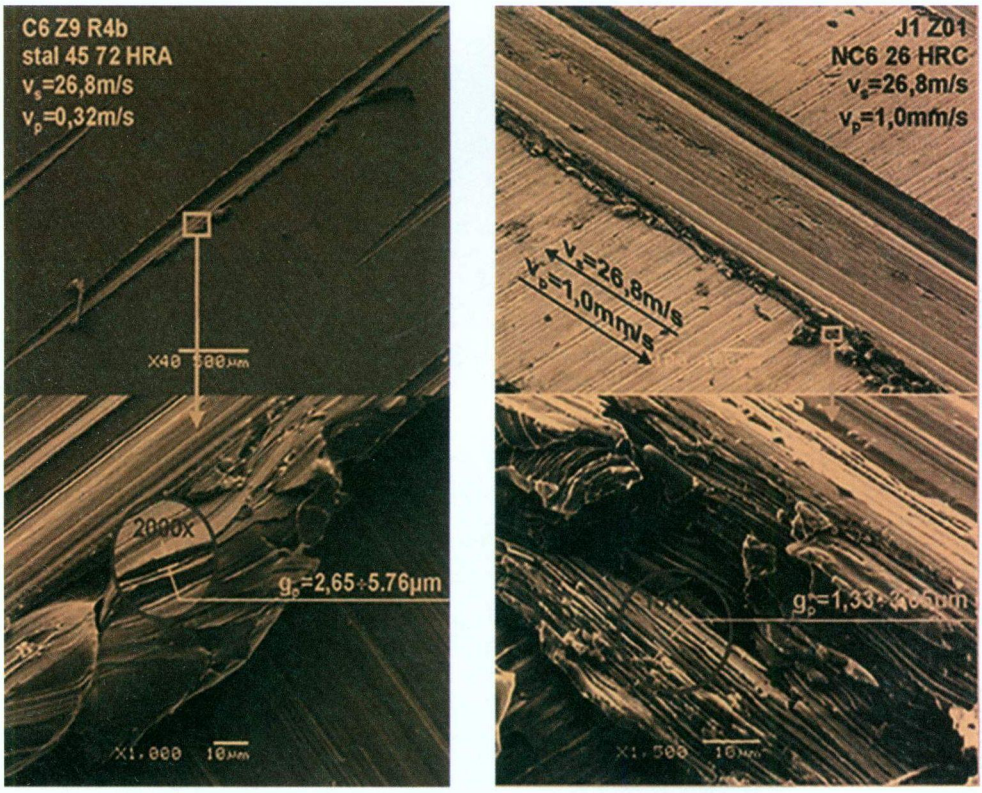


Rys. 5. Postaci mikrowykruszania się wierzchołków ziaren ściernych i wykruszania całych ziaren z powierzchni narzędzia

Zmienność zagłębienia ziaren ściernych w materiał obrabiany jest niekorzystną, choć nieuniknioną cechą procesów mikroskrawania. Trzeba przy tym zauważyć, iż energia właściwa obróbki zależy nie tylko od średnich wartości parametrów warstw skrawanych poszczególnymi ostrzami, ale także od zakresu zmienności i rozkładu wartości tych parametrów.

We wszystkich sposobach obróbki, ziarna ścierne w strefie styku z przedmiotem, przemieszczają się stycznie do obrabianej powierzchni, a ich zagłębienie w materiał jest zmienne wzdłuż toru skrawania. Zmienność zagłębienia jest skutkiem wielu czynników. Do najważniejszych można zaliczyć [Kac2014/3]:

- zmienność zagłębienia nominalnego, która zależy od kinematycznych cech metody,
- nierówności powierzchni przedmiotu w strefie obróbki,
- podatność lokalną materiału obrabianego i ziaren ściernych,
- drgania narzędzia i ziaren ściernych [Alt2004, Trm2001, Wec1989, Wie2010],
- znaczne lokalne zróżnicowanie (w strefie oddziaływania ziarna) przyrostów temperatur, zwłaszcza podczas obróbki z bardzo dużymi prędkościami materiałów o małej przewodności cieplnej, zmienność właściwości materiału obrabianego w mikroobjętościach porównywanych z objętościami warstw skrawanych [Kru2003],
- makro- i mikronieciągłość procesu tworzenia wiórów i wypływek (rys. 6).

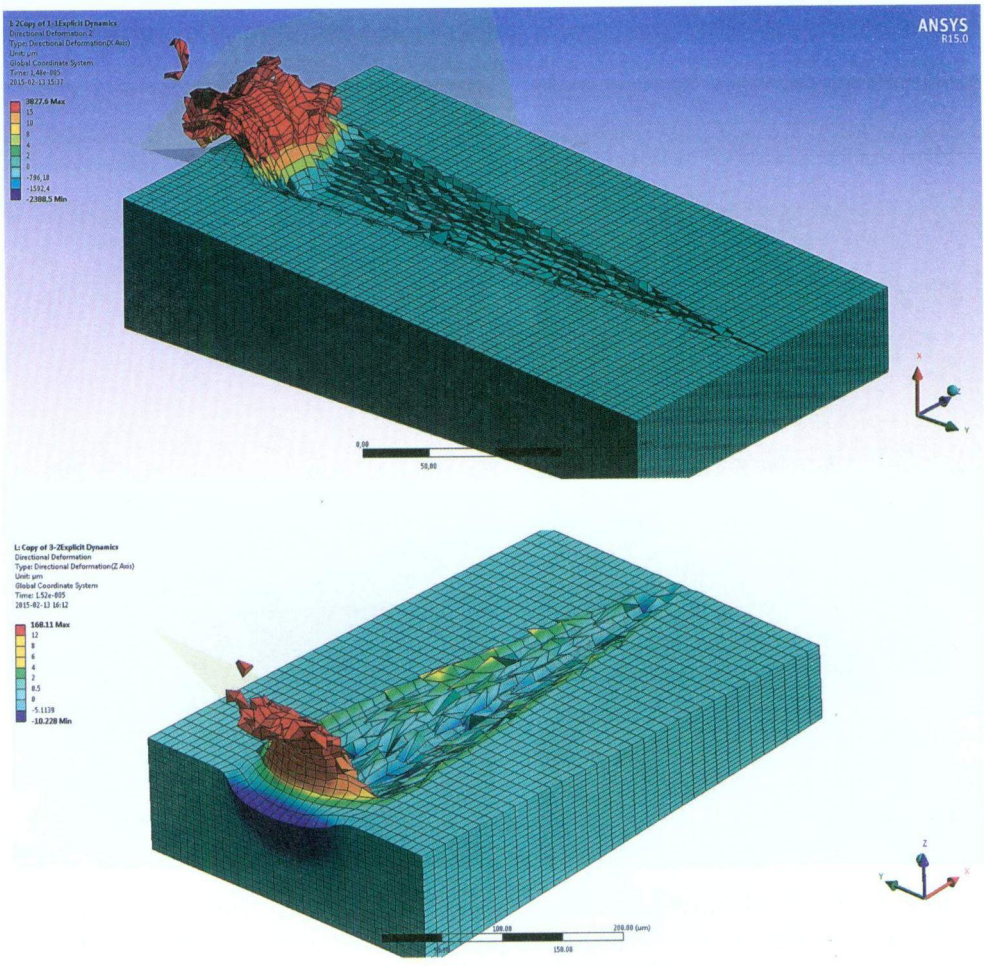


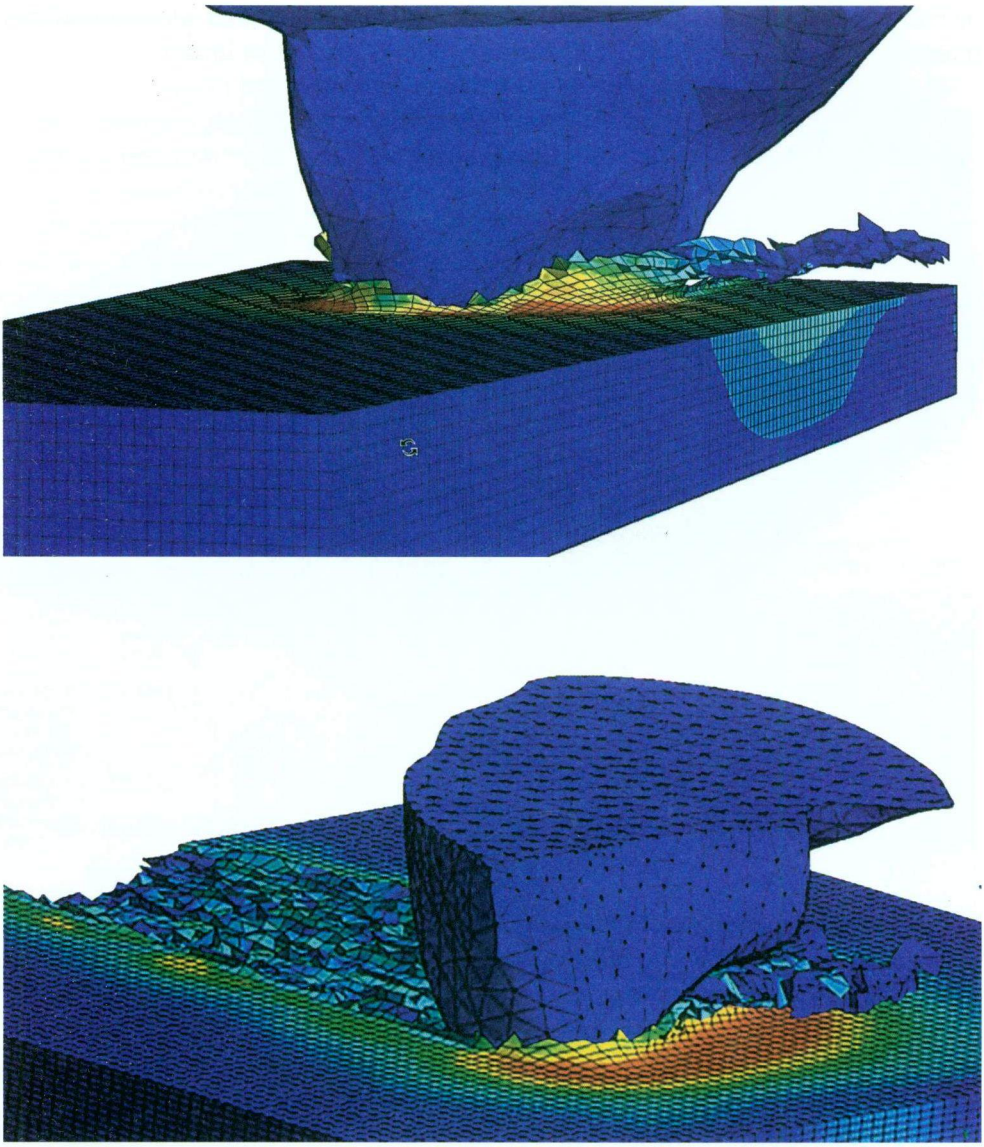
Rys. 6. Przykłady nieregularności wypływek otaczających ślady oddziaływania wierzchołka ziarna ściernego oraz płytkowej budowy wypływek (grubości płytek wynoszą od 1 do 6 µm)

Przed ziarnem ściernym, między dolną częścią powierzchni natarcia, a powierzchnią ścinania materiału obrabianego, tworzy się strefa zastoju materiału, która nie może być stabilna w warunkach bardzo wysokich temperatur oraz nieciągłości naprzemiennego procesu narastania lokalnych odkształceń i oddzielania materiału.

Potwierdzają to również wyniki modelowania procesu, zilustrowane na rysunku 7. Nie znajduje też uzasadnienia, spotykany niekiedy pogląd, iż istnieje w tej strefie pewien stabilny punkt, rozdzielający strefy przepływu materiału w kierunkach nad obrabianą powierzchnią, pod ziarnem oraz w kierunkach bocznych.

Badania modelowe i eksperymentalne potwierdzają występowanie cyklicznie pojawiającego się i losowo oscylującego obszaru chwilowo ograniczonego przemieszczania materiału. Można stwierdzić ogólniej, że nieciągłość procesu tworzenia wióra nie jest odstępstwem od stanu stabilnego, wywołanego zakłóceniami, lecz jest stanem stabilizowanych fluktuacji, stanowiących typową cechę procesu.

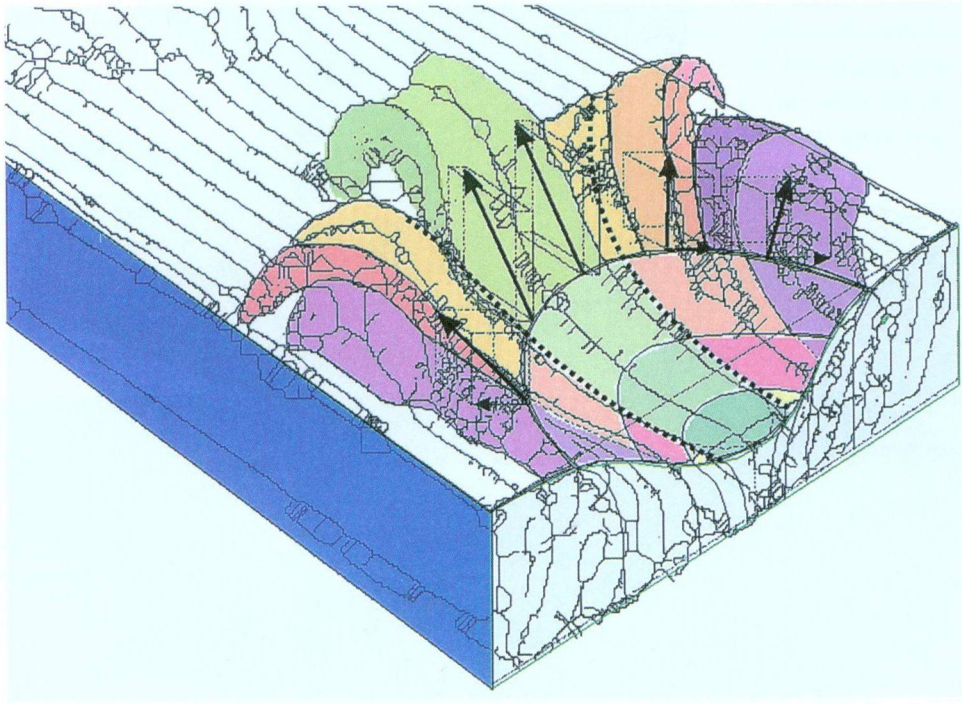




Rys. 7. Modelowanie w systemie ANSYS procesu mikroskrawania wierzchołkiem ziarna ściernego [Ryp2015]

Siły tarcia, jakie występują między rozpatrywaną cząstką materiału, a powierzchnią ostrza są jedynie częścią składową oporów skrawania [Hec2007, Ika1992, Mar2004, Niż2013]. Rozpatrywana cząstka w swym ruchu stycznym do powierzchni ostrza poddawana jest ponadto oddziaływaniom cząstek sąsiednich, tych stykających się również z powierzchnią ostrza (te mają swoje sąsiednie cząstki itd.) jak również oddziaływaniu tych cząstek sąsiednich, które nie stykają się z powierzchnią

ostrza. Ten mechanizm kumulacji wpływów decyduje o kierunkach przemieszczeń materiału (rys. 8).



Rys. 8. Zróżnicowanie kierunków przemieszczeń materiału w strefie oddziaływania ostrza

Dla zapewnienia adekwatności wyznaczanych modeli do realizacji, które mają dopiero nastąpić, istotne znaczenie ma poznanie mechanizmów kumulacji zakłóceń losowych, których skutkiem jest rozproszenie wartości badanej cechy.

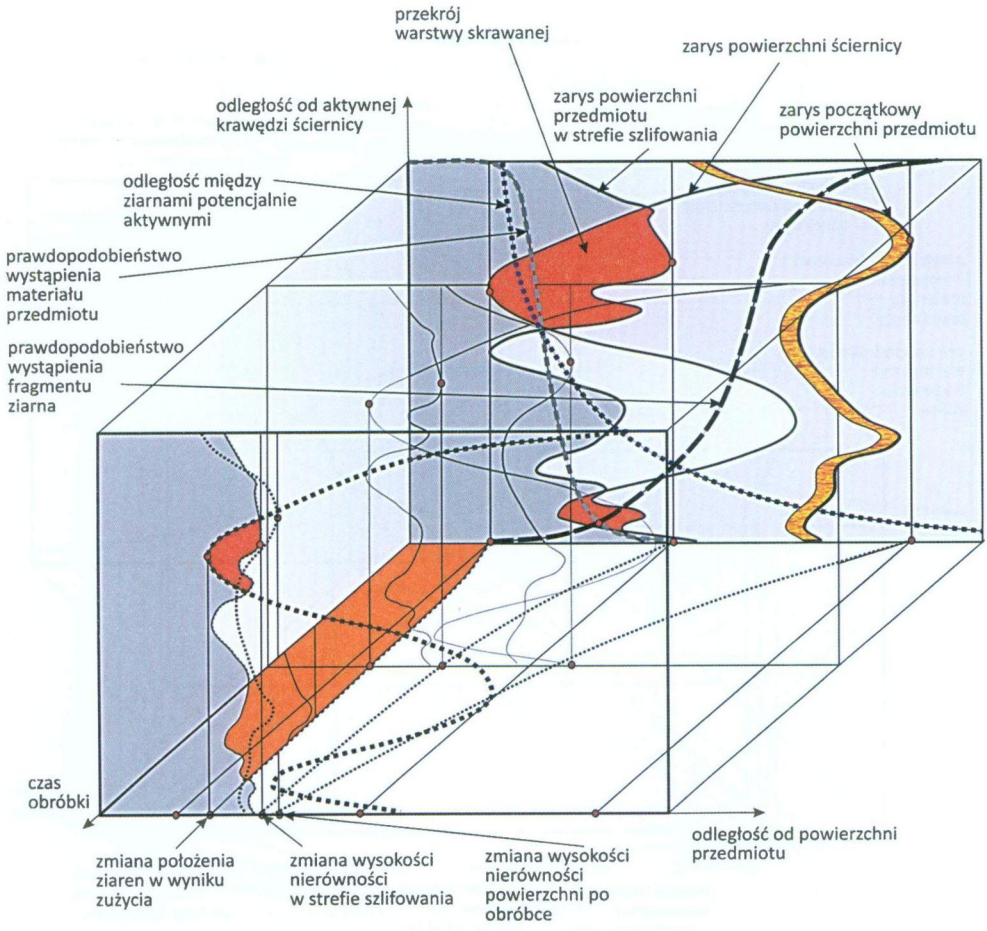
W warunkach niezależności czynników, wywołujących zróżnicowanie wyników procesu, jeżeli żaden z czynników nie dominuje nad pozostałymi, to w przypadku addytywnego mechanizmu kumulacji, nawet bez znajomości liczby składowych losowych i ich rozkładów, można zakładać, iż rozkład sumy skutków, jest zbliżony do normalnego. W procesach szlifowania addytywny mechanizm kumulacji skutków zakłóceń nie występuje zbyt często, zaś skłonność do posługiwania się takim modelem jest nadmierna.

Geometryczne sumowanie się zakłóceń, jest charakterystycznym mechanizmem kumulacji przemieszczeń elementarnych ostrzy narzędzia i powierzchni przedmiotu o losowym kierunku i wartości. Typowym modelem rozkładu wartości zmiennej wynikowej, dla multiplikatywnego mechanizmu kumulacji skutków, jest rozkład logarytmicznie normalny. W wielu zadaniach generowania zmiennych losowych o określonym rozkładzie, konieczne jest również uwzględnienie cech dotyczących

ich skorelowania. Dotyczy to między innymi modelowania położenia ziaren ściernych na powierzchni ściernicy.

W dalszej części pracy zostanie przedstawione rozwiązanie tego problemu, które jest wystarczająco dobre do opisu rozproszenia takich cech jak: wymiary ziaren ściernych, położenie wierzchołków ziaren ściernych, odchyłki wymiarów i kształtu oraz trwałość narzędzi dla niektórych kryteriów trwałości.

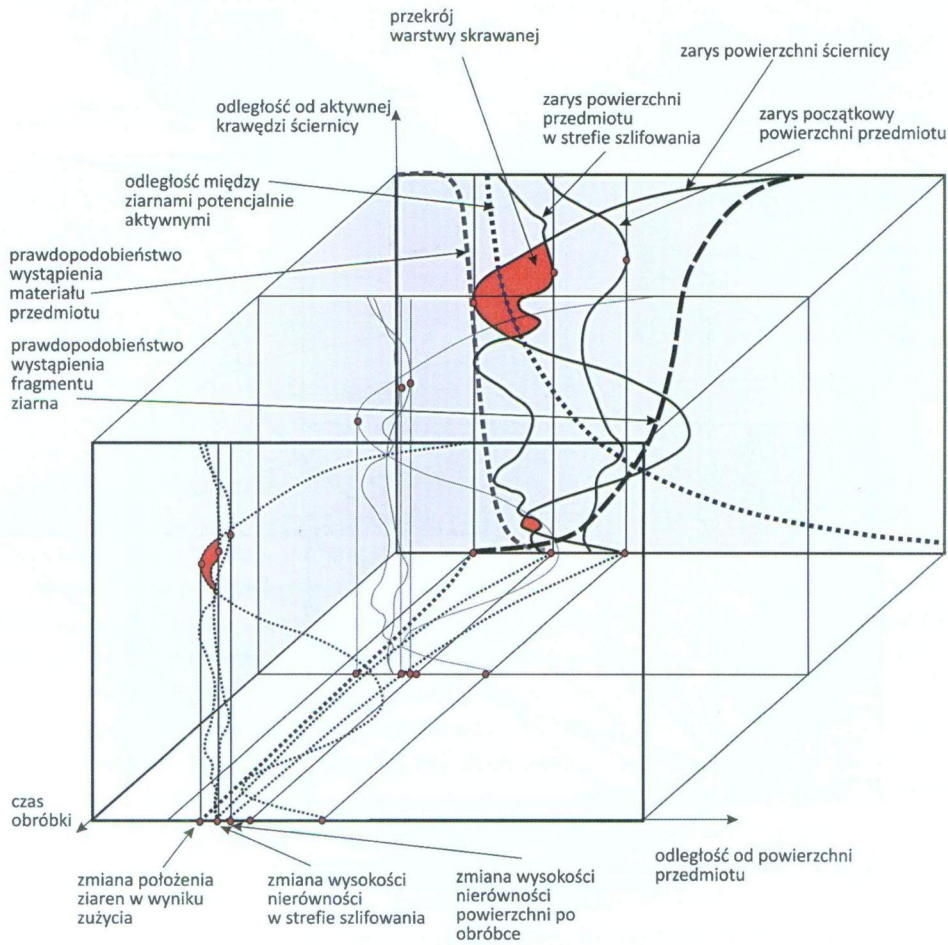
W procesach szlifowania występuje zazwyczaj bardzo złożony mechanizm kumulacji skutków losowych, harmonicznych i monotonicznych przyczyn niedokładności [Kac1994, Kac1995/2, Kac2001/2]. Składowa deterministyczna jest tym większa, im większe są skutki odkształceń cieplnych i mechanicznych obrabianego przedmiotu oraz im większe są skutki niedokładności obrabiarki.



Rys. 9. Schemat do analizy możliwych kontaktów ziaren z obrabianym przedmiotem w procesie szlifowania z usuwaniem dużego naddatku materiału

Składowa losowa w największym stopniu zależy od zużycia ściernicy oraz losowych przyczyn niedokładności kinematycznej układu technologicznego, przy czym rozkład składowej losowej jest zbliżony do rozkładu logarytmicznie normalnego. W modelowaniu i symulacji procesów, gdy potrzebny jest generator liczb losowych, wybiera się zazwyczaj jeden z modelowych rozkładów, co może być przyczyną błędów, gdy dane z rzeczywistych procesów wskazują na nietypową postać, na przykład wielomodalną.

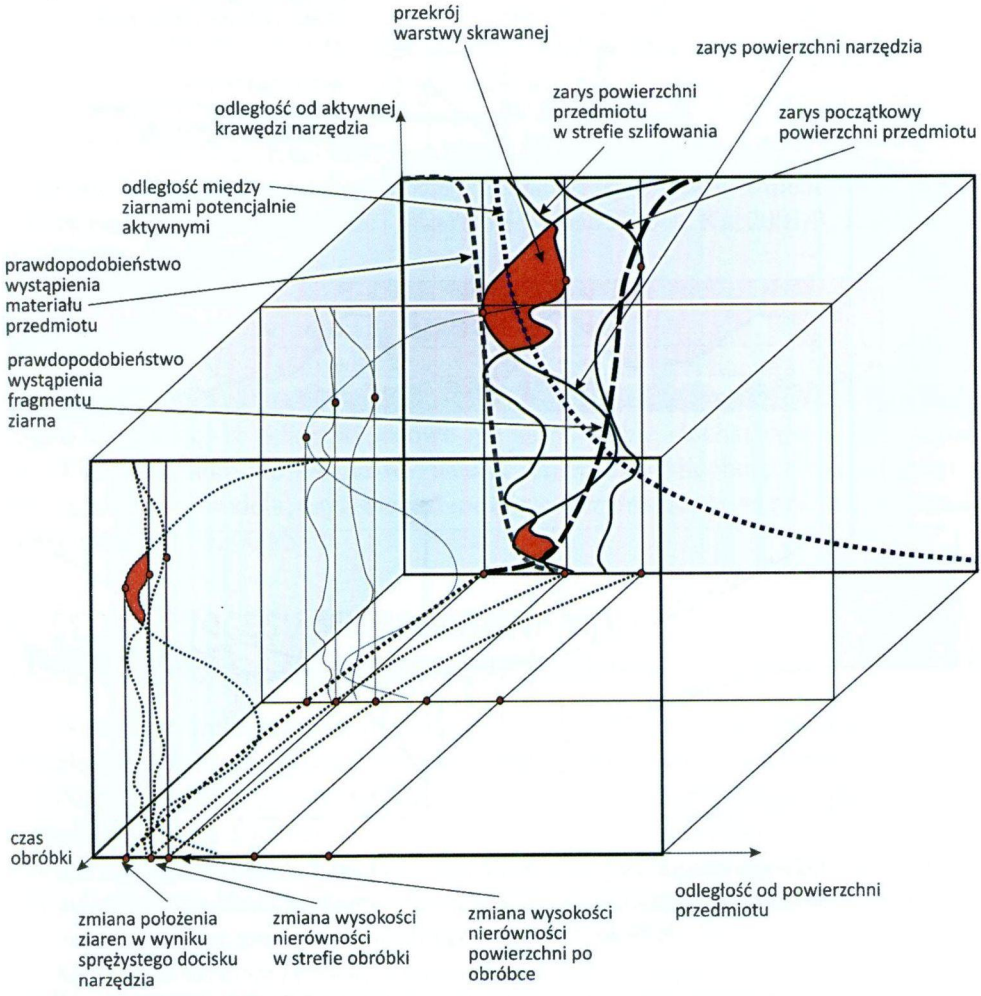
Prawdopodobieństwo kontaktu ziaren na powierzchni narzędzia ściernego i materiału obrabianego przedmiotu o określonej topografii powierzchni zależy od cech statystycznych rozkładów wierzchołków ziaren i rzędnych obrabianej powierzchni [Stę2009], grubości usuwanej warstwy, cech kinematycznych procesu i podatności narzędzia (rys. 9, 10, 11).



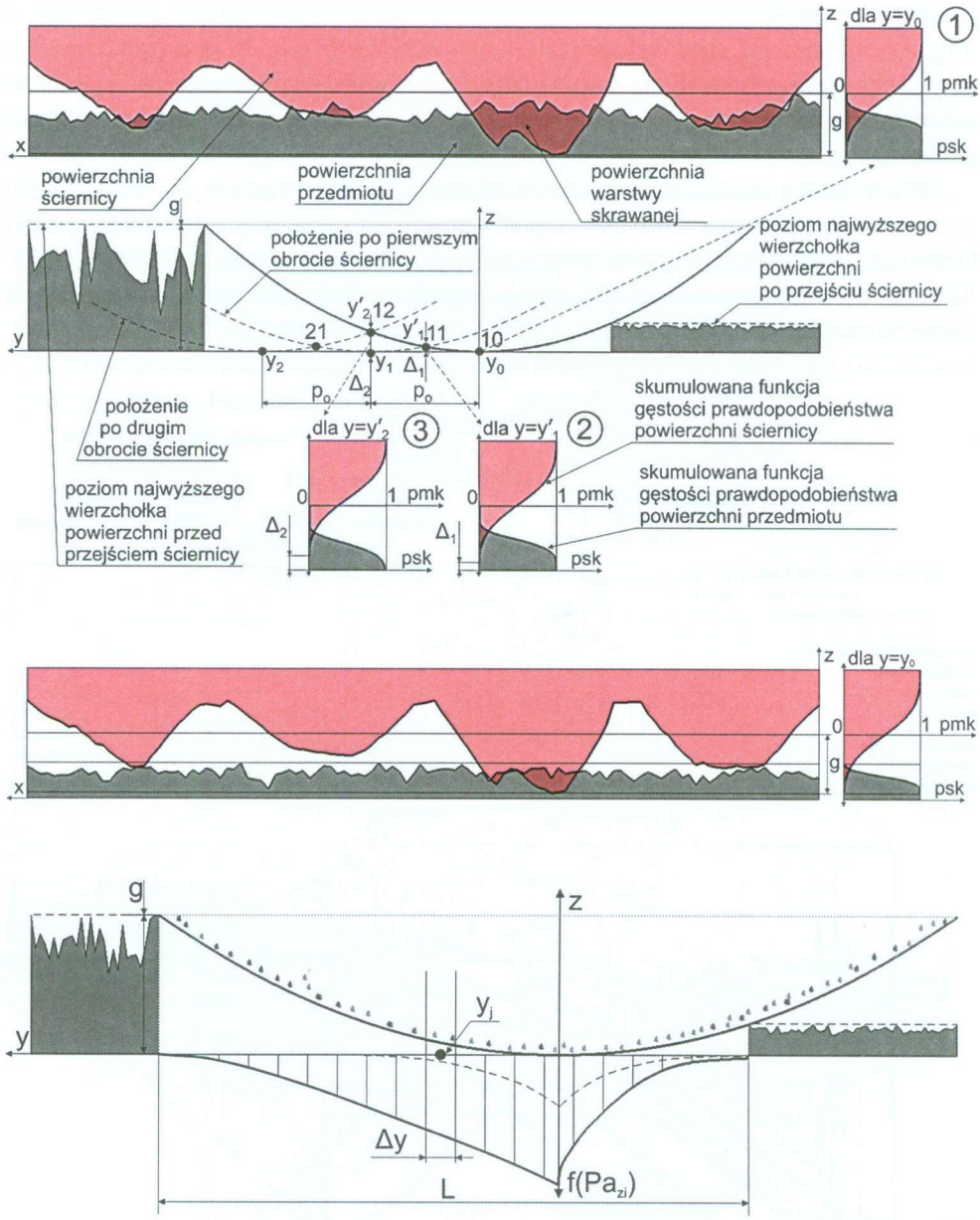
Rys. 10. Schemat do analizy możliwych kontaktów ziaren z obrabianym przedmiotem w procesie precyzyjnego szlifowania z niewielką głębokością

Prawdopodobieństwo kontaktu ostrzy z materiałem obrabianym maleje wraz z przemieszczaniem się kolejnych stref powierzchni ściernicy nad powierzchnią obrobioną już przez strefy je poprzedzające. Im mniejsza jest grubość szlifowanej warstwy tym mniejsze jest prawdopodobieństwo kontaktu ziaren z obrabianym przedmiotem.

W przypadku narzędzi ściernych o większej podatności (takich jak folie ścierne, ściernice o spoiwach podatnych), zagłębienia ziaren są mniejsze, a prawdopodobieństwo kontaktu w mniejszym stopniu maleje z upływem czasu obróbki (rys. 11). Schemat do analizy prawdopodobieństwa kontaktu wierzchołków ziaren ściernych i wzniesień materiału obrabianego przedstawiono na rysunku 12.



Rys. 11. Schemat do analizy możliwych kontaktów ziaren z materiałem przedmiotu w procesie obróbki podatnym narzędziem ściernym



Rys. 12. Schemat do analizy prawdopodobieństwa kontaku ziaren ściernych i materiału obrabianego przedmiotu dla szlifowania kształtującego i dla przypadku kolejnego przejścia wygładzającego

Modelowane procesy obróbki ściernej nie są procesami stacjonarnymi. Błędy wynikające z przyjęcia założenia o stacjonarności procesów zależą od momentu rozpoczęcia oraz okresu zbierania danych.

Rozkład sumaryczny różni się od rozkładów chwilowych tym bardziej, im dłuższy jest całkowity okres zbierania danych oraz im mniej stabilne są składowe systematyczne. Składowe te mogą powodować wzrost wariancji rozkładu sumarycznego, zmianę współczynnika asymetrii oraz zmianę współczynnika spłaszczenia. Niestabilność składowych losowych powoduje natomiast zmianę postaci rozkładu.

Kompensacja zakłóceń w precyzyjnych procesach technologicznych jest dość częstym postulatem użytkowników i ważnym zadaniem producentów układów technologicznych. Jest ona dość łatwa w układach o stabilnych charakterystykach zwłaszcza, gdy dotyczy wielkości łatwo sterowalnych.

Wprowadzenie kompensacji staje się trudnym zadaniem, gdy charakterystyka układu jest zmienna (np. sztywność wynikowa układu technologicznego w procesie szlifowania wałków, czy długich śrub zmienia się wraz z przemieszczaniem ściernicy wzdłuż przedmiotu), oraz gdy wielkość kompensowanego odchylenia staje się porównywalna z wpływem nieznanego zakłócenia lub jest zbliżona do elementarnej wartości korekty [Kac1994, Kac2000/4, Kac2001/3, Kac2002]. Wówczas konieczna jest kompensacja adaptacyjna, zależna od parametrów zmiennych w czasie i przestrzeni procesu [Kac1995/1, Kac1995/2, Kac2000/1, Kac2001/3, Kac2003/2, Kac2004/1, Lip2008].

Rozpatrując model pewnej wielkości wyjściowej, charakteryzującej proces szlifowania, zakładamy, że nieznana zależność ma postać $y^* = f(x_i, w_j, z_\varrho)$, gdzie x_i to wielkości mierzalne i sterowalne, w_j to wielkości mierzalne, lecz niesterowalne, zaś z_ϱ, to zakłócenia, których liczby nie znamy. Wyznaczając model $y^\wedge = f(x_i)|_{wj}$, często zdarza się, iż składniki losowe nie są od siebie stochastycznie niezależne. W takim przypadku nie można wyznaczyć najlepszych nieobciążonych estymatorów parametrów modelu, czyli nie jest możliwe otrzymanie estymatorów o minimalnej wariancji [Kac2000/5].

