



**POLITECHNIKA  
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ  
I OKRĘTOWNICTWA



Imię i nazwisko autora rozprawy: Maciej Gniot

Dyscyplina naukowa: Inżynieria Mechaniczna

## ROZPRAWA DOKTORSKA

Tytuł rozprawy w języku polskim: Wpływ parametrów dawkowania wymuszonego zawiesiny ścierniej na efekty docierania jednotarczowego powierzchni płaskich elementów ceramicznych

Tytuł rozprawy w języku angielskim: The influence of dosing parameters of forced abrasive suspension on the effects of lapping single-disc surfaces of flat ceramic elements

Promotor  <i>podpis</i>	Drugi promotor  _____ <i>podpis</i>
prof. dr hab. inż. Adam Barylski	<Tytuł, stopień, imię i nazwisko>
Promotor pomocniczy  _____ <i>podpis</i>	Kopromotor  _____ <i>podpis</i>
<Stopień, imię i nazwisko>	<Tytuł, stopień, imię i nazwisko>

Gdańsk, rok 2021



The author of the PhD dissertation: Maciej Gniot  
Scientific discipline: Mechanical Engineering

## DOCTORAL DISSERTATION

Title of PhD dissertation: The influence of dosing parameters of forced abrasive suspension on the effects of lapping single-disc surfaces of flat ceramic elements

Title of PhD dissertation (in Polish): Wpływ parametrów dawkowania wymuszonego zawiesiny ścierniej na efekty docierania jednotarczowego powierzchni płaskich elementów ceramicznych

Supervisor  <i>signature</i>	Second supervisor  _____ <i>signature</i>
prof. dr hab. inż. Adam Barylski	<Title, degree, first name and surname>
Auxiliary supervisor  _____ <i>signature</i>	Cosupervisor  _____ <i>signature</i>
<Title, degree, first name and surname>	<Title, degree, first name and surname>

Gdańsk, year 2021



**GDAŃSK UNIVERSITY  
OF TECHNOLOGY**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
AND SHIP TECHNOLOGY



## OŚWIADCZENIE

Autor rozprawy doktorskiej: Maciej Gniot

Ja, niżej podpisany(a), wyrażam zgodę na bezpłatne korzystanie z mojej rozprawy doktorskiej zatytułowanej:

Wpływ parametrów dawkowania wymuszonego zawiesiny ścierniej na efekty docierania jednotarczowego powierzchni płaskich elementów ceramicznych do celów naukowych lub dydaktycznych.<sup>1</sup>

Gdańsk, dnia .....

.....  
*podpis doktoranta*

Świadomy(a) odpowiedzialności karnej z tytułu naruszenia przepisów ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz. U. z 2006 r., nr 90, poz. 631) i konsekwencji dyscyplinarnych określonych w ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz. U. z 2012 r., poz. 572 z późn. zm.),<sup>2</sup> a także odpowiedzialności cywilno-prawnej oświadczam, że przedkładana rozprawa doktorska została napisana przeze mnie samodzielnie.

Oświadczam, że treść rozprawy opracowana została na podstawie wyników badań prowadzonych pod kierunkiem i w ścisłej współpracy z promotorem <promotor>, drugim promotorem <drugi promotor>, promotorem pomocniczym <promotor pomocniczy>, kopromotorem <kopromotor>\*.

Niniejsza rozprawa doktorska nie była wcześniej podstawą żadnej innej urzędowej procedury związanej z nadaniem stopnia doktora.

Wszystkie informacje umieszczone w ww. rozprawie uzyskane ze źródeł pisanych i elektronicznych, zostały udokumentowane w wykazie literatury odpowiednimi odnośnikami zgodnie z art. 34 ustawy o prawie autorskim i prawach pokrewnych.

Potwierdzam zgodność niniejszej wersji pracy doktorskiej z załączoną wersją elektroniczną.

Gdańsk, dnia .....

.....  
*podpis doktoranta*

Ja, niżej podpisany(a), wyrażam zgodę na umieszczenie ww. rozprawy doktorskiej w wersji elektronicznej w otwartym, cyfrowym repozytorium instytucjonalnym Politechniki Gdańskiej, Pomorskiej Bibliotece Cyfrowej oraz poddawania jej procesom weryfikacji i ochrony przed przywłaszczeniem jej autorstwa.

Gdańsk, dnia .....

.....  
*podpis doktoranta*

\*) niepotrzebne skreślić

<sup>1</sup> Zarządzenie Rektora Politechniki Gdańskiej nr 34/2009 z 9 listopada 2009 r., załącznik nr 8 do instrukcji archiwalnej PG.

<sup>2</sup> Ustawa z dnia 27 lipca 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym: Rozdział 7 Odpowiedzialność dyscyplinarna doktorantów, Art. 226.





**GDAŃSK UNIVERSITY  
OF TECHNOLOGY**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
AND SHIP TECHNOLOGY



## STATEMENT

The author of the PhD dissertation: Maciej Gniot

I, the undersigned, agree that my PhD dissertation entitled:  
The influence of dosing parameters of forced abrasive suspension on the effects of lapping single-disc surfaces of flat ceramic elements  
may be used for scientific or didactic purposes.<sup>1</sup>

Gdańsk,.....

.....  
*signature of the PhD student*

Aware of criminal liability for violations of the Act of 4<sup>th</sup> February 1994 on Copyright and Related Rights (Journal of Laws 2006, No. 90, item 631) and disciplinary actions set out in the Law on Higher Education (Journal of Laws 2012, item 572 with later amendments),<sup>2</sup> as well as civil liability, I declare, that the submitted PhD dissertation is my own work.

I declare, that the submitted PhD dissertation is my own work performed under and in cooperation with the supervision of <name of the supervisor>, the second supervision of <name of the second supervisor>, the auxiliary supervision of <name of the auxiliary supervisor>, the cosupervision of <name of the cosupervisor>\*.

This submitted PhD dissertation has never before been the basis of an official procedure associated with the awarding of a PhD degree.

All the information contained in the above thesis which is derived from written and electronic sources is documented in a list of relevant literature in accordance with art. 34 of the Copyright and Related Rights Act.

I confirm that this PhD dissertation is identical to the attached electronic version.

Gdańsk,.....

.....  
*signature of the PhD student*

I, the undersigned, agree to include an electronic version of the above PhD dissertation in the open, institutional, digital repository of Gdańsk University of Technology, Pomeranian Digital Library, and for it to be submitted to the processes of verification and protection against misappropriation of authorship.

Gdańsk,.....

.....  
*signature of the PhD student*

\*) delete where appropriate.

<sup>1</sup> Decree of Rector of Gdansk University of Technology No. 34/2009 of 9<sup>th</sup> November 2009, TUG archive instruction addendum No. 8.

<sup>2</sup> Act of 27<sup>th</sup> July 2005, Law on Higher Education: Chapter 7, Criminal responsibility of PhD students, Article 226.





**POLITECHNIKA  
GDAŃSKA**

WYDZIA INŻYNIERII MECHANICZNEJ  
I OKRĘTOWNICTWA



## OPIS ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

**Autor rozprawy doktorskiej:** Maciej Gniot

**Tytuł rozprawy doktorskiej w języku polskim:** Wpływ parametrów dawkowania wymuszonego zawiesiny ścierniej na efekty docierania jednotarczowego powierzchni płaskich elementów ceramicznych

**Tytuł rozprawy w języku angielskim:** The influence of dosing parameters of forced abrasive suspension on the effects of lapping single-disc surfaces of flat ceramic elements

**Język rozprawy doktorskiej:** polski

**Promotor rozprawy doktorskiej:** prof. dr hab. inż. Adam Barylski

**Drugi promotor rozprawy doktorskiej\*:** <imię, nazwisko>

**Promotor pomocniczy rozprawy doktorskiej\*:** <imię, nazwisko>

**Kopromotor rozprawy doktorskiej\*:** <imię, nazwisko>

**Data obrony:**

**Słowa kluczowe rozprawy doktorskiej w języku polski:** obróbka ścierna, docieranie jednotarczowe, kinematyka docierania, dawkowanie zawiesiny ścierniej, optymalizacja parametrów dawkowania

**Słowa kluczowe rozprawy doktorskiej w języku angielskim:** abrasive machining, single-disc lapping, lapping kinematics, dosage, of abrasive suspended optimization of dosage parameters

**Streszczenie rozprawy w języku polskim:** Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest analiza wpływu parametrów dawkowania wymuszonego zawiesiny ścierniej na efekty docierania jednotarczowego powierzchni płaskich elementów ceramicznych. W pierwszej części pracy opisano proces docierania elementów na docierarkach jednotarczowych. Opisano rolę ziaren ściernych i mechanizm procesu docierania elementów ceramicznych  $AL_2O_3$  na docierarkach jednotarczowych. Dokonano również przeglądu materiałów ściernych stosowanych w przemyśle. Przeanalizowano różne metody dawkowania substancji ściernych. Przeprowadzono przegląd dostępnych na rynku nowoczesnych urządzeń do docierania jednotarczowego. Dokonano również analizy literatury i opracowań branżowych. W kolejnej części rozprawy opracowano model matematyczny opisujący wpływ wybranych czynników wpływających na ubytek masowy i ubytek liniowy docieranych elementów ceramicznych. W dalszej części pracy opisano stanowisko badawcze z wymuszonym systemem dawkowania zawiesiny ścierniej. Następnie otrzymane wyniki empiryczne poddano analizie statystycznej. Określono poziom istotności statystycznej wybranych czynników. Przeanalizowano na podstawie modelu matematycznego przebieg zmienności równania regresji ubytku liniowego. Na tej podstawie określono wartości minimalne i maksymalne dawkowania i przeprowadzono optymalizację. Określono wartość parametrów wejściowych, które zapewnią optymalny ubytek liniowy dla zadanych czynników wejściowych. W pracy przeprowadzono również analizę korelacji wybranych parametrów chropowatości powierzchni po docieraniu.