4. CECHY PROCESU MIKROSKRAWANIA WPŁYWAJĄCE NA ZŁOŻONOŚĆ MODELI

Pierwszym problemem wymagającym rozstrzygnięcia przed przystąpieniem do modelowania i matematycznej symulacji procesu, jest wybór kompromisu między „ogólnością" opisów analitycznych, skłonnością do „przejrzystości" i łatwością interpretacji modelu z jednej strony, a zasadnością uwzględnienia wielu skomplikowanych i wzajemnie powiązanych oddziaływań z drugiej strony. Dla zapewnienia wymaganej dokładności opracowanych modeli uwzględniono poniżej określone cechy procesu szlifowania.

Analizując procesy obróbki z niewielkimi zagłębieniami ostrzy, należy zwrócić uwagę na to, że lokalne ugięcia ziaren mogą być porównywalne z wartościami zagłębień [Ika1992, Liu2004, Maj1991, McC1986, Nad2015, Zar1998]. Kąt natarcia ziaren o kształcie wielościennym wskutek przemieszczeń kątowych ziaren ulega

zmniejszeniu. Obserwuje się to zwłaszcza podczas stosowania narzędzi o podatnych spoiwach.

Zjawiskiem charakterystycznym w początkowej strefie kontaktu ziarna z obrabianym materiałem (w układzie kinematycznym z rosnącym zagłębieniem wzdłuż drogi ostrza) jest nieciągłość procesu rozpoczynania i przerywania mikroskrawania [Bri1992, Row1993], zauważalna zwłaszcza dla większych podatności zamocowania ostrzy. Jest to zrozumiałe, skoro nawet proces skrawania z większymi zagłębieniami, uważany za proces ciągły, charakteryzuje się mikronieciągłością tworzenia wióra. Ponadto, jeżeli amplituda drgań ostrza jest porównywalna z zagłębieniami (na przykład poniżej 1 μm), to należy uwzględnić również i to źródło makronieciągłości procesu.

Z badań mikroskopowych jednoznacznie wynika, że boczne spiętrzenia materiału wyprzedzają ostrze i są następnie częściowo usuwane, gdyż powierzchnia wypływek od strony mikrorysy jest gładko ukształtowana przez ziarno. Krawędź górna wypływek jest ostra i w wielu miejscach ma promienie zaokrąglenia mniejsze od 0,1 μm.

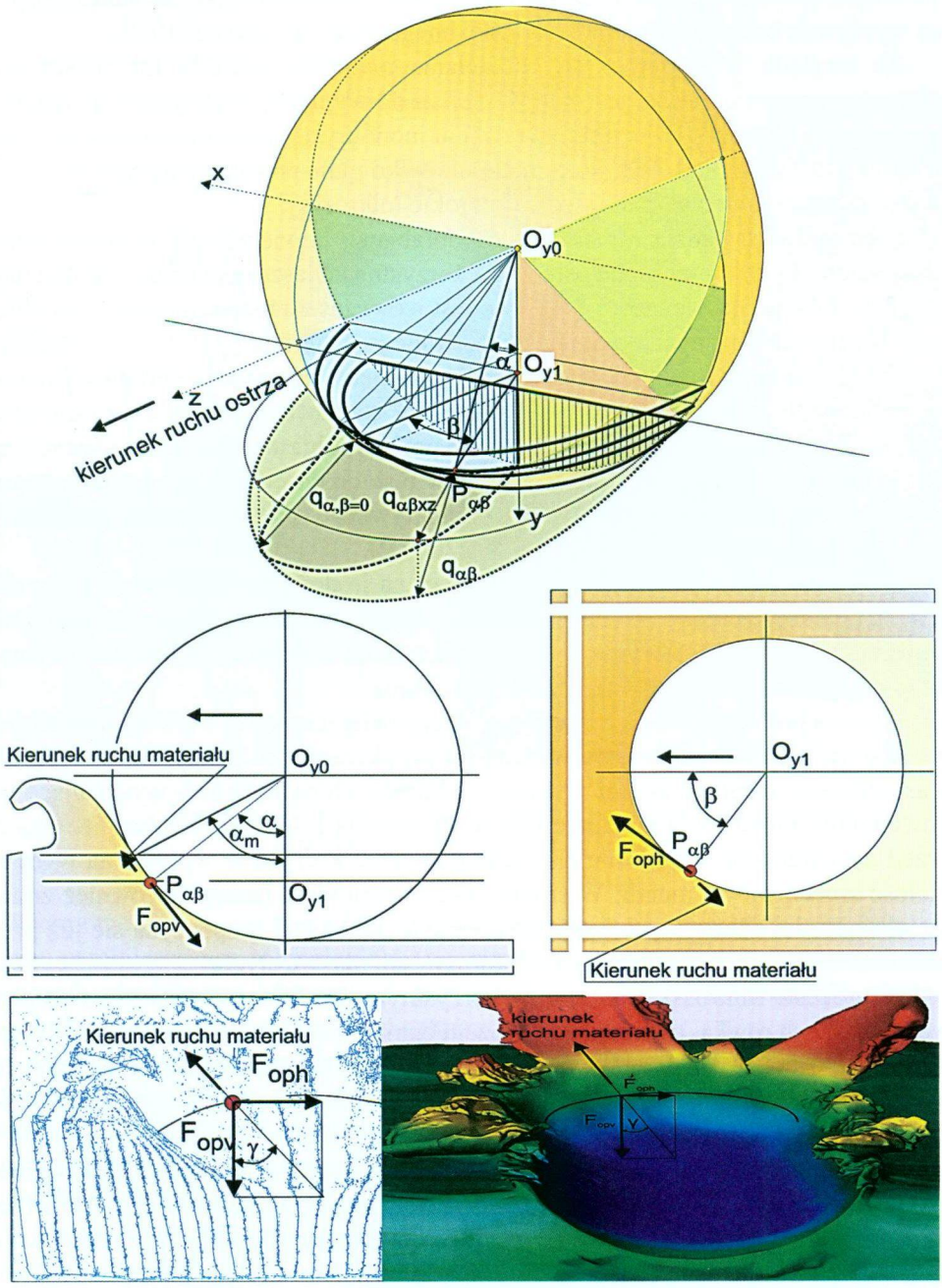
Na rysunku 8 pokazano kształt strefy kontaktu kulistego wierzchołka ostrza z materiałem. Widoczne są kształty powstających wiórów oraz wypływek. W postaci kolorowych stref wyróżniono charakterystyczne obszary w strefie mikroskrawania. Widoczne są obszary, w których materiał obrabiany przemieszczany jest w kierunku zbliżonym do kierunku ruchu ostrza. W tych obszarach odbywa się tworzenie wióra i oddzielanie materiału. Wyraźnie wyodrębniają się obszary, w których boczne składowe kierunku przemieszczania materiału stają się coraz większe, co oznacza, iż w tych fragmentach strefy, tworzą się boczne wypływki materiału.

Ze schematu do analizy oporów przemieszczania się materiału w strefie mikroskrawania (rys. 13) wynika, że opory przepływu bocznego są zmienne w strefie kontaktu ostrza z materiałem (korzystnie, jeżeli są duże, gdyż zmniejsza to objętość wypływek) i zależą od położenia rozpatrywanego punktu. Zależą również od kształtu ostrza, sił tarcia, właściwości materiału obrabianego i lokalnych pól temperatur [Cha2008, Goł2010, Kru2001/1]. Od gradientów pól temperatur i pól naprężeń zależą naprężenia pozostające w warstwie wierzchniej po procesie obróbki [Lia2000, Sch1998, Win2012].

W procesach mikroskrawania zmniejszenie współczynnika tarcia między ziarnem a materiałem obrabianym, utrudnia formowanie wióra, a zwiększenie współczynnika tarcia powoduje korzystne zmiany rzeczywistego kąta natarcia oraz wyraźne zmniejszenie skutecznego promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej – co zwiększa możliwości skutecznego skrawania ziarnami płytko zagłębionymi w materiał obrabiany.

Zwiększenie współczynnika tarcia między ziarnem a materiałem obrabianym powoduje rozbudowanie strefy martwej. Skrawanie w takich warunkach jest łatwiejsze i bardziej podobne do skrawania wiórowego, energia właściwa maleje, dając w rezultacie niższe przyrosty temperatur, co sprzyja zmniejszaniu wartości naprę-

żeń rozciągających w warstwie wierzchniej, choć proces mikroskrawania może być mniej stabilny.



Rys. 13. Schemat do analizy oporów przemieszczania materiału w strefie mikroskrawania

Skrawanie szeroką krawędzią równoległą do obrabianej powierzchni i położoną prostopadle do kierunku ruchu głównego, wydłuża drogę bocznych przemieszczeń materiału, co utrudnia tworzenie wypływek i korzystnie zmniejsza stosunek objętości wypływek bocznych do objętości usuwanego materiału [Kac2010/2].

Ze względu na zdolność do oddzielania materiału, wklęsła lub płaska powierzchnia natarcia ziarna, jest korzystniejsza od wypukłej. Najwyraźniej czynniki te uwidaczniają się podczas mikroskrawania monokrystalicznymi ziarnami węglika krzemu [Bor1979, Bor1990], które mają nie tylko małe promienie naroży, ale także płaską powierzchnię natarcia i tworzą szerokie mikrorysy.

Skrawanie krawędzią równoległą do obrabianej powierzchni i w przybliżeniu prostopadłą do kierunku ruchu ostrza jest korzystne zwłaszcza podczas obróbki materiałów o dużej plastyczności. Możliwe jest wówczas zmniejszenie stosunku objętości wypływek bocznych do objętości usuwanego materiału.

Zwiększanie współczynnika tarcia, ograniczające przepływ materiału w kierunku prostopadłym do toru ostrza, wywołane np. usunięciem atmosfery z otoczenia strefy mikroskrawania (mikroskrawanie w próżni) lub zmniejszeniem plastyczności skrawanego materiału (mikroskrawanie w niskich temperaturach np. temperaturze skraplania azotu), znacząco zwiększa efektywność mikroskrawania materiałów o wysokiej plastyczności [Kac2001/4, Kac2002/2].

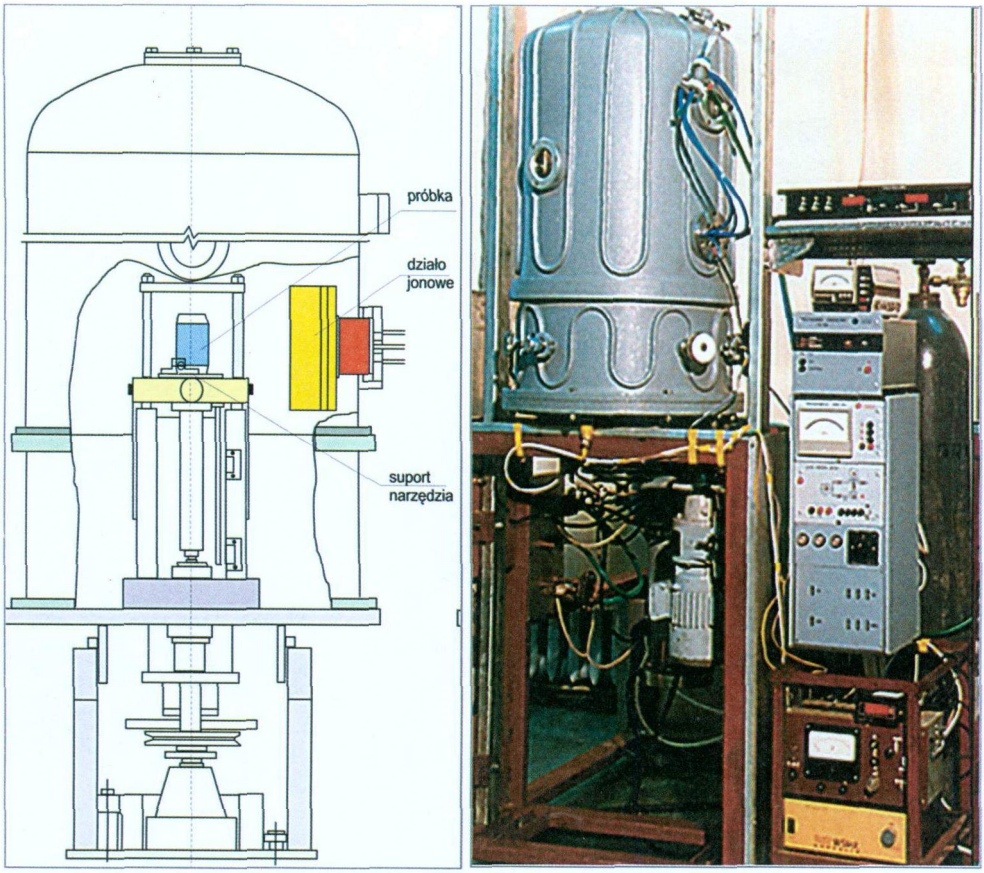
Zmiana otoczenia z warunków normalnych na środowisko charakterystyczne dla próżni, powoduje bardzo istotne zmiany w przebiegu mikroskrawania. Zmieniają się wówczas właściwości powierzchni narzędzia (ziaren ściernych) i materiału obrabianego oraz ich fizyczne i chemiczne oddziaływania.

Wysoka próżnia zmienia właściwości przypowierzchniowej warstwy elementów z wielu metali i ich stopów, prowadząc do zwiększenia ich plastyczności. Wzrost plastyczności metali w próżni wynika z faktu, że błona tlenkowa występująca na powierzchni metalu w atmosferze otoczenia, spełnia rolę bariery zabezpieczającej przed dyslokacjami. Obniżenie ciśnienia powietrza korzystnie wpływa na wytrzymałość zmęczeniową metali. W środowisku próżniowym następuje również zmiana właściwości adhezyjnych metali. Sczepianie adhezyjne rozpoczyna się już przy znacznie mniejszych obciążeniach i deformacjach plastycznych.

W procesie mikroskrawania, o niekorzystnym zjawisku występowania wypływek na bokach rowka, tworzonego narożem ziarna ściernego, decyduje relacja między oporem bocznym przepływu materiału, a oporem przemieszczania materiału wzdłuż powierzchni natarcia ostrza. Obniżanie ciśnienia, powodując wzrost współczynnika tarcia, sprzyja zwiększeniu bocznych przepływów materiału.

Do badania procesu mikroskrawania w próżni opracowano specjalne stanowisko badawcze (rys. 14) z komorą próżniową o objętości roboczej 100 dm^3, w której możliwe jest uzyskanie ciśnienia $1{,}3 \cdot 10^{-6}$ hPa dla chłodzenia wodą i $9{,}3 \cdot 10^{-7}$ hPa dla chłodzenia ciekłym azotem [Kac1996/2, Kac2001/1].

Podczas prób mikroskrawania na tym stanowisku ruch główny wykonuje próbka znajdująca się w komorze próżniowej, napędzana siłownikiem hydraulicznym.

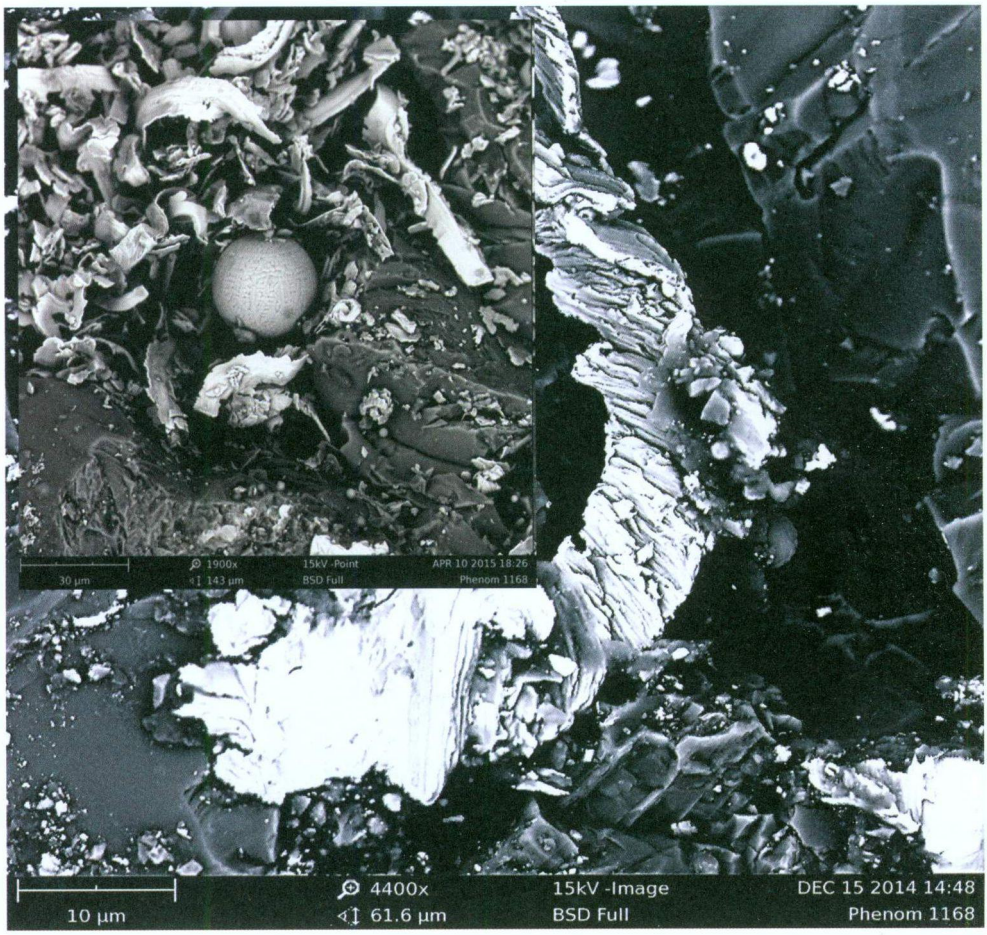


Rys. 14. Stanowisko do badań procesów mikroskrawania w próżni i niskich temperaturach (–150 … –170°C) [Ści1995]

W komorze próżniowej mogą być umieszczane podatnie utwierdzone ostrza skrawające, przemieszczane równolegle do osi obrabianego przedmiotu. Poprzez ukształtowanie obrabianego elementu w postaci stożka ściętego uzyskuje się zmienną głębokość skrawania wzdłuż drogi ostrza.

Układ mocowania próbki skonstruowano tak, aby po jednym odpompowaniu komory można było przeprowadzić wiele prób mikroskrawania na obwodzie próbki, zarówno dla maksymalnej wartości próżni, jak i dla wartości pośrednich. Rozwiązanie to ponadto zapewnia realizację dużej liczby procesów mikroskrawania w niezmiennych warunkach.

Na podstawie obserwacji budowy wiórów (rys. 15) wykazano, że częstotliwość mikronieciągłości procesu tworzenia wióra w procesach szlifowania sięga kilku MHz, a więc przekracza częstości uzyskiwane przez wymuszenie w układach mechanicznych. Może to przyczyniać się do korzystnego lokalnego obniżenia granicy

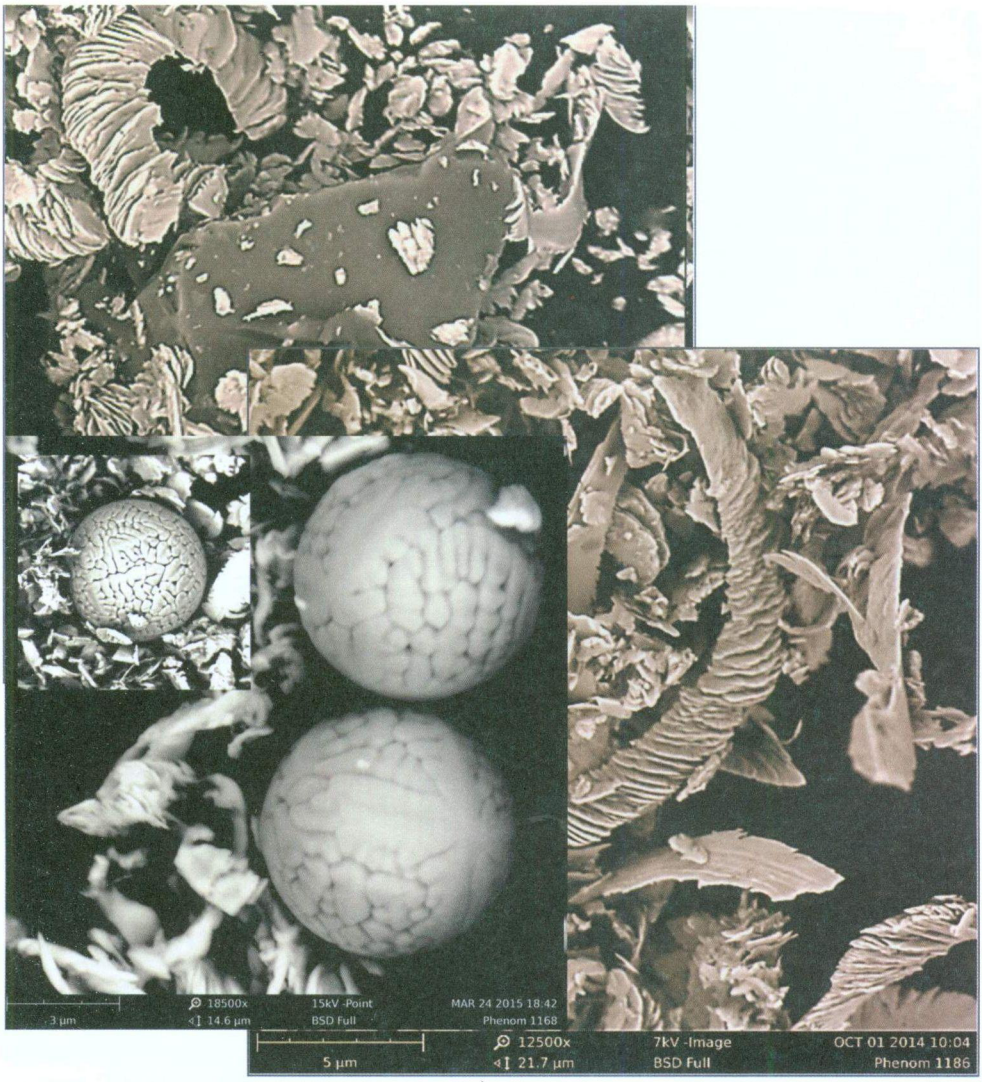


Rys. 15. Płytkowa budowa wiórów w procesie szlifowania z prędkością 35 m/s stali łożyskowej (fotografia z wiórem kulistym) oraz w procesie szlifowania stopu tytanu

wytrzymałości obrabianego materiału. Ten kierunek badań zapewne będzie ważny dla rozwoju nanoobróbki ściernej.

W procesach obróbki ściernej następujących z mniejszymi prędkościami ruchu głównego, na przykład w procesach mikrowygładzania, częstość tworzenia nanopłytek z których składają się mikrowióry jest mniejsza, ale samo zjawisko nieciągłości procesu jest podobne [Tan2014] (rys. 16). W procesach mikroskrawania, gdy ziarna są umieszczone na podatnym nośniku lub w podatnym spoiwie, rozmiary motywów dna śladu obróbkowego (odległości lokalnych wgłębień i wyniosłości) są zgodne z częstością nieciągłości procesu [Kac2012/1, Tan2014].

Wpływ temperatury na proces mikroskrawania jest niemonotoniczny. W zakresie temperatur 300–1000°C dla stopów stali, tytanu i niklu względne zmniejszenie



Rys. 16. Płytkowa budowa mikrowiórów w procesie wygładzania diamentowymi foliami ściernymi – grubości płytek ok. 200 nanometrów [Tan2014]

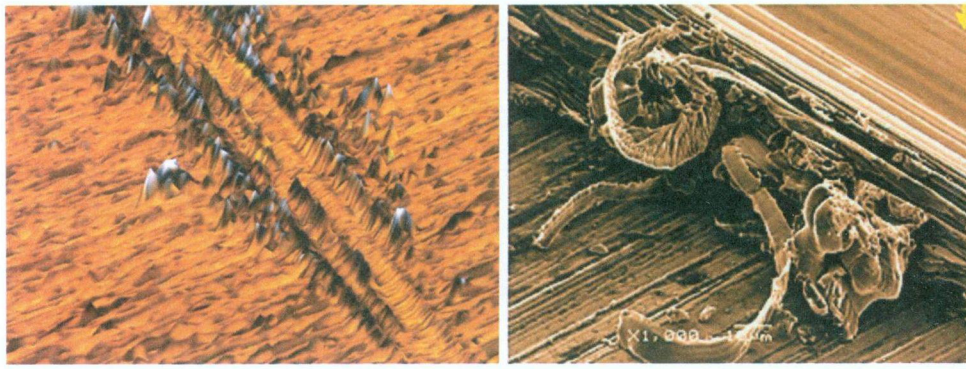
wytrzymałości jest większe od względnego zmniejszenia twardości. Oznacza to korzystne warunki dla mikroskrawania. Dla wyższych temperatur zmniejszają się opory bocznego przemieszczania materiału. Może to znacznie ograniczyć skuteczność mikroskrawania, zwłaszcza dla ostrzy, których położenie jest w przybliżeniu takie, iż krawędź klinowej powierzchni natarcia leży w płaszczyźnie prostopadłej do obrabianej powierzchni i równoległej do kierunku skrawania.

W literaturze spotyka się znaczne rozbieżności w wynikach badań, dotyczących warunków, jakie muszą być spełnione, aby następowało oddzielanie materiału, a nie

tylko odkształcanie sprężyste i plastyczne [Maj1991, Mat1997]. Jest kilka powodów tych rozbieżności. Przede wszystkim należy zauważyć, iż w mikroobróbce dominują boczne (względem toru mikroskrawania) przepływy materiału, podczas gdy zwykle analizuje się tylko geometryczne warunki tworzenia wióra, w przekroju prostopadłym do powierzchni przedmiotu i równoległym do kierunku ruchu ostrza.

Najmniejsza grubość warstwy, dla której następuje już oddzielanie materiału, zależy od geometrii i cech mikrogeometrii ostrzy i może być szacowana w obróbce ściernej, jako zbliżona do wartości 0,05–0,1 μm (50 do 100 nm).

Warto zauważyć, że boczne wypływki, zwłaszcza w warunkach dużej wartości oporów tarcia obrabianego materiału o powierzchnię ostrza, mają postać podobną do tworzącego się mikrowióra. W badaniach eksperymentalnych potwierdzono, iż spotyka się dwie formy wypływek bocznych materiału, tworzonych po obydwu stronach śladu mikroskrawania. Jedna to typowa wypływka w postaci plastycznego wypiętrzenia materiału, często w postaci przylegających płytek o bardzo małej grubości od 50 do 3000 nanometrów (rys. 17), a druga to boczny, wywinięty łukowo mikrowiór, również o budowie płytkowej. W tym drugim przypadku, w przekroju poprzecznym do kierunku ruchu ostrza, „wypływka" jest „pusta" w środku.



Rys. 17. Formy geometryczne wypływek

W badaniach eksperymentalnych procesów obróbki ściernej przydatne jest również stanowisko do akwizycji obrazów szybkozmiennych (rys. 18), wyposażone w kamerę Phantom v210, której parametry akwizycji umożliwiają rejestrację do 300 000 klatek na sekundę z dodatkowym oświetleniem punktowym o jasności 4,6 mln luksów.

W odmiennym od szlifowania procesie obróbki, jakim jest mikrowygładzanie foliami ściernymi, podatne zamocowanie ziaren ściernych w folii, dociskanych do przedmiotu elastyczną rolką, powoduje w strefie obróbki zmniejszanie różnic wysokości wierzchołków ziaren, co zwiększa równomierność obciążeń mechanicznych i cieplnych. Prędkość przesuwu folii jest wielokrotnie mniejsza od prędkości przedmiotu, która z kolei jest znacznie mniejsza od prędkości szlifowania.



Rys. 18. Stanowisko do akwizycji obrazów szybkozmiennych podczas procesu mikroskrawania [Kac2013/1]

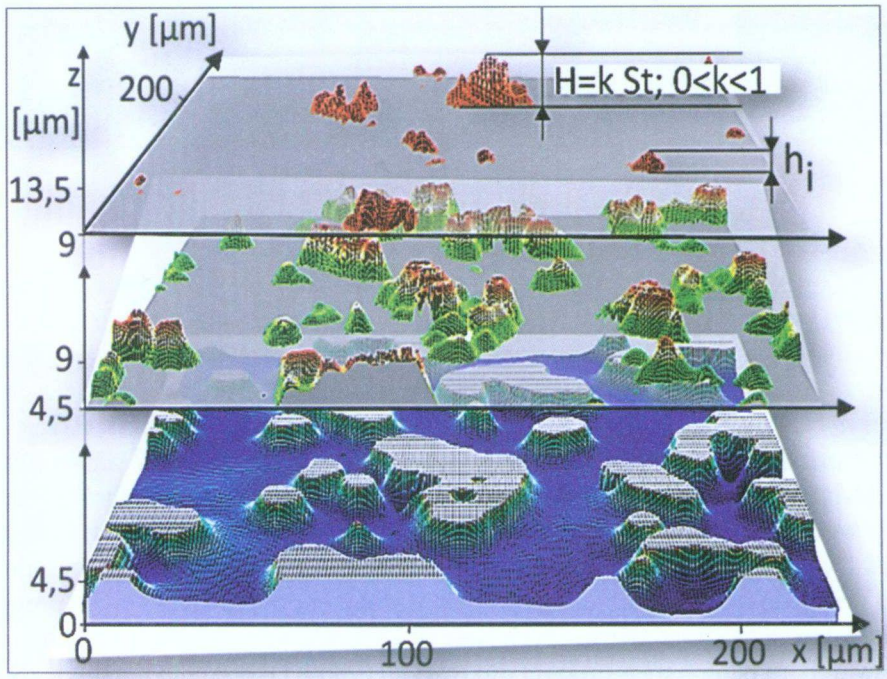
To przyczynia się do ograniczenia energii obróbki odniesionej do jednostki obrobionej powierzchni. Określone fragmenty folii ściernej tylko raz znajdują się w strefie obróbki, po czym przemieszczają się i nawijają na rolkę odbierającą. Dąży się przy tym do pełnego wykorzystania potencjału obróbkowego ziaren oraz objętości przestrzeni między ostrzami (dla gromadzenia produktów obróbki), co zawęża obszar rozwiązań optymalnych dla doboru parametrów obróbki.

Oddziaływania lokalne między sąsiednimi ziarnami w strefie obróbki mają istotny wpływ na ich aktywność oraz długość dróg kontaktu z powierzchnią obrabianą [Shi1994, Zha2002]. Uwzględnienie wpływu warunków sprężystego dociskania ziaren do materiału obrabianego, jest warunkiem poprawnego opisu procesu kształtowania cech stereometrycznych powierzchni, a w konsekwencji opracowania podstaw doboru parametrów procesu mikrowygładzania i uzyskania możliwie dużej złożoności układu śladów obróbkowych, dla zapewnienia korzystnych cech stereometrycznych obrabianej powierzchni.

5. ANALIZA TOPOGRAFII POWIERZCHNI CZYNNEJ NARZĘDZI ŚCIERNYCH

Topografia powierzchni narzędzi oraz powierzchni obrabianych przedmiotów jest przedmiotem badań w wielu ośrodkach naukowych [Dom2006, Grz2010, Hec2003, Ina1996, Kru1995, Lub2000, mat2001, Nad2010, Paw2005, Sta2004]. Nadal jednak przeważa stosowanie podobnych parametrów do analizy tych dwóch różnych rodzajów powierzchni, co ogranicza precyzję oceny ich wzajemnego oddziaływania.

W analizie topografii powierzchni czynnej narzędzi ściernych szczególną uwagę należy zwrócić na cechy wzniesień wierzchołków ziaren ponad pewną płaszczyznę położoną na różnych poziomach, od 0,1 do 0,4 wartości parametru St od najwyższego wierzchołka powierzchni (rys. 19).



Rys. 19. Schemat do analizy topografii powierzchni czynnej narzędzi ściernych [Tan2014]

Wynika to z cech procesu, w którym powierzchnia czynna narzędzia kontaktuje się z materiałem obrabianym tylko wierzchołkami ziaren najbardziej wysuniętych w kierunku obrabianej powierzchni.

Cenne wnioski dotyczące wyników procesu obróbki ściernej można wyprowadzić między innymi z zastosowaniem dekompozycji powierzchni narzędzia z wykorzystaniem komórek Voronoi. Pierwszym zadaniem jest wyznaczenie odległości między wierzchołkami wzniesień metodą najbliższych sąsiadów, których centralnymi punktami są wierzchołki ziaren [Kac2011/2, Tan2014]. Pozwala to następnie określić relacje między polem podstawy ziarna, a polem komórki Voronoi, a także wyznaczyć kąty pochylenia linii łączących sąsiednie wierzchołki ziaren.

Ocena rozmieszczenia i kształtu wyniesień wierzchołków ziaren ponad pewien poziom od najwyższego wierzchołka może być podstawą między innymi do:

- oceny aktywności ziaren,
- prognozowania energii właściwej obróbki, zależnej od rozkładu parametrów geometrycznych warstw skrawanych poszczególnymi ziarnami,
- oceny procesów zużycia narzędzi,
- doboru parametrów obróbki.