**POLITECHNIKA  
GDAŃSKA**

WYDZIA INŻYNIERII MECHANICZNEJ  
I OKRĘTOWNICTWA



**Streszczenie rozprawy w języku angielskim:** The subject of the doctoral dissertation is an analysis of the effect of the dosage parameters of forced abrasive suspension on the effects of lapping the single-disc surface of flat ceramic elements. The first part of the work describes the process of lapping elements on single-sided reaches. Describes the role of abrasive grains and the mechanism of the process of lapping ceramic elements  $Al_2O_3$  on single-disc reachers. A review of abrasives used in industry has also been carried out. Various dosage methods of abrasives have been analysed. A review of the modern single-point running-in equipment available on the market was carried out. Literature and industry studies were also analysed. In the next part of the dissertation, a mathematical model was developed describing the impact of selected factors affecting the mass loss and linear loss of the lapped ceramic elements. The test bench with forced abrasive suspension dosing system is described later in the work. The empirical results obtained were then statistically analysed. The level of statistical significance of the selected factors has been determined. Based on a mathematical model, the variability of the linear cavity regression equation was analysed. On this basis, minimum and maximum dosage values were established and optimised. The value of the input parameters is specified to ensure optimal linear loss for the input factors specified. The work also analysed the correlation of selected surface roughness parameters after lapping.

\*) niepotrzebne skreślić.

\*\*) dotyczy rozpraw doktorskich napisanych w innych językach, niż polski lub angielski.



## DESCRIPTION OF DOCTORAL DISSERTATION

**The Author of the PhD dissertation:** Maciej Gniot

**Title of PhD dissertation:** The influence of dosing parameters of forced abrasive suspension on the effects of lapping single-disc surfaces of flat ceramic elements

**Title of PhD dissertation in Polish:** Wpływ parametrów dawkowania wymuszonego zawiesiny ścierniej na efekty docierania jednotarczowego powierzchni płaskich elementów ceramicznych

**Language of PhD dissertation:** Polish

**Supervision:** prof. dr hab. inż. Adam Barylski

**Second supervision\*:** <first name, surname >

**Auxiliary supervision\*:** <first name, surname >

**Cosupervision\*:** <first name, surname >

**Date of doctoral defense:**

**Keywords of PhD dissertation in Polish:** obróbka ścierna, docieranie jednotarczowe, kinematyka docierania, dawkowanie, optymalizacja parametrów dawkowania

**Keywords of PhD dissertation in English:** abrasive machining, single-disc lapping, lapping kinematics, dosage, optimization of dosage parameters

**Summary of PhD dissertation in Polish:** Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest analiza wpływu parametrów dawkowania wymuszonego zawiesiny ścierniej na efekty docierania jednotarczowego powierzchni płaskich elementów ceramicznych. W pierwszej części pracy opisano proces docierania elementów na docierarkach jednotarczowych. Opisano rolę ziaren ściernych i mechanizm procesu docierania elementów ceramicznych  $Al_2O_3$  na docierarkach jednotarczowych. Dokonano również przeglądu materiałów ściernych stosowanych w przemyśle. Przeanalizowano różne metody dawkowania substancji ściernych. Przeprowadzono przegląd dostępnych na rynku nowoczesnych urządzeń do docierania jednotarczowego. Dokonano również analizy literatury i opracowań branżowych. W kolejnej części rozprawy opracowano model matematyczny opisujący wpływ wybranych czynników wpływających na ubytek masowy i ubytek liniowy docieranych elementów ceramicznych. W dalszej części pracy opisano stanowisko badawcze z wymuszonym systemem dawkowania zawiesiny ścierniej. Następnie otrzymane wyniki empiryczne poddano analizie statystycznej. Określono poziom istotności statystycznej wybranych czynników. Przeanalizowano na podstawie modelu matematycznego przebieg zmienności równania regresji ubytku liniowego. Na tej podstawie określono wartości minimalne i maksymalne dawkowania i przeprowadzono optymalizację. Określono wartość parametrów wejściowych, które zapewnią optymalny ubytek liniowy dla zadanych czynników wejściowych. W pracy przeprowadzono również analizę korelacji wybranych parametrów chropowatości powierzchni po docieraniu.





**Summary of PhD dissertation in English:** The subject of the doctoral dissertation is an analysis of the effect of the dosage parameters of forced abrasive suspension on the effects of lapping the single-disc surface of flat ceramic elements. The first part of the work describes the process of lapping elements on single-sided reaches. Describes the role of abrasive grains and the mechanism of the process of lapping ceramic elements  $AL_2O_3$  on single-disc reachers. A review of abrasives used in industry has also been carried out. Various dosage methods of abrasives have been analysed. A review of the modern single-point running-in equipment available on the market was carried out. Literature and industry studies were also analysed. In the next part of the dissertation, a mathematical model was developed describing the impact of selected factors affecting the mass loss and linear loss of the lapped ceramic elements. The test bench with forced abrasive suspension dosing system is described later in the work. The empirical results obtained were then statistically analysed. The level of statistical significance of the selected factors has been determined. Based on a mathematical model, the variability of the linear cavity regression equation was analysed. On this basis, minimum and maximum dosage values were established and optimised. The value of the input parameters is specified to ensure optimal linear loss for the input factors specified. The work also analysed the correlation of selected surface roughness parameters after lapping.

\*) delete where appropriate.

\*\*\*) applies to doctoral dissertations written in other languages, than Polish or English.



### *Podziękowanie*

*W tym miejscu chciałem serdecznie podziękować promotorowi pracy prof. dr hab. inż. Adamowi Barylskiemu za pomoc w wyznaczaniu kierunków badań. Pan profesor z ogromną życzliwością poświęcał czas na konsultacje problemów naukowych, udzielał cennych rad, a także bardzo wspierał w rozwoju naukowym.*

*Chciałbym również podziękować nieżyjącej już dziś mojej ukochanej mamie, która mnie mocno wspierała. Podziękowania należą się również mojemu tacie, bratu i Bożence. Są to osoby mi najbliższe, które przyczyniły się również do powstania tej pracy.*

*Maciej Gniot*

## SPIS TREŚCI

Spis treści.....	10
Wykaz ważniejszych oznaczeń.....	13
1. Wstęp .....	15
2. Analiza stanu wiedzy tematu na podstawie literatury .....	21
2.1. Standardowy układ wykonawczy docierarki jednotarczowej.....	22
2.1.1. Kinematyka docierania powierzchni płaskich .....	22
2.1.2. Prędkość docierania w układzie wykonawczym standardowej docierarki jednotarczowej .....	25
2.1.3. Przyspieszenia w układzie wykonawczym docierarki jednotarczowej.....	26
2.1.4. Przegląd docierarek jednotarczowych .....	27
2.1.5. Sposoby dawkowania zawiesiny ścierniej podczas docierania powierzchni płaskich .....	31
2.2. Wpływ dawkowania zawiesiny ścierniej na przebieg i efekty docierania.....	34
2.3. Zasady programowania badań doświadczalnych .....	34
2.3.1. Programy stosowane do badań doświadczalnych w technologii maszyn .	35
2.3.2. Kryteria oceny programów badawczych .....	38
2.3.3. Programy statyczne selekcyjne wieloczynnikowe .....	39
2.4. Wnioski ogólne i uzasadnienie podjęcia tematu rozprawy.....	46
3. Cele pracy i hipotezy badawcze.....	48
3.1. Cele pracy .....	48
3.2. Hipotezy badawcze .....	48
4. Ogólny schemat realizacji badań własnych .....	49
4.1. Zakres rozprawy.....	49
5. Przygotowanie badań eksperymentalnych .....	50
5.1. Konwencjonalny system dozowania zawiesiny ścierniej docierarki Abralap 380 ....	50
5.2. Stanowisko badawcze z wymuszonym układem dozowania zawiesiny ścierniej - wersja I .....	52
5.2.1. Koncepcja układu.....	52
5.2.2. Opis budowy stanowiska .....	53
5.2.3. Wyniki prób docierania i ich ocena .....	54
5.3. Stanowisko badawcze z wymuszonym układem dozowania zawiesiny ścierniej - wersja ostateczna.....	56