Opracowane oprogramowanie [Kac2010/3] pozwala wyznaczyć między innymi następujące parametry:

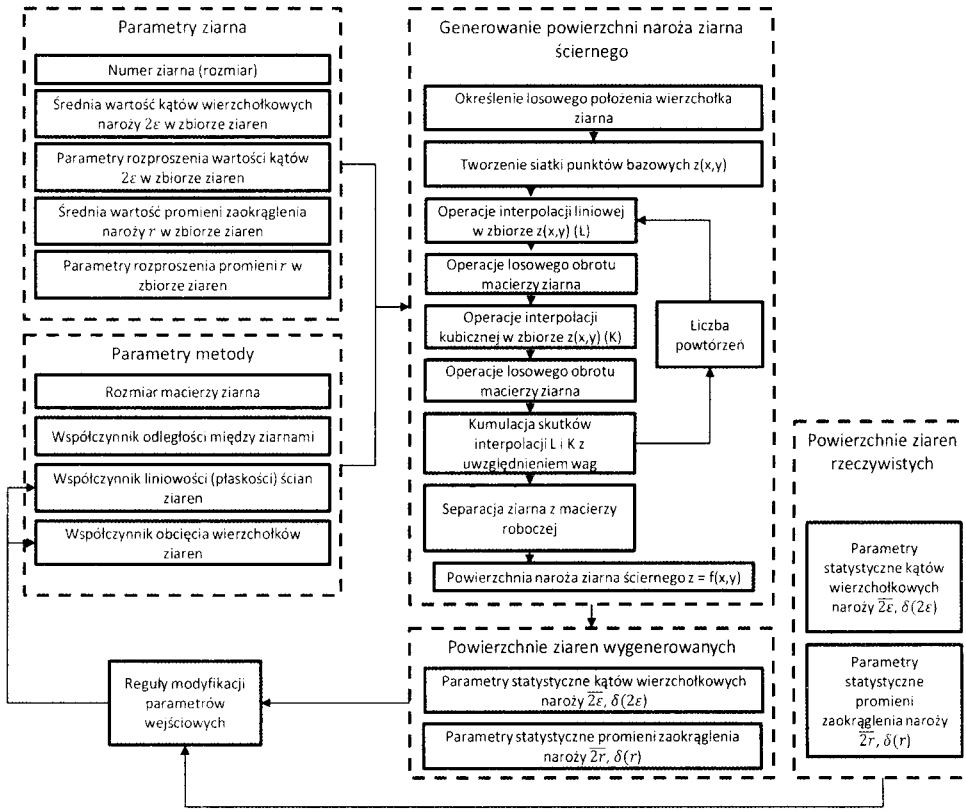
- zbiory $z(x,y)$ dla wzniesień powierzchni,
- pole powierzchni wzniesienia nad określoną płaszczyzną,
- powierzchnię podstawy wzniesienia (wyspy),
- środki geometryczne wysp,
- liczbę wysp,
- współrzędne x, y najwyższego wierzchołka wzniesienia,
- wysokość i rozproszenie wysokości wierzchołków wzniesień,
- średnią odległość między wierzchołkami wzniesień, wyznaczoną na podstawie dekompozycji powierzchni na komórki Voronoi, metodą najbliższych sąsiadów,
- pole powierzchni komórek Voronoi,
- współrzędne x, y wierzchołków komórek Voronoi,
- relacje między polem i obwodem podstawy wyniesienia,
- parametry charakteryzujące rozwinięcie obwodu podstawy wyniesienia,
- zmienność opisanych parametrów w funkcji położenia płaszczyzny odcinającej.

6. METODYKA MODELOWANIA POWIERZCHNI ZIAREN OKREŚLONYCH MATERIAŁÓW ŚCIERNYCH

Generowanie powierzchni ziaren ściernych może następować z wykorzystaniem różnych metod – jako proces:

- addytywnego i multiplikatywnego kumulowania funkcji opisu kształtu, jej zakłóceń, zużycia, mikrogeometrii,
- randomizowanego fraktalnego kumulowania składowych o różnych częstościach [Kac2012/2],

- odrywania od modelowanego ziarna fragmentów w różnych miejscach i dobieranej wielkości [Kac2007/1],
- osadzania i rozpraszania osadzanych cząstek według pewnej procedury doboru lokalnych intensywności tych procedur,
- rozciągania elastycznej sieci do punktów charakterystycznych, generowanych, z wykorzystaniem generatora kształtu ziaren danego typu [Bał2007],
- automatycznego wyboru powierzchni ziarna z licznego zbioru ziaren wcześniej zapisanych w bazie (rzeczywistych lub statystycznie z nimi zgodnych), z dokonywaniem modyfikacji poprawnych w zakresie zgodności statystycznej [Kac2011, Kac2015],
- metodami hybrydowymi.

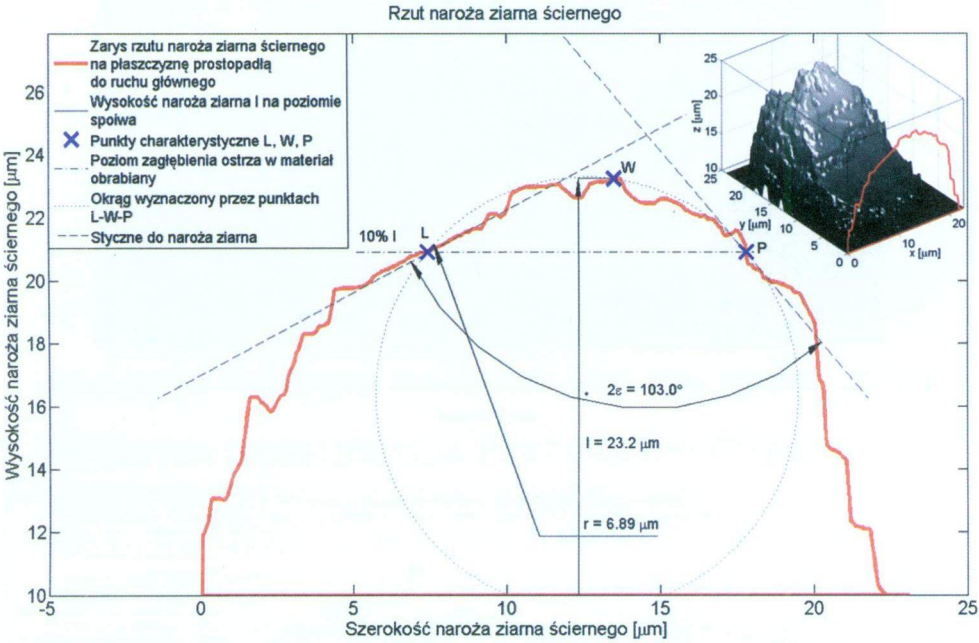


Rys. 20. Randomizowany fraktalny algorytm generowania powierzchni naroża ziarna ściernego [Kac2012/2, Kac2015]

Na rysunku 20 przedstawiono randomizowany fraktalny algorytm generowania powierzchni naroża ziarna ściernego, w którym zaimplementowano mechanizm sa-

moczynnego korygowania parametrów generatora na podstawie stopnia zgodności cech naroży ziaren generowanych i zbioru ziaren rzeczywistych.

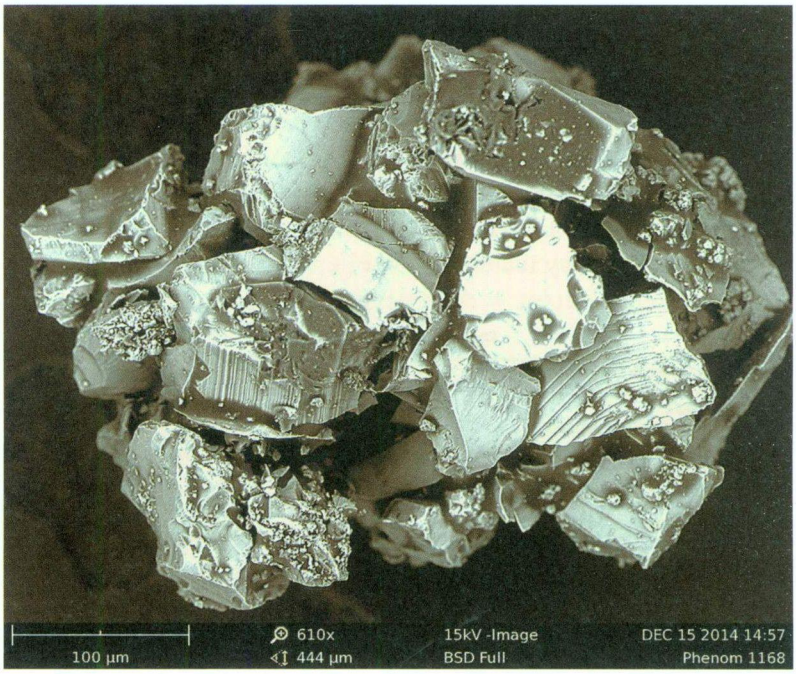
Weryfikacja cech geometrycznych naroży ziaren modelowych jest bardzo ważnym etapem w tworzeniu procedur symulacji, od których wymaga się wysokiej zgodności z dokładnie zdefiniowanymi procesami rzeczywistymi. Szczególną uwagę należy zwrócić na parametry geometryczne wierzchołków (naroży) ziaren, wyznaczane dla określonych warunków ich stosowania, od których zależy rozkład zagłębień ziaren w obrabiany materiał (rys. 21).



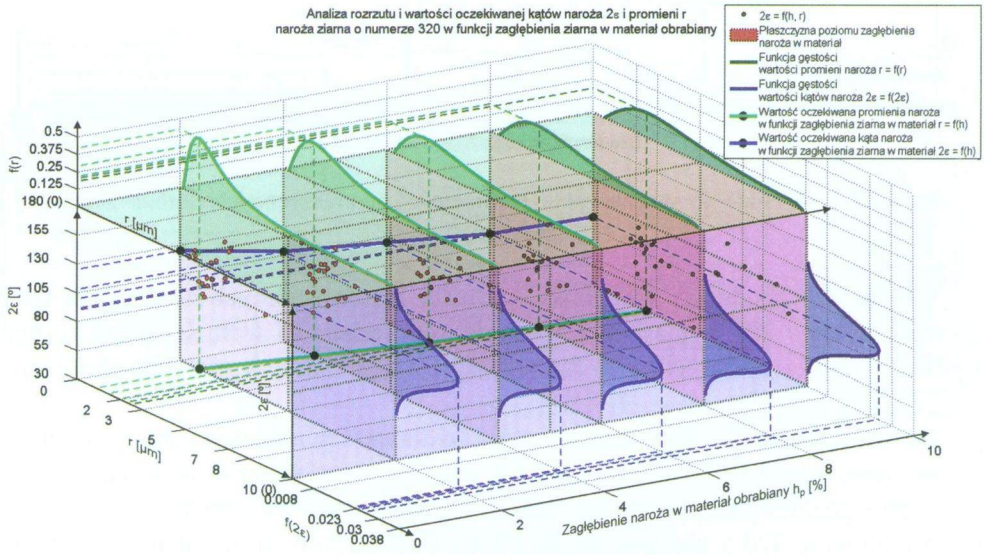
Rys. 21. Schemat do wyznaczania parametrów geometrycznych naroża ziarna ściernego

Weryfikacja zgodności modelowych naroży ziaren ściernych z narożami rzeczywistymi (rys. 22) wymaga oceny zgodności wariancji i wartości oczekiwanej kątów naroży 2ε i promieni r w funkcji zagłębienia ziarna w materiał obrabiany (rys. 23, 24).

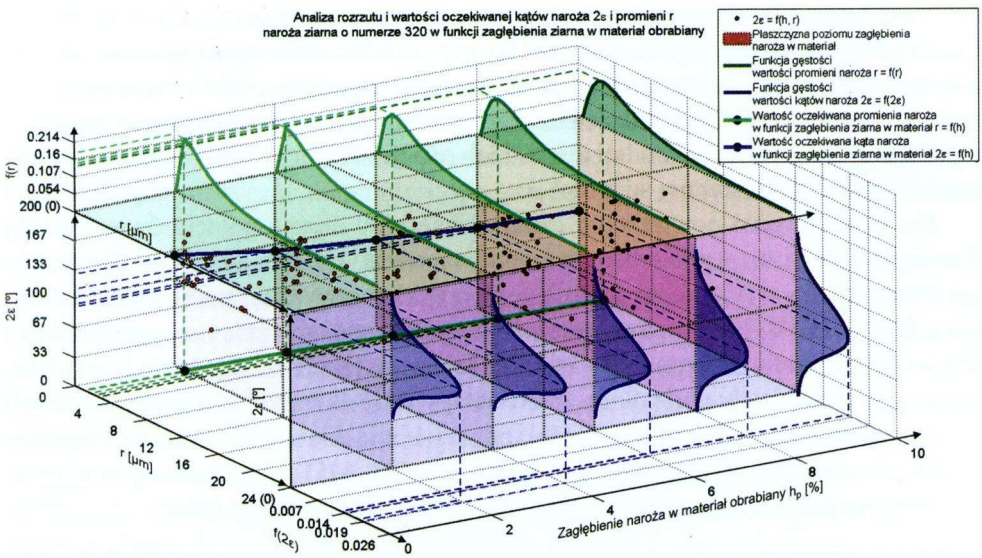
Porównano wartości oczekiwane kątów 2ε dla naroży modelowych i promieni r zaokrąglenia wierzchołków w funkcji ich zagłębienia w materiał obrabiany z parametrami geometrycznymi naroży ziaren rzeczywistych (w przykładzie dla ziaren o rozmiarze 320 z elektrokorundu 99A). Stwierdzono, że uzyskano zgodność parametrów geometrycznych ziaren modelowych z ziarnami rzeczywistymi z elektrokorundu w zakresie od 2–10% w całym zakresie wartości zagłębienia naroża w materiał obrabiany.



Rys. 22. Przykład grupy ziaren elektrokorundu specjalnego w mikroagregacie ściernym



Rys. 23. Analiza rozproszenia i wartości oczekiwanej kątów i promieni $\bar{r}$ modelowych naroży ziaren o numerze 320 w funkcji zagłębienia ziarna w materiał obrabiany [Kac2012/2]



Rys. 24. Analiza rozproszenia i wartości oczekiwanej kątów i promieni $\bar{r}$ rzeczywistych naroży ziaren o numerze 320 w funkcji zagłębienia ziarna w materiał obrabiany [Kac2012/2]

7. METODYKA MODELOWANIA POWIERZCHNI CZYNNEJ NARZĘDZI ŚCIERNYCH Z UWZGLĘDNIENIEM POSTACI ROZKŁADU I KORELACJI PRZESTRZENNEGO ROZMIESZCZENIA ICH WIERZCHOŁKÓW DLA OKREŚLONYCH ŚCIERNIC RZECZYWISTYCH

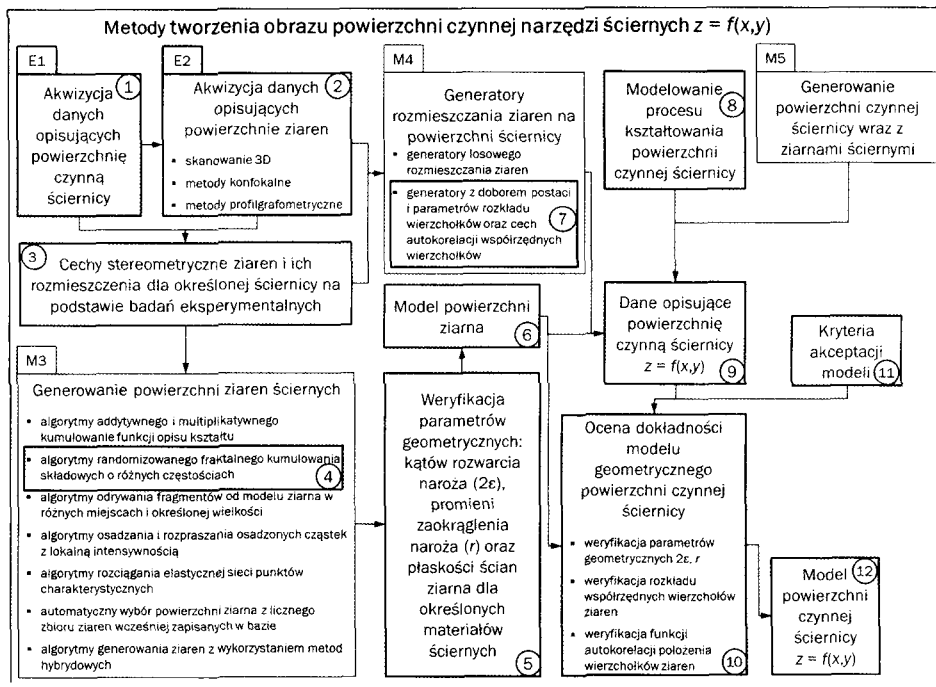
Można wyróżnić dwie podstawowe metody prowadzące do zbudowania modelu topografii powierzchni ściernicy: akwizycja danych opisujących powierzchnię czynną określonej ściernicy lub modelowanie komputerowe topografii powierzchni.

Akwizycja danych umożliwia uzyskanie rzeczywistego obrazu czynnej powierzchni ściernicy, ale jest procesem, który trwa bardzo długo i wymaga bardzo dużej przestrzeni dyskowej na przechowanie informacji o badanej strukturze. Może być realizowana z zastosowaniem różnych metod i systemów pomiarowych [Ber2007, Kac2007/2, Kac2011/1, Tom2012/1, Tom2012/2, Lip2013, Lip2012]. W zadaniach wymagających danych dotyczących powierzchni innej ściernicy konieczne jest wtedy powtórzenie zadania akwizycji lub wykorzystanie zbioru danych do generowania kolejnych zbiorów statystycznie równoważnych, co wymaga uzyskania zgodności nie tylko rozkładu rzędnych, ale również ich korelacji.

W procesie szlifowania, zagłębienie pojedynczego ziarna ściernego w materiale obrabianym, stanowi często nie więcej niż 5% jego największego wymiaru, dlatego

istotnego znaczenia nabierają cechy morfologii powierzchni ziarna takie jak: zagłębienia na powierzchni, liczba wierzchołków oraz ich rozmieszczenie. Wszystkie te czynniki wpływają na charakter pracy ziarna podczas procesu szlifowania oraz jego zużycie i zdolność do samoostrzenia. To powoduje, że wymienione cechy powinny mieć wpływ na tworzenie modeli ziaren i ich relacji w zbiorze danych, stanowiących model powierzchni czynnej ściernicy.

Do modelowania powierzchni czynnej ściernicy można polecić dwie metody. Pierwsza polega na wykorzystaniu metod matematycznych do tworzenia obrazu geometrycznego powierzchni ściernicy, na przykład z wykorzystaniem analiz fraktalnych [Kac2010/1], a druga wykorzystuje metody statystycznie z uwzględnieniem losowego rozkładu ziaren na powierzchni ściernicy [Kac2012/2]. Metody modelowania (rys. 25) zostały podzielone na dwa etapy: etap akwizycji danych opisujących powierzchnię czynną ściernicy (E1) lub powierzchnię ziaren (E2) oraz etap modelowania powierzchni czynnej narzędzi ściernych (M3–M5). Na rysunku powyższym wyróżniono oraz określono kolejność operacji prowadzących do celu.



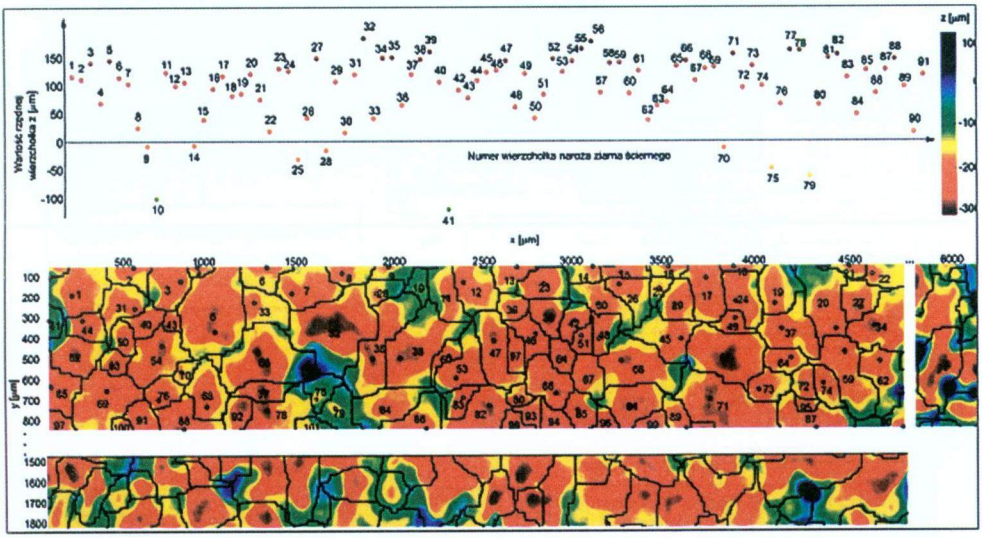
Rys. 25. Metody modelowania powierzchni czynnej narzędzi ściernych z określoną kolejnością operacji realizowanych w pracy [Kac2014/4, Kac2015] E1, E2 – etapy akwizycji danych, M3-M5 – etapy modelowania

Akwizycji danych, opisujących powierzchnię czynną ściernicy, towarzyszą zazwyczaj utrudnienia ze względu na niski współczynnik odbicia światła przez powierzchnię czynną ściernic oraz jej skomplikowaną strukturę. Pomiar topografii

powierzchni narzędzi ściernych jest możliwy na przykład z zastosowaniem laserowego skaningowego mikroskopu konfokalnego, lecz ograniczeniem jest maksymalna wysokość mierzonego przedmiotu. Konieczne staje się zastosowanie replik badanych powierzchni z przeprowadzoną wcześniej oceną dokładności odwzorowania powierzchni [Kac2014/3]. Do wykonania replik powierzchni czynnej można wykorzystać specjalistyczne materiały i oprzyrządowanie zapewniające rozdzielczość odwzorowania 0,1 μm.

Do wyodrębnienia fragmentów naroży ziaren ściernych zastosowano algorytm „wododziału" [Kac2014/4], który umożliwia rozdzielenie większych obiektów na mniejsze. Segmentację powierzchni opisanej macierzą liczb rzeczywistych przeprowadzono w systemie obliczeniowym MATLAB z pakietem narzędziowym Image Processing [Kac2015]. Przykładowe powierzchnie fragmentów ziaren ściernych wyodrębnione z zastosowaniem opisywanej metody przedstawiono na rysunku 26. Metoda ta pozwala dość dobrze wyodrębniać ziarna, ale może nie wyróżniać, jako odrębnych, dwóch bliskich wierzchołków o podobnej wysokości, należących do różnych ziaren.

Możliwe jest wówczas zastosowanie najpierw procedur wyodrębniania wierzchołków, a następnie wykorzystania wyników działania algorytmu „wododziału".

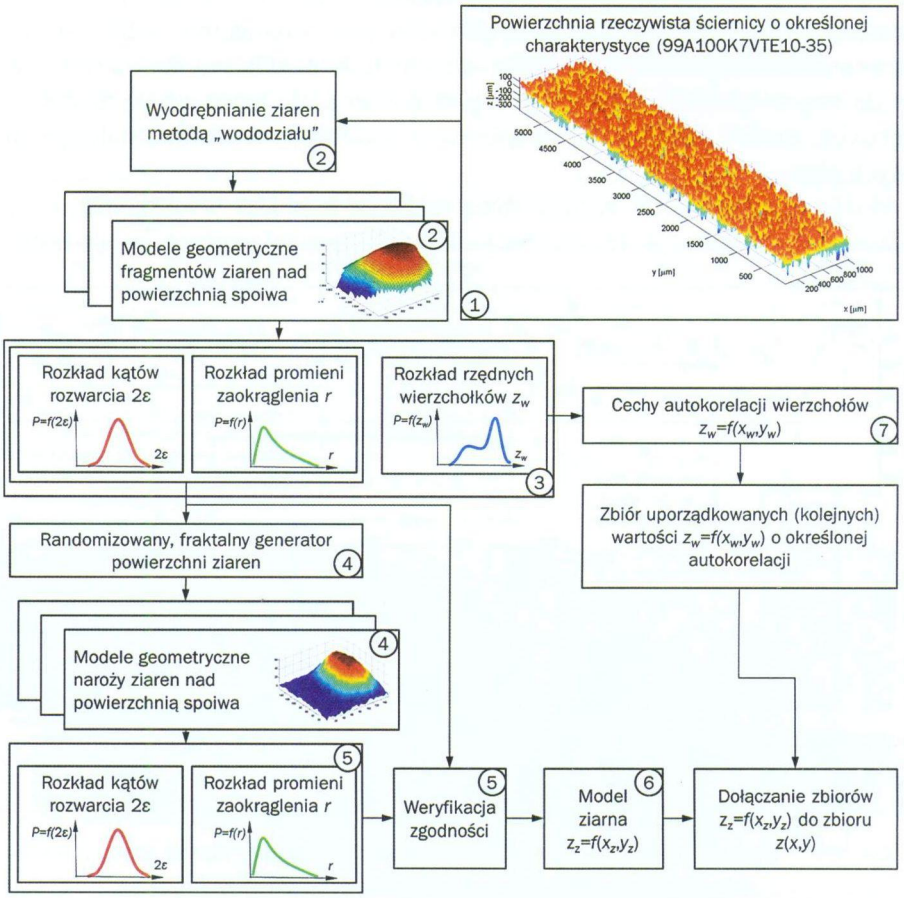


Rys. 26. Wartości rzędnych kolejnych wierzchołków naroży ziaren ściernych wyróżnianych metodą „wododziału" [Kac2014/4, Kac2015]

W generowaniu powierzchni ziaren ściernych na czynnej powierzchni ściernicy należy uwzględnić, iż współrzędne położenia ziaren modelowych w kierunku osi x i y w zbiorze $z(x,y)$ zależą od średniej odległości ziaren i mają rozkład równomierny, lub wielomodalny (zwykle dwumodalny), gdy występuje agregowanie się ziaren. Rozkład ten można wyznaczyć w etapie akwizycji danych dla określonej ściernicy.

Rozkład wierzchołków w kierunku osi z jest odmienny, a położenie kolejnych rzędnych jest związane pewną cechą autokorelacji wysokości wierzchołków. Autokorelacja wysokości wierzchołków ziaren ściernych wynika z ich grupowania się. Nieuwzględnienie w modelu powierzchni czynnej narzędzia ściernego autokorelacji położenia wierzchołków prowadzi do błędów w modelowaniu [Kac2014/4].

Opracowano i wykorzystano w modelowaniu algorytm generowania uporządkowanych (kolejnych) wartości o określonych cechach funkcji autokorelacji (rys. 27). Ostatni etap tworzenia modelu czynnej powierzchni ściernicy polega na zmodyfikowaniu rzędnych powierzchni naroży ziaren o wartości wynikające z autokorelacji położenia wierzchołów, które określa się za pomocą opracowanego algorytmu.



Rys. 27. Schemat generowania powierzchni narzędzi ściernych z uwzględnieniem postaci rozkładu wysokości wierzchołków ziaren oraz ich autokorelacji [Kac2014/4, Kac2015]

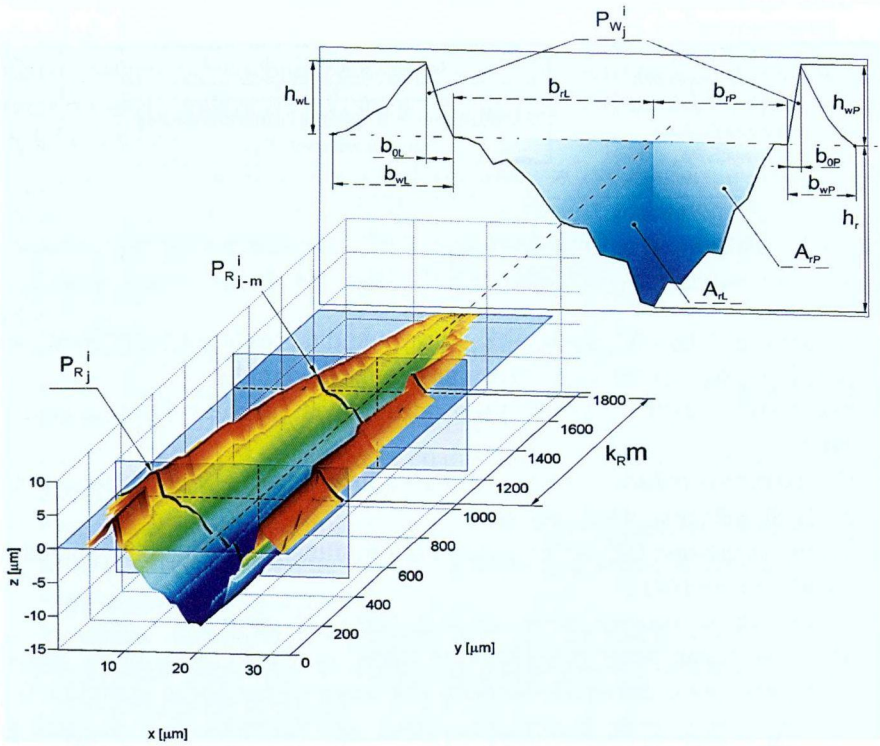
Do porównania powierzchni modelowej z powierzchnią rzeczywistą narzędzia ściernego można zastosować łącznie dwie metody. Pierwsza z nich polega na porów-

naniu wartości średniej pól komórek Voronoi wyznaczonych na określonych poziomach od najwyższego wierzchołka analizowanej powierzchni. W metodzie drugiej porównuje się funkcję częstości rzędnych wierzchołów ziaren ściernych oraz funkcje autokorelacji wysokości wierzchołków.

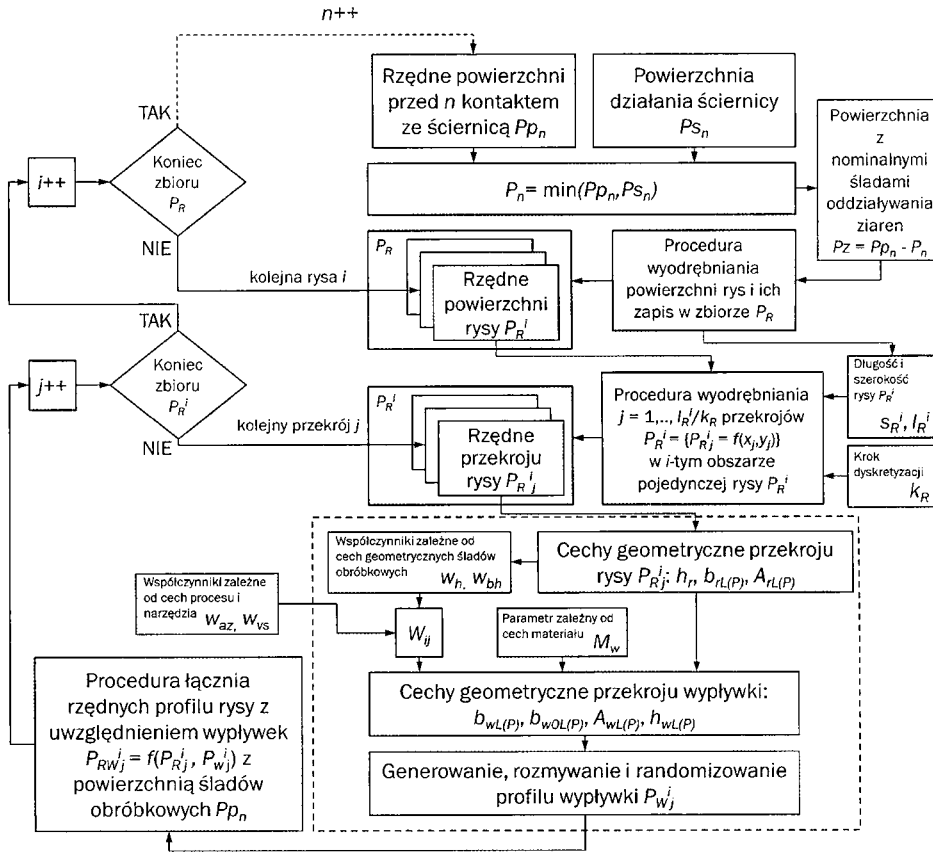
Do powyższej oceny zgodności należy jeszcze dołączyć wyniki badania zgodności częstości występowania największych wysokości wierzchołków dla modelu i ściernicy rzeczywistej, bowiem tylko nieliczne ziarna, te położone najwyżej w danym okresie pracy narzędzia, będą kontaktowały się z obrabianym przedmiotem. Od zgodności w tym zakresie zależeć będzie to, w jakim stopniu wyniki symulacji będą poprawnie opisywać rzeczywiste procesy obróbki [Kac2014/4].

8. METODYKA MODELOWANIA WYPŁYWEK OTACZAJĄCYCH ŚLADY ODDZIAŁYWANIA ZIAREN ŚCIERNYCH

Modelowanie wypływek otaczających ślady tworzone przez poszczególne ziarna wymaga uwzględnienia wpływu wielu czynników na objętość i ukształtowanie bocznych (rys. 28) wzniesień materiału, będących skutkiem przemieszczeń i odkształceń plastycznych w strefie oddziaływania ziaren.



Rys. 28. Parametry geometryczne wgłębienia i wypływek, będących skutkiem oddziaływania ostrza



Rys. 29. Schemat do modelowania procesów kształtowania wypływek otaczających ślady oddziaływania ziaren

Zmniejszenie objętości wypływek, korzystne dla efektywności procesu, obserwuje się, gdy występują między innymi następujące warunki:

- Szerokość warstwy skrawanej jest duża, nawet, jeżeli zagłębienie ziarna jest małe,
- Powierzchnia natarcia ziarna jest płaska lub wklęsła i w przybliżeniu prostopadła do kierunku ruchu ostrza,
- Ściany tworzonej rysy tworzą duży kąt z nominalną powierzchnią przedmiotu (ściany są strome),
- Powierzchnia natarcia ziarna jest rozwinięta i chropowata,
- Ślady tworzone przez poszczególne ziarna są długie, gdyż wtedy zmniejsza się wpływ początkowych i końcowych fragmentów torów kontaktu, w których występują małe zagłębienia ziarna; sprzyja temu duży stosunek prędkości przedmiotu do prędkości ruchu ziaren oraz duże zagłębienia ziaren w materiał przedmiotu,

- Prędkość odkształceń jest duża – prędkość skrawania jest duża,
- Materiał obrabiany charakteryzuje się niską plastycznością,
- W otoczeniu wierzchołka ostrza, w strefie kontaktu, trójosiowy stan ściskania nie jest rozległy i nie występują w nim znaczne naprężenia ściskające.

Uwzględnienie w procedurach symulacji nawet tylko najważniejszych z powyższych czynników wymagało (rys. 29) sprawdzenia warunków geometrycznych i kinematycznych pracy ostrza wzdłuż całej długości tworzonego śladu i generowania cech geometrycznych wypływek zależnych od lokalnych zmian tych warunków wzdłuż drogi ostrza.