5.3.1. Opis konstrukcji stanowiska .....	57
5.3.2. Wyniki i analiza badań wstępnych .....	62
5.4. Charakterystyka docieranych próbek .....	68
5.5. Przygotowanie zawiesiny ścierniej.....	70
5.5. Sposób oczyszczania powierzchni próbek po docieraniu.....	71
5. 6. Metody badań i aparatura .....	71
5.6.1 Sposób oceny kształtu ziaren ściernych .....	71
5.6.2. Sposób oceny lepkości nośnika płynnego ziaren ściernych .....	72
5.6.3. Sposób oceny ubytku masowego próbek .....	72
5.6.4. Sposób oceny ubytku liniowego próbek.....	73
5.6.5. Sposoby oceny chropowatości powierzchni próbek po docieraniu .....	74
5.7. Metodyka planowania doświadczeń.....	75
5.7.1. Model badań zasadniczych.....	75
5.7.2. Wybór planu eksperymentów.....	75
5.7.3. Opis ogólny wnioskowania statystycznego.....	78
6. Zasadnicze badania eksperymentalne docierania przy wymuszonym dawkowaniu zawiesiny ścierniej płaskich elementów ceramicznych .....	81
6.1. Ogólny program badań.....	81
6. 2. Wyniki badań wpływu warunków dawkowania zawiesiny ścierniej na ubytek liniowy docieranych elementów .....	84
6.3. Wyniki badań chropowatości powierzchni po docieraniu .....	95
6.3.1. Badania wpływu warunków dawkowania zawiesiny ścierniej na parametr chropowatości $R_v$ .....	95
6.3.2. Badania wpływu warunków dawkowania zawiesiny ścierniej na parametr chropowatości $R_p$ .....	104
6.3.3. Badania wpływu warunków dawkowania zawiesiny ścierniej na parametr chropowatości $R_z$ .....	108
6.3.4. Badania wpływu warunków dawkowania zawiesiny ścierniej na korelacje podstawowych parametrów struktury geometrycznej powierzchni po docieraniu .....	117
7. Badania uzupełniające .....	138
7.1. Wpływ lepkości mieszaniny składników płynnych w zawieszynie ścierniej na kinematykę docierania.....	138
7.2. Wpływ rozmieszczenia elementów docieranych w separatorze na kinematykę docierania.....	149

7.3 .Wpływ prędkości obrotowej docieraka i separatora na kinematykę docierania...	162
7.4. Wpływ rozmieszczenia losowego elementów docieranych w separatorze na kinematykę docierania.....	168
7.5. Wpływ podstawowych warunków dawkowania wymuszonego zawiesiny ścierniej na ubytek masowy docieranych elementów ceramicznych .....	175
7.6. Wpływ sposobu dawkowania na zużycie zawiesiny ścierniej .....	184
8. Podsumowanie i wnioski końcowe.....	185
8.1. Wnioski poznawcze .....	186
8.2. Wnioski o charakterze użytkowym.....	188
8.3. Proponowane kierunki dalszych badań.....	189
Literatura .....	190
Wykaz rysunków.....	196
Wykaz tabel .....	202

## WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

p - nacisk jednostkowy [MPa]

A - pole powierzchni próbek wykonanych z ceramiki  $Al_2O_3$  [mm<sup>2</sup>]

T<sub>cb</sub> - czas jednej próby [min]

K - udział wagowy ziaren ściernych w zawiesinie [%]

V<sub>s</sub> - dawka zawiesiny ścierniej [ml/20 min]

L<sub>e</sub> - lepkość nośnika płynnego ziaren ściernych [mPa·s]

U<sub>m</sub> - ubytek masowy próbek [g]

U<sub>l</sub> - ubytek liniowy próbek [μm]

C<sub>D1</sub>, C<sub>D2</sub> - warunki stałe procesu docierania

U<sub>D1</sub>, U<sub>D1</sub> - zakłócenia podczas procesu docierania

R<sub>a</sub> - średnie arytmetyczne odchylenie profilu

R<sub>q</sub> - średnie kwadratowe odchylenie profilu

R<sub>p</sub> - wysokość najwyższego wzniesienia profilu

R<sub>t</sub> - całkowita wysokość profilu (między szczytem najwyższego wierzchołka a najniższym zagłębieniem)

R<sub>z</sub> - największa wysokość profilu

R<sub>sk</sub> - współczynnik asymetrii (skośność profilu)

R<sub>ku</sub> - współczynnik spłaszczenia (skupienia) – kurtoza

R<sub>sm</sub> - średni odstęp pomiędzy wzniesieniami profilu (średnia szerokość rowków profilu)

S<sub>a</sub> - średnie arytmetyczne odchylenie wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia

S<sub>q</sub> - średnie kwadratowe odchylenie wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia

S<sub>p</sub> - maksymalna wysokość wzniesienia powierzchni

S<sub>v</sub> - maksymalna głębokość wgłębienia powierzchni

S<sub>sk</sub> - współczynnik skośności rozkładu wysokości topografii (rzędnych) powierzchni

S<sub>ku</sub> - współczynnik skupienia rozkładu wysokości topografii (rzędnych) powierzchni

S<sub>z</sub> - dziesięciopunktowa wysokość nierówności powierzchni

S<sub>t</sub> - wysokość nierówności

S<sub>mnr</sub> - średnia objętość materiału

$S_{mvr}$  - średnia objętość pustek

$R$  - współczynnik korelacji wielokrotnej

$R^2$  – współczynnik determinacji

$SS$  – (suma kwadratów)

$MS$  – (średnia kwadratów)

$df$  – stopnie swobody

$s$  – błąd standardowy regresji

$F$  – istotność  $F$

$p$ -value – poziom istotności testu

$t$  – Studenta – wartość statystyki

## 1. WSTĘP

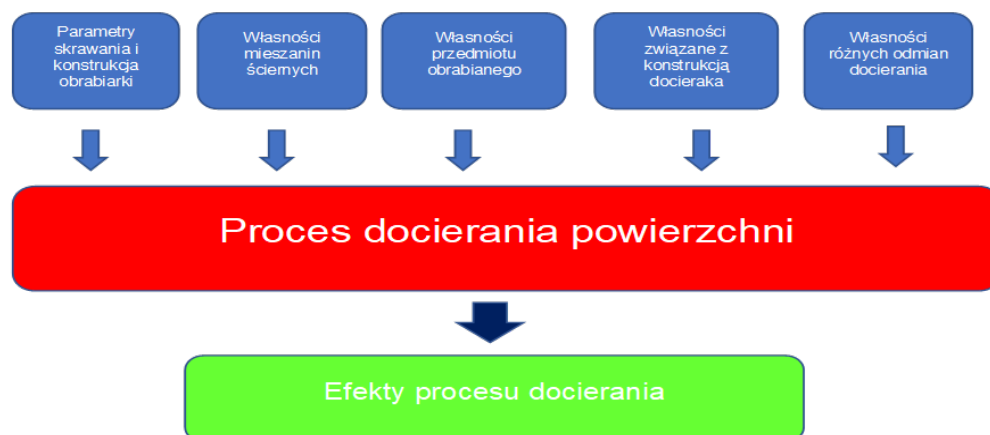
We współczesnych procesach wytwarzania części maszyn duży nacisk stawia się na stosowanie obróbki bardzo dokładnej, która zapewnia wysoką jakość powierzchni elementów obrabianych. Tak wytwarzane części maszyn pracują często w bardzo trudnych warunkach. Obróbka stosowana jest we wszystkich głównych gałęziach przemysłu, do których można zaliczyć przemysł lotniczy, samochodowy, kolejowy i okrętowy. Jedną z powszechnych metod stosowanych do obróbki wykańczającej jest docieranie [11], [27], [89], [90], [91], [77],[50], [30],[4].

Struktura stereometryczna powierzchni po docieraniu jest bardzo korzystna przy połączeniach ruchowych ze względu na dużą nośność i szczelność [8]. Jest wiele czynników wpływających na proces docierania, co zostało przedstawione na rys. 1.1. Istnieją również różne metody realizacji tego procesu, co przedstawiono na rys. 1.2 [12], [55], [33], [39].

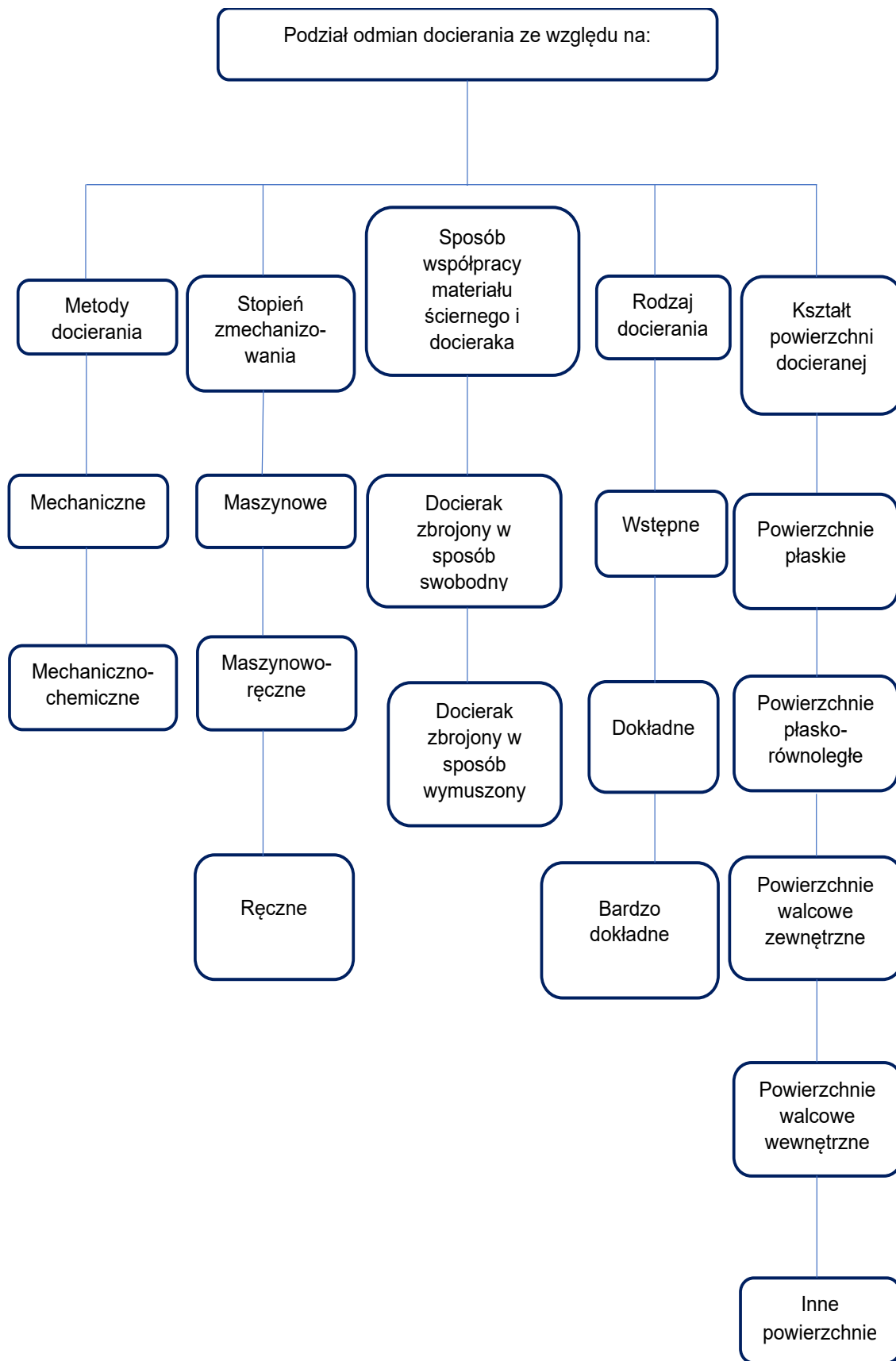
Możemy klasyfikować odmiany docierania według następujących kryteriów: metoda docierania, stopień zmechanizowania, sposób współpracy materiału ściernego i docieraka, rodzaj docierania, rodzaj kształtu powierzchni poddanych docieraniu. Ważniejsze czynniki dotyczące docieraka podano na rys. 1.3. Zalicza się do nich czynniki związane z jakością powierzchni docieraka (opisanych odchyłkami niepłaskości powierzchni roboczej i chropowatością powierzchni) oraz z konstrukcją docieraka (jego wymiarami, kształtem, sposobem rowkowania). Podstawowe znaczenie ma też rodzaj (gatunek) materiału, z którego wykonany jest docierak tarczowy.

Na rys. 1.4 przedstawiono czynniki dotyczące konstrukcji przedmiotu obrabianego (to jest jego zarysu, wymiarów i kształtu). Istotny jest też wpływ wstępnej jakości technologicznej obrabianych przedmiotów na efekt końcowy docierania [25], [19], [31]. W literaturze opisano charakterystyki warstwy wierzchniej docieranych materiałów [76], [3], [60].

Czynniki mające wpływ na przebieg procesu docierania, a dotyczące mieszanki ściernej, przedstawiono na rys. 1.5. W szczególności dotyczy to wpływu sposobu dawkowania i rodzaju ścierniwa na przebieg procesu. Istotne są też czynniki związane z właściwościami reologicznymi, chemicznymi i fizycznymi substancji ściernych. Kolejne czynniki determinujące proces docierania, to warunki skrawania (głównie nacisk jednostkowy) i kinematyka obrabiarki (rys. 1.6).