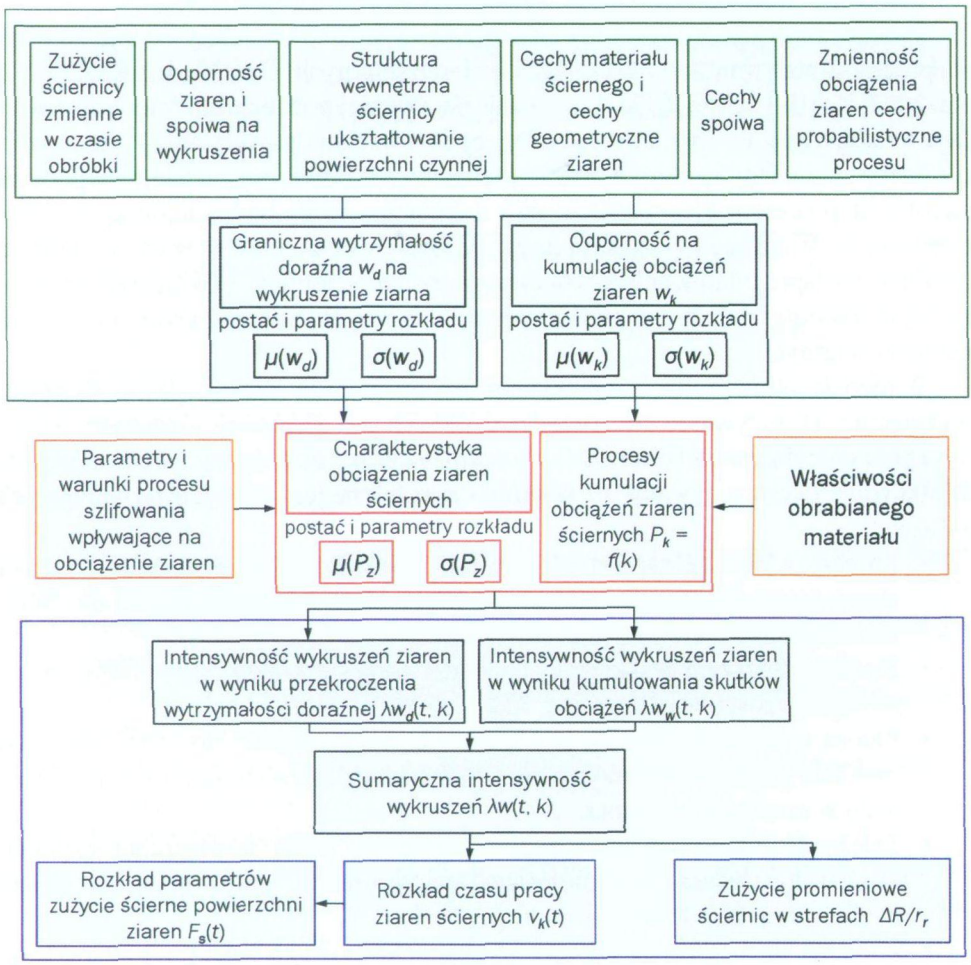
9. MODELOWANIE ZUŻYCIA I TRWAŁOŚCI NARZĘDZI ŚCIERNYCH

Efekt końcowy procesu szlifowania w znacznym stopniu zależy od intensywności procesów zużywania i wykruszania się ziaren ściernych [Gaw2014/2, Kac2001/2, Kas2007, Kru1995, Tom2013]. Zużywanie się czynnej powierzchni ściernicy powoduje zmniejszenie liczby ziaren kształtujących obrabianą powierzchnię (zmniejszenie liczby ziaren aktywnych). Analiza wymienionych procesów ma istotny wpływ na sterowanie procesem i jest problemem o dużym znaczeniu technologicznym i ekonomicznym. Ważne jest zwłaszcza prawidłowe określenie okresu czasu, po którym powinno nastąpić odnowienie czynnej powierzchni ściernicy. Dokładność prognozowania trwałości zależy od jakości probabilistycznych modeli zużycia i trwałości narzędzi ściernych.

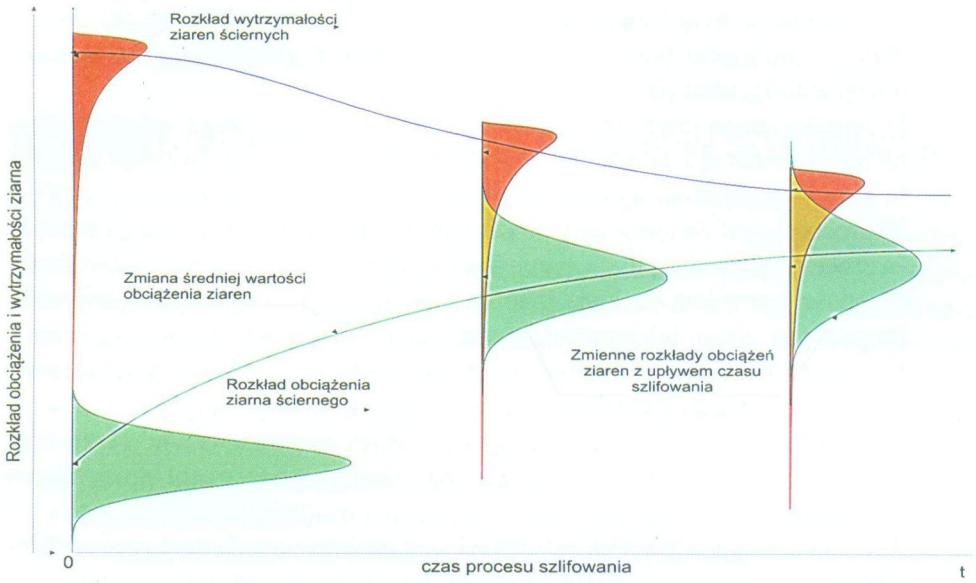
W modelowaniu probabilistycznych procesów zużycia ściernicy (rys. 30), warto uwzględnić, iż zużywanie się narzędzi ściernych jest procesem złożonym, zależnym głównie od zjawisk ściernego i wytrzymałościowego zużycia ziaren ściernych. W analizie procesu zużywania się ściernic uzasadnione jest przyjęcie następujących założeń:

- Procesy wykruszeń spowodowane przekroczeniem wytrzymałości doraźnej ziarna oraz wykruszenia spowodowane przekroczeniem odporności na obciążenie sumaryczne występują równolegle.
- Ziarna o dłuższym czasie pracy charakteryzują się większym starciem, co powoduje wzrost obciążenia (rys. 31).
- Proces wykruszeń wskutek przekroczenia wytrzymałości doraźnej zależy od rozkładu granicznej wytrzymałości ziaren i rozkładu obciążenia ziarna zmiennego w czasie pracy ziarna.
- Zależność intensywności zużycia ściernic od stanu powierzchni czynnej, zauważalna zwłaszcza w pierwszym etapie procesu szlifowania, osłabia się z upływem pracy ściernicy.
- Zmienna intensywność zużycia wytrzymałościowego zależy od charakterystyki narzędzia ściernego, w szczególności od zastosowanego materiału ściernego i spoiwa, a także ich udziału w objętości ściernicy.

- Dla ściernic o mniejszej twardości przeważa proces wykruszeń całych ziaren ściernych, natomiast w przypadku większej twardości narzędzia dominują mikrowykruszenia powierzchni ziarna lub postępujące ścieranie powierzchni ziarna.
- Wykruszenia ziaren aktywnych powodują zmniejszanie sumarycznej powierzchni starcia wszystkich ziaren aktywnych.
- Liczba ziaren wykruszonych w danej chwili jest wartością zmienną w czasie.
- W warunkach pracy ściernicy z ograniczonym samoostrzeniem średni czas oczekiwania na wykruszenie w grupie ziaren o ustalonym czasie pracy może zależeć od sumarycznego czasu pracy ziarna ściernego.
- Rozkład czasu pracy ziaren aktywnych jest zmienny z upływem czasu szlifowania.



Rys. 30. Schemat do budowy probabilistycznego modelu zużycia ściernicy



Rys. 31. Zmiany obciążenia i wytrzymałości ziaren ściernych z upływem czasu szlifowania

Ponadto trzeba uwzględnić, że cieplne i mechaniczne obciążenie ziaren ściernych, ich wytrzymałość doraźna i odporność na kumulację obciążeń, a także siła niezbędna do wykruszenia ziarna są wartościami zmiennymi losowo.

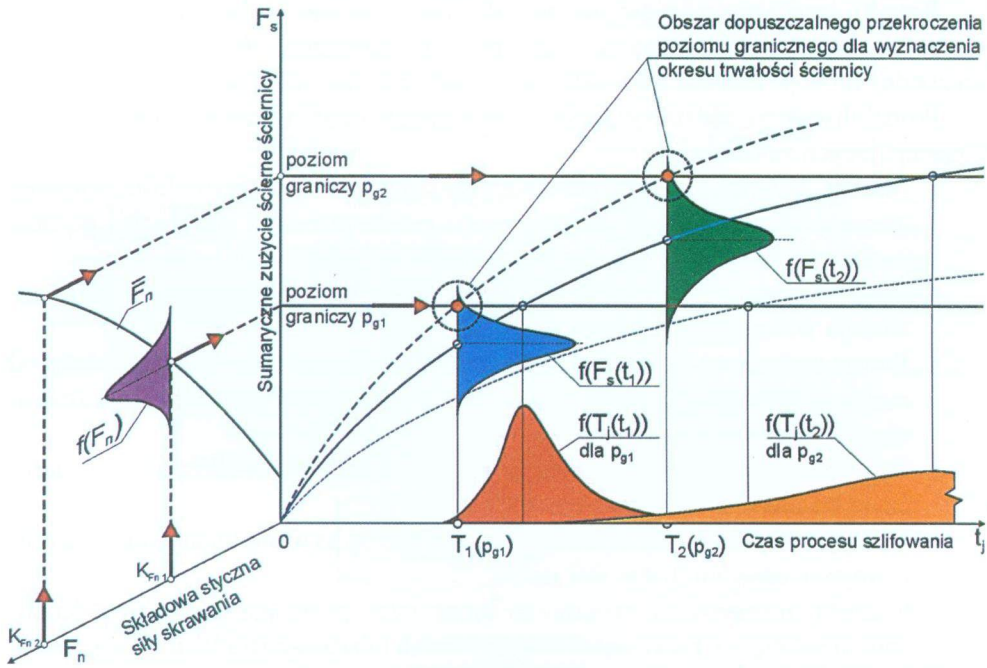
Probabilistyczne podstawy modelowania procesu wykruszania ziaren wynikają z następujących założeń:

- Procesy wykruszeń spowodowane przekroczeniem wytrzymałości doraźnej ziarna oraz wykruszenia spowodowane przekroczeniem odporności na skumulowane skutki wcześniejszych obciążeń są addytywne.
- Ziarna o dłuższym czasie pracy charakteryzują się większym starciem, co powoduje wzrost obciążenia.
- Proces wykruszeń wskutek przekroczenia wytrzymałości doraźnej zależy od rozkładu granicznej wytrzymałości ziaren i rozkładu obciążenia ziarna zmiennego w czasie pracy ziarna.
- Stała intensywność wykruszeń może być opisywana rozkładem wykładniczym trwałości ziaren.
- Malejąca intensywność wykruszeń może być opisywana logarytmicznie normalnym rozkładem trwałości ziaren.
- Rosnąca intensywność wykruszeń może być opisywana normalnym jednostronnie obciętym rozkładem trwałości ziaren lub rozkładem Weibulla i gamma.

Na podstawie analiz i badań trwałości ściernic wyprowadzono następujące wnioski:

- W początkowym okresie pracy, po zabiegu kształtowania powierzchni czynnej, intensywność zużycia ściernicy wyraźnie zależy od topografii tej powierzchni.

- Intensywność wykruszania ziaren w pierwszym etapie procesu szlifowania maleje z upływem pracy ściernicy, szczególnie w przypadku zastosowania obciągania zgrubnego.
- Dynamika zmian intensywności zużycia wytrzymałościowego zależy od charakterystyki narzędzia ściernego, w szczególności od zastosowanego materiału ściernego i spoiwa, a także ich udziału w objętości ściernicy.
- W procesie szlifowania z zastosowaniem ściernic o niskiej twardości przeważa proces wykruszeń całych ziaren ściernych, natomiast w przypadku większej twardości narzędzia większe znaczenie uzyskują procesy mikrowykruszania fragmentów ziaren lub narastające zużywanie ścierne wierzchołków ziaren.
- W warunkach pracy z intensywnym samoostrzeniem prawdopodobieństwo wykruszenia ziarna nie zależy od czasu jego pracy.
- W warunkach pracy ściernicy z ograniczonym samoostrzeniem średni czas oczekiwania na wykruszenie zależy od sumarycznego czasu pracy ziarna ściernego.
- Rozkład czasu pracy ziaren aktywnych jest zmienny z upływem czasu szlifowania.
- Monitorowane cechy procesu, wykorzystywane, jako miary stanu ściernicy, zawierają składową losową (rys. 32).



Rys. 32. Probabilistyczne aspekty określania trwałości ściernic – schemat do wyznaczania trwałości ściernicy w warunkach ograniczeń nałożonych na zmiany monitorowanych cech procesu [Kas2005]

W określaniu trwałości ściernic należy uwzględnić, iż miary wykorzystywane w ocenie stanu narzędzi są cechami w określonym stopniu losowymi [Kas2005].

10. MODELOWANIE I SYMULACJA PROCESÓW SZLIFOWANIA

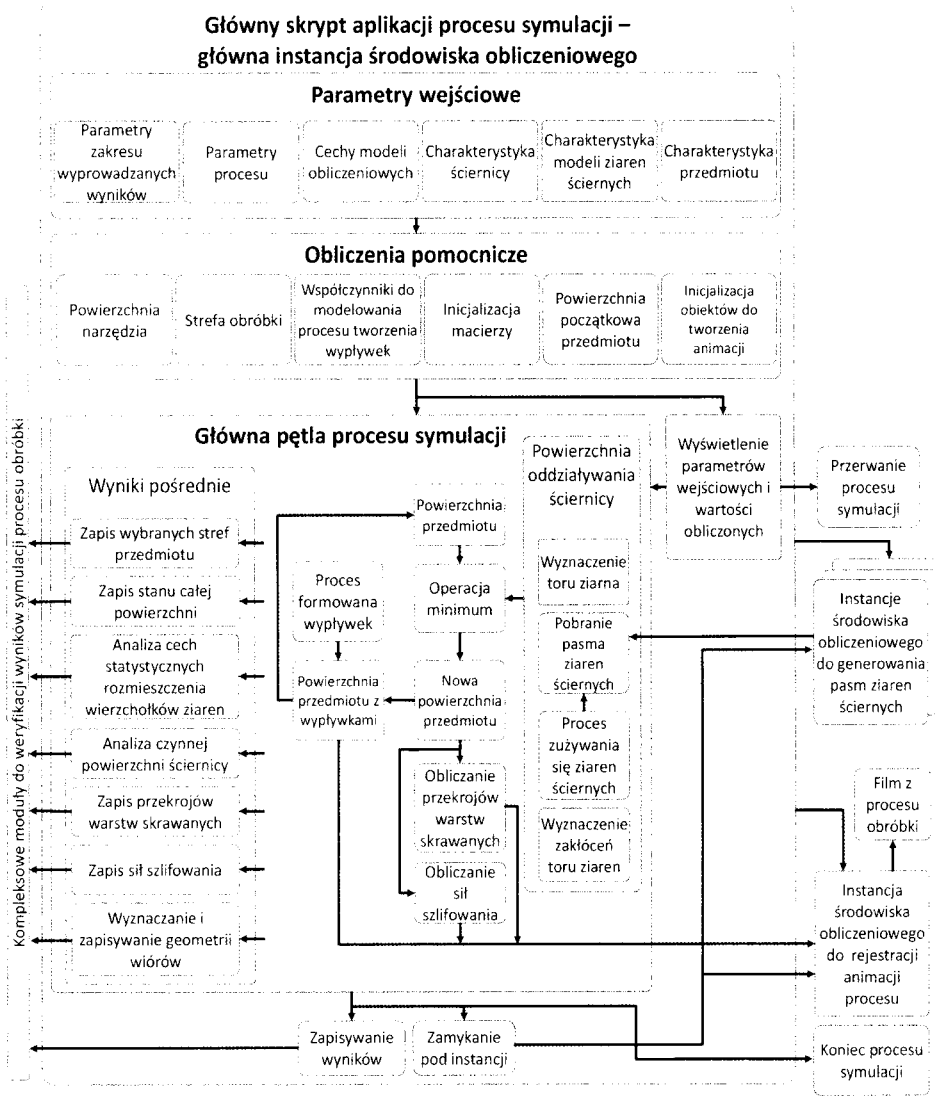
Cele modelowania i symulacji procesów szlifowania były następujące:

- Wyznaczenie lokalnych (również w mikrostrefach) i chwilowych wartości parametrów charakteryzujących kształtowanie powierzchni obrabianego przedmiotu (lokalnych – w różnych miejscach strefy szlifowania, chwilowych – w kolejnych momentach procesu, w ustalonych przedziałach czasu).
- Wyznaczenie zmian stereometrii obrabianej powierzchni i topografii powierzchni ściernicy dla zbiorów parametrów procesu i warunków wykraczających poza obecne lub standardowe zastosowania.
- Wyznaczenie lokalnych i chwilowych oraz globalnych parametrów charakteryzujących obciążenie poszczególnych ziaren, wykonaną pracę (i jej zmiany lokalne oraz zmiany w czasie), rozkład strumieni energii.
- Wyznaczenie wpływu cech narzędzi oraz parametrów i warunków obróbki (w tym również wyizolowanych zmian) na wartości lokalnych i chwilowych wartości parametrów charakteryzujących kształtowanie powierzchni obrabianego przedmiotu.
- Wyznaczenie wpływu zakłóceń na realizację i wyniki procesu szlifowania.
- Analiza procesów obróbki z zastosowaniem nowych typów narzędzi o strukturze zmiennej strefowo, z ziarnami agregatowymi i hybrydowymi, o strefowo oraz kierunkowo zmiennych właściwościach, narzędzi o zmiennej podatności, narzędzi o odmiennych cechach statystycznych dotyczących kształtu i rozmieszczenia ziaren na powierzchni narzędzia.
- Wyznaczenie licznych zbiorów powierzchni po obróbce dla analizy cech stereometrycznych, oceny przydatności nowych parametrów oceny i klasyfikacji, a także opracowania założeń do korzystnych modyfikacji narzędzi oraz doboru parametrów i warunków obróbki.

W opracowanej metodzie symulacji procesu szlifowania [Kac2011, Kac2015], powierzchnia ściernicy tworzona jest w czasie rzeczywistym, jako zbiór powierzchni ziaren ściernych i spoiwa, z uwzględnieniem procesu jej kształtowania i odnawiania oraz zużywania się ziaren (rys. 33). Opracowane modele, których podstawy opisano powyżej zostały zaimplementowane wraz z procedurami wyprowadzania wyników w środowisku Matlab.

Proces budowy modeli obejmował następujące etapy:

- Określenie wielkości wejściowych i wyjściowych (etap tworzenia modelu).
- Określenie zasad doboru parametrów i warunków realizowanych symulacji.
- Określenie skal wymiarów i czasu. Określenie zasad doboru geometrycznej precyzji prezentacji wyników.



Rys. 33. Ogólny schemat procesu modelowania i symulacji procesów szlifowania

- Określenie zasad wyboru generowanych wyników z pełnego zbioru możliwych wyników (dobór wydajności i zapotrzebowania na pamięć).
- Dobór założeń i ograniczeń oraz uproszczeń (wybór poziomu uproszczeń).
- Obliczanie cech charakteryzujących symulowany proces.
- Wybór modelu i modelowanie wielkości pomocniczych i tworzenie bazy danych.
- Kontrola statystyczna cech obiektów pomocniczych.
- Generowanie relacji między obiektami pomocniczymi, a głównymi.
- Kontrola statystyczna wyników pośrednich i wielkości kontrolnych.

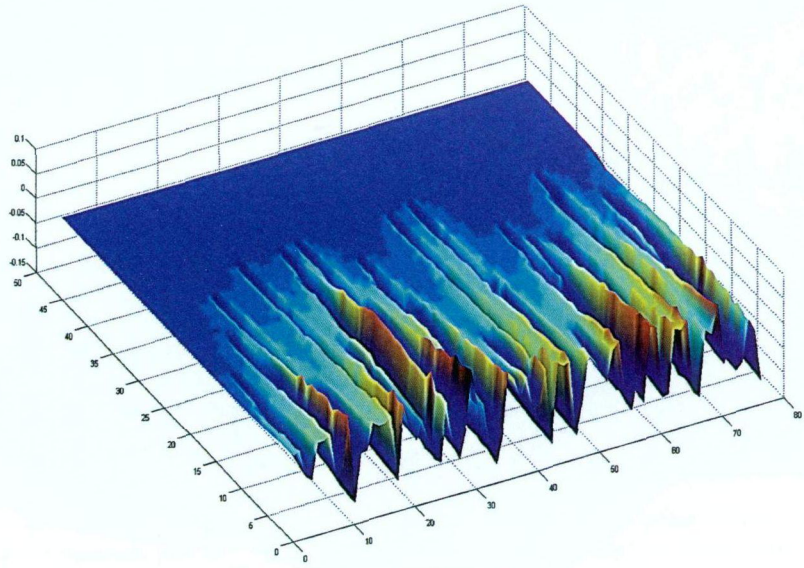
- Testowanie modeli poza typowym zakresem zastosowań.
- Ocena potrzeby ulepszenia modeli.
- Ocena potrzeby optymalizacji procedur obliczeniowych.
- Określenie programu rozwoju modeli i procedur symulacyjnych.

Opracowane modele i procedury symulacji [Kac2011, Kac2015] umożliwiają modelowanie topografii powierzchni ściernic, o różnych cechach geometrycznych, takich jak:

- Określone cechy rozmieszczenia ziaren ściernych na powierzchni narzędzia.
- Zadane rozkłady wysokości wierzchołków ziaren.
- Występowanie określonych form nieciągłości czynnej powierzchni ściernicy.
- Różne cechy ukształtowania powierzchni tworzonej przez spoiwo.

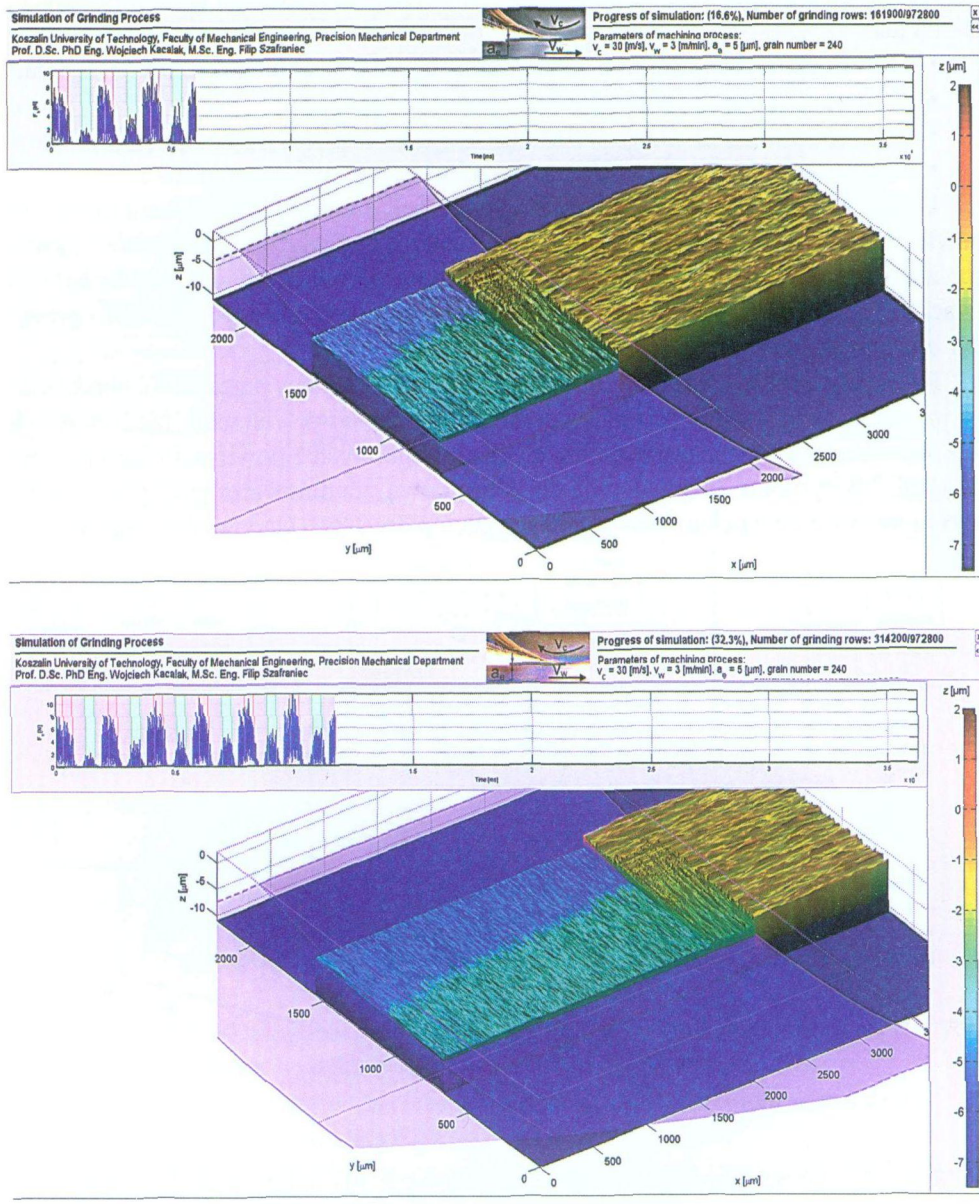
Liczny zbiór przykładowych filmów z symulacji procesu kształtowania topografii powierzchni w procesach szlifowania, dla różnych warunków i parametrów procesu, zamieszczono w Internecie (http://www.youtube.com/user/PrecisionMechanics) [Kac2015], jako materiały zachęcające do stosowania opracowanych modeli i procedur oraz przydatne w procesie dydaktycznym.

Początkową (przed obróbką) topografię kolejnych zarysów przedmiotu obrabianego uzyskuje się w wyniku pomiarów profilometrycznych powierzchni rzeczywistych lub poprzez generowanie powierzchni o cechach zgodnych z powierzchniami rzeczywistymi. Na rysunku 34 powierzchnię początkową zdefiniowano jako płaszczyznę w celu uwidocznienia charakterystycznych cech pierwszych śladów obróbkowych.

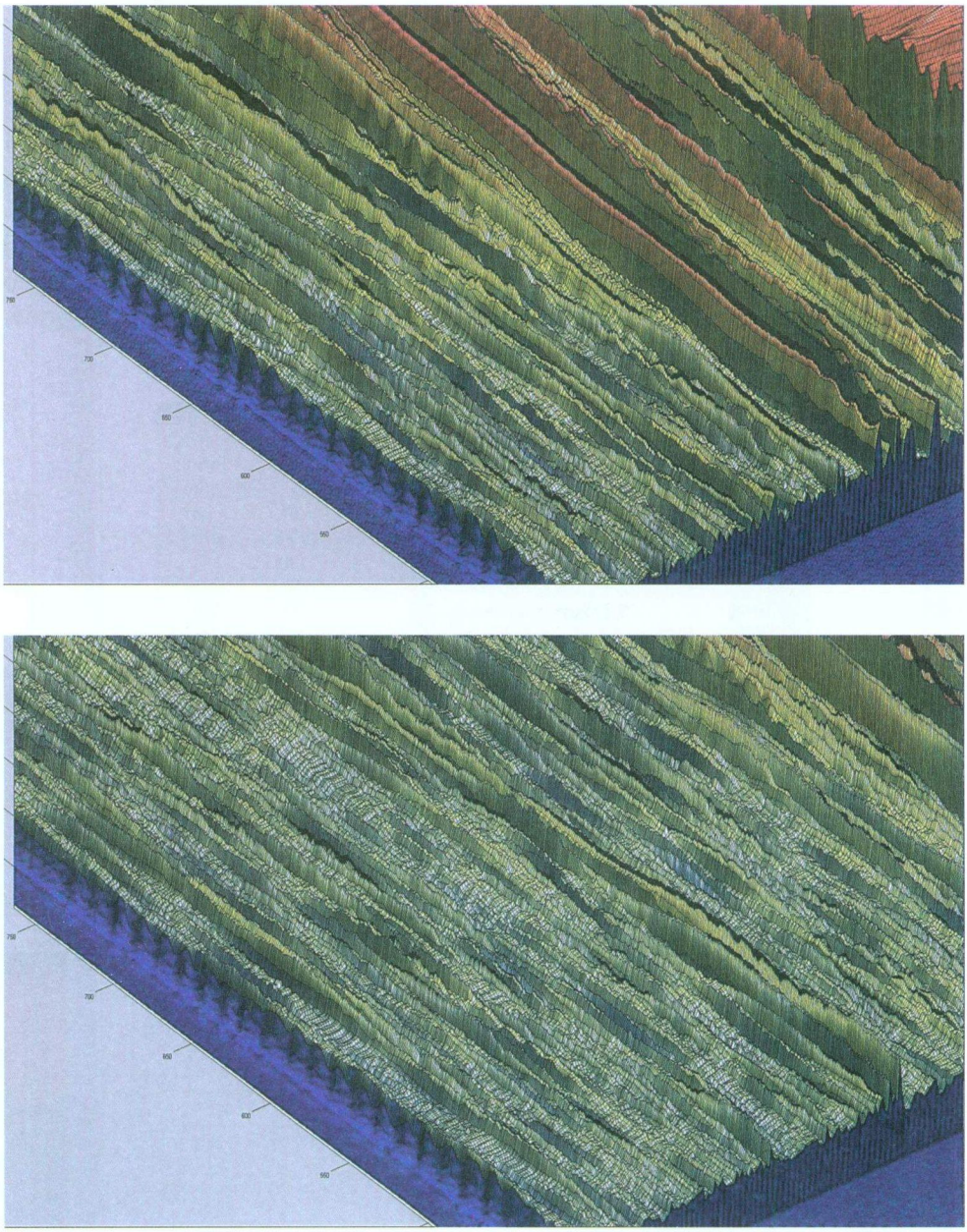


Rys. 34. Obraz pierwszych śladów obróbkowych dla szlifowania ściernicami z ziarnami o numerze ziarna 320 (wymiar średni ziaren 29 μm), dla głębokości szlifowania 0,5 μm; odległość średnia między wierzchołkami ziaren 80 μm (wszystkie wymiary w μm)

Przykładowe obrazy kształtowania topografii powierzchni w procesie szlifowania płaszczyzn z posuwem poprzecznym, dla dwóch wybranych położeń narzędzia, przedstawiono na rysunkach (35 i 36), na których zaznaczono położenie ściernicy oraz zamieszczono wykresy sił szlifowania podczas przejścia roboczego i powrotu. Rysunek 36 przedstawia obrazy powierzchni kształtowanej podczas szlifowania.



Rys. 35. Wizualizacja wybranych stanów topografii powierzchni oraz zmienności sił podczas procesu szlifowania

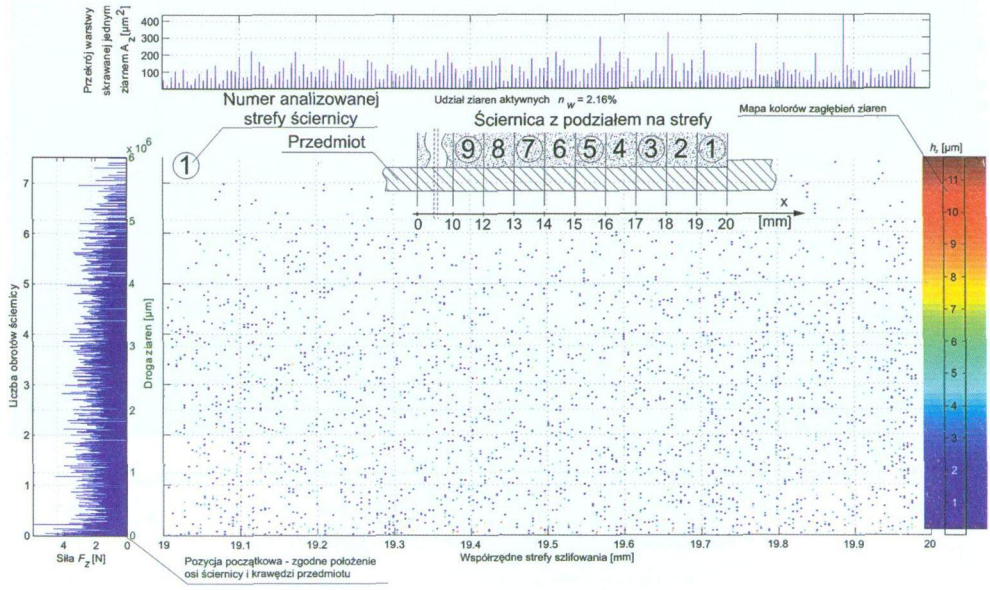


Rys. 36. Obrazy topografii obrabianej powierzchni podczas szlifowania płaszczyzn z posuwem poprzecznym 0,3 mm; po dwóch przesuwach – obraz górny, po trzech przesuwach poprzecznych – obraz dolny

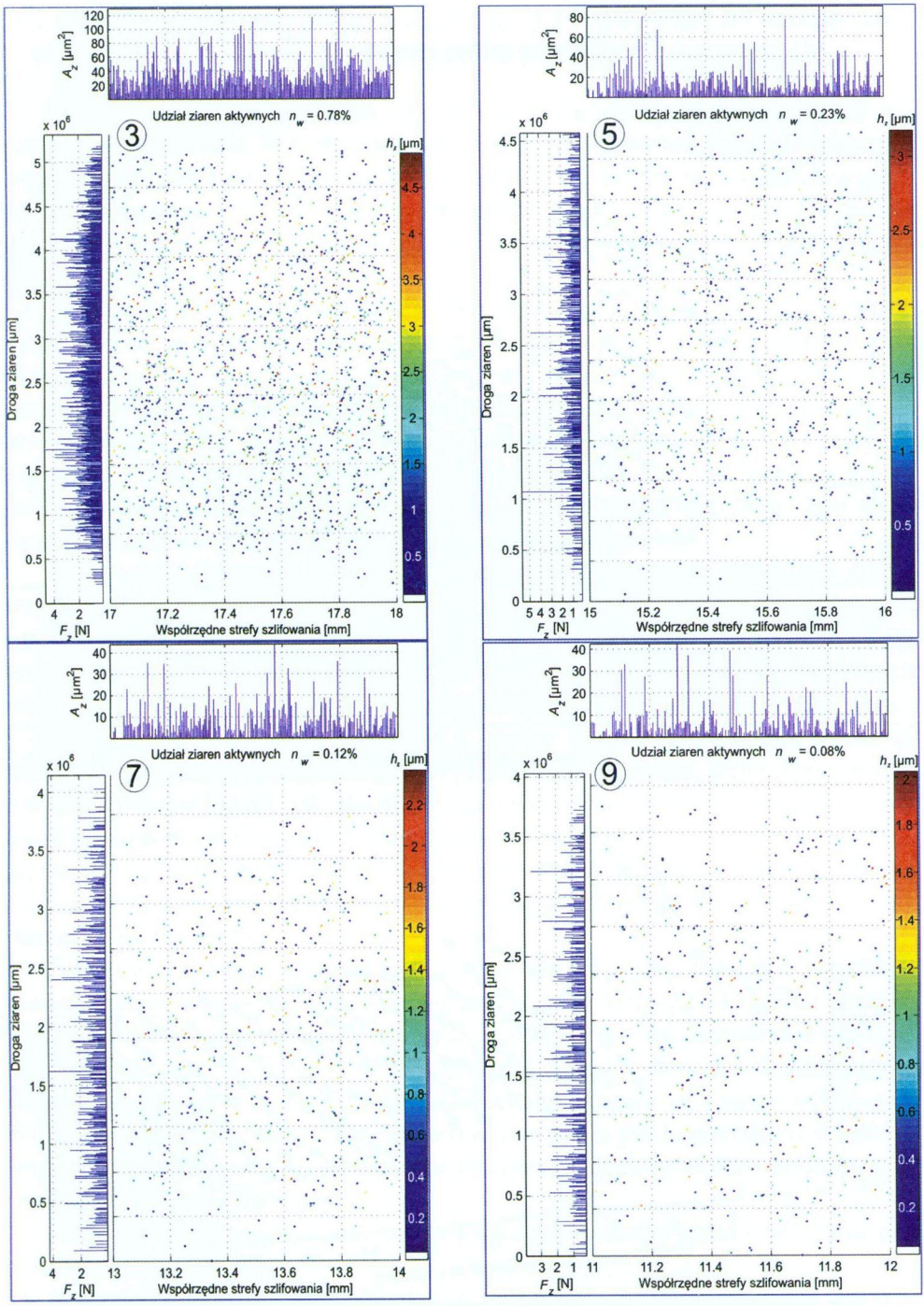
11. ANALIZA AKTYWNOŚCI I OBCIĄŻENIA ZIAREN ŚCIERNYCH

Opracowane procedury symulacji znacznie ułatwiają wyznaczenie zbiorów danych do analizy aktywności i obciążenia ziaren ściernych [Kac2013/2, Kac2014/2]. Na rysunku 37 przedstawiono położenie ziaren aktywnych na czynnej powierzchni ściernicy w strefie numer 1 o szerokości równej wartości posuwu poprzecznego. Po lewej stronie rysunku przedstawiono wartości siły dla danego ziarna. Po prawej stronie przedstawiono mapy kolorów zagłębień ziaren w mikrometrach. W górnej części rysunku zawarto dane o przekrojach warstw skrawanych ziarnami oraz wyróżniono strefy na powierzchni ściernicy. Dane te wyznaczono dla poniższych parametrów i warunków szlifowania.