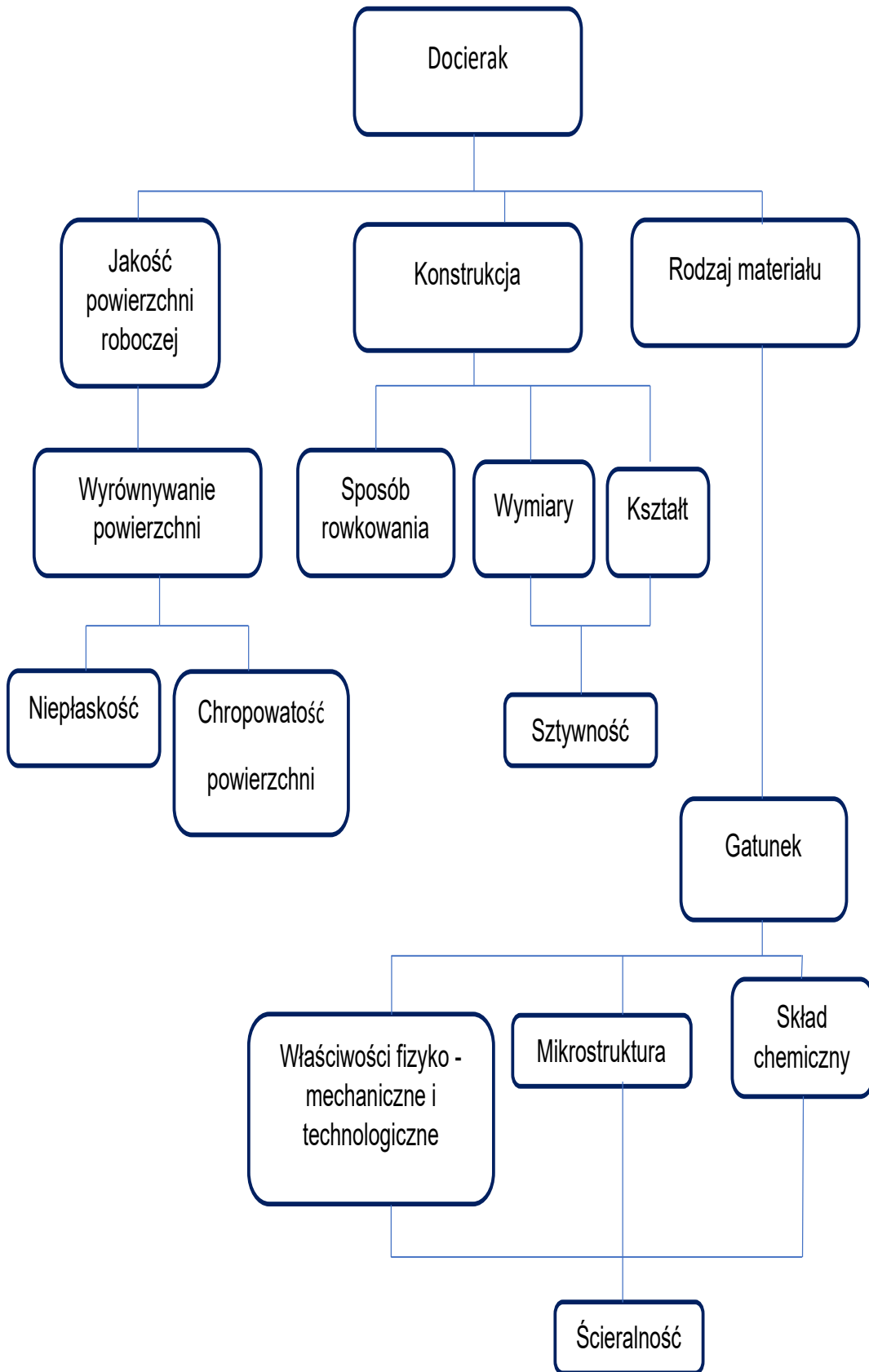


Rys. 1.1. Czynniki wpływające na proces docierania

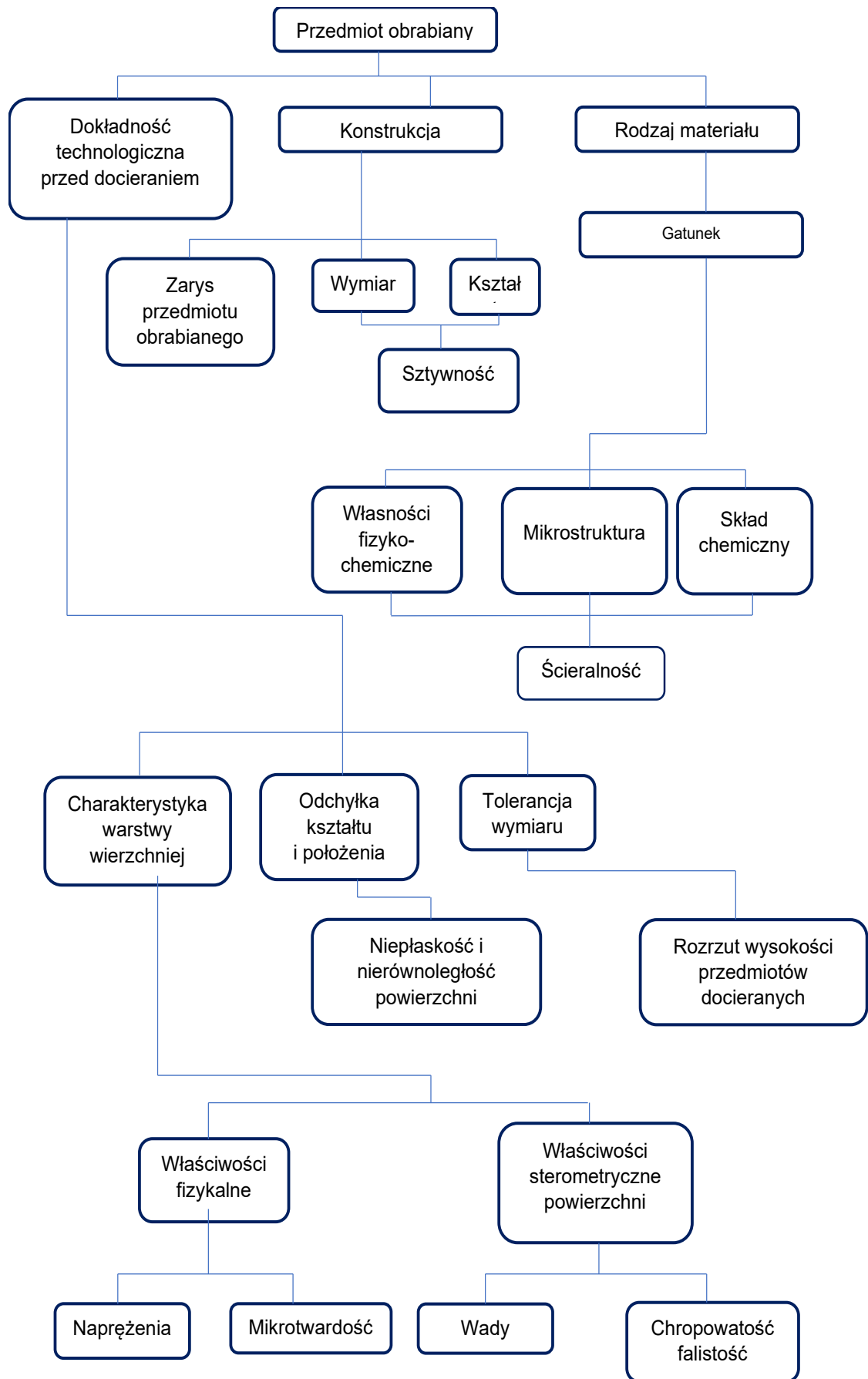


Rys. 1.2. Ogólny podział odmian docierania

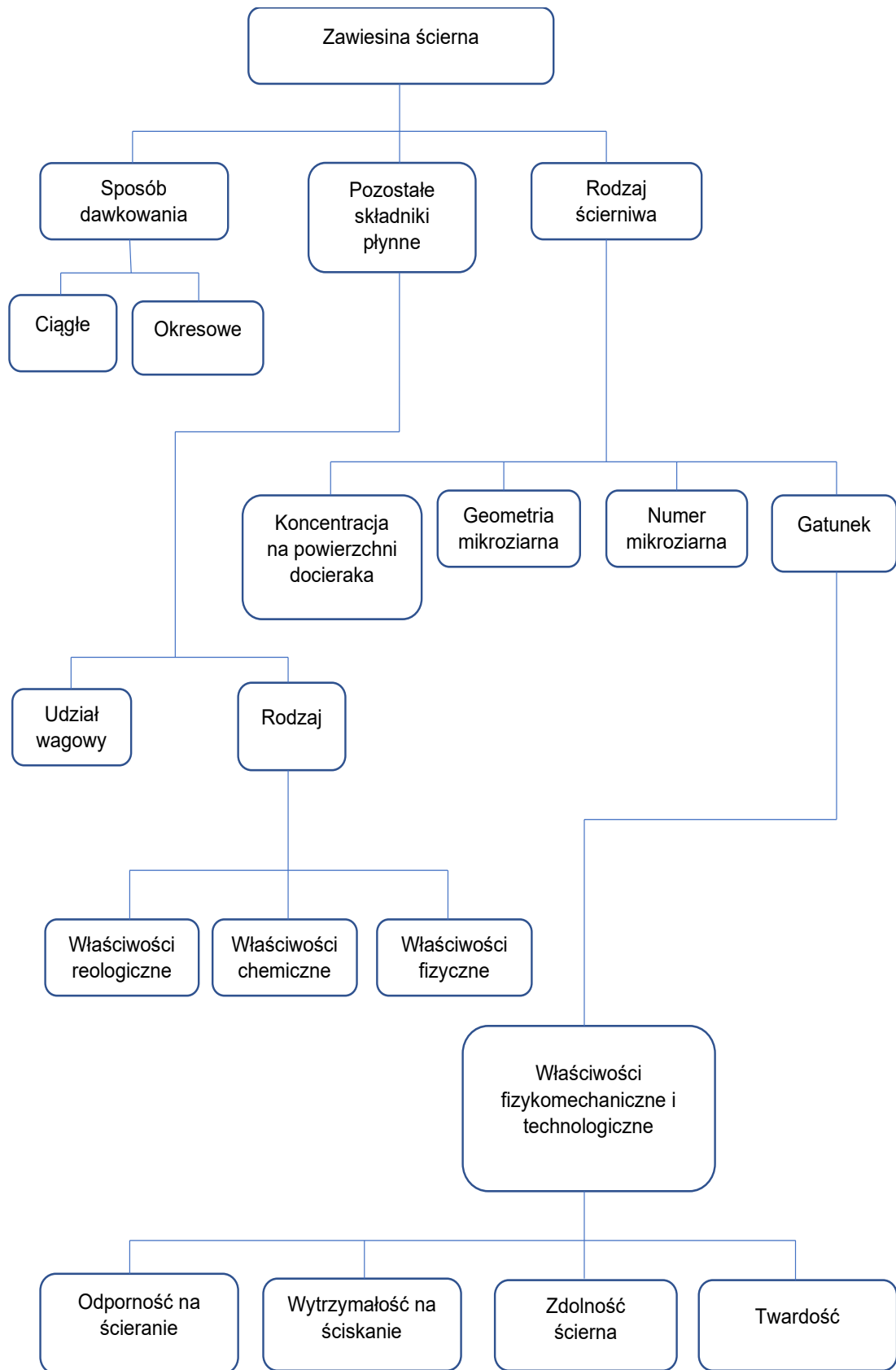




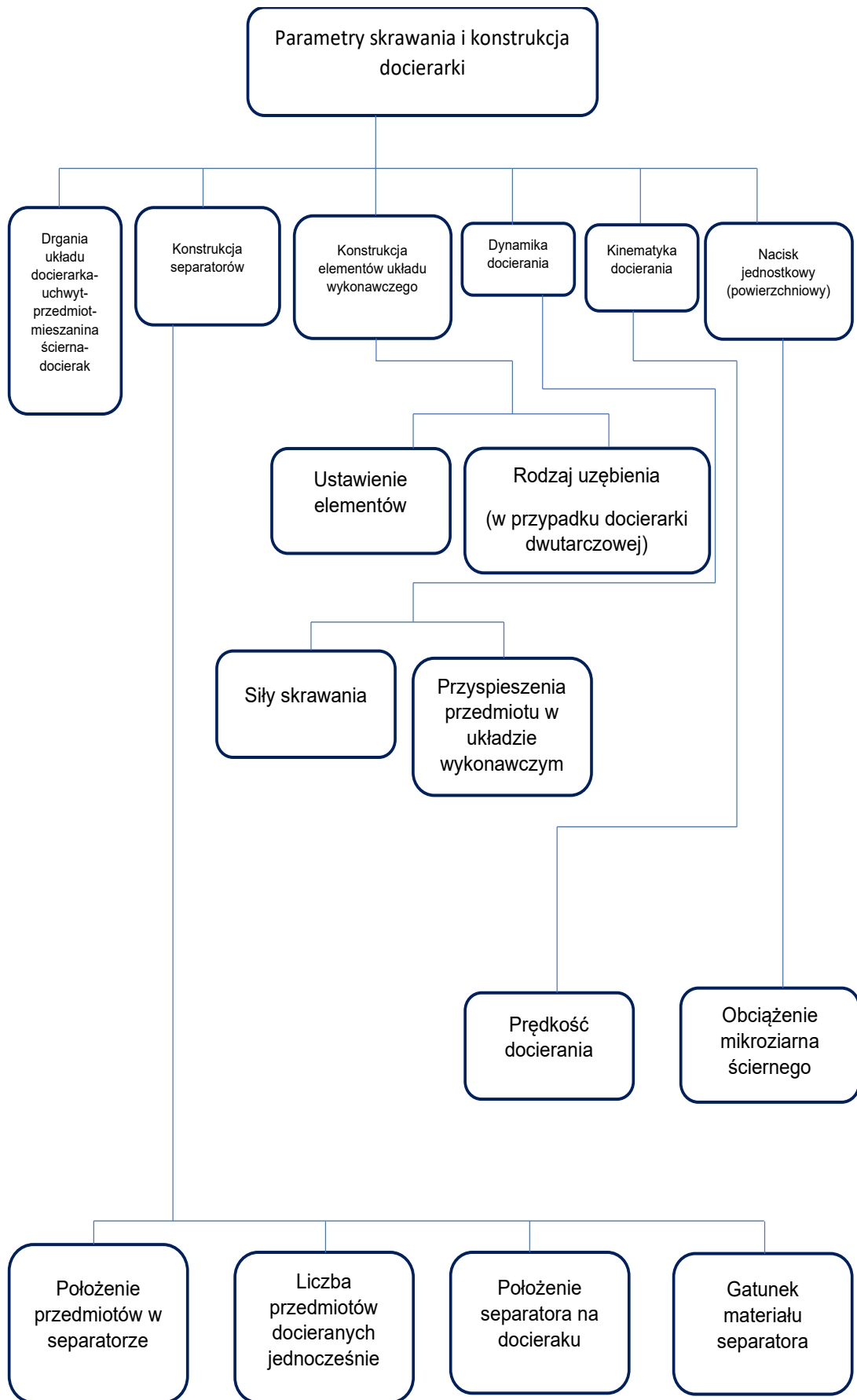
Rys. 1.3. Ważniejsze czynniki dotyczące metalowego docieraka tarczowego



Rys. 1.4. Ważniejsze czynniki dotyczące przedmiotu obrabianego



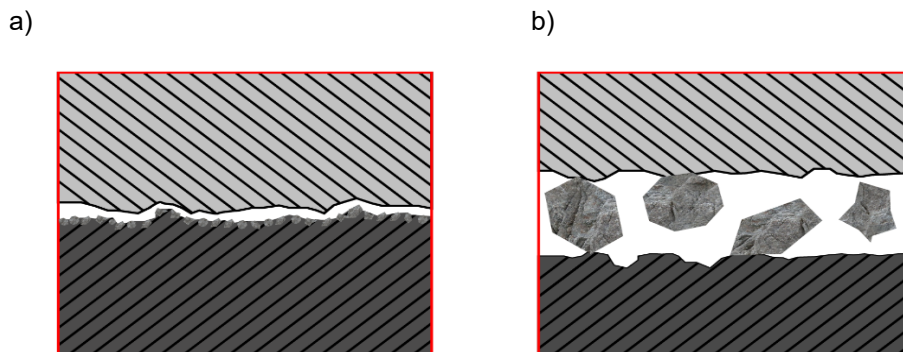
Rys. 1.5. Ważniejsze czynniki dotyczące zawiesiny ścierniej



Rys. 1.6. Ważniejsze czynniki dotyczące warunków docierania i układu wymuszonego dawkowania

## 2. ANALIZA STANU WIEDZY TEMATU NA PODSTAWIE LITERATURY

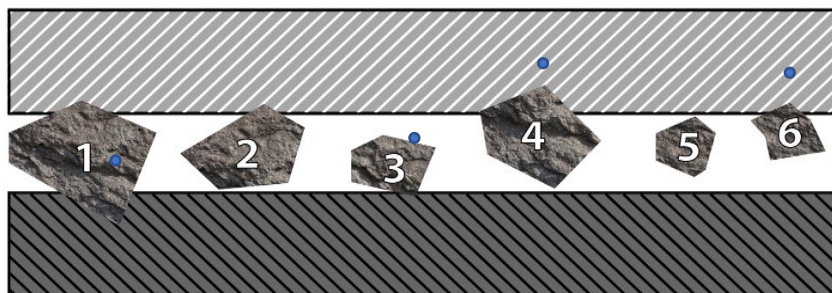
Docieranie powierzchni jest niezbędnym elementem procesu obróbki części maszyn, którym stawia się wysokie wymagania w zakresie jakości powierzchni. Docieranie jest obróbką wykańczającą, która jest stosowana na ostatnim etapie produkcji części maszyn. Poprzedzające zabiegi technologiczne nie pozwalają na osiągnięcie tak wysokich parametrów jakości powierzchni [92]. Proces docierania powierzchni odbywa się przy pomocy mikroziaren ściernych [77], [4], [50]. Na rys. 2.1 przedstawiono ziarna ścierna zakotwione w docieraku, gdzie ziarna ścierna mogą toczyć się i ślizgać pomiędzy przedmiotem obrabianym a powierzchnią roboczą docieraka. Zjawiska te mają duży wpływ na wydajność procesu [60], [75], [61], [59].



Rys. 2.1. Docieranie: a) dwuelementowe, b) trzeelementowe

Docieranie odbywa się wskutek bruzdowania, mikroskrawania i rysowania. Pożądane mikroskrawanie powoduje powstanie wióra o objętości równej objętości rysy, ale w praktyce jest to trudne do osiągnięcia [21], [57], [62], [63]. Wskutek działania skoncentrowanych obciążeń wywieranych przez ziarna ścierna może dochodzić do mikropęknięć w obrabianym przedmiocie. Podczas realizacji procesu docierania mikroziarna ścierna przyjmują różne położenia w strefie obróbki [29]. Na rys. 2.2 przedstawiono schemat ilustrujący różne położenie ziaren ściernych w strefie obróbki [80], [40], [58], [23], [86].

Przedmiot obrabiany

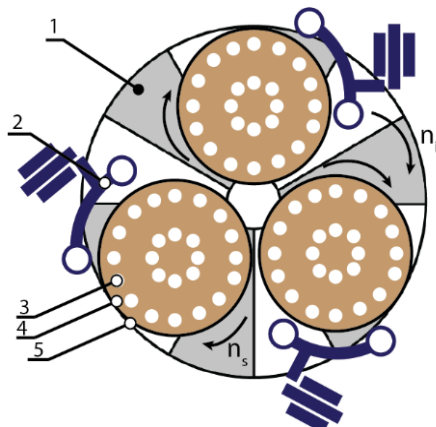


Docierak

Rys. 2.2. Położenie mikroziaren ściernych w strefie obróbki (1-mikroziarna wgniezione w powierzchnię docieraka, 2-mikroziarna toczące się, 3- mikroziarna wgniezione w docierak, nie oddziałujące na przedmiot obrabiany, 4-mikroziarna wgniezione w powierzchnię docieraną, 5-mikroziarna bierne, 6-mikroziarna wgniezione w powierzchnię docieraną)

## 2.1. Standardowy układ wykonawczy docierarki jednotarczowej

Docieranie powierzchni płaskich najczęściej realizowane jest na docierarkach jednotarczowych ze standardowym układem kinematycznym, wyposażonym w jeden lub kilka pierścieni prowadzących (rys. 2.3) [13].