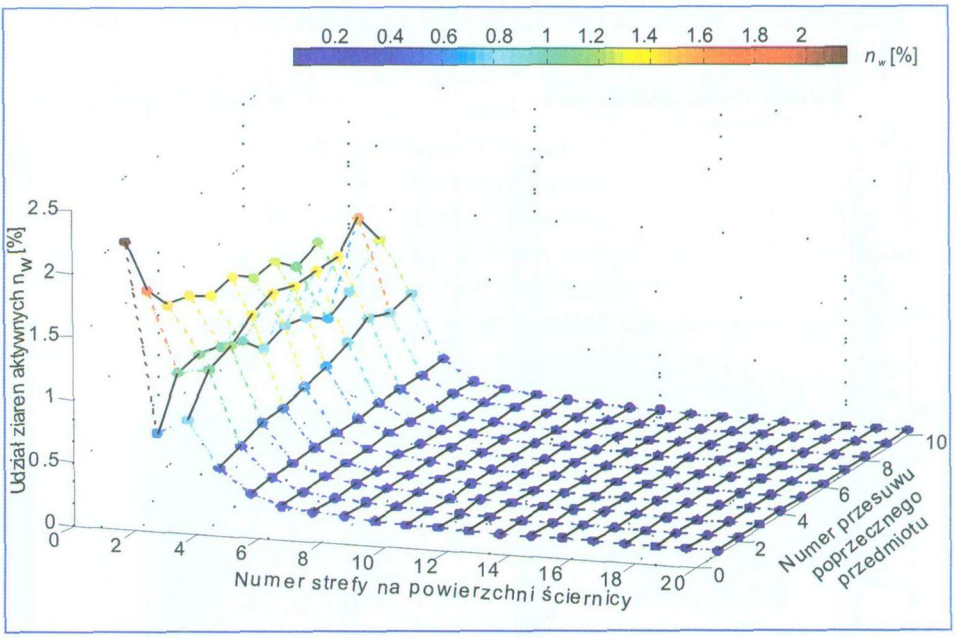
Symbol	Opis	Wartość	J. m.
v_s	Prędkość szlifowania	35	m/s
v_{ft}	Prędkość wzdłużna przedmiotu	2	m/min
a_p	Posuw poprzeczny	1	mm
a_e	Dosuw	20	µm
D	Średnica ściernicy	250	mm
-	Numer ziarna	120	-
-	Rodzaj ziarna	99A	-
-	Szerokość przedmiotu	10	mm
-	Długość przedmiotu	6,5	mm
St	Wartość parametru St powierzchni początkowej	4,01	µm
Sa	Wartość parametru Sa powierzchni początkowej	2,83	µm



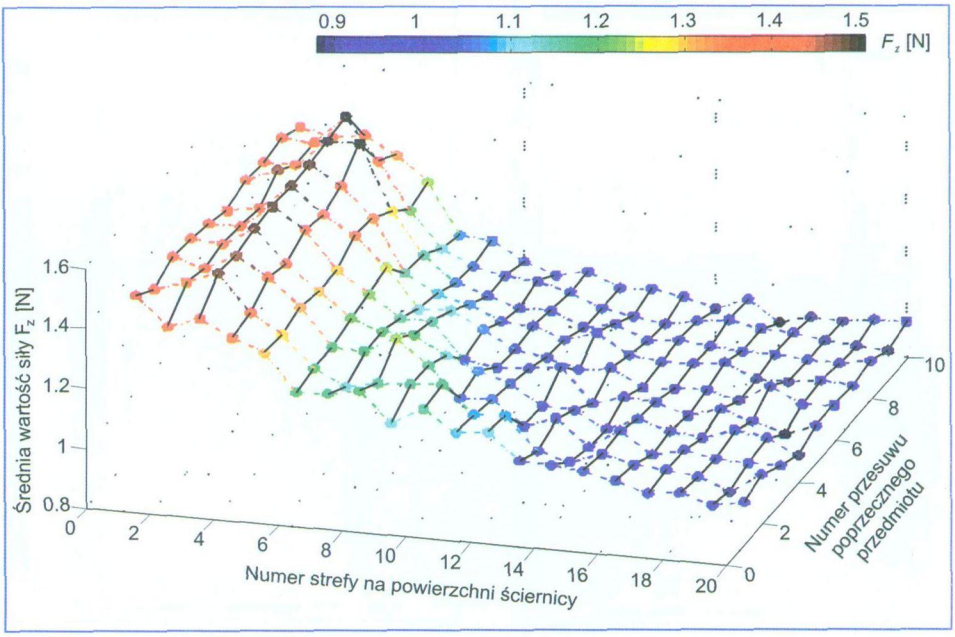
Rys. 37. Mapa aktywności ziaren w pierwszej strefie podczas szlifowania płaszczyzn z posuwem poprzecznym



Rys. 38. Mapy aktywności ziaren w strefach 3, 5, 7, 9 (wg rys. 37) – szerokość strefy jest równa wartości posuwu poprzecznego (1 mm)



Rys. 39. Stosunek liczby ziaren aktywnych do liczby ziaren na powierzchni ściernicy w zależności od numeru strefy na powierzchni narzędzia



Rys. 40. Średnia wartość siły na jedno ziarno aktywne w zależności od numeru strefy na powierzchni ściernicy

12. ZASTOSOWANIE MODELOWANIA I PROCEDUR SYMULACJI DO DOSKONALENIA PROCESÓW MIKROSZLIFOWANIA

Typowe procesy precyzyjnego szlifowania nie są odpowiednie dla operacji mikro- i nanoszlifowania. W tych procesach głębokość szlifowania (grubość usuwanej warstwy materiału) jest wielokrotnie większa od parametru St, charakteryzującego wysokość nierówności powierzchni. Odchyłki kształtu i falistość, zwłaszcza dla przedmiotów o małych rozmiarach, są również znacznie mniejsze od stosowanych głębokości szlifowania.

Stosowanie głębokości szlifowania, znacznie większych od grubości warstwy, koniecznej do usunięcia w wyniku ukształtowania powierzchni w operacjach obróbki poprzedzającej, było i jest nadal skutkiem: stosowania układów technologicznych przeznaczonych do realizacji operacji szlifowania przedmiotów z różnych materiałów, o różnej masie i wielkości, po operacjach obróbki poprzedzającej o różnej dokładności, z zastosowaniem typowych narzędzi o znacznym rozproszeniu promieni działania wierzchołków ziaren, w warunkach stosowania ściernic z ziarnami ściernymi o rozmiarach (najczęściej) od 60–300 mikrometrów.

Siły i moc szlifowania, w wyniku stosowania nadmiernych głębokości szlifowania, są wielokrotnie wyższe od tych, jakie można byłoby uzyskać podczas usuwania warstwy materiału o minimalnej grubości. To powoduje niekorzystne skutki w postaci odkształceń układu technologicznego, a także w postaci niekorzystnych właściwości warstwy wierzchniej przedmiotu lub nawet uszkodzenia powierzchni.

Rozwiązanie problemu szlifowania z bardzo małymi grubościami usuwanej warstwy, nie jest ani proste, ani łatwe. W przeciwnym wypadku, technologie mikro- i nanoszlifowania byłyby już stosowane, jako niezbędne, w bardzo precyzyjnej obróbce mikroelementów i części z materiałów o dużej twardości, od których wymaga się najwyższej dokładności, takich jak prowadnice w przyrządach pomiarowych (np. profilometry), elementy napędów i mikroprzekładni, elementy układów optycznych, pamięci masowych itp.

Zastosowanie modelowania i symulacji do doskonalenia procesów mikroszlifowania zaowocowało opracowaniem metod (rys. 41), zapewniających wysoką efektywność usuwania warstwy materiału, o grubości jedynie nieznacznie większej niż wysokość nierówności po obróbce poprzedzającej – czyli 0,3–1 mikrometra. Dążenie do tego celu wynika z konieczności zmniejszenia sił i mocy szlifowania w obróbce przedmiotów wrażliwych na oddziaływanie pól temperatur o wysokich gradientach oraz z potrzeby ograniczenia obciążeń przedmiotu siłami obróbki w procesach mikro- i nanoszlifowania.

Naukowe i aplikacyjne znaczenie prowadzonych badań wynika z następujących przesłanek:

1. Stosowanie bardzo małej głębokości szlifowania pozwala znacznie zmniejszyć energię procesu, co sprzyja uzyskiwaniu korzystniejszych cech warstwy wierzchniej po obróbce.

2. Mała głębokość szlifowania skutkuje małą gęstością strumieni cieplnych, krótkim czasem ich oddziaływania lokalnego i małymi gradientami temperatury. Znacznie zmniejsza się głębokość wnikania ciepła do warstwy przypowierzchniowej przedmiotu.
3. Stosowanie małych głębokości szlifowania zmniejsza siły, co może być ważne dla obróbki przedmiotów o małych wymiarach i dużej podatności.
4. W obróbce z małymi głębokościami szlifowania niekorzystnie zmniejsza się udział ziaren aktywnych, które kształtują obrabianą powierzchnię – aby temu zapobiegać należy:
   - Zmniejszyć rozproszenie promieni działania wierzchołków ziaren (konieczne jest opracowanie specjalnych metod kształtowania powierzchni ściernic).
   - Stosować mikroziarna o małych wymiarach, co skutkuje koniecznością modyfikacji technologii narzędzi lub stosować specjalne mikroagregaty ziaren o podwyższonej podatności spoiwa.
   - Zmniejszyć odległość między aktywnymi ziarnami.

Dla unikatowej [Kac1996/1, Kac-P142132, Kac-P141138, Kac2000/2] metody precyzyjnego szlifowania czołem ściernicy z zastosowaniem interaktywnej komunikacji z operatorem [Kac 2004/1, Kac2004/2, Kac2005/1, Kac2005/2, Kac 2006, Maj2005/1, Maj2005/2], opracowano innowacyjne odmiany z zastosowaniem hiperboloidalnej powierzchni czynnej i wyznaczono postawy jej stosowania, a zwłaszcza wyznaczono zależności opisujące kształt powierzchni czynnej ściernicy i strefy szlifowania w funkcji parametrów określających cechy geometryczne metody.

W prezentowanej metodzie obróbki, oś ściernicy, z założenia, nie jest prostopadła do płaszczyzny zawierającej tor przedmiotu i jest odchylona od kierunku prostopadłego o kąty α i β.

Najniższa tworząca hiperboloidalnej powierzchni czynnej ściernicy jest prostą wichrowatą względem osi ściernicy i jest równoległa do płaszczyzny zawierającej tor ruchu przedmiotów.

Cechą opisywanej metody jest wielokrotne wydłużenie strefy obróbki w stosunku do szlifowania czołem ściernicy z nakrojem, a w stosunku do szlifowania obwodem ściernicy, nawet kilkudziesięciokrotnie. Dzięki temu można zapewnić małą prędkość usuwania naddatku, dużą równomierność lokalnego obciążenia przedmiotu w strefie szlifowania, krzyżowanie się śladów obróbkowych, postępujące wraz z przemieszczaniem przedmiotu w strefie obróbki i łagodne wychodzenie przedmiotu ze strefy szlifowania.

Efektem wymienionych powyżej cech metody jest możliwość, w zależności od kątów α i β, zarówno usuwania dużego naddatku w jednym zabiegu, jak również realizacja operacji mikro i nanoszlifowania i usuwania naddatku o wartości 0,5–10 μm.

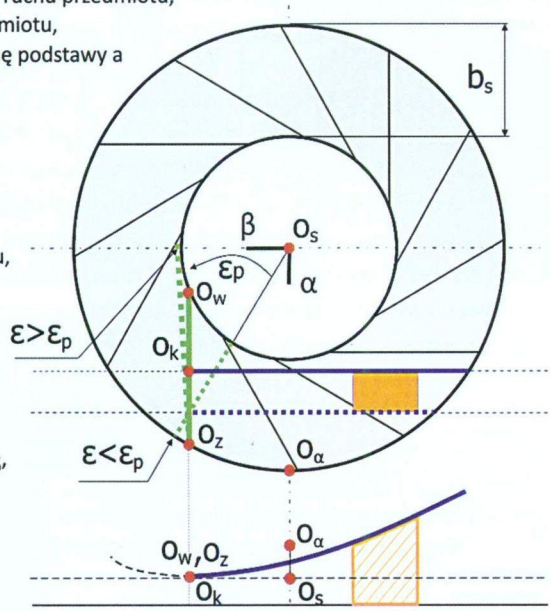
W opisywanej metodzie, w czasie przemieszczania się przedmiotu wzdłuż strefy szlifowania, nad powierzchnią przedmiotu, przesuwa się kilka do kilkunastu milionów ziaren na każdy milimetr szerokości strefy obróbki. Oznacza to, że naddatek jest usuwany w zależności od udziału ziaren aktywnych, przez ziarna w liczbie do

Hiperboloidalna powierzchnia czynna ściernicy konfiguracja kątów $\alpha < 0$, $\beta < 0$, $\varepsilon = \varepsilon_p$

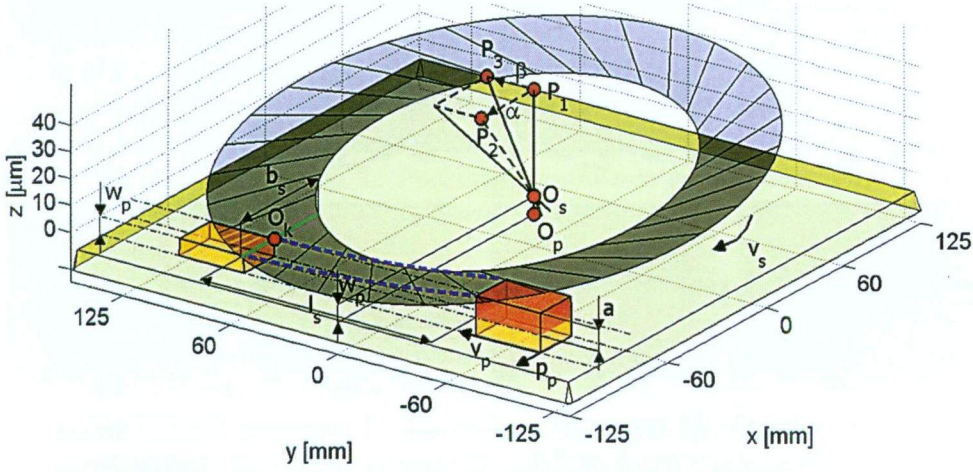
Opis oznaczeń na rysunku:

- α - kąt prostopadły w płaszczyźnie stycznej do ruchu przedmiotu,
- β - kąt w płaszczyźnie stycznej do ruchu przedmiotu,
- ε - kąt między rzutem tworzącej na płaszczyznę podstawy a kierunkiem osiowym,
- l_s - długość strefy szlifowania,
- b_s - szerokość ściernicy,
- a - naddatek,
- w_p - wysokość przedmiotu,
- v_s - prędkość obrotowa ściernicy,
- v_p - prędkość posuwu wzdłużnego przedmiotu,
- p_p - posuw poprzeczny przedmiotu,
- O_S - punkt zerowy osi,
- O_p - punkt zerowy płaszczyzny,
- O_k - punkt końca szlifowania w przekroju,
- O_w - punkt wewnętrzny najniższej tworzącej,
- O_z - punkt zewnętrzny najniższej tworzącej,
- O_α - punkt zewnętrzny w płaszczyźnie $P_1P_2O_S$,
- Pozioma tworząca równoległa do płaszczyzny ruchów,
- Przekrój powierzchni czynnej przez przedmiot,
- Przedmiot obrabiany,
- Powierzchnia czynna ściernicy.

Widok z góry na ściernicę



Trójwymiarowa ilustracja metody mikroszlifowania płaszczyzn czołem ściernicy



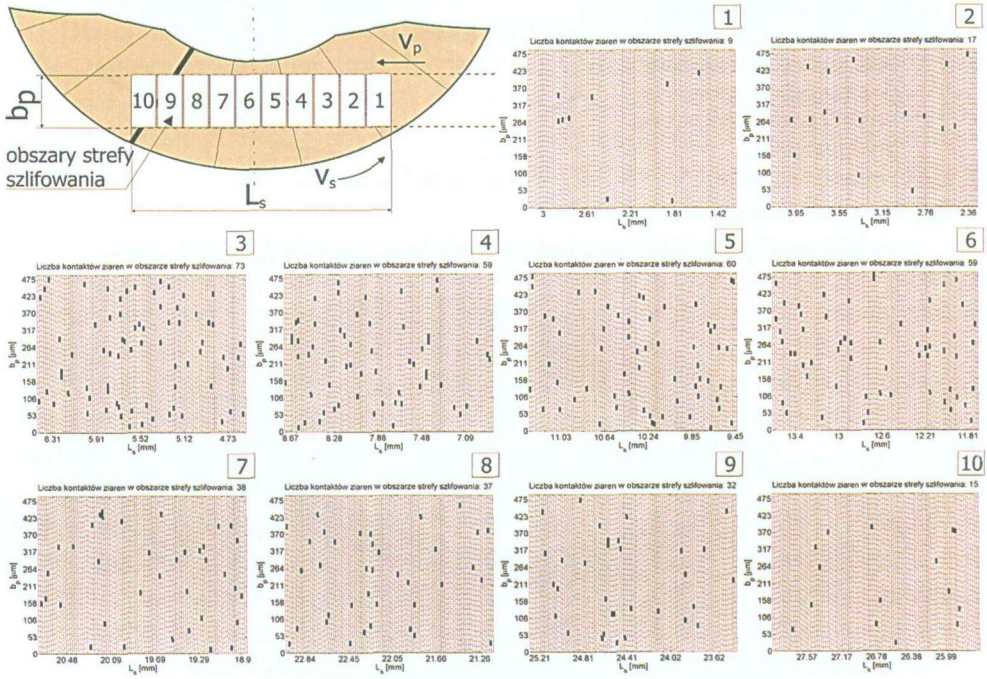
Rys. 41. Parametry geometryczne i kinematyczne do metody mikroszlifowania płaszczyzn ściernicą o hiperboloidalnej powierzchni czynnej dla $\alpha < 0$, $\beta < 0$, $\varepsilon = \varepsilon_p$

100 razy większej niż innych metodach szlifowania (dla ustalonych prędkości posuwu wzdłużnego przedmiotu i prędkości obrotowej ściernicy).

W zależności od wymagań technologicznych mogą być stosowane różne odmiany opisywanej metody, w których występuje zróżnicowanie wartości kątów pochylenia osi oraz odpowiednio zróżnicowane położenie, w którym tworząca hiperboloidalnej powierzchni czynnej jest równoległa do płaszczyzny ruchu posuwowego przedmiotu.

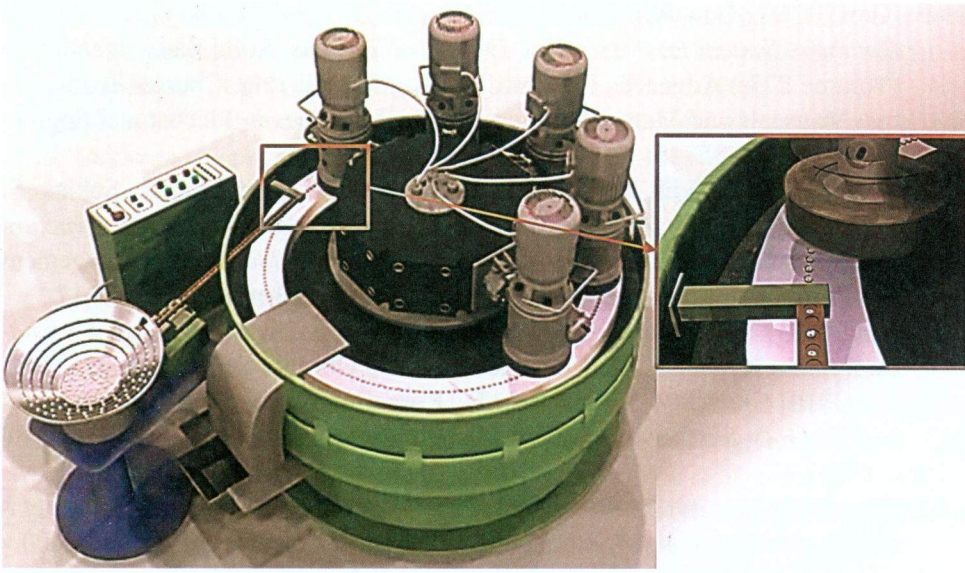
Korzystną cechą opisywanej metody jest możliwość uzyskania bardzo małych prędkości wnikania powierzchni ściernicy w obrabianą warstwę – dla analizowanych danych i średniej prędkości usuwania naddatku v_a = 0,125 μm/mm, dosuw powierzchni ściernicy do powierzchni przedmiotu na jeden obrót ściernicy wynosi tylko około 0,04 mikrometra [ ], co uzyskuje się bez konieczności stosowania specjalnych systemów przemieszczania wrzeciennika ściernicy.

Proces szlifowania rozpoczyna się narastająco, od małej aktywności ziaren do maksymalnej i kończy zmniejszającą się do zera prędkością usuwania naddatku (rys. 42).



Rys. 42. Wizualizacja aktywności ziaren ściernych w procesie mikroszlifowania płaszczyzn ściernicą o hiperboloidalnej powierzchni czynnej dla różnych położeń przedmiotu w strefie szlifowania

Opracowane i wdrożone liczne odmiany szlifierek automatycznych do szlifowania ceramicznych elementów kondensatorów (rys. 43), specjalnych piezoceramicznych zapłonników oraz ceramicznych zaworów płytkowych, są przemysłowym potwierdzeniem przydatności opracowanej i rozwijanej metody mikroszlifowania.



Rys. 43. Automatyczna szlifierka do obróbki małych elementów ceramicznych z zastosowaniem ściernic o hiperboloidalnych powierzchniach czynnych

LITERATURA

1. [Alt2004] Altintas Y., Weck M.: *Chatter stability of metal cutting and grinding*. Ann. CIRP 2, 2004, s. 619–642.
2. [Bał2007] Bałasz B., Szatkiewicz T., Królikowski T.: *Grinding Wheel Topography Modeling with Application of an Elastic Neural Network*. Lecture Notes in Computer Science Volume 4682, 2007, s. 83–90.
3. [Bor1979] Borkowski J.: *Podstawy stosowania monokrystalicznych ziaren węglika krzemu w obróbce ściernej*. Monografie Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Koszalinie, 1979.
4. [Bor1990] Borkowski J. A.: *Zużycie i trwałość ściernic*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1990, Warszawa.
5. [Bri1992] Brinksmeier E., Werner F.: *Monitoring of grinding wheel wear*. Ann. CIRP 41(2), 1992, s. 373–376.
6. [Bri1999] Brinksmeier E., Heinzel C., Wittmann M.: *Friction, cooling and lubrication in grinding*. Ann. of the CIRP 48, 1999, s. 581–598.
7. [Cha2008] Chang H. C., Wang J. J.: *A stochastic grinding force model considering random grit distribution*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 48, 2008, s. 1335–1344.
8. [Dom2006] Doman D. A., Warkentin A., Bauer R. A.: *Survey of recent grinding wheel topography models*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 46, s. 343–352, 2006.

9. [Gaw2014/1] Gawlik J., Kiełbus A., Karpisz D.: *Application of an Integrated Database System for Processing Difficult Materials*. Solid State Phenomena (Volume 223), Advances in Manufacturing Engineering, Chapter 1: Innovative Materials and Materials Processing Technologies in Mechanical Engineering, 2014, s. 35–45.
10. [Gaw2014/2] Gawlik J., Niemczewska-Wójcik M., Krajewska J., Sokhan S. V., Paščenko E. A., Žuk T. S.: *The Influence of Tool Composite's Structure During Process of Diamond Grinding of Ceramic Materials*. Management and Production Engineering Review Volume 5, Number 4, 2014, s. 9–17.
11. [Goł2010] Gołąbczak M.: *Polerowanie struktur półprzewodnikowych na bazie węglika krzemu*. XXXIII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Łódź, 2010.
12. [Grz2010] Grzesik W., Kruszyński B., Ruszaj A.: *Surface Integrity of Machined Surfaces*. Surface Integrity in Machining, Springer-Verlag London, 2010, s. 143–179.
13. [Ham2000] Hamrol A.: *Process diagnostic as a means of improving the efficiency of quality control*. Production Planning & Control, Vol. 11 nr 8/2000.
14. [Hec2003] Hecke R. L., Liang S. Y.: *Predictive modeling of surface roughness in grinding*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 43 (2003), s. 755–761.
15. [Hec2007]. Hecke R. L., et al.: *Grinding force and power modeling based on chip thickness analysis*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 33, 2007, s. 449–459.
16. [Ika1992] Ikawa N., Shimada S., Tanaka H.: *Minimum Thickness of Cut in Micromachining*. Nanotechnology 3, 1992, s. 6–9.
17. [Ina1996] Inasaki I.: *Grinding process simulation based on the wheel topography measurement*. CIRP Ann. Manuf. Technol. 45(1), 1996, s. 347–350.
18. [Kru1995] Kruszyński B.: *Model of gear grinding process*. Annals of the CIRP, 44(1995)1, s. 321–324.
19. [Kru2001/1] Kruszyński B., Wójcik R.: *Residual stress in grinding*. Journal of Materials Processing Technology, Volume 109, Issue 3, 2001, s. 254–257.
20. [Kru2001/2] Kruszyński B.: *Surface Integrity in Grinding*. The Technical University Press. A Series of Monographs, 2001, Łódź.
21. [Kru2003] Kruszyński B., Pazgier J.: *Temperatures in Grinding of Magnetic Composites – Theoretical and Experimental Approach*. Annals of the CIRP 52 (2003)1, s. 263–266.
22. [Lia2000] Liao T. W., Li K., Mcspadden S. B.: *Wearmechanisms of diamond abrasives during transition and steady stages in creep-feed grinding of structural ceramics*. Wear, 2000, 242(1/2), s. 28–37.
23. [Liu2004] Liu X., DeVor R. E., Kapoor S. G., Ehmann K. F.: *The Mechanics of Machining at the Microscale: Assessment of the Current State of the Science*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 126/4, 2004, s. 666–678.

24. [Lub2000] Lubimow W., Oczoś K. E., Łabudzki R. K.: *Klasyfikacja struktur geometrycznych powierzchni (SGP).* Obróbka ścierna, podstawy i technika. Zbiór prac XIII Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, 2000.
25. [Maj1991] Majumdar A., Bhushan B.: *Fractal model elastic–plastic contact between rough surfaces.* J. Tribol. 113, 1991, s. 1–11.
26. [Mam2002] Mamalis A. G., Kundrak J., Gyani K., Horvath M.: *On the precision grinding of advanced ceramics.* Int. J. Adv. Manuf. Technol. 20, 2002, s. 255–258.
27. [Mar2004] Marinescu I. D., Rowe W. B., Dimitrov B., Inasaki I.: *Tribology of Abrasive Machining Processes.* William Andrew Publishing, New York, 2004.
28. [Mat1997] Matsuo T., Touge M., Yamada H.: (1997) *High-precision surface grinding of ceramics with superfine grain diamond cup wheels.* Ann CIRP 46(1),1997, s. 249–252
29. [Mat2011] Mathia T. G., Pawlus P., Wieczorowski M.: R*ecent trends in surface metrology.* Wear, Volume 271, Issues 3–4, 2011, s. 494–508.
30. [McC1986] McCool J.I.: *Comparison of models for the contact of rough surfaces.* Wear 107, 1986, s. 37–60.
31. [Nad2010] Nadolny K., Plichta J., Bałasz B.: *Application of computer Modeling and simulation for designing of grinding wheelswith zone-diversified structure.* Management and Production Engineering Review, Volume 1, Number 4, 2010, s. 38–45.
32. [Nad2015] Nadolny K., Kapłonek W.: *Analysis of the effects of the single abrasive-grain microcutting scratch on INCOLOY® Alloy 800HT® by using advanced CLSM-SEM techniques.* Journal of Engineering Tribology, 2015.
33. [Niż2013] Niżankowski C.: *Influence of the abradant's composition on the selected physical properties in the process of front grinding of surfaces with microcrystalline sintered corundum grinding wheels.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, Volume 69, Issue 1–4, s. 499–507.
34. [Ocz1986] Oczoś K., Porzycki J.: *Szlifowanie. Podstawy i technika.* WNT Warszawa 1986.
35. [Paw2005] Pawlus P., *Topografia powierzchni – pomiar, analiza, oddziaływanie.* Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2005, s. 165–168.
36. [Row1993] Rowe W.,B., et al.: *The effect of deformation on the contact area in grinding.* Annals of the CIRP 42 (1), 1993, s. 409–412.
37. [Sch1988] Schajer G.S.: *Measurement of non-uniform residual-stresses using the hole-drilling method. 1. Stress calculation procedures.* (1988), ASME J. Eng. Mater. Technol. 110, s. 338–343.
38. [Shi1994] Shimada S., Ikawa N., Tanaka H., Uchikoshi J.: *Structure of Micromachined Surface Simulated by Molecular Dynamics Analysis.* CIRP Annals, 43/1, 1994, s. 51–54.

39. [Sta2004] Stachowiak G. W., Posiadlo P., *Classification of tribological surfaces*. W: Tribology International, 2004.
40. [Stę2009] Stępień P.: *Applied a probabilistic model of the grinding proces*. Mathematical Modelling, 33 2009, s. 3863–3884.
41. [Trm2001] Trmal G. J., Holesovsky F.: *Wave-shift and its effect on surface quality in super-abrasive grinding*. Int. J. Mach. Tools. Manuf. 7, (2001), s. 979–989.
42. [Wec1989] Weck M., Alldieck J.: *The originating mechanisms of wheel generative grinding vibration*. Ann. CIRP 1, 1989, s. 381–384.
43. [Wie2010] Wieczorowski M., Cellary A., Majchrowski R.: *The analysis of credibility and reproducibility of surface roughness measurement results*. Wear, Volume 269, Issues 5–6, 2010, s. 480–484.
44. [Win2012] Winiarski B., Withers P. J.: *Micron-Scale Residual Stress Measurement by Micro-Hole Drilling and Digital Image Correlation*. Experimental Mechanics, 52, 2012, s. 417–428.
45. [Zar1998] Zarudi I., Zhang L. C.: *Effect of ultraprecision grinding on the microstructural change in silicon monocrystals*. J. Mater. Process. Technol. 84, 1998, s. 149–158.
46. [Zha1993] Zhang L.,C., et al.: *Applied mechanics in grinding – III. A new formula for contact length prediction and a comparison of available models*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 33, 199, s. 587–597.
47. [Zha2002] Zhang B., Liu X., Brown C.,A., Bergstrom T.,S.: *Microgrinding of Nanostructured Material Coatings*. Annals of the CIRP, 2002, 51/1, s. 251–254.

LITERATURA (prace własne)

48. [Ber2007] Bernat A., Kacalak W.: *Problem soft 3D reconstruction methods in visual inspection of surfaces of abrasive tools*. CSM 2007, Computer Methods and Systems, Kraków 2007, s. 247–252.
49. [Kac1994] Kacalak W., Lewkowicz R.: *Präzisionsschleifen Langer Schrauben und Spindeln*. Werkstattstechnik WT Produktion und Management, Springer Verlag 11/12 1994, s. 526–529.
50. [Kac1995/1] Kacalak W., Kukiełka L., Marché P.: *Commande de processus de traitements superficiels utilisant la logique floue*. Revue d'automatique et de productique appliquées. Journal of Automation and CIM, Vol. 8, no 2–3/1995, s. 377–382.
51. [Kac1995/2] Kacalak W., Wawryn K.: *A fuzzy compensation of disturbances in automated manufacturing*. Intelligent Engineering Systems Through Artificial Neural Networks. Vol. 5. Fuzzy Logic And Evolutionary Programming. ASME Press, 1995, s. 291–296.