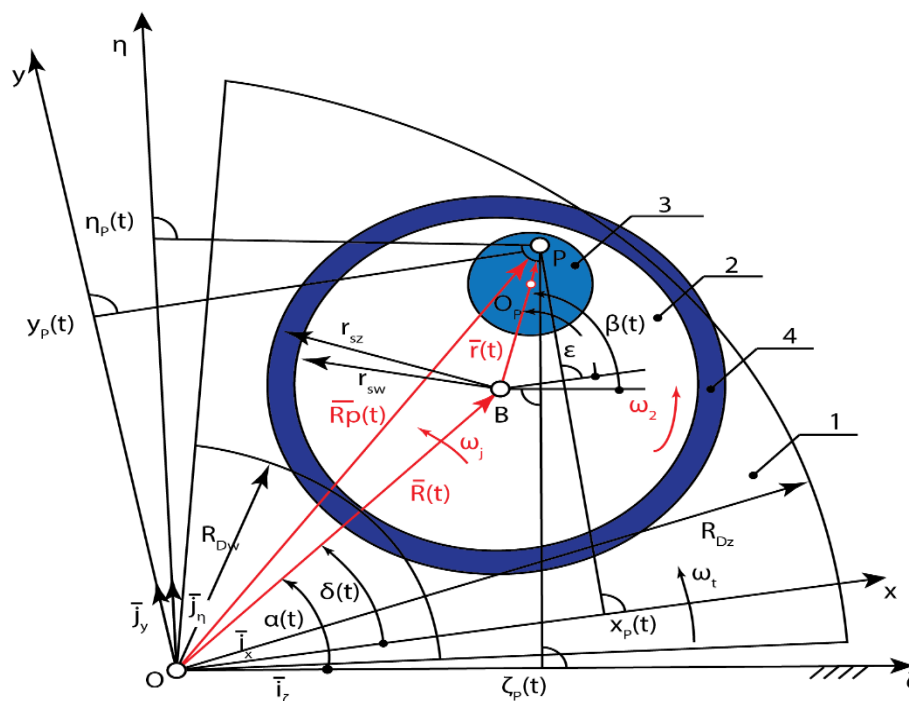


Rys. 2.3. Układ wykonawczy docierarki jednotarczowej [13]

W tym układzie na powierzchni tarczy docieraka (1) poruszają się pierścienie prowadzące (5) z prędkością obrotową  $n_s$ . Tarcza docierająca obraca się z prędkością  $n_t$  napędzając pierścienie, w których w sposób swobodny umieszczone są separatory (4), umożliwiając zwykle pomijany dodatkowy ruch przedmiotów obrabianych (3). Na przedmioty wywierane jest obciążenie poprzez podkładkę filcową. Pierścień prowadzący obraca się pod wpływem momentu siły tarcia (2) uchwyt prowadzący separator. Jego prędkość zależy od prędkości obrotowej docieraka, warunków tarcia, obciążenia, oraz od położenia separatora względem środka docieraka [22]. Realizacja prawidłowego przebiegu obróbki wymaga odpowiedniej wartości nacisku jednostkowego na obrabiane elementy oraz dawki zawiesiny ścierniej, która najczęściej w praktyce podawana jest z dużym nadmiarem.

### 2.1.1. Kinematyka docierania powierzchni płaskich

Istotny wpływ na jakość procesu docierania elementów ma kinematyka docierania [53], [73], [82], [52], [66], [9]. W celu opisu kinematyki należy wyznaczyć położenie dowolnego punktu  $P$  na polu powierzchni przedmiotu obrabianego, określonego za pomocą wektora promienia wodzącego: w układzie  $\overline{R}_P(t)$  w dwóch układach: w układzie absolutnym  $\zeta-\eta$  i układzie względnym  $x-y$ , związanym z obracającym się docierakiem (rys. 2.4). Ruch punktu  $P$  można opisać równaniami zawartymi w tabeli 2.1 [13].



Rys. 2.4. Układ kinematyczny docierarki jednotarczowej: 1-docierak, 2-separator, 3-przedmiot obrabiany n – pierścieni prowadzących [13]

Tabela 2.1. Równanie ruchu dowolnego punktu P [13]

W układzie absolutnym $\zeta\eta$	W układzie względnym $x-y$
$\bar{R}_p(t) = \zeta_p(t)\bar{i}_\zeta + \eta_p(t)\bar{j}_\eta$ $\begin{bmatrix} \zeta_p(t) \\ \eta_p(t) \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} \cos\alpha \\ \sin\alpha \end{bmatrix} + r \begin{bmatrix} \cos\beta \\ \sin\beta \end{bmatrix}$ $\alpha(t) = \omega_j t$ $\beta(t) = \omega_2 t$	$\bar{R}_p(t) = x_p(t)\bar{i}_x + y_p(t)\bar{j}_y$ $\begin{bmatrix} x_p(t) \\ y_p(t) \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} \cos\delta \\ \sin\delta \end{bmatrix} + r \begin{bmatrix} \cos\varepsilon \\ \sin\varepsilon \end{bmatrix}$ $\delta(t) = (\omega_j - \omega_t)t$ $\varepsilon(t) = (\omega_2 - \omega_t)t$
<p>t - dowolna chwila docierania,  <math>\omega_t</math> - prędkość kątowna docieraka,  <math>\omega_2</math> - prędkość kątowna pierścienia prowadzącego,  <math>\omega_j</math> - prędkość kątowna wyobraźnianego jarzma (<math>\omega_j = 0</math>)</p>	

W procesie docierania ważne jest położenie przedmiotu względem tarczy docierającej (w układzie  $x-y$ ). Współrzędne  $x_p$  i  $y_p$  są ciągłymi funkcjami czasu i można je opisać równaniami skończonymi ruchu:

$$x_p(t) = R \cdot \cos(\omega_j \cdot t - \omega_t \cdot t) + r \cdot \cos(\omega_2 \cdot t - \omega_t \cdot t) \quad (2.1)$$

$$y_p(t) = R \cdot \sin(\omega_j \cdot t - \omega_t \cdot t) + r \cdot \sin(\omega_2 \cdot t - \omega_t \cdot t) \quad (2.2)$$

Zależności te przedstawiają parametryczne równania toru punktu  $P$ , gdzie parametrem jest czas  $t$  [13].

Prędkość względna w układzie przedmiot-docierak wynika z różnicy prędkości kątowej pierścienia prowadzącego i prędkości kątowej tarczy docierającej. Można wprowadzić dodatkowy parametr  $k$ , w postaci:

$$k = \frac{\omega_2 - \omega_t}{\omega_j - \omega_t} \quad (2.3)$$

przy czym w standardowym układzie kinematycznym docierarki jednotarczowej  $\omega_j = 0$ , a więc

$$k = 1 - \frac{\omega_2}{\omega_t} \quad (2.4)$$

Przy takich założeniach równania ruchu przyjmują postać:

$$x_p(t) = R \cdot \cos(-\omega_t \cdot t) + r \cdot \cos(-k \cdot \omega_t \cdot t) \quad (2.5)$$

$$y_p(t) = R \cdot \sin(-\omega_t \cdot t) + r \cdot \sin(-k \cdot \omega_t \cdot t) \quad (2.6)$$

Wprowadzając dodatkowy parametr kinematyczny:

$$k' = \frac{\omega_2}{\omega_t} \quad (2.7)$$

można określić warunek występowania trajektorii w kształcie:

epicykloidy  $k' < 0$  (2.8)

hipocykloidy  $k' > 1$  (2.9)

oraz pericykloidy  $0 < k' < 1$  (2.10)

Zakreślane trajektorie są krzywymi cyklicznymi. Czas jednego cyklu ruchu  $T_z$  wyznaczany jest z warunku równej długości promienia wodzącego  $\overline{R}_p(t)$ . Jest to czas, po którym długość wektora  $\overline{R}_p(t)$  równa jest długości wyjściowej dla  $t = 0$ :

$$|\overline{R}_p(t = T_z)| = |\overline{R}_p(t = 0)| \quad (2.11)$$

$$|\overline{R}_p(t)| = \sqrt{x_p t^2 + y_p t^2} \quad (2.12)$$

Wykorzystując równania ruchu (2.1) i (2.2) po przekształceniu otrzymujemy:

$$|\overline{R}_p(t = T_z)| = \sqrt{R^2 + r^2 + 2Rr \cos(-\omega T_z)} \quad (2.13)$$

$$|\overline{R}_p(t = 0)| = R + r \quad (2.14)$$

Równość (2.11) jest spełniona dla:

$$T_z = \frac{2\pi}{|\omega_2|} \quad (2.15)$$



### 2.1.2. Prędkość docierania w układzie wykonawczym standardowej docierarki jednotarczowej

Wektor prędkości chwilowej dowolnego punktu  $P$  na powierzchni przedmiotu docieranego jest pochodną względem czasu wektora - promienia wodzącego  $\overline{R}_P(t)$  tego punktu [13]:

$$\overline{v}_P(t) = \frac{d\overline{R}_P(t)}{dt} = \overline{i}_x \frac{dx_p(t)}{dt} + \overline{j}_y \frac{dy_p(t)}{dt} \overline{u}_x + \overline{v}_y \quad (2.16)$$

Wartość chwilowej prędkości punktu  $P$  wyraża się wzorem:

$$\overline{v}_P(t) = |\overline{v}_P(t)| = \sqrt{\dot{x}_p(t)^2 + \dot{y}_p(t)^2} \quad (2.17)$$

Dokonując przekształcenia otrzymujemy wzór na prędkość chwilową:

$$v_p(t) = \sqrt{\omega_t^2 R^2 + (\omega_2 - \omega_t)^2 r^2 - 2\omega_t(\omega_2 - \omega_t)rR\cos(-\omega_2 t)} \quad (2.18)$$

Po podstawieniu parametru  $k$ , wzór (2.18) przyjmuje postać:

$$v_p(t) = \sqrt{\omega_t R^2 + k^2 r^2 + 2rRk\cos(-\omega_2 t)} \quad (2.19)$$

Punkty powierzchni obrabianej zakreślają trajektorie ruchu, których długości zależą od położenia przedmiotu w separatorze. Długość trajektorii przebytą w czasie  $t = t_2 - t_1$  można obliczyć ze wzoru:

$$s = \int_{t_1}^{t_2} v_p(t) dt \quad (2.20)$$

Średnia prędkość docierania  $v_{\dot{s}r}$  dowolnego punktu  $P$  na powierzchni przedmiotu docieranego określa wzór:

$$v_{\dot{s}r} = \frac{1}{T_z} \int_0^{T_z} v_p(t) dt \quad (2.21)$$

### 2.1.3. Przyspieszenia w układzie wykonawczym docierarki jednotarczowej

Przyspieszenie chwilowe dowolnego punktu  $P$  leżącego na powierzchni przedmiotu obrobionego jest równe pierwszej pochodnej wektora prędkości lub drugiej pochodnej wektora promienia wodzącego  $\overline{R}_P(t)$  względem czasu [13]:

$$\overline{a}_P(t) = \frac{d^2\overline{R}_P(t)}{dt^2} = \frac{d\overline{v}}{dt} = \overline{i}_x \frac{d^2x_p(t)}{dt^2} + \overline{j}_y \frac{d^2y_p(t)}{dt^2} \overline{a}_x + \overline{a}_y \quad (2.22)$$

Wartość przyspieszenia punktu  $P$  wyrażona jest wzorem:

$$\overline{a}_P(t) = |\overline{a}_P(t)| = \sqrt{\ddot{x}_p(t)^2 + \ddot{y}_p(t)^2} \quad (2.23)$$

Dokonując odpowiedniego przekształcenia otrzymujemy wzór na wartość chwilowego przyspieszenia:

$$a_p(t) = \sqrt{\omega_t^4 R^2 + (\omega_2 - \omega_t)^4 r^2 - 2\omega_t^2 (\omega_2 - \omega_t)^2 r R \cos(-\omega_2 t)} \quad (2.24)$$

Podstawiając parametr  $k$ , wzór (2.24) przyjmuje postać:

$$a_p(t) = \omega_t^2 \sqrt{R^2 + k^4 r^2 + 2r R k^2 \cos(-\omega_2 t)} \quad (2.25)$$

Na przebieg procesu docierania ma wpływ również przyspieszenie styczne  $\overline{a}_t$ , które jest składową przyspieszenia całkowitego  $\overline{a}_p$  w kierunku stycznym do toru ruchu:

$$\overline{a}_t = \frac{dv}{dt} \overline{\tau} \quad (2.26)$$

gdzie:

$\overline{\tau}$  – jednostkowy wektor styczny do toru ruchu.

Wartość przyspieszenia stycznego można obliczyć korzystając ze wzoru:

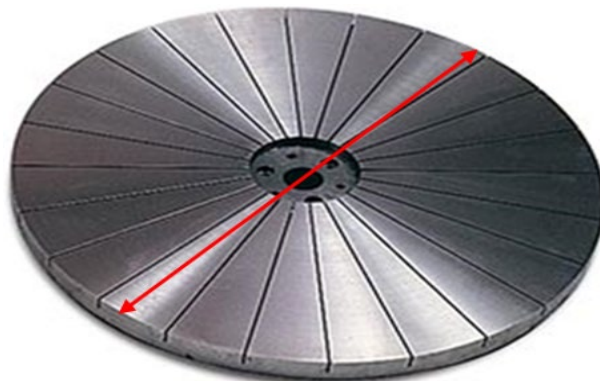
$$a_{tp} = \frac{dv_p(t)}{dt} = \frac{r R \omega_t \omega_2 (\omega_2 - \omega_t) \sin(\omega_2 t)}{\sqrt{\omega_t^2 R^2 + (\omega_2 - \omega_t)^2 r^2 - 2\omega_t (\omega_2 - \omega_t) r R \cos(-\omega_2 t)}} \quad (2.27)$$

Po podstawieniu parametru  $k$ , wzór (2.27) przyjmuje postać:

$$a_{tp} = - \frac{r R \omega_t \omega_2 k \sin(\omega_2 t)}{R^2 + k^2 r^2 + 2k r R \cos(-\omega_2 t)} \quad (2.28)$$

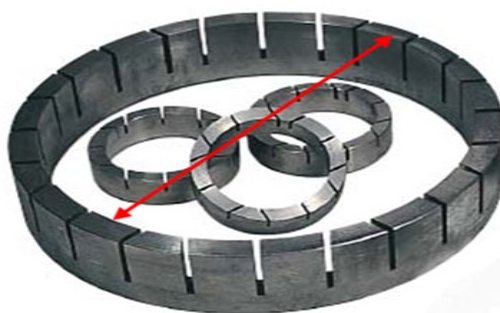
#### 2.1.4. Przegląd docierarek jednotarczowych

Obecnie istnieje wielu producentów obrabiarek jednotarczowych przeznaczonych do docierania powierzchni płaskich. Wiodący producenci to firmy: Kemet, Lapmaster Wolters, Hamail, czy też Speedfam. Konstrukcje obrabiarek służących do jednotarczowego docierania są bardzo podobne. Wielkość obrabiarki jest zdeterminowana średnicą tarczy docierającej [93]. Tarcze są wytwarzane w różnych rozmiarach i konstrukcji (np. rowkowana, pełna lub segmentowa) [54]. Przykład tarczy rowkowanej przedstawiono na rys. 2.5.



Rys. 2.5. Rowkowana tarcza docierająca o średnicy 3800 mm [93]

W docierarkach jednotarczowych bardzo ważnymi elementami są pierścienie prowadzące, wewnątrz których w separatorach umieszcza się elementy docierane. Liczba i rozmiar pierścieni prowadzących zależy od średnicy tarczy obrabiarki. Przykłady pierścieni prowadzących przedstawiono na rys. 2.6.



Rys. 2.6. Pierścienie prowadzące o średnicy wewnętrznej 140 mm i 578 mm [93]

Wielkość tarczy docierającej oraz liczba pierścieni prowadzących ma wpływ na liczbę elementów, które można docierać jednocześnie. W tabeli 2.2 przedstawiono dane dotyczące liczby elementów, które mogą być umieszczone w pierścieniu prowadzącym, dla różnych modeli docierarek firmy Kemet. Są to przybliżone wartości liczby elementów obrabianych, bazując średnio na 60% wypełnieniu separatora. Tabela 2.3 przedstawia wymiary pierścieni prowadzących dla docierarek firmy Kemet [93].

**Tabela 2.2.** Liczba elementów, które mogą być umieszczone w pierścieniach prowadzących w docierarkach firmy Kemet [93]

Model	Liczba pier.	Średnica zewnętrzna elementów o zarysie kołowym [mm]																									
		6	7,5	9	10,5	12	13,5	15	18	22	26	30	34	38	42	46	50	54	60	70	80	90	100	110	120	130	140
15	3	275	175	118	86	60	50	40	27	18	12	10	8	6	5	4	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1
20	3	-	-	-	-	150	114	90	63	39	33	21	17	14	10	9	7	6	5	3	3	2	2	1	1	1	1
24	3	-	-	-	-	210	165	132	87	57	42	33	24	18	15	13	10	9	7	5	4	3	3	2	2	1	1
24	4	-	-	-	-	150	114	90	63	39	33	21	17	14	10	9	7	6	5	3	3	2	2	1	1	1	1
36	3	-	-	-	-	-	-	-	204	93	93	69	60	42	33	29	24	21	17	12	10	7	6	5	4	3	2
36	4	-	-	-	-	-	-	-	156	72	72	54	39	33	25	33	20	15	12	10	8	5	5	3	2	2	2
48	4	-	-	-	-	-	-	-	-	132	132	99	75	60	48	39	33	29	24	17	14	12	8	7	5	5	4
56	4	-	-	-	-	-	-	-	-	204	204	150	117	100	76	62	52	44	35	26	20	16	12	10	8	8	6
72	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	204	164	132	108	92	78	62	44	35	26	21	18	16	14	10
64	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	185	152	129	109	88	63	47	38	30	24	20	17	15

**Tabela 2.3.** Wymiary pierścieni prowadzących w docierarkach jednotarczowych firmy Kemet [93]

Pierścień prowadzący		Model docierarki									
		15	20	24	36	48	56	72	84	120	
<b>Średnica wewnętrzna [mm]</b>	3 pierścienie	140	191	248	368	505	578	-	-	-	
	4 pierścienie	-	-	209	322	432	530	692	813	1016	

Najczęstszym sposobem obciążania przedmiotów docieranych jest stosowanie obciążników w przestrzeni pierścienia prowadzącego. Innym sposobem może być docisk za pomocą siłownika pneumatycznego. W takim przypadku jest możliwa zmiana wartości docisku jednostkowego podczas realizacji procesu, na który ma wpływ operator. W obrabiarkach nowej generacji stosuje się wyposażenie, które pozwala monitorować temperaturę tarczy docierającej i utrzymać