52. [Kac1996/1] Kacalak W., Lewkowicz R., Dziura Z.: *Methoden und Probleme bei der Präzisionsbearbeitung kleiner Keramikformstücke.* VDI Berichte 1276, Bearbeitung neuer Werkstoffe – 2nd International Conference On Machining Of Advanced Materials. VDI Verlag, Düsseldorf, 1996, s. 53–74.
53. [Kac1996/2] Kacalak W., Lewkowicz R., Bałasz B., Zawadka W.: *Optimierung der Schleifprozesse schwer zerspanbarer Werkstoffe bei niedrigen Temperaturen und im Vakuum.* VDI Berichte 1276, Bearbeitung neuer Werkstoffe – 2nd International Conference On Machining Of Advanced Materials. VDI Verlag, Düsseldorf, 1996, s. 617–640.
54. [Kac1997] Kacalak W.: *Teoretyczne podstawy minimalizacji energii właściwej w procesach obróbki ściernej.* XX Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej. Poznań 1997, s. 77–81.
55. [Kac2000/1] Kacalak W., Kukiełka L., Krzyżyński T.: *Application of Fuzzy Logic Algorythms to Irregular Distirbuance Compensation in Technological Processes.* GAMM Annual Meeting, Metz 1999. Zeitschrift f. angew. Math. Mech. 80 (2000).
56. [Kac2000/2] Kacalak W., Krzyżyński T., Dziura Z., Ściegienka R., Lewkowicz R.: *On Optimization of Automated Process of Fine Grinding Small Ceramic Elements.* Annual Scientific Conference GAMM 2000, Goettingen.
57. [Kac2000/3] Kacalak W.: *Modelowanie, diagnostyka i optymalizacja procesów obróbki ściernej.* Zbiór prac, XXIII Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Rzeszów–Myczkowce, wrzesień 2000, s. 76–88.
58. [Kac2000/4] Kacalak W., Krzyżyński T., Romanowski T., Kamienik T., Lipiński D.: *On Thermal Minimization and Deviation Compensation in the Process of Super-Fine Grinding Long Helical Surfaces.* Annual Scientific Conference GAMM 2000, Goettingen.
59. [Kac2000/5] Kacalak W., Lewkowicz R., Krzyżyński T.: *Random Components Auto_Correlation and its Influence on Estimation of Grinding Process Models.* GAMM Annual Meeting, Metz 1999. Zeitschrift f. angew. Math. Mech. 80 (2000).
60. [Kac2000/6] Kacalak W., Lewkowicz R., Krzyżyński T.: *Specific Energy Minimization in Processes of Abrasive Machining.* GAMM Annual Meeting, Metz 1999. Zeitschrift f. angew. Math. Mech. 80 (2000).
61. [Kac2001/1] Kacalak W., Kasprzyk M., Krzyżyński T., Lewkowicz R., Ściegienka R.: *Selected Problems of Micro-Smoothing Process in Extra Low Temperatures.* Third International Conference on Metal Cutting and High Speed Machining – June, 2001 – METZ (Francja).
62. [Kac2001/2] Kacalak W., Kasprzyk M., Krzyżyński T.: *Selected Problems of Stochastic Processes Modelling of Abrasive Wear and Durability of Grinding Wheel.* Third International Conference on Metal Cutting and High Speed Machining – June, 2001 – METZ (Francja) Vol. II, s. 184–188.

63. [Kac2001/3] Kacalak W., Krzyżyński T., Lipiński D., Kamienik T.: *Intelligent Systems of Inaccuracies Minimization and Disturbance Compensation in Process of Fine Grinding*. 15th European Simulation Multiconference, June 6–9 2001, Praga.
64. [Kac2001/4] Kacalak W., Kasprzyk M., Krzyżyński T., Lewkowicz R., Ściegienka R.: *Methods and Characteristics of Micro-Cutting and Micro-Smoothing Processes in a Vacuum*. Proc. Third International Conference on "Metal Cutting and High Speed Machining" Metz, France (2001) Vol. II, pp. 189–192.
65. [Kac2002/1] Kacalak, W., Lipinski, D., Krzyżyński, T.: *On hybrid systems of monitoring of machining processes*. GAMM Annual Meeting 2002, Augsburg, 2002.
66. [Kac2002/2] Kacalak W., Kasprzyk M., Krzyżyński T., Lewkowicz, Ściegienka: *On Modelling and Experimental Verification of Micro-Smoothing Process in Extra Low Temperatures*. International Conference GAMM 2002, Augsburg, Niemcy.
67. [Kac2003/1] Kacalak W., Majewski M.: *Intelligent Two-Sided Voice Communication System Between the Machining System and the Operator*. Proceedings of the ANNIE 2003 Conference, Artificial Neural Networks in Engineering ANNIE 2003, Vol. 13: Smart Engineering Systems Design, 1–4 November 2003, St. Louis, ASME Press, New York 2003, s. 969–974.
68. [Kac2004/1] Kacalak W., Lipiński D.: *Adaptive system of quality supervising in technological processes*. Advances in Manufacturing Science and Technology, Vol. 28, No 2,2004, s. 7–16.
69. [Kac2004/2] Kacalak W., Majewski M., *Automatic recognition and safety estimation of voice commands in natural language given by the operator of the technical device using artificial neural networks*. Proceedings of the ANNIE 2004 Conference, Artificial Neural Networks in Engineering ANNIE 2004, Vol. 14: Smart Engineering Systems Design, 7–10 November 2004, St. Louis, ASME Press, New York 2004, p. 831–836.
70. [Kac2005/1] Kacalak W., Majewski M., *Intelligent Layer of Two-Way Speech Communication of the Technological Device with the Operator*. Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence ICAI 2005, Las Vegas, USA, 27–30 June 2005, CSREA, Georgia 2005.
71. [Kac2005/2] Kacalak W., Majewski M., *Selected Problems of Automatic Recognition and Evaluation of Voice Commands in Natural Language given by the Operator using Artificial Neural Networks*. 9th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics, Orlando, Florida, USA, 10–13 July 2005.
72. [Kac2006] Kacalak W., Majewski M., *A New Method for Handwriting Recognition using Artificial Neural Networks*. Proceedings of the ANNIE 2006 Conference, Artificial Neural Networks in Engineering ANNIE 2006, Vol. 16:

Smart Engineering System Design, St. Louis, 2006, ASME Press, New York 2006.
73. [Kac2007/1] Kacalak W., Tomkowska A., Tomkowski R., *Metody generowania powierzchni ziaren ściernych do zastosowań w analizie i symulacji procesów szlifowania*. Podstawy i technika obróbki ściernej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2007, s. 211–218.
74. [Kac2007/2] Kacalak W., Bernat A.: *Practical and theoretical aspects of abrasive tool surface reconstruction based on photometric stereo*. Pomiary Automatyka Kontrola vol. 53, nr 8/2007, s. 21–24.
75. [Kac2009] Kacalak W., Bałasz B., Królikowski T., Lipiński D.: *Kierunki rozwoju mikro- i nanoszlifowania*. Współczesne problemy obróbki ściernej, Monografie – Szkoła Naukowa Obróbki Ściernej, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2009, s. 13–40.
76. [Kac2010/1] Kacalak W., Szafraniec F., Kunc R., Remelska H.: *Zastosowanie teorii fraktali do tworzenia i wizualizacji powierzchni o określonej topografii*. Rozdział w monografii Podstawy i Technika Obróbki Ściernej. Łódź, 2010.
77. [Kac2010/2] Kacalak W., Królikowski T., Bałasz B.: *Analiza przemieszczeń materiału w strefie mikroskrawania*. XXXIII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Łódź, 2010.
78. [Kac2010/3] Kacalak W., i inni: *System do analizy i oceny topografii powierzchni technicznych*. Projekt R03 040 03, 2010.
79. [Kac2011/1] Kacalak W., Tandecka K.: *Metrologiczne aspekty oceny topografii diamentowych folii ściernych do precyzyjnego mikrowygładzania*. Pomiary Automatyka Kontrola, 5/2011.
80. [Kac2011/2] Kacalak W., Szafraniec F., Tomkowski R., Lipiński D., Łukianowicz Cz.: *Metodyka oceny zdolności klasyfikacyjnej parametrów charakteryzujących cechy stereometryczne nierówności powierzchni*. Pomiary Automatyka Kontrola, 5/2011.
81. [Kac2011] Kacalak W.: **Modele i procedury symulacji w środowisku MATLAB – 2009–2011** – praca niepublikowana.
82. [Kac2012/1] Kacalak W., Tandecka K.: *Budowa mikrowiórów oraz skutki mikronieciągłości ich tworzenia w procesach wygładzania powierzchni z zastosowaniem folii ściernych*. Innovative Manufacturing Technology 2, Kraków 2012, s. 181–192.
83. [Kac2012/2] Kacalak W., Szafraniec F., Tomkowski R., *Metodyka modelowania powierzchni ziaren określonych materiałów ściernych*. Innovative Manufacturing Technology 2, Kraków 2012, s. 555–562.
84. [Kac2012/3] Kacalak W., Szafraniec F., *Metodyka i algorytmy modelowania i symulacji oraz badań i analizy procesów obróbki ściernej*. Problemy i tendencje rozwoju obróbki ściernej, Prace naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej, 2012, s. 205–234.

85. [Kac2013/1] Kacalak W., Królikowski T., Rypina Ł., *Modelowanie naprężeń i przemieszczeń materiału w strefie mikroskrawania z wykorzystaniem środowiska LS-DYNA*. MECHANIK NR 8–9/2013.
86. [Kac2013/2] Kacalak W., Szafraniec F., *Modelowanie obciążeń ziaren aktywnych i sił w procesie szlifowania*. MECHANIK NR 8–9/2013.
87. [Kac2014/1] Kacalak W., Majewski M., Lipiński D.: *Minimalizacja odkształceń cieplnych i kompensacji odchyłek położenia ściernicy i przedmiotu w procesie szlifowania długich powierzchni śrubowych*. Miesięcznik Naukowo-Techniczny MECHANIK, nr 1/2014, s. 36–40.
88. [Kac2014/2] Kacalak W., Szafraniec F., Lipiński D.: *Probabilistyczna analiza aktywności ziaren na czynnej powierzchni ściernicy*. Miesięcznik Naukowo-Techniczny MECHANIK, nr 8–9/2014, s. 176–184.
89. [Kac2014/3] Kacalak W., Bałasz B., Tomkowski R., Lipiński D., Królikowski T., Szafraniec F., Tandecka K., Rypina Ł.: *Problemy naukowe i kierunki rozwoju procesów mikroobróbki ściernej*. Miesięcznik Naukowo-Techniczny MECHANIK, nr 8–9/2014, s. 157–170.
90. [Kac2014/4] Kacalak W., Szafraniec F., Tandecka K.: *Metodyka modelowania powierzchni czynnej narzędzi ściernych z uwzględnieniem korelacji przestrzennego rozmieszczenia ich wierzchołków dla określonych ściernic rzeczywistych*. Miesięcznik Naukowo-Techniczny MECHANIK, nr 8–9/2014, s. 255–262.
91. [Kac2015] Kacalak W., Szafraniec F.: **Modele i procedury symulacji w środowisku MATLAB – 2012–2015** – praca niepublikowana.
92. [Kac-P141 828] Kacalak W., Ściegienka, Pluta Z., Śmiałek W., Ziółkowski S.: *Sposób i narzędzie do gładkościowej obróbki powierzchni*. Patent nr 141 828.
93. [Kac-P141 138] Kacalak W. i inni: *Sposób i urządzenie do gładkościowej obróbki płaszczyzn przedmiotów drobnych, zwłaszcza elementów ceramicznych pokrytych cienkimi warstwami innych materiałów*. Patent nr 141 138.
94. [Kac-P142 132] Kacalak W. i inni: *Sposób szlifowania płaskiego, zwłaszcza drobnych elementów ceramicznych oraz urządzenie do szlifowania płaskiego zwłaszcza drobnych elementów ceramicznych*. Patent nr 142 132.
95. [Kas2005] Kasprzyk M.: *Probabilistyczne modele trwałości i zużycia ściernic z ziarnami z elektrokorundu szlachetnego*. Praca doktorska, Politechnika Koszalińska, 2005.
96. [Kas2007] Kasprzyk M., Kacalak W.: *Probabilistyczne modele trwałości narzędzi ściernych*. Podstawy i technika obróbki ściernej. Monografia Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2007, s. 227–234.
97. [Lip2008] Lipiński D., Kacalak W.: *Assessment of the Accuracy of the Process of Ceramics Grinding with the Use Fuzzy Interference*. Springer, Lecture Notes in Computer Science 4432, 2008, s. 596- 603.
98. [Lip2012] Lipiński D., Kacalak W., Tomkowski R.: *Application of the laser scanning microscopy to evaluation of abrasive tool wear*. Journal of Machine Engineering, Vol. 12, No. 4, 2012, s. 99–105.

99. [Lip2012] Lipiński D., Kacalak W., Tomkowski R.: *Methodology of evaluation of abrasive tools' wear with the use of laser scanning.* Proceedings of the International Conference on Surface Metrology, 2012, France, s. 72–78.
100. [Lip2013] Lipiński D., Kacalak W., Tandecka K.: *Zastosowanie systemu skanowania przestrzennego do oceny zużycia narzędzi ściernych.* Pomiary Automatyka Kontrola, vol. 59, nr 11, 2013, s. 1227–1231.
101. [Maj2005/1] Majewski M., Kacalak W.: *Intelligent human-machine speech communication system.* International Journal of Information Technology Vol. 11 No. 5, 2005, p. 220–229.
102. [Maj2005/2] Majewski M., Kacalak W.: *Selected problems of automatic evaluation of commands given by the operator using artificial neural networks.* International Journal of Information Technology Vol. 11 No. 5, 2005, p. 302–311.
103. [Ryp2015] Rypina Ł., Królikowski T.: *Modele i procedury symulacji procesów mikroskrawania w systemie ANSYS*, 2015. Praca niepublikowana.
104. [Ści1995] Ściegienka R., Lewkowicz R., Kacalak W.: *Stanowisko do badań procesu mikroskrawania w próżni i niskich temperaturach.* Politechnika Koszalińska, 1995. Praca niepublikowana.
105. [Tan2014] Tandecka K.: *Badania procesów mikrowygładzania z zastosowaniem folii ściernych o nieciągłej powierzchni oraz rolek dociskowych o strefowo zmiennej podatności.* Praca doktorska, Politechnika Koszalińska, 2014.
106. [Tom2012/1] Tomkowski R., Kacalak W., Lipiński D., *Evaluation of the surface topography after precision machining.* Journal of Machine Engineering, Vol. 12, No. 4, 2012, s. 71–80.
107. [Tom2012/2] Tomkowski R., Kacalak W., Lipiński D., *Methodology of evaluation of extra smooth surfaces with the use of new evaluation parameters.* Proceedings of the International Conference on Surface Metrology, 2012, France, s. 64–71.
108. [Tom2013] Tomkowski R., Lipiński D., Kacalak W., *Pomiary i analiza naprężeń resztkowych w stopie tytanu Ti6Al5 z zastosowaniem elektronicznej interferometrii plamkowej (ESPI).* Pomiary Automatyka Kontrola, vol. 59, nr 11 2013, s. 1223–1226.

EPILOG

Szanowny Panie Rektorze,
Szanowny Senacie, Szanowny Panie Promotorze,
Szanowni Państwo

Na zakończenie mojego wystąpienia chciałbym w obecności Państwa zadać sobie pytanie, co oznacza tak zaszczytne wyróżnienie i jakie niezwykłe wartości w sobie zawiera?

Młodzi naukowcy w pośpiechu dążą do sukcesu i nie wszyscy jeszcze wiedzą, że sukces nie jest dzieckiem szczęścia, ale sumą faktów. Później zaczynają mozolnie budować własną przestrzeń w wielowymiarowym układzie współrzędnych.

Cztery pierwsze wymiary są oczywiste – współrzędne miejsca i czas. Praca poświęcona rozwojowi cywilizacji jest oczywiście zwykłym wyrazem wdzięczności za miejsce, jakie zajmujemy, a czas jest kapitałem, z którego można korzystać.

Kolejnym wymiarem jest położenie naukowca na własnej osi planów. Ten wymiar ma charakter zmienny i jest w znacznym stopniu rozmyty. Zapewne do tego można jeszcze dołożyć kolejny wymiar, jakim jest dojrzałość.

Najpierw w młodości ważne są fakty, później dane, następnie informacja, kolejno wiedza, wreszcie i mądrość, która pozwala stwierdzić, iż mądrość to jeszcze nie wszystko, i pozwala dostrzec, że wszystko nie jest potrzebne.

W tym procesie poszukiwania miejsca we własnym układzie współrzędnych ważne jest, aby nasz układ był nierozerwalnie połączony z innymi układami. Początkowo nie ma czasu na cierpliwość w rozwiązywaniu problemów, a nawet w kontaktach z otoczeniem. Dopiero później zauważamy, że aby mieć anielski charakter i niezłomną wytrwałość, trzeba właśnie mieć diabelską cierpliwość.

Pojawia się pytanie, a gdzie tu jest talent. Moim zdaniem talent jest w znacznym stopniu taką kombinacją wiedzy, kreatywności, determinacji i umiejętności oddziaływania na otoczenie, której nie otrzymuje się z przydziału. Można go kreować i rozwijać, tak długo, jak długo zachowuje się młodość ducha, szerokie horyzonty i nie dąży się do jedynie słusznego punktu widzenia.

W potrzebnym racjonalizmie naszego działania, w poszukiwaniu harmonii teorii i jej zastosowań, ważne jest, by innowacje tworzyły nowe kierunki rozwoju i wówczas wypełniamy oczekiwania naszej cywilizacji.

Nie można jednak wszystkiego sprowadzić do tak prostych stwierdzeń, bo różnorodność jest bardzo ważną cechą każdej społeczności, co sprzyja optymalizacji drogi rozwoju.

Jestem przekonany, że zaszczytne wyróżnienia godnością doktora honoris causa tworzą przestrzeń, do której się nie biegnie, ale można do niej otrzymać zaproszenie i być zobowiązanym do wypełniania misji, z tego wynikającej. Za to zaproszenie serdecznie dziękuję i pozostaję w gotowości do wypełniania towarzyszących temu zadań.

Wojciech Kacalak

prof. dr hab. inż. Wojciech Kacalak

ŻYCIORYS DOKTORA HONORIS CAUSA

Prof. dr hab. inż. Wojciech Kacalak, lat 69 (ur. 30.11.1945 w Zduńskiej Woli), absolwent Politechniki Łódzkiej (1970). Studia ukończył z wyróżnieniem i nagrodą w konkursie na najlepszego studenta łódzkiego środowiska akademickiego (laureat „Złotej Łódki").

Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w Instytucie Budowy Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej w 1974 roku. Praca doktorska została wyróżniona.

Stopień naukowy doktora habilitowanego uzyskał w 1978 roku na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej. Osiągnięcia naukowe zawarte w rozprawie habilitacyjnej zostały wyróżnione nagrodą indywidualną Ministra Szkolnictwa Wyższego.

Tytuł naukowy profesora uzyskał w 1989 roku. W 1991 roku został mianowany na stanowisko profesora zwyczajnego.

Od 44 lat jest pracownikiem Politechniki Koszalińskiej. W latach 1978–1981 był prorektorem ds. kształcenia. Od 1982 roku przez dwie kadencje pełnił funkcję dziekana Wydziału Mechanicznego, następnie pełnił funkcję prorektora ds. nauki.

W okresie 1993–1999 pełnił funkcję rektora. W 1996 roku Uczelnia została przekształcona w Politechnikę Koszalińską. W latach 1993–1999 nastąpił bardzo istotny rozwój Uczelni. Powstały nowe kierunki studiów magisterskich, utworzono nowe wydziały, powstał Park Naukowo-Technologiczny, trzykrotnie wzrosła liczba profesorów i doktorów habilitowanych, uzyskano kolejne uprawnienia do nadawania stopni naukowych. Liczba studentów wzrosła do poziomu zapewniającego możliwości silnego oddziaływania cywilizacyjnego w regionie i kraju.

Politechnika uzyskała status i znaczenie dobrej i dużej uczelni akademickiej, uznanie wśród innych ośrodków naukowych. Bardzo korzystnie rozwinęła się naukowa i dydaktyczna współpraca międzynarodowa. Koszalin stał się miastem akademickim, a Uczelnia rozwinęła swoją funkcję i rolę centrum rozwoju i współpracy regionalnej.

W kolejnym okresie, od 1999 roku do 2005, prof. dr hab. inż. Wojciech Kacalak pełnił funkcję dziekana Wydziału Mechanicznego. Od wielu lat kieruje Katedrą Mechaniki Precyzyjnej.

W okresie pełnienia funkcji dziekana Wydział Mechaniczny uzyskał uprawnienia do nadawania stopnia naukowego doktora habilitowanego, a Wydział i Politechnika dzięki temu wiele dodatkowych uprawnień akademickich. Wydział Mechaniczny rozpoczął kształcenie na studiach doktoranckich. Politechnika nadała pierwsze tytuły i najwyższe akademickie godności doktora honoris causa.

Prof. dr hab. inż. Wojciech Kacalak jest członkiem Komitetu Budowy Maszyn Oddziału PAN w Poznaniu, członkiem Sekcji Technologii Maszyn i Sekcji Mechatroniki Komitetu Budowy Maszyn PAN, członkiem Polskiego Towarzystwa Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej, Polskiego Towarzystwa Informatycznego oraz uczestnikiem komitetów kilku innych stowarzyszeń naukowych. Przez wiele lat był przewodniczącym rady naukowej Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Obrabiarek i Urządzeń Specjalnych w Poznaniu.

Od 2007 roku jest zastępcą przewodniczącego Komitetu Budowy Maszyn Polskiej Akademii Nauk.

Od 1999 był członkiem sekcji T07D Komitetu Badań Naukowych, a od 2000 roku do roku 2002 jej przewodniczącym. Jest ekspertem Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w Warszawie, ekspertem Narodowego Centrum Nauki w Krakowie oraz Polskiej Agencji Rozwoju Przedsiębiorczości w Warszawie.

Aktywnie uczestniczył w zespołach programowych Ministerstwa Edukacji Narodowej (Zespół dydaktyczny MECHANIKA). Aktywnie pracował w Komisji ds. Standardów Kształcenia w Konferencji Rektorów Polskich Uczelni Akademickich. Jest członkiem Gesellschaft für Angewandte Mathematik und Mechanik „GAMM", członkiem kilkudziesięciu komitetów naukowych konferencji krajowych i zagranicznych.

Prof. dr hab. inż. Wojciech Kacalak był przewodniczącym i członkiem rad programowych wielu prestiżowych konferencji. Jest członkiem Rady Naukowej czasopisma „Mechanik" oraz czasopisma „Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji".

Współpracuje z ośrodkami naukowymi w Niemczech, Francji i na Węgrzech, a wraz ze swoimi współpracownikami z ośrodkami akademickimi w Hiszpanii, Francji, Stanach Zjednoczonych, Chinach i Rosji. Związki z organizacjami przemysłowymi w Niemczech rozwijane były również w ramach projektu DAAD obejmującego staże w zakładach grupy Volkswagena w Wolfsburgu, w zakładach Opel w Bochum, w zakładach firmy Mercedes-Benz w Stuttgarcie oraz BMW Group Research and Technology w Monachium.

Szczególnie owocna jest współpraca z prof. dr hab. inż. Thomasem G. Mathia, dyrektorem naukowym zespołów „Surface Topography & Abrasion" – In Laboratory of Tribology and Dynamics of Systems, rektorem Ecole Nationale d'Ingénieurs de St. Etienne, której efektem jest wiele wspólnych prac naukowych i publikacji.

Wiele publikacji powstało również we współpracy z zespołami, którymi kieruje prof. dr hab. inż. Pierre Joseph Marché z Ecole Nationale d'Ingénieurs de Bourges.

Prof. dr hab. inż. Wojciech Kacalak współpracuje również z licznymi zespołami krajowymi, a zwłaszcza z zespołami kierowanymi przez profesorów: Jana Kaczmarka z PAN, Krzysztofa Marchelka i Stefana Berczyńskiego, Mirosława Pajora, Andrzeja Błędzkiego z Zachodniopomorskiego Uniwersytetu w Szczecinie, Józefa Gawlika, Wojciecha Zębali, Adama Ruszaja, Czesława Niżankowskiego z Politechniki Krakowskiej, Adama Hamrola, Jana Żurka, Mieczysława Kawalca, Romana Stańka, Michała Wieczorowskiego z Politechniki Poznańskiej, Bogdana Kruszyńskiego, Andrzeja Gołąbczaka, Tadeusza Marciniaka, Mirosława Urbaniaka z Politechniki Łódzkiej, Edwarda Chlebusa, Henryka Żebrowskiego, Jana Kocha z Politechniki Wrocławskiej, Mieczysława Marciniaka i Lucjana Dąbrowskiego z Politechniki Warszawskiej, Kazimierza Oczosia, Tadeusza Markowskiego, Andrzeja Kawalca, Janusza Porzyckiego z Politechniki Rzeszowskiej, Stanisława Adamczaka z Politechniki Świętokrzyskiej, Włodzimierza Przybylskiego, Adama Barylskiego z Politechniki Gdańskiej, Jana Kosmola z Politechniki Śląskiej, a także z zespołami badawczymi Instytutu Zaawansowanych Technologii Wytwarzania.

Wiele efektów naukowych oraz wdrożeniowych jest efektem współpracy z organizacjami przemysłowymi między innymi: Tyrolit Schleifmittelwerke Swarovski K.G. Austria, GHW Grote & Hartmann GmbH w Wuppertalu, Niemcy, Zakład Wytwarzania Artykułów Ściernych ANDRE ABRASIVE ARTICLES Robert Andre, Saint-Gobain Abrasives i firmą NORTON, Holdingiem ZREMB Gorzów, Zakładami Ceramiki Radiowej CERAD w Warszawie, a ponadto z licznymi zakładami i centrami badawczymi przemysłu narzędziowego, produkcji obrabiarek i urządzeń technologicznych, przemysłu obronnego, samochodowego i maszyn roboczych.

Przez 15 lat prof. W. Kacalak pełnił funkcję przewodniczącego Środkowopomorskiej Rady Naczelnej Organizacji Technicznej. Był członkiem zespołu ds. strategii rozwoju Regionu. Brał udział w wielu pracach zmierzających do opracowania strategii i programów rozwoju Pomorza Środkowego. Jest autorem wielu opracowań na rzecz integracji, samodzielności i rozwoju Pomorza Środkowego. Prof. dr hab. inż. Wojciech Kacalak wielokrotnie przewodniczył komisjom konkursowym w konkursach technicznych i edukacyjnych. Wielokrotnie był wyróżniany tytułem najlepszego dydaktyka.

Prof. dr hab. inż. Wojciech Kacalak od 2003 roku jest prezesem Koszalińskiego Towarzystwa Naukowego.

W grudniu 2012 roku prof. Wojciech Kacalak na podstawie wyników wyborów został członkiem Centralnej Komisji do Spraw Stopni i Tytułów.

Dziedzina prac naukowych

Dziedziną prac naukowych prof. dr hab. inż. Wojciecha Kacalaka jest mechanika precyzyjna i technologia maszyn, specjalnością naukową jest mechatronika, diagnostyka, optymalizacja i automatyzacja procesów mikroobróbki oraz procesów bardzo dokładnej obróbki ściernej, w tym zwłaszcza materiałów trudno obrabialnych, a także budowa i eksploatacja precyzyjnych urządzeń technologicznych.

Wiele prac naukowych prof. Wojciecha Kacalaka dotyczy teoretycznych i doświadczalnych podstaw modelowania procesów obróbki, kumulacji skutków wielkiej liczby zdarzeń losowych w procesach kształtowania topografii powierzchni podczas obróbki ściernej, a także zastosowań sztucznej inteligencji w budowie i eksploatacji maszyn, a w tym przede wszystkim zastosowań sztucznych sieci neuronowych, metod i zastosowań teorii zbiorów rozmytych oraz logiki rozmytej, a także hybrydowych, inteligentnych systemów diagnostyki, kompensacji zakłóceń oraz optymalizacji procesów i systemów technicznych.

Dorobek naukowy

Dorobek naukowy prof. dr hab. inż. Wojciecha Kacalaka, w syntetycznym zestawieniu, jest następujący:

1. Wykształcenie szkoły naukowej w zakresie nowych metod precyzyjnej obróbki ściernej oraz zastosowań sztucznej inteligencji w technologii maszyn. W trzech zespołach, które zostały stworzone i ukształtowane przez prof. dr hab. inż. Wojciecha Kacalaka, pracuje ponad 30 pracowników naukowych i doktorantów, w tym 3 profesorów, 6 doktorów habilitowanych, 12 doktorów i kilkunastu doktorantów.
2. Promotor 17 doktorów (w tym 14 prac doktorskich wyróżnionych).
3. Siedmiu pracowników zespołów kierowanych przez prof. dr hab. inż. Wojciecha Kacalaka uzyskało stopnie naukowe doktora habilitowanego.
4. Autor i współautor ponad 300 publikacji naukowych, w tym 3 monografii autorskich, ponad 90 publikacji zagranicznych w czasopismach i wydawnictwach o światowym zasięgu.
5. Opiniodawca w postępowaniu o nadanie tytułów i godności doktora honoris causa wielu wybitnym uczonym polskim i zagranicznym:
   - Opinia o dorobku naukowym, efektach kształcenia kadr naukowych, reprezentacji nauki polskiej i współpracy międzynarodowej oraz o osiągnięciach dydaktycznych i organizacyjnych **prof. zw. dr. hab. inż. dr. h.c. Jana Kocha** z Politechniki Wrocławskiej w związku z postępowaniem o nadanie tytułu i godności doktora honoris causa Politechniki Szczecińskiej - 01/2002.
   - Opinia o dorobku naukowym, efektach kształcenia kadr naukowych, reprezentacji nauki polskiej i współpracy międzynarodowej oraz o osiągnięciach dydaktycznych i organizacyjnych **prof. zw. dr inż. dr h.c. Jerzego Wojcie-**

cha Doerffera z Politechniki Gdańskiej, w związku z postępowaniem o nadanie tytułu i godności doktora honoris causa Politechniki Szczecińskiej – 03/2003.

- Uzasadnienie wniosku o nadanie tytułu i godności doktora honoris causa Politechniki Koszalińskiej **prof. zw. dr hab. inż. dr h.c. Janowi Kaczmarkowi** z Polskiej Akademii Nauk – 06/2003.
- Uzasadnienie wniosku o nadanie tytułu i godności doktora honoris causa Politechniki Koszalińskiej **prof. zw. dr hab. inż. dr h.c. Henrykowi Hawrylakowi** z Politechniki Wrocławskiej – 04/2005.
- Uzasadnienie wniosku o nadanie tytułu i godności doktora honoris causa Politechniki Koszalińskiej **dla prof. dr hab. inż. Pierre Joseph Marché** z Instytutu Technologicznego w Bourges (Uniwersytet w Orleanie) i Państwowej Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Bourges – 05/2005.
- Opinia o dorobku naukowym, efektach kształcenia kadr naukowych, reprezentacji nauki polskiej i współpracy międzynarodowej oraz o osiągnięciach dydaktycznych i organizacyjnych **prof. zw. dr hab. inż. Krzysztofa Marchelka** z Politechniki Szczecińskiej w związku z postępowaniem o nadanie tytułu i godności doktora honoris causa Politechniki Poznańskiej – 06/2006.

6. Autor ponad 80 recenzji wniosków o nadanie tytułu naukowego, nadanie stopnia naukowego doktora habilitowanego i doktora, w tym recenzje w przewodach zagranicznych.
7. Ponad 280 recenzji dorobku naukowego, monografii, artykułów naukowych, w tym ponad 140 recenzji projektów badawczych (KBN) MNiSZW.
8. 75 raportów i kompleksowych opracowań naukowych.
9. Autor i współautor 81 patentów (ponad 50% opatentowanych rozwiązań zostało wykorzystanych w budowie narzędzi, przekładni, zautomatyzowanych urządzeń technologicznych i oprzyrządowania technologicznego).
10. Autor lub kierownik zespołu dziesięciu ważnych kompleksowych wdrożeń przemysłowych.
11. Współautor trzech Polskich Norm dotyczących nowych metod badań narzędzi do obróbki ściernej i narzędzi do obróbki uzębień.
12. Laureat wyróżniony Złotym Medalem Targów w Lipsku w dziedzinie zautomatyzowanych urządzeń technologicznych.

Kształcenie kadr naukowych

Prof. dr hab. inż. Wojciech Kacalak jest promotorem 17 doktorów (w tym 14 prac doktorskich zostało wyróżnionych).

WYKAZ WYPROMOWANYCH DOKTORÓW

1. **Dr inż. Piotr Stępień**, „WYBRANE ZAGADNIENIA PROCESU KSZTAŁTOWANIA TOPOGRAFII POWIERZCHNI SZLIFOWANEJ", 1984, Politechnika Wrocławska (obecnie dr hab. prof. nazw. Politechniki Koszalińskiej).
2. **Dr inż. Stanisława Plichta**, „ZMIANY TOPOGRAFII ROBOCZEJ POWIERZCHNI ŚCIERNICY PODCZAS SZLIFOWANIA I ICH WPŁYW NA WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE WARSTWY WIERZCHNIEJ PRZEDMIOTÓW", 1987, Politechnika Wrocławska.
3. **Dr inż. Zdzisław Pluta**, „WYBRANE ZAGADNIENIA PROCESU SKRAWANIA POJEDYNCZYM ZIARNEM ŚCIERNYM UTWIERDZONYM PODATNIE", 1988, Politechnika Wrocławska.
4. **Dr inż. Andrzej Czyżniewski**, „WPŁYW DOKŁADNOŚCI WYKONANIA FREZÓW ŚLIMAKOWYCH NA ZUŻYCIE I TRWAŁOŚĆ OSTRZY POKRYTYCH WARSTWĄ AZOTKU TYTANU", 1999, Politechnika Koszalińska.
5. **Dr inż. Błażej Bałasz**, „ANALIZA KSZTAŁTOWANIA TOPOGRAFII POWIERZCHNI PRZEDMIOTU I OBCIĄŻENIA ZIAREN AKTYWNYCH W PROCESIE SZLIFOWANIA", 2003, Politechnika Koszalińska (obecnie dr hab. prof. nadzw. Politechniki Koszalińskiej).
6. **Dr inż. Tomasz Królikowski**, „ANALIZA WPŁYWU MIKRO- I MAKROTOPGRAFII POWIERZCHNI CZYNNEJ ŚCIERNICY NA CECHY ENERGETYCZNE PROCESÓW SZLIFOWANIA", 2003, Politechnika Koszalińska (obecnie dr hab. prof. nadzw. Politechniki Koszalińskiej).
7. **Dr Dariusz Pielka**, „WYBRANE PROBLEMY ZASTOSOWAŃ SZTUCZNYCH SIECI NEURONOWYCH DO OPTYMALIZACJI TRAJEKTORII PRZEMIESZCZEŃ NARZĘDZI W PROCESACH TECHNOLOGICZNYCH", 2003, Politechnika Koszalińska.
8. **Dr inż. Maciej Majewski**, „INTELIGENTNY SYSTEM OBUSTRONNEJ GŁOSOWEJ KOMUNIKACJI URZĄDZEŃ TECHNOLOGICZNYCH Z OPERATOREM W ZAUTOMATYZOWANYCH PROCESACH SZLIFOWANIA MAŁYCH ELEMENTÓW CERAMICZNYCH", 2004, Politechnika Koszalińska. (obecnie dr hab. prof. nadzw. Politechniki Koszalińskiej).
9. **Dr inż. Dariusz Lipiński**, „NADZOROWANIE JAKOŚCI W PROCESACH AUTOMATYCZNEGO SZLIFOWANIA MAŁYCH ELEMENTÓW CERAMICZNYCH Z WYKORZYSTANIEM METOD SZTUCZNEJ INTELIGENCJI", 2005, Politechnika Koszalińska.
10. **Dr inż. Tomasz Szatkiewicz**, „HYBRYDOWY, ADAPTACYJNY SYSTEM OPTYMALIZACJI PRZEMIESZCZEŃ WZGLĘDNYCH NARZĘDZI

I PRZEDMIOTÓW W SYSTEMACH TECHNOLOGICZNYCH", 2005, Politechnika Koszalińska.

11. **Dr inż. Mariusz Kasprzyk**, „PROBABILISTYCZNE MODELE TRWAŁOŚCI I ZUŻYCIA ŚCIERNIC Z ZIARNAMI Z ELEKTROKORUNDU SZLACHETNEGO", 2005, Politechnika Koszalińska.
12. **Dr inż. Daniel Biedny**, „PODSTAWY REGULACJI LUZU BOCZNEGO I DOBORU PARAMETRÓW GEOMETRYCZNYCH PRZEKŁADNI ŚLIMAKOWEJ ZE ŚLIMAKIEM STREFOWO PODATNYM OSIOWO I PROMIENIOWO", 2007, Politechnika Koszalińska.
13. **Dr inż. Sławomir Makuch**, „ANALIZA PROCESÓW WYGŁADZANIA ELASTYCZNYMI NARZĘDZIAMI ŚCIERNYMI O PODATNOŚCI ZRÓŻNICOWANEJ LOKALNIE", 2008, Politechnika Koszalińska.
14. **Dr inż. Ryszard Ściegienka**, „PODSTAWY DOBORU WARUNKÓW I PARAMETRÓW PROCESU MIKROWYGŁADZANIA POWIERZCHNI Z ZASTOSOWANIEM FOLIOWYCH TAŚM ŚCIERNYCH", 2008, Politechnika Koszalińska.
15. **Dr inż. Artur Bernat**, „OCENA CECH STEREOMETRYCZNYCH POWIERZCHNI NARZĘDZI ŚCIERNYCH NA PODSTAWIE DANYCH, ZAWARTYCH W OBRAZACH TYCH POWIERZCHNI, 2010, Politechnika Koszalińska.
16. **Dr inż. Robert Tomkowski**, „ANALIZA CECH STEREOMETRYCZNYCH POWIERZCHNI PO OBRÓBCE ŚCIERNEJ Z ZASTOSOWANIEM NOWYCH PARAMETRÓW OCENY, 2013, Politechnika Koszalińska.
17. **Dr inż. Katarzyna Tandecka**, „BADANIA PROCESÓW MIKROWYGŁADZANIA Z ZASTOSOWANIEM FOLII ŚCIERNYCH O NIECIĄGŁEJ POWIERZCHNI ORAZ ROLEK DOCISKOWYCH O STREFOWO ZMIENNEJ PODATNOŚCI", 2014, Politechnika Koszalińska.

Najważniejsze osiągnięcia naukowe

Osiągnięciami naukowymi, które uzyskały potwierdzenie swojej nowości i znaczenia poprzez wyróżnienia nagrodami Ministra Edukacji Narodowej, wyróżnienia w konkursach krajowych lub międzynarodowych oraz znaczącym zasięgiem publikacji zagranicznych są między innymi:

1. Opracowanie nowych metod w pełni zautomatyzowanego, precyzyjnego szlifowania elementów z materiałów trudno obrabialnych, stosowanych w przemyśle elektronicznym i obronnym.
2. Opracowanie podstaw budowy wielu odmian zautomatyzowanych urządzeń do szlifowania elementów ceramicznych (wdrożone do produkcji masowej między innymi ceramicznych kondensatorów odpornych na zakłócenia, piezoceramicznych zapłonników do zastosowań specjalnych, płytek ceramicznych do zaworów).

3. Opracowanie podstaw optymalizacji procesów szlifowania i wygładzania z uwzględnieniem probabilistycznego charakteru procesów i stochastycznie zmiennych warunków realizacji.
4. Opracowanie niekonwencjonalnych narzędzi ściernych o budowie warstwowej i pakietowej z agregatami ściernymi oraz strefowo zróżnicowanymi właściwościami.
5. Opracowanie nowych metod kontroli kształtu stożkopochodnych powierzchni śrubowych.
6. Opracowanie teoretycznych i doświadczalnych podstaw konstrukcji i technologii precyzyjnych, bezluzowych przekładni ślimakowych (kilkanaście rozwiązań).
7. Opracowanie podstaw oceny właściwości narzędzi ściernych, z uwzględnieniem probabilistycznych cech ich budowy, zużywania się i stochastycznie zmiennych warunków ich eksploatacji.
8. Opracowanie podstaw nowych metod intensyfikacji procesów szlifowania trudno obrabialnych materiałów ceramicznych.
9. Opracowanie nowych głowic do mikrowygładzania powierzchni otworów foliowymi taśmami ściernymi.
10. Opracowanie unikatowego stanowiska badawczego do badań procesu mikroskrawania w próżni, w różnych atmosferach i w bardzo niskich temperaturach.
11. Opracowanie kompleksowej charakterystyki procesu mikroskrawania materiałów trudno obrabialnych, z określeniem wpływu ekstremalnych warunków pracy ziarna, a zwłaszcza badania procesów mikroskrawania w niskich temperaturach (do 78 K) oraz w próżni.
12. Opracowanie podstaw optymalizacji cykli zautomatyzowanej obróbki wielonarzędziowej z uwzględnieniem zróżnicowanej wydajności szlifowania i zmian stanu czynnych powierzchni wszystkich ściernic w układzie technologicznym.
13. Opracowanie zautomatyzowanego stanowiska do badań naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotów po obróbce ściernej.
14. Opracowanie nowej, efektywnej odmiany algorytmu konkurencyjnego uczenia sztucznych sieci neuronowych bez nadzorowania.
15. Opracowanie nowych inteligentnych systemów minimalizacji niedokładności i kompensacji zakłóceń w procesach precyzyjnego szlifowania.
16. Opracowanie nowych inteligentnych systemów diagnostyki w procesach precyzyjnego szlifowania.
17. Opracowanie inteligentnego systemu minimalizacji odkształceń cieplnych i kompensacji odchyłek położenia ściernicy i przedmiotu w procesie precyzyjnego szlifowania długich powierzchni śrubowych.
18. Opracowanie inteligentnego systemu minimalizacji odkształceń mechanicznych i wyrównywania obciążeń przedmiotów w układzie obróbkowym z wieloma ściernicami diamentowymi oraz kompensacji odchyłek położenia ściernicy

i przedmiotu w procesie zautomatyzowanego precyzyjnego szlifowania małych elementów ceramicznych.

19. Opracowanie podstaw tworzenia zbiorów parametrów do oceny cech stereometrycznych powierzchni technicznych o cechach komplementarności, wysokiej zdolności klasyfikacyjnej i dużej przydatności technologicznej.
20. Opracowanie pakietu do modelowania i symulacji procesów obróbki ściernej z uwzględnieniem zaawansowanych metod modelowania kształtu i położenia ziaren ściernych, probabilistycznych cech ich zużycia i wykruszeń, stereometrii śladów skrawania i wypływek oraz kinematyki, a także skutków różnorodnych zakłóceń.
21. Opracowanie podstaw budowy interaktywnych systemów wspomagania projektowania z zastosowaniem symbolicznego zapisu cech projektowanych elementów i zautomatyzowanym tworzeniem graficznej reprezentacji projektu z wykorzystaniem sztucznej inteligencji i metod twórczego rozwiązywania problemów.
22. Opracowanie wielu obrabiarek i urządzeń wdrożonych do produkcji: nowych gładzarek, szlifierek do zaworów i głowic oraz blików silników spalinowych, sprężarek, pomp do hydrauliki siłowej i hydraulicznych urządzeń ratowniczych.

Najważniejsze zastosowania wyników badań

Do najważniejszych wdrożeń przemysłowych można zaliczyć:

1. Zastosowania nowych metod precyzyjnego, zautomatyzowanego szlifowania małych elementów z materiałów trudno obrabialnych, w przemyśle elektronicznym.
2. Opracowanie i wdrożenie wielu generacji automatycznych linii do precyzyjnej obróbki ceramiki i piezoceramiki.
3. Opracowanie i wdrożenie hydraulicznej gładzarki do cylindrów z bezstopniową regulacją parametrów kinematycznych i nacisków roboczych.
4. Współautorstwo i współpraca w opracowaniu i wdrożeniu rodziny zasilaczy elektrohydraulicznych o ciśnieniu 63 MPa.
5. Współautorstwo i współpraca w opracowaniu szlifierki do głowic i bloków silników spalinowych.
6. Współautorstwo i współpraca w opracowaniu szlifierki do zaworów.
7. Współautorstwo i współpraca w opracowaniu pomp hydraulicznych o ciśnieniu do 63 MPa.
8. Współautorstwo i współpraca w opracowaniu pras i rozpieraczy hydraulicznych.
9. Współautorstwo i współpraca w opracowaniu sprężarki z wirującym tłokiem.
10. Współautorstwo w opracowaniu nowych metod i głowic do mikrowygładzania otworów z zastosowaniem foliowych taśm ściernych.
11. Opracowanie konstrukcji wielu odmian przekładni ślimakowych z regulacją luzu bocznego, do zastosowań w precyzyjnych mechanizmach i napędach.
12. Opracowanie i zastosowanie w badaniach naukowych wielu kompleksowych stanowisk badawczych.

13. Opracowanie i zastosowanie w pracach naukowych wielu programów obliczeniowych i narzędziowych napisanych w języku C/C++.
14. Opracowanie 3 Polskich Norm dotyczących narzędzi do obróbki ściernej i obróbki wiórowej kół zębatych.

Najważniejsze wyróżnienia

- Złoty Medal Targów w Lipsku w dziedzinie zautomatyzowanych urządzeń technologicznych.
- Pięć Nagród Ministra za osiągnięcia w działalności naukowej, w tym dwie nagrody stopnia II.
- Dwie Nagrody Ministra za osiągnięcia w działalności dydaktycznej.
- Pięć Nagród Ministra za osiągnięcia organizacyjne związane z rozwojem Politechniki Koszalińskiej.
- Tytuł I Wicemistrza Techniki NOT w krajowym konkursie „za wybitne osiągnięcia w dziedzinie techniki".
- Nagroda Prezydenta Miasta Koszalina za osiągnięcia w rozwoju regionu i miasta.
- Wyróżnienie „Menadżer Pomorza Środkowego„.
- Dwukrotne wyróżnienie „za wybitne osiągnięcia wynalazcze" – Złota Odznaka 'DEDAL'.
- Dziewięć nagród w regionalnych konkursach NOT w zakresie wdrożeń nowej techniki, dotyczących nowych metod precyzyjnego szlifowania elementów ceramicznych, automatycznych urządzeń technologicznych, nowych narzędzi oraz metod pomiarowych i systemów kontroli jakości.
- Wyróżnienie tytułem „Człowiek Roku" na Pomorzu Środkowym.
- Wyróżnienia w konkursach studenckich na najlepszego dydaktyka.

Publikacje i cytowania publikacji

- The American Society of Mechanical Engineers (ASME), Journal of Mechanisms and Robotics,
- Revue d'automatique et de productique appliquées. Journal of Automation and CIM, Hermes, Francja,
- Intelligent Engineering Systems Through Artificial Neural Networks. ASME Press, USA,
- VDI Berichte – Bearbeitung neuer Werkstoffe, VDI Verlag, Düsseldorf, Niemcy,
- Werkstatt und Betrieb – Zeitschrift für Maschinenbau, Konstruktion und Fertigung, Carl Hanser Verlag, Niemcy,
- Industrie Diamanten Rundschau – IDR Düsseldorf, Niemcy,
- Zeitschrift für Industrielle Fertigung – Spanende Fertigung, Springer-Verlag, Berlin, Heidelgerg, Nowy Jork, Tokio,

- WT Produktion und Management, Springer-Verlag, Berlin, Heidelgerg, Nowy Jork, Londyn, Paryż, Tokio,
- Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik. Gesellschaft für Angewandte Mathematik und Mechanik,
- Springer Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York,
- Advances in Soft Computing, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York,
- Elsevier Knowledge Based Systems,
- Springer Lectures Notes in Artificial Intelligence, Series on Intelligent Engineering Systems & ANN,
- Engineering Mechanics International Journal for Theoretical and Applied Mechanics,
- Innowacyjne rozwiązania projektowe oraz patenty są często cytowane w opisach patentowych urzędów patentowych w Stanach Zjednoczonych i Niemczech.

Ważniejsze publikacje

1. Kacalak W., Lewkowicz R.: Präzisionsschleifen Langer Schrauben und Spindeln. **Werkstattstechnik WT Produktion und Management, Springer Verlag** 11/12 1994, s. 526–529.
2. Kacalak W., Wawryn K.: Some aspects of the modified competitive self learning neural network algorithm. Materiały międzynarodowej konferencji „Artificial Intelligence Networks in Engineering ANNIE'94", St Louis, USA, listopad, 1994, wydanie książkowe **ASME, tom IV „Intelligent Engineering Systems Through Artificial Neural Networks"**, s. 103–109.
3. Kacalak W.: Wybrane problemy konstrukcji i technologii precyzyjnych przekładni ślimakowych. Monografia Wydziału Mechanicznego. Politechnika Koszalińska, nr 51, 1995.
4. Kacalak W., Kukiełka L., Marché P.: Commande de processus de traitements superficiels utilisant la logique floue. **Revue d'automatique et de productique appliquées. Journal of Automation and CIM**, Vol. 8, no 2–3/1995, s. 377–382.
5. Kacalak W., Wawryn K.: Artificial neural network opimisation of mobile manipulator trajectories. **Revue d'automatique et de productique appliquées. Journal of Automation and CIM**, Vol. 8, no 2–3/1995, s. 259–264.
6. Kacalak W., Wawryn K.: A fuzzy compensation of disturbances in automated manufacturing. Intelligent Engineering Systems Through Artificial Neural Networks. Vol. 5. **Fuzzy Logic And Evolutionary Programming. ASME Press**, 1995, s. 291–296.
7. Kacalak W., Lewkowicz R., Dziura Z.: Methoden und Probleme bei der Präzisionsbearbeitung kleiner Keramikformstücke. **VDI Berichte 1276, Bearbeitung neuer Werkstoffe – 2nd International Conference On Machining Of Advanced Materials. VDI Verlag**, Düsseldorf, 1996, s. 53–74.

8. Kacalak W., Lewkowicz R., Balasz B., Zawadka W.: Optimierung der Schleifprozesse schwer zerspanbarer Werkstoffe bei niedrigen Temperaturen und im Vakuum. **VDI Berichte 1276, Bearbeitung neuer Werkstoffe – 2nd International Conference On Machining Of Advanced Materials. VDI Verlag**, Düsseldorf, 1996, s. 617–640.
9. Kacalak W.: Selected aspects of fuzzy logic algorithms and system design. Materiały XX konferencji CIRCUT THEORY and ELECTRONIC NETWORKS. Koszalin 1997, Vol. 1, s. 1–12.
10. Kacalak W.: Teoretyczne podstawy minimalizacji energii właściwej w procesach obróbki ściernej. XX Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej. Poznań 1997, s. 77–81.
11. Kacalak W.: Methodes et applications de l'intelligence artificielle pour le diagnostic, l'optimisation et la commande du processus d'abrasion. Materiały Międzynarodowego Sympozjum Naukowego, Koszalin 1998.
12. Kacalak W., Kukiełka L., Krzyżyński T.: Application of Fuzzy Logic Algorythms to Irregular Distirbuance Compensation in Technological Processes. GAMM Annual Meeting, Metz 1999. **Zeitschrift f. angew. Math. Mech.** 80 (2000).
13. Kacalak W., Krzyżyński T., Dziura Z., Ściegienka R., Lewkowicz R.: On Optimization of Automated Process of Fine Grinding Small Ceramic Elements. **Annual Scientific Conference GAMM 2000**, Goettingen.
14. Kacalak W.: Modelowanie, diagnostyka i optymalizacja procesów obróbki ściernej. Zbiór prac, XXIII Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Rzeszów–Myczkowce, wrzesień 2000, s. 76–88.
15. Kacalak W., Krzyżyński T., Romanowski T., Kamienik T., Lipiński D.: On Thermal Minimization and Deviation Compensation in the Process of Super-Fine Grinding Long Helical Surfaces. **Annual Scientific Conference GAMM 2000**, Goettingen.
16. Kacalak W., Krzyżyński T., Zachara A., Lipiński D.: On Hybrid Compensation System of Irregular Disturbances in a Process of Fine Machining. **Annual Scientific Conference GAMM 2000**, Goettingen.
17. Kacalak W., Lewkowicz R., Krzyżyński T.: Random Components Auto-Correlation and its Influence on Estimation of Grinding Process Models. GAMM Annual Meeting, Metz 1999. **Zeitschrift f. angew. Math. Mech.** 80 (2000).
18. Kacalak W., Lewkowicz R., Krzyżyński T.: Specific Energy Minimization in Processes of Abrasive Machining. **GAMM Annual Meeting, Metz 1999. Zeitschrift f. angew. Math. Mech.** 80 (2000).
19. Kacalak W., Kasprzyk M.: Wybrane problemy modelowania stochastycznych procesów zużycia i trwałości ściernic. Zbiór prac, XXIII Naukowa Szkoły Obróbki Ściernej, Rzeszów–Myczkowce, wrzesień 2000.
20. Kacalak W., Kasprzyk M., Krzyżyński T., Lewkowicz R., Ściegienka R.: Selected Problems of Micro-Smoothing Process in Extra Low Temperatures.

Third International Conference on Metal Cutting and High Speed Machining – June, 2001 – METZ (Francja).
21. Kacalak W., Kasprzyk M., Krzyżyński T.: Selected Problems of Stochastic Processes Modelling of Abrasive Wear and Durability of Grinding Wheel. **Third International Conference on Metal Cutting and High Speed Machining** – June, 2001 – METZ (Francja).
22. Kacalak W., Krzyżyński T., Lipiński D., Kamienik T.: Intelligent Systems of Inaccuracies Minimization and Disturbance Compensation in Process of Fine Grinding, **15th European Simulation Multiconference**, June 6–9 2001, Praga.
23. Królikowski T., Bałasz B., Kacalak W.: The Influence of Micro and Macro Topography of the Active Grinding Surface on the Energy Consumption in the Grinding Process. **Third International Conference on Metal Cutting and High Speed Machining** – June, 2001 – METZ (Francja).
24. Bałasz B., Królikowski T., Kacalak W.: Method of Complex Simulation of Grinding Process. **Third International Conference on Metal Cutting and High Speed Machining** – June, 2001 – METZ (Francja).
25. Kacalak, W., Lipinski, D., Krzyżyński, T.: On hybrid systems of monitoring of machining processes, **GAMM Annual Meeting 2002**, Augsburg, marzec 2002.
26. Lipiński D., Kacalak W., Krzyżyński T.: On the Hybryd System of Complex Diagnosis of Machining Processes. **Intelligent Engineering Systems Through Artifical Neural Networks, Volume 12, New York 2002**, pp. 951–957.
27. Kacalak W., Majewski M.: Intelligent Two-Sided Voice Communication System Between the Machining System and the Operator, Proceedings of the ANNIE 2003 Conference, **Artificial Neural Networks in Engineering ANNIE 2003, Vol. 13: Smart Engineering Systems Design, 1–4 November 2003, St. Louis, ASME Press**, New York 2003, s. 969–974.
28. Kacalak W., Szatkiewicz T.: New algorithms for trajectory optimisation of displacement of tools and objects in production systems. II Międzynarodowa Konferencja CAMT „Modern Trends in Manufacturing", Wrocław 2003, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, pp. 182–190.
29. Kacalak W., Dariusz Lipiński, Krzyżyński T.: On the hybrid system of quality supervising in the automated grinding process. II Międzynarodowa Konferencja CAMT „Modern Trends in Manufacturing", Wrocław 2003, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, pp. 167–174.
30. Kacalak W., Piotr Domagała: Using Cult 3d technology and VRML modelling for visualization and simulation of technical devices with autonomous robot as an example. II Międzynarodowa Konferencja CAMT „Modern Trends in Manufacturing", Wrocław 2003, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
31. Kacalak W., Biedny D.: Selected problems of side play adjustment in worm gear with zonary flexible worm, **Advances in Manufacturing Science and Technology, vol. 28**, 3/2004.

32. Kacalak Wojciech, Lipiński Dariusz: Adaptive system of quality supervising in technological processes, **Advances in Manufacturing Science and Technology, Vol. 28**, No 2, 2004, s. 7–16.
33. Kacalak W., Makuch S., Bałasz B., Cincio R.: The Simulation of Polishing Processes as Basis for Designing New Grinding Tools, **Industrial Simulation Conference 2004**, Malaga, Hiszpania, s. 61–65.
34. Szatkiewicz T.,Królikowski T., Bałasz B., Kacalak W.: New Algorithms for Trajectory Optimisation of Displacement of Tools And Objects In The Production Systems, **Industrial Simulation Conference 2004**, Malaga, Hiszpania, s. 349–352.
35. Kacalak W., Majewski M., Automatic recognition and safety estimation of voice commands in natural language given by the operator of the technical device using artificial neural networks, Proceedings of the ANNIE 2004 Conference, **Artificial Neural Networks in Engineering ANNIE 2004, Vol. 14: Smart Engineering Systems Design, 7–10 November 2004, St. Louis, ASME Press**, New York 2004, p. 831–836.
36. Bernat A., Kacalak W.: The Problems of Determining of the Parameters of Stereometric Structure of Abrasive Tool Surface with Use of 2D Optical Images. International Conference on Mechatronics, Robotics and Biomechanics MRB 2005, Trest, Czech Republic, 26–29 September 2005, **Engineering Mechanics International Journal for theoretical and applied mechanics, Vol. 12**, 2005, No. 3, pp. 165–172.
37. Bernat A., Kacalak W: Problems of determination of stereometry of abrasive tools cutting surface, based on analysis of 2D optical images with use of PS method. International Conference Computer Methods and Systems, CMS'05, AGH Kraków 14–16 listopada 2005, Kraków 2005, Vol. II, pp. 271–274.
38. Makuch S., Kacalak W., Cincio R.: Estimation of possibility obtained the specified geometry of surface structure in polishing process of the flexible grinding tools. International Conference on Mechatronics, Robotics and Biomechanics MRB 2005, Trest, Czech Republic, 26–29 September 2005, **Engineering Mechanics International Journal for theoretical and applied mechanics, Vol. 12, 2005**, No. 3, p. 127–134.
39. Kacalak W., Majewski M., Automatic recognition and verification of voice commands in natural language given by the operator of the technological device using artificial neural networks, 4th International Conference on Computer Recognition Systems CORES 2005, Rydzyna 22–25 maj 2005, **Series on Advances in Soft Computing, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York** 2005, s. 689–696.
40. Kacalak W., Majewski M., Intelligent Layer of Two-Way Speech Communication of the Technological Device with the Operator, **Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence ICAI 2005, Las Vegas, USA**, 27–30 June 2005, CSREA, Georgia 2005.

41. Kacalak W., Majewski M., Selected Problems of Automatic Recognition and Evaluation of Voice Commands in Natural Language given by the Operator using Artificial Neural Networks, **9th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics, Orlando, Florida, USA**, 10–13 July 2005.
42. Majewski M., Kacalak W., Intelligent human-machine speech communication system, **International Conference on Intelligent Computing ICIC2005,** Hefei Anhui, China 23–26 August 2005, China, p. 3441–3450.
43. Majewski M., Kacalak W., Selected problems of automatic evaluation of commands given by the operator using artificial neural networks, **International Conference on Intelligent Computing ICIC2005**, Hefei Anhui, China 23–26 August 2005, China, p. 3605–3614.
44. Majewski M., Kacalak W., Intelligent Layer of Two-Way Voice Communication of the Technological Device with the Operator, Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems, **9th International Conference, KES 2005, Melbourne, Australia**, 14–16 September 2005, **Lectures Notes in Artificial Intelligence, Subseries of Lecture Notes in Computer Science 3683, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2005**, p. 930–936.
45. Majewski, M., Kacalak, W., Selected problems of automatic evaluation of commands given by the operator using artificial neural networks, International Conference on Mechatronics, Robotics and Biomechanics MRB 2005, Trest, the Czech Republic, 26–29 September 2005, **Engineering Mechanics International Journal for theoretical and applied mechanics, Vol. 12, 2005**, No. 3, p. 185–192.
46. Majewski M., Kacalak W., Intelligent human-machine speech communication system, **International Journal of Information Technology Vol. 11, No. 5**, 2005, p. 220–229.
47. Majewski M., Kacalak W., Selected problems of automatic evaluation of commands given by the operator using artificial neural networks, **International Journal of Information Technology, Vol. 11, No. 5**, 2005, p. 302–311.
48. Majewski M., Kacalak W., Intelligent Two-Way Speech Communication System between the Technological Device and the Operator, Proceedings of the ANNIE 2005 Conference, **Artificial Neural Networks in Engineering ANNIE 2005, Vol. 15: Smart Engineering System Design, St. Louis 6–9 November 2005, ASME Press**, New York 2005.
49. Kacalak W., Douglas Stuart K., Majewski M., Intelligent Natural Language Processing, Second International Conference on Natural Computation ICNC2006, Xi'an, China, 24-28 September 2006, **Lectures Notes in Artificial Intelligence, Subseries of Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York** 2006.
50. Kacalak W., Majewski M., Intelligent System for Automatic Recognition and Evaluation of Speech Commands, 13th International Conference on Neural

Information Processing ICONIP2006, Hong Kong, China, 3–6 October 2006, **Lectures Notes in Artificial Intelligence, Subseries of Lecture Notes in Computer Science 4232, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York** 2006, p. 298–305.
51. Kacalak W., Majewski M., A New Method for Handwriting Recognition using Artificial Neural Networks, **Proceedings of the ANNIE 2006 Conference, Artificial Neural Networks in Engineering ANNIE 2006, Vol. 16: Smart Engineering System Design, St. Louis 5–8 November 2006, ASME Press**, New York 2006.
52. Kacalak W., Majewski M., A New Written Language Recognition Metod using Artificial Neural Networks, **5th International Symposium on Robotics and Automation ISRA2006, San Miguel Regla, Hidalgo, Mexico**, 25–28 August 2006, ISBN 970-769-070-4, Mexico 2006, p. 415–419.
53. Lipiński D., Kacalak W.: Assessment of the Accuracy of the Process of Ceramics Grinding with the Use Fuzzy Interference, Adaptive and Natural Computing Algorithms, **8th International Conference, ICANNAGA 2007**, Part II, LNCS 4432, s. 596–603.
54. Kacalak W., Tomkowska A., Tomkowski R., Metody generowania powierzchni ziaren ściernych do zastosowań w analizie i symulacji procesów szlifowania, Podstawy i technika obróbki ściernej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2007, s. 211–218.
55. Makuch S., Kacalak W.: Estimation of a geometrical structure surface in the polishing process of flexible grinding tools with zone differentiation flexibility of a grinding tool, **VII International Conference Mechatronics 2007, Recent Advances in Mechatronics**, s. 375–380.
56. Bernat A., Kacalak W.: Problems in Derivation of Abrasive Tools Cutting Properties with Use of Computer Vision, **Recent Advances in Mechatronics, Warszawa** 2007, s. 431–437.
57. Kacalak W., Makuch S.: Estimation of a geometrical surface structure using a new method of polishing of flexible grinding tool, zone differentiation of the macrogeometry of the active surface of the grinding tool, **VII International Congress on Precision Machining**, Sandomierz-Kielce 2007, s. 153–158.
58. Bernat A., Kacalak W.: Problem soft 3D reconstruction methods In Visual inspection of surfaces of abrasive tools, CSM 2007, Computer Methods and Systems, Kraków 2007, s. 247–252.
59. Bernat A., Kacalak W.: Problems of acquiring of the parameters of cutting surface of abrasive tools, used in grinding of ceramics, CSM 2007, Computer Methods and Systems, Kraków 2007, s. 253–258.
60. Kacalak W., Bernat A.: Practical and theoretical aspects of abrasive tool surface reconstruction based on photometric stereo, Pomiary Automatyka Kontrola vol. 53, nr 8/2007, s. 21–24.

61. Kasprzyk M., Kacalak W.: Probabilistyczne modele trwałości narzędzi ściernych, Podstawy i technika obróbki ściernej. Monografia Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2007, s. 227–234.
62. Kacalak W., Douglas Stuart K., Majewski M., Selected Problems of Intelligent Handwriting Recognition, **World Congress of Theory and Applications of Fuzzy Logic and Soft Computing IFSA 2007**, Cancun, Mexico, 18–21 June 2007, Analysis and Design of Intelligent Systems using Soft Computing Techniques, **Book series of Advances in Soft Computing, vol. 41/2007, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York** 2007, p. 298–305.
63. Lipiński D., Kacalak W.; Assessment of the Accuracy of the Process of Ceramics Grinding with the Use Fuzzy Interference, Springer, **Lecture Notes in Computer Science** 4432, 2008, s. 596–603.
64. Kacalak W., Bałasz B., Królikowski T., Lipiński D.: Kierunki rozwoju mikro- i nanoszlifowania, Współczesne problemy obróbki ściernej, Monografie – Szkoła Naukowa Obróbki Ściernej, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2009, s. 13–40.
65. Bernat A., Kacalak W.: Visual inspection in estimation of stereometric parameters of cutting surface of abrasive tools, overview of the methodology in the approach to the problem, Współczesne problemy obróbki ściernej, Monografie – Szkoła Naukowa Obróbki Ściernej, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2009, s. 147–158.
66. Kacalak W., Majewski M.: Natural language human-robot interface using evolvable fuzzy neural networks for mobile technology. International Conference on Intelligent Computing ICIC 2009, South Korea, 2009. **Lecture Notes In Computer Science 5754**. Springer 2009, s. 480–489.
67. Kacalak W., Majewski M.: E-learning systems with artificial intelligence In engineering. International Conference on Intelligent Computing ICIC 2009, South Korea, 2009. **Lecture Notes In Computer Science 5754. Springer** 2009, s. 918–927.
68. Majewski M., Kacalak W., Zurada J.M.: Intelligent Human-Robot Speech Communication. **IEEE Inteligent Systems Magazine**, 2010.
69. Kacalak W., Tandecka K., Tomkowski R.: Metodyka analizy i oceny topografii powierzchni czynnej folii ściernych. Rozdział w monografii PODSTAWY I TECHNIKA OBRÓBKI ŚCIERNEJ. Łódź, 2010.
70. Lewkowicz R., Kacalak W., Ściegienka R.: Wykończeniowe mikrowygładzanie super gładkich powierzchni elementów ceramicznych. Rozdział w monografii PODSTAWY I TECHNIKA OBRÓBKI ŚCIERNEJ. Łódź, 2010.
71. Tomkowski R., Kacalak W., Lipiński D.: Analiza właściwości stereometrycznych powierzchni w procesach mikro- i nanowygładzania. Rozdział w monografii PODSTAWY I TECHNIKA OBRÓBKI ŚCIERNEJ. Łódź, 2010.

72. Kacalak W., Królikowski T., Bałasz B.: Analiza przemieszczeń materiału w strefie mikroskrawania. Rozdział w monografii PODSTAWY I TECHNIKA OBRÓBKI ŚCIERNEJ. Łódź, 2010.
73. Kacalak W., Szafraniec F., Kunc R., Remelska H.: Zastosowanie teorii fraktali do tworzenia i wizualizacji powierzchni o określonej topografii. Rozdział w monografii PODSTAWY I TECHNIKA OBRÓBKI ŚCIERNEJ. Łódź, 2010.
74. Kacalak W., Tandecka K.: Metrologiczne aspekty oceny topografii diamentowych folii ściernych do precyzyjnego mikrowygładzania. **Pomiary Automatyka Kontrola**, 5/2011.
75. Kacalak W., Szafraniec F., Tomkowski R., Lipiński D., Łukianowicz Cz.: Metodyka oceny zdolności klasyfikacyjnej parametrów charakteryzujących cechy stereometryczne nierówności powierzchni. **Pomiary Automatyka Kontrola**, 5/2011.
76. Kacalak W., Tandecka K.: Metrologiczne aspekty oceny topografii diamentowych folii ściernych do precyzyjnego mikrowygładzania. **Pomiary Automatyka Kontrola**, 5/2011.
77. Kacalak W., Szafraniec F., Tomkowski R., Lipiński D., Łukianowicz Cz.: Metodyka oceny zdolności klasyfikacyjnej parametrów charakteryzujących cechy stereometryczne nierówności powierzchni. **Pomiary Automatyka Kontrola**, 5/2011.
78. Kacalak W., Majewski M.: Ocena predyspozycji operatora w zadaniach decyzyjnych w inteligentnym systemie interakcji z urządzeniami technicznymi. **Pomiary Automatyka Kontrola**, 5/2011.
79. Kacalak W., Majewski M.: Wybrane problemy efektywnego rozpoznawania pisma odręcznego. **Pomiary Automatyka Kontrola**, 5/2011.
80. Kacalak W., Tandecka K., Budowa mikrowiórów oraz skutki mikronieciągłości ich tworzenia w procesach wygładzania powierzchni z zastosowaniem folii ściernych, INNOVATIVE MANUFACTURING TECHNOLOGY 2, Kraków 2012, s. 181–192.
81. Kacalak W., Szafraniec F., Tomkowski R., Metodyka modelowania powierzchni ziaren określonych materiałów ściernych, INNOVATIVE MANUFACTURING TECHNOLOGY 2, Kraków 2012, s. 555–562.
82. Tomkowski R., Kapłonek W., Kacalak W., Łukianowicz Cz., Lipiński D., Cincio R., Metody filtracji cyfrowej w ocenie topografii powierzchni, POMIARY AUTOMATYKA KONTROLA, Tom 59, Nr 06, 2013, s. 507–510.
83. Tomkowski R., Kacalak W., Lipiński D., Evaluation of the surface topography after precision machining, **Journal of Machine Engineering**, 2012; 12(4), s. 71–79.
84. Kacalak W., Tandecka K., Podstawy prognozowania cech stereometrycznych powierzchni wygładzanych z zastosowaniem folii ściernych, INNOVATIVE MANUFACTURING TECHNOLOGY 2, Kraków 2012, s. 563–577.

85. Kacalak W., Majewski M., New Intelligent Interactive Automated Systems for Design of Machine Elements and Assemblies, **ICONIP 2012, Part IV, LNCS 7666, pp. 115–122, 2012, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg** 2012.
86. Lipiński D., Kacalak W., Tandecka K., Zastosowanie systemu skanowania przestrzennego do oceny zużycia narzędzi ściernych, **Pomiary Automatyka Kontrola**, vol. 59, nr 11, 2013, s. 1227–1231.
87. Tomkowski R., Lipiński D., Kacalak W., Pomiary i analiza naprężeń resztkowych w stopie tytanu Ti6Al5 z zastosowaniem elektronicznej interferometrii plamkowej (ESPI), **Pomiary Automatyka Kontrola**, vol. 59, nr 11 2013, s. 1223–1226.
88. Lipiński D., Kacalak W., Tomkowski R., Application of the laser scanning microscopy to evaluation of abrasive tool wear, **Journal of Machine Engineering**, Vol. 12, No. 4, 2012, pp. 99–105.
89. Tomkowski R., Kacalak W., Lipiński D., Evaluation of the surface topography after precision machining, **Journal of Machine Engineering**, Vol. 12, No. 4, 2012, pp. 71–80.
90. Kacalak W., Kunc R., Analiza wpływu parametrów kształtowania powierzchni czynnej na parametry statystyczne oceny aktywności ziaren ściernych, Mechanik, Vol. 8-9/2012, s. 25–36.
91. Kacalak W. Szafraniec F., Tomkowski R. Lipiński D. Łukianowicz Cz., Metodyka oceny zdolności klasyfikacyjnej parametrów charakteryzujących cechy stereometryczne nierówności powierzchni, **Pomiary Automatyka Kontrola**, Vol. 57, 2011, s. 542–546.
92. Lipiński D., Kacalak W., Tomkowski R., Methodology of evaluation of abrasive tools' wear with the use of laser scanning, **Proceedings of the International Conference on Surface Metrology, 2012, France**, pp.: 72–78.
93. Tomkowski R., Kacalak W., Lipiński D., Methodology of evaluation of extra smooth surfaces with the use of new evaluation parameters, **Proceedings of the International Conference on Surface Metrology, 2012, France**, pp.: 64–71.
94. Kacalak W., Szafraniec F., Metodyka i algorytmy modelowania i symulacji oraz badań i analizy procesów obróbki ściernej, Problemy i tendencje rozwoju obróbki ściernej, Prace naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej, s. 205–234.
95. Kacalak W., Kunc R., Algorytmy i procedury optymalizacji procesu szlifowania powierzchni śrubowych, INNOVATIVE MANUFACTURING TECHNOLOGY 2, Kraków 2012, s. 597–609.
96. Kacalak W., Tandecka K., Sempruch R., Badania modelowe procesu mikroskrawania, MECHANIK NR 8–9/2013.
97. Kacalak W., Królikowski T., Rypina Ł., Modelowanie naprężeń i przemieszczeń materiału w strefie mikroskrawania z wykorzystaniem środowiska LS-DYNA, MECHANIK NR 8–9/2013.

98. Kacalak W., Szafraniec F., Modelowanie obciążeń ziaren aktywnych i sił w procesie szlifowania, MECHANIK NR 8–9/2013.
99. Lipiński D., Kacalak W., Tomkowski R., Methodology of evaluation of abrasive tool wear with the use of laser scanning microscopy, **SCANNING**, 2013 (DOI:0.1002/sca.21088).
100. Kacalak W., Majewski M., Lipiński D.: Minimalizacja odkształceń cieplnych i kompensacji odchyłek położenia ściernicy i przedmiotu w procesie szlifowania długich powierzchni śrubowych. Miesięcznik Naukowo-Techniczny MECHANIK, nr 1/2014, s. 36–40.
101. Kacalak W., Majewski M., Budniak Z.: Przekładnie ślimakowe z regulowanym luzem bocznym. Miesięcznik Naukowo-Techniczny MECHANIK, nr 7/2014, s. 526–533.
102. Kacalak W., Tandecka K.: Efekty mikrowygładzania foliami ściernymi o nieciągłej powierzchni czynnej (The effects of the use of discontinuous active surface of microfinishing films for superfinishing proces). Miesięcznik Naukowo-Techniczny MECHANIK, nr 8–9/2014, s. 36–40.
103. Kacalak W., Szafraniec F., Lipiński D.: Probabilistyczna analiza aktywności ziaren na czynnej powierzchni ściernicy. Miesięcznik Naukowo-Techniczny MECHANIK, nr 8–9/2014, s. 176–184.
104. Kacalak W., Tomkowski R., Lipiński D., Szafraniec F.: System oceny struktury geometrycznej powierzchni po obróbce ściernej. Miesięcznik Naukowo-Techniczny MECHANIK, nr 8–9/2014, s. 219–226.
105. Kacalak W., Majewski M.: Interactive systems for design of machine elements and assemblies, Archives of Mechanical Technology and Automation. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, ATMiA Poznań.
106. Kacalak W., Majewski M.: Effective handwriting recognition in intelligent design systems. Archives of Mechanical Technology and Automation Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, ATMiA Poznań.
107. Kacalak W., Majewski M., Budniak Z.: Innowacyjne przekładnie ślimakowe do zastosowań w precyzyjnych mechanizmach i napędach. XXI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Koła Zębate KZ i XIX Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna Przekładnie Zębate, Wisła 25.11–27.11.2014. www.czasopismologistyka.pl.
108. Kacalak W., Majewski M., Lipiński D.: Podstawy precyzyjnego szlifowania powierzchni śrubowych elementów mechanizmów i przekładni. XXI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Koła Zębate KZ i XIX Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna Przekładnie Zębate, Wisła 25.11–27.11.2014. www.czasopismologistyka.pl.
109. Kacalak W., Majewski M.: Intelligent Interactive Systems for Design of Machine Elements and Assemblies in Uncertainty and Unrepeatability. **The 28th International Conference on Industrial, Engineering & Other Applications of Applied Intelligent Systems – IEA/AIE 2015, Seoul,**

Korea, 10–12 June 2015. Lecture Notes in Computer Science. Springer 2015.

110. Kacalak W., Majewski M., Budniak Z.: Innovative design of non-backlash worm drives. Civil and Mechanical Engineering, 2015.
111. Kacalak W., Majewski M., Budniak Z.: Intelligent Design of Machine Elements using Antipatterns. **The 28th International Conference on Industrial, Engineering & Other Applications of Applied Intelligent Systems – IEA/AIE 2015, Seoul, Korea**, 10–12 June 2015. Lecture Notes in Computer Science. Springer 2015.
112. Kacalak W., Majewski M., Budniak Z.: Worm gear drives with adjustable backlash. **ASME Journal of Mechanisms and Robotics. ASME Press** 2015.

Ważne patenty

1. Kacalak W.: Układ połączeń funkcjonalnych urządzenia od rejestracji nierówności powierzchni. Patent nr 101668.
2. Kacalak W.: Sposób wyznaczania twardości ściernic. Patent nr 108628.
3. Kacalak W.: Urządzenie do pomiaru elastyczności ściernic polerskich. Patent nr 108622.
4. Kacalak W.: Narzędzie ścierne i sposób jego wytwarzania. Patent nr 118215.
5. Kacalak W., Śmiałek W.: Urządzenie próżniowe do mocowania przedmiotów z materiałów niemagnetycznych. Patent nr 128023.
6. Kacalak W., Śmiałek W.: Urządzenie próżniowe do mocowania przedmiotów z materiałów niemagnetycznych. Patent nr 128112.
7. Kacalak W., Śmiałek W.: Urządzenie próżniowe do mocowania przedmiotów z materiałów niemagnetycznych. Patent nr 137130.
8. Kacalak W., Lewkowicz R., Lechowski T.: Sposób pomiaru niedokładności zarysu powierzchni śrubowej ślimaka oraz urządzenie do jego realizacji. Patent nr 137523.
9. Kacalak W., Śmiałek W.: Urządzenie próżniowe do mocowania przedmiotów z materiałów niemagnetycznych. Patent nr 128113.
10. Kacalak W., Śmiałek W.: Urządzenie próżniowe do mocowania przedmiotów z materiałów niemagnetycznych. Patent 132509.
11. Ziółkowski S., Kacalak W.: Zawieszenie wrzeciennika zwłaszcza szlifierki do płaszczyzn pracującej czołem ściernicy. Patent nr 136506.
12. Kacalak W.: Przekładnia ślimakowa. Patent nr 137131.
13. Kacalak W., Kacalak A.: Sposób sterowania procesem wzdłużnego szlifowania wałków. Patent nr 137418.
14. Kacalak W., Poletajew B., Pluta Z.: Sposób i narzędzie ścierne do kształtowania regularnej makrogeometrii obrabianej powierzchni w postaci równomiernie rozmieszczonych wgłębień. Patent nr 137405.

15. Pluta Z., Kacalak W.: Uchwyt do mocowania pakietów płytek, zwłaszcza ceramicznych. Patent nr 137132.
16. Ziółkowski S., Kacalak W.: Wrzeciennik z osiowo przesuwnym wrzecionem zwłaszcza do szlifierki pracującej czołem ściernicy. Patent nr 136507.
17. Kacalak W. i inni: Sposób szlifowania płaskiego, zwłaszcza drobnych elementów ceramicznych oraz urządzenie do szlifowania płaskiego zwłaszcza drobnych elementów ceramicznych. Patent nr 142132.
18. Kacalak W. i inni: Sposób i urządzenie do gładkościowej obróbki płaszczyzn przedmiotów drobnych, zwłaszcza elementów ceramicznych pokrytych cienkimi warstwami innych materiałów. Patent nr 141138.
19. Kacalak W., Ściegienka, Pluta Z., Śmiałek W., Ziółkowski S.: Sposób i narzędzie do gładkościowej obróbki powierzchni. Patent nr 141828.
20. Kacalak W.: Narzędzie ścierne do wykonywania płytkich wgłębień na powierzchniach. Patent 145286.
21. Kacalak W.: Urządzenie do frezowania obwiedniowego stycznego ślimacznic. Pa-tent nr 147824.
22. Kacalak W., Ściegienka, Ziółkowski S., Konfisz J.: Zawieszenie wrzeciennika, zwłaszcza szlifierki ze stołem obrotowym. Patent nr 147222.
23. Ziółkowski S., Konfisz J., Ściegienka, Kacalak W.: Zawieszenie wrzeciennika zwłaszcza szlifierki do płaszczyzn pracującej czołem ściernicy. Patent nr 147152.
24. Ziółkowski S., Ściegienka, Kacalak W., Konfisz J.: Wrzeciennik z osiowo przesuwnym wrzecionem zwłaszcza szlifierki do ceramiki elektronicznej Patent nr 147223.
25. Ziółkowski S., Ściegienka, Kacalak W., Konfisz J.: Układ przeniesienia napędu na przesuwne osiowo wrzeciono obrabiarki, zwłaszcza szlifierki pracującej czołem ściernicy. Patent nr 146616.
26. Kacalak W., Konfisz J., Derkacz A., Bokiej S.: Stół obrotowy szlifierki z gniazdami ustalającymi do obróbki płaskich przedmiotów. Patent P 285 765.
27. Kacalak W., Ściegienka, Konfisz J., Derkacz A.: Stół obrotowy szlifierki z gniazdami ustalającymi do precyzyjnej obróbki drobnych płaskich przedmiotów. Patent nr 285766.
28. Kacalak W., Ściegienka, Piotrowski: Stół obrotowy szlifierki z gniazdami ustalającymi do precyzyjnej obróbki drobnych płaskich przedmiotów. Patent nr 287493.
29. Kacalak W., Ściegienka, Pluta Z., Derkacz A., Ziółkowski S., Kundzicz W., Piotrowski: Sposób i urządzenie do dwustronnego szlifowania płaskich powierzchni czołowych, zwłaszcza małych walcowych przedmiotów ceramicznych. Patent nr 285396.
30. Kacalak W., Ryckiewicz J.: Precyzyjna przekładnia ślimakowa. Patent nr 288496.
31. Kacalak W., Ryckiewicz J., Ziółkowski S.: Przekładnia ślimakowa do bezluzowego przenoszenia momentów obrotowych. Patent nr 288497.

32. Kacalak W., Ryckiewicz J., Ziółkowski S.: Przekładnia ślimakowa z regulowanym luzem międzyzębnym. Patent nr 288495.
33. Kacalak W., Ryckiewicz J., Ziółkowski S.: Przekładnia ślimakowa bezluzowa. Patent nr 288498.
34. Kacalak W.: Sposób obciągania ściernicy. Patent 152828.
35. Kacalak W.: Narzędzie ścierne do kształtowania regularnej makrogeometrii obrabianej powierzchni. Patent nr 152827.
36. Kacalak W., Łukianowicz Cz.: Sposób i układ do pomiaru nierówności powierzchni. Patent nr 140791.
37. Kacalak W.: Przekładnia ślimakowa bezluzowa. Patent nr 296444.
38. Kacalak W.: Moduł mikronapędu. Patent nr 296377.
39. Kacalak W., Ściegienka, Ziółkowski S., Konfisz J.: Sposób szlifowania płaskiego, zwłaszcza drobnych przedmiotów o małej wysokości. Patent nr 154419.
40. Kacalak W.: Przekładnia ślimakowa bezluzowa. Patent nr 301669.
41. Kacalak W., Derkacz A.: Układ napędowy stołu obrotowego obrabiarki. Patent nr 160800.
42. Kacalak W., Derkacz A.: Układ nośny obrabiarki z obrotowym stołem, zwłaszcza do obróbki drobnych przedmiotów. Patent nr 161644.
43. Kacalak W., Konfisz T., Markiewicz A.: Stół obrotowy szlifierki z gniazdami ustalającymi do precyzyjnej obróbki drobnych płaskich przedmiotów. Patent nr 161790.
44. Kacalak W., Lubiński A.: Sposób szlifowania dokładnych powierzchni śrubowych, zwłaszcza długich gwintów. Patent nr 160799.
45. Kacalak W., Lubiński A.: Przekładnia ślimakowa bezluzowa. Patent nr 160312.
46. Kacalak W., Ściegienka,: Sposób precyzyjnej obróbki płaskich powierzchni, zwłaszcza obróbki drobnych przedmiotów ceramicznych w cyklu automatycznym. Patent nr 161481.
47. Kacalak W., Tatoń J., Derkacz A.: Przekładnia ślimakowa bezluzowa. Patent nr 160314.
48. Ściegienka, Kacalak W., Pluta Z., Derkacz A., Ziółkowski S., Kundzicz W., Piotrowski: Sposób i urządzenie do dwustronnego szlifowania płaskich powierzchni czołowych, zwłaszcza małych walcowych elementów ceramicznych. Patent nr 161480.
49. Kacalak W., Lubiński A.: Końcówka przewodu pneumatycznego, zwłaszcza do urządzeń do pompowania opon samochodowych. Patent nr 160033.
50. Kacalak W., Lubiński A.: Urządzenie do składowania i transportu przedmiotów. Patent nr 161788.
51. Kacalak W., Tatoń J.: Urządzenie do frezowania rowków w tynku. Patent nr 160025.
52. Kacalak W., Konfisz J., Bokiej S., Derkacz A., Tomaszewicz M.: Mechanizm do umieszczania płaskich przedmiotów w gniazdach stołu obrabiarki. Patent nr 161479.

53. Kacalak W, Ściegienka R., Lange A.: Zbiornik osadczy. Patent nr 161176.
54. Kacalak W., Ryckiewicz J.: Precyzyjna przekładnia ślimakowa. Pat. Nr 164104.
55. Kacalak W., Ryckiewicz J., Ziółkowski S.: Przekładnia ślimakowa do bezluzowego przenoszenia momentów obrotowych. Patent nr 164105.
56. Kacalak W., Derkacz A., Konfisz J., Bokiej S., Frąckowiak P.: Urządzenie do odwracania płaskich przedmiotów obrabianych. Patent nr 162320.
57. Kacalak W., Derkacz A.: Układ nośny obrabiarki z obrotowym stołem, zwłaszcza do obróbki drobnych przedmiotów. Patent nr 161643.
58. Ściegienka R., Kacalak W., Lewkowicz R., Plichta S.: Małogabarytowa głowica do mikrowygładzania foliami ściernymi. Patent nr 181922.
59. Ściegienka R., Lewkowicz R., Kacalak W., Bokiej S.: Głowica do mikrowygładzania otworów foliowymi taśmami ściernymi. Patent nr 190466.
60. Ściegienka R., Lewkowicz R., Kacalak W., Bokiej S.: Głowica do mikrowygładzania otworów foliowymi taśmami ściernymi. Patent nr 190467.
61. Kacalak W., Derkacz A., Markiewicz A.: Urządzenie do oczyszczania cieczy, zwłaszcza chłodząco-smarującej. Patent nr 164402.
62. Ściegienka R., Lewkowicz R., Kacalak W.: Głowica do mikrowygładzania otworów foliowymi taśmami ściernymi. Zgł. P.-393071.
63. Ściegienka R., Lewkowicz R., Kacalak W., Bokiej S.: Obrabiarka do mikroskrawania albo wygładzania ściernego w komorze próżniowej. Zgł. P.-393211.

Opinie dotyczące nadania tytułów doktora honoris causa, profesora i mianowania na stanowisko profesora oraz w przewodach habilitacyjnych w Politechnice Poznańskiej

1. Opinia o dorobku naukowym, efektach kształcenia kadr naukowych, reprezentacji nauki polskiej i współpracy międzynarodowej oraz o osiągnięciach dydaktycznych i organizacyjnych **prof. zw. dr. hab. inż. Krzysztofa Marchelka** z Politechniki Szczecińskiej w związku z postępowaniem o nadanie tytułu i godności doktora honoris causa Politechniki Poznańskiej – 2006.
2. Opinia o dorobku naukowym, efektach kształcenia kadr naukowych, osiągnięciach dydaktycznych i organizacyjnych oraz reprezentacji nauki polskiej i współpracy międzynarodowej **prof. dr. hab. inż. Adama Hamrola** z Politechniki Poznańskiej w związku z postępowaniem o nadanie tytułu naukowego profesora (1999), w związku z mianowaniem na stanowisko profesora zwyczajnego Politechniki Poznańskiej (2002) – również wcześniej recenzja pracy doktorskiej.
3. Opinia o dorobku naukowym, efektach kształcenia kadr naukowych, osiągnięciach dydaktycznych i organizacyjnych oraz osiągnięciach we współpracy z przemysłem i wdrożeniach **dr. hab. inż. Ryszarda Grajdka**, profesora

nadzwyczajnego Politechniki Poznańskiej, w związku z postępowaniem o nadanie tytułu naukowego profesora – 2003.

4. Opinia o dorobku naukowym, efektach kształcenia kadr naukowych, osiągnięciach dydaktycznych i organizacyjnych **dr. hab. inż. Michała Wieczorowskiego** profesora nadzwyczajnego w Politechnice Poznańskiej w związku z postępowaniem o nadanie tytułu naukowego profesora – 2013.
5. Opinia o dorobku naukowym, efektach kształcenia kadr naukowych, osiągnięciach dydaktycznych i organizacyjnych **dr. hab. inż. Romana Stańka** profesora nadzwyczajnego w Politechnice Poznańskiej w związku z postępowaniem o nadanie tytułu naukowego profesora – 2014.
6. Recenzja w postępowaniu habilitacyjnym:
   - **Edmunda Weissa** (przewód habilitacyjny w Politechnice Wrocławskiej)
   - **Edwarda Pająka**,
   - **Piotra Frąckowiaka**,
   - **Małgorzaty Sławińskiej**.
7. Przewodniczenie komisji habilitacyjnej w przewodach habilitacyjnych:
   - **Olafa Ciszaka**,
   - **Przemysława Kurczewskiego**.
8. RECENZJE w przewodach habilitacyjnych przeprowadzanych w Politechnice Poznańskiej pracowników innych uczelni:
   - **Tadeusza Markowskiego** (Politechnika Rzeszowska) – recenzja w przewodzie habilitacyjnym,
   - **Mariana Mijała** (Politechnika Rzeszowska), recenzja w przewodzie habilitacyjnym.
9. Recenzja książki **prof. dr. hab. inż. dr. h.c. multi Czesława Cempla** nt.: INŻYNIERIA KREATYWNOŚCI W PROJEKTOWANIU INNOWACJI.

Recenzje projektów realizowanych w Politechnice Poznańskiej

1. Wdrożenie systemu pomiarowego wałów korbowych z koroną Hirth'a w praktykę przemysłową.
2. Laserowe wspomaganie obróbki skrawaniem nadstopów i stopów tytanu stosowanych w konstrukcjach silników lotniczych.
3. Inżynieria Kreatywności w Budowaniu Innowacji.
4. Mobilna zrobotyzowana obrabiarka NC do obróbki części wielkogabarytowych.
5. Analiza warstwy wierzchniej po frezowaniu węglików spiekanych.
6. Obróbka kriogeniczna stopów tytanu podczas toczenia.
7. Eksperymentalna i teoretyczna analiza układów ze zmienną masą.

8. Analiza wybranych problemów przepływu płynu z wymianą ciepła w rurach użebrowanych z wykorzystaniem metod bezsiatkowych.
9. Zastosowanie rozkładów wartości szczególnych teorii szarych systemów w wielowymiarowej diagnostyce maszyn.
10. Automatyzacja programowania robotów przemysłowych na podstawie danych z fotogrametrii.
11. Opracowanie adaptacyjnych metod oceny stanu procesu wytwarzania.
12. Opracowanie nowej geometrii i technologii kształtowania przekładni, w której ślimak walcowy współpracuje z dwoma uzębieniami czołowymi oraz badania jej w aplikacjach nowej generacji typoszeregu precyzyjnych i silnie obciążonych stołów obrotowych NC.
13. Przemysłowe badania inteligentnego systemu oceny stanu procesu wytwarzania.
14. Wdrożenie zautomatyzowanego komputerowego systemu projektowania i przygotowania technologii dla maszyn CNC.
15. Wdrożenie kompleksowego systemu zapewnienia dokładności obróbki części o złożonych kształtach w produkcji mało i średnioseryjnej.
16. Modelowanie dynamicznych zmian struktury zasobowej procesu produkcyjnego w przemyśle budowy maszyn.
17. Inteligentne sterowniki pralek.
18. Opracowanie nowego – opartego na wiedzy pracowników – sposobu doboru i stosowania.
19. Instrumentarium zarządzania jakością na potrzeby doskonalenia procesów wytwarzania w przedsiębiorstwach produkcyjnych.
20. Bieżąca ocena przydatności systemu pomiarowego w procesie wytwarzania.
21. Ocena metod badania czasu pracy w procesach technologicznych montażu.
22. Wdrożenie bezstykowych metod w procesie produkcji masowej wałów korbowych.

Współpraca naukowa z zespołami naukowymi z Politechniki Poznańskiej

Projekty:

1. PBS III (Konsorcjum „ARControl", ZACHODNIOPOMORSKI UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNY w Szczecinie, POLITECHNIKA POZNAŃSKA, POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, Cargotec Poland Sp. z o.o.) „**Zastosowanie rozszerzonej rzeczywistości, interaktywnych układów i głosowego interfejsu operatora w sterowaniu urządzeniami dźwigowymi**"
2. PBS III (Konsorcjum SmartTECH, ZACHODNIOPOMORSKI UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNY w Szczecinie, POLITECHNIKA POZNAŃ-

SKA, POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, FOP AVIA SA, Instytut Optyki Stosowanej) **„Zastosowanie inteligentnych systemów wizyjnych do nadzorowania i sterowania procesów obróbki skrawaniem"**.

Konsorcja powołane do tworzenia nowoczesnej infrastruktury badawczej:

1. **Północnozachodnie Konsorcjum Infrastruktury Badawczej dla Biogospodarki BIOAT** powołane w związku z aktualizacją Polskiej Mapy Drogowej Infrastruktury Badawczej (ZACHODNIOPOMORSKI UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNY w Szczecinie, POLITECHNIKA POZNAŃSKA, POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA)
2. **Autostrada Technologii i Innowacji, Centrum Technologii (Bio)Kompozytów, Zaawansowane systemy wytwarzania i materiały**. (POLITECHNIKA WROCŁAWSKA, AGH, ZACHODNIOPOMORSKI UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNY w Szczecinie, POLITECHNIKA POZNAŃSKA, POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA).

dr hab. inż. Olaf Ciszak

WNIOSEK

o nadanie Profesorowi Wojciechowi Kacalakowi tytułu doktora honoris causa Politechniki Poznańskiej

Szanowny Panie Rektorze,

Zgodnie z § 10 p. 3 Statutu proponuję wystąpienie Jego Magnificencji Rektora do Senatu naszej Uczelni o nadanie tytułu honorowego *doktora honoris causa* Politechniki Poznańskiej

prof. dr. hab. inż. Wojciechowi Kacalakowi

wybitnemu uczonemu, specjaliście w dziedzinie budowy i eksploatacji maszyn.

Do najważniejszych osiągnięć naukowych Profesora zaliczyć można: opracowanie nowych metod zautomatyzowanego, precyzyjnego szlifowania elementów z materiałów trudno obrabialnych, stosowanych w przemyśle elektronicznym i obronnym, opracowanie podstaw budowy urządzeń do szlifowania elementów ceramicznych w warunkach produkcji masowej, między innymi ceramicznych kondensatorów odpornych na zakłócenia oraz piezoceramicznych zapłonników do zastosowań specjalnych, opracowanie teoretycznych i doświadczalnych podstaw konstrukcji i technologii precyzyjnych, bezluzowych przekładni ślimakowych do zastosowań w precyzyjnych napędach i mikroinżynierii.

Prof. W. Kacalak jest autorem i współautorem ponad 350 publikacji naukowych, w tym ponad 90 publikacji zagranicznych w czasopismach i wydawnictwach o światowym zasięgu.

Jednocześnie informuję, że Rada Wydziału Budowy Maszyn i Zarządzania podjęła stosowną uchwałę w przedmiotowej sprawie oraz zaproponowała zwrócić się o opracowanie recenzji do Senatów Politechnik: Krakowskiej i Łódzkiej oraz Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Na promotora zaproponowano osobę prof. dr hab. inż. Adama Hamrola.

RECENZENCI DOKTORATU HONOROWEGO

prof. **Bogdan KRUSZYŃSKI** – Politechnika Łódzka

„Współpraca profesora Kacalaka z Politechniką Poznańską była i jest owocna oraz przyczynia się do rozwoju nauki polskiej (...)

(...) Z uwagi na olbrzymi dorobek naukowy i wdrożeniowy, autorytet jakim się cieszy Kandydat w środowiskach naukowych krajowych i zagranicznych oraz z uwagi na znaczące zasługi prof. Wojciecha Kacalaka dla rozwoju Politechniki Poznańskiej z pełnym przekonaniem rekomenduję Wysokiemu Senatowi Politechniki Łódzkiej poparcie wniosku Politechniki Poznańskiej o nadanie Profesorowi Wojciechowi Kacalakowi tytułu i godności Doktora Honoris Causa Politechniki Poznańskiej."

prof. **Józef GAWLIK** – Politechnika Krakowska

„Biorąc pod uwagę dokonania naukowo-badawcze, dydaktyczne i organizacyjne oraz niekwestionowaną pozycję naukową w kraju i wymiarze międzynarodowym prof. dra hab. inż. Wojciecha Kacalaka, wyrażam z pełnym przekonaniem opinię, że wniosek Senatu Akademickiego Politechniki Poznańskiej w sprawie nadania Mu zaszczytnego tytułu doktora honoris causa jest ze wszech miar godny poparcia przez Senat Politechniki Krakowskiej."

prof. **Krzysztof MARCHELEK**
– Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

„Nadanie Profesorowi Wojciechowi Kacalakowi najwyższej godności akademickiej – tytułu doktora honoris causa, jest pod każdym względem uzasadnione Jego wybitnymi osiągnięciami jako uczonego, nauczyciela i promotora licznych kadr naukowych, twórcy i kreatora nowych innowacyjnych rozwiązań technicznych, organizatora nauki i techniki, człowieka godnego najwyższego szacunku."

Uchwała Nr 145/2012–2016
Senatu Akademickiego Politechniki Poznańskiej
z dnia 29 kwietnia 2015 r.

W SPRAWIE NADANIA TYTUŁU DOKTORA HONORIS CAUSA POLITECHNIKI POZNAŃSKIEJ

Działając na podstawie art. 16 ustawy z dnia 27 lipca 2005 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz. U. z 2012 r., poz. 572, z późn. zm.) oraz § 10 Statutu Politechniki Poznańskiej, po wysłuchaniu opinii Senatu Politechniki Krakowskiej, Senatu Politechniki Łódzkiej i Senatu Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie oraz wypowiedzi członków Senatu –

Senat Akademicki Politechniki Poznańskiej
nadaje prof. Wojciechowi Kacalakowi
tytuł doktora honoris causa Politechniki Poznańskiej.

Uchwała wchodzi w życie z dniem podjęcia.

Przewodniczący Senatu
Rektor Politechniki Poznańskiej

prof. dr hab. inż. Tomasz Łodygowski

DOKTORZY HONORIS CAUSA POLITECHNIKI POZNAŃSKIEJ

- prof. zw. dr WŁADYSŁAW ŚLEBODZIŃSKI
  Politechnika Wrocławska, 1967
- prof. zw. dr hab. inż. STEFAN ZIEMBA
  Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie, 1978
- prof. zw. mgr inż. TADEUSZ MALKIEWICZ
  Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, 1978
- prof. zw. dr hab. WŁADYSŁAW ORLICZ
  Uniwersytet im. A. Mickiewicza w Poznaniu, 1978
- prof. zw. dr inż. WITOLD NOWACKI
  Uniwersytet Warszawski, 1979
- prof. zw. dr inż. ZBIGNIEW JASICKI
  Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, 1987
- prof. zw. dr hab. inż. ROBERT SZEWALSKI
  Politechnika Gdańska, 1987
- prof. zw. dr PIOTR ZAREMBA
  Politechnika Szczecińska, 1989
- prof. zw. mgr inż. TEOBALD OLEJNIK
  Politechnika Poznańska, 1990
- prof. dr WOLFGANG PAUL
  Laureat Nagrody Nobla, Uniwersytet w Bonn, Niemcy, 1990
- prof. dr WIKTOR JANKOWSKI
  Politechnika Poznańska, 1991
- Prof. Dr. h.c. BERNARD ROY
  Uniwersytet Paryski Dauphine, Francja, 1992

- Prof. Dr. h.c. DOMINIQUE DE WERRA
  Politechnika Federalna w Lozannie, Szwajcaria, 1992
- prof. zw. dr hab. inż. JAN KMITA
  Politechnika Wrocławska, 1993
- prof. zw. dr hab. inż. ZBIGNIEW GÓRNY
  Instytut Odlewnictwa w Krakowie, 1993
- Dr. Dr. h.c. THOMAS M. BERBERICH
  Fundacja im. Aleksandra von Humboldta, Niemcy, 1993
- Prof. Dr. Dr. h.c. HANS GÜNTHER NATKE
  Uniwersytet w Hanowerze, Niemcy, 1994
- Prof. Dr. rer. nat. Dr. h.c. mult. HINRICH SEIDEL
  Uniwersytet w Hanowerze, Niemcy, 1995
- Prof. D-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. ERWIN STEIN
  Uniwersytet w Hanowerze, Niemcy, 1997
- prof. zw. dr hab. inż. BOLESŁAW WOJCIECHOWICZ
  Politechnika Poznańska, 2001
- prof. zw. dr hab. inż. JAN KACZMAREK
  Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie, 2001
- prof. dr hab. inż. EDMUNDAS ZAVADSKAS
  Wileński Uniwersytet Techniczny im. Giedymina, Litwa, 2002
- prof. dr hab. inż. ZDZISŁAW PAWLAK
  Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej PAN w Gliwicach, 2002
- prof. dr hab. inż. ZDZISŁAW BUBNICKI
  Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie, 2003
- prof. ALFRED FETTWEIS
  Uniwersytet w Bochum, Niemcy, 2004
- prof. zw. dr hab. inż. JAN WĘGLARZ
  Politechnika Poznańska, 2006
- prof. dr hab. inż. KRZYSZTOF MARCHELEK
  Politechnika Szczecińska, 2007
- prof. zw. dr hab. inż. PIOTR PERZYNA
  Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie, 2008
- prof. dr inż. EDMUND KUFFEL
  Uniwersytet Manitoba, Winnipeg, Kanada, 2009

- prof. dr hab. inż. arch. SŁAWOMIR GZELL
  Politechnika Warszawska, 2010
- prof. dr inż. TADEUSZ MALIŃSKI
  Uniwersytet Ohio, Stany Zjednoczone, 2011
- prof. zw. dr hab. inż. TADEUSZ KACZOREK
  Politechnika Warszawska, 2011
- prof. dr inż. JANUSZ RAJSKI
  Mentor Graphics, 2013
- prof. PETER WRIGGERS, PhD, hab., Eng.
  Uniwersytet w Hanowerze, Niemcy, 2013
- prof. dr inż. JAN A. OLESZKIEWICZ
  University of Manitoba, Kanada, 2014
- Prof. Dr. ROLAND WIESENDANGER
  Uniwersytet w Hamburgu, Niemcy, 2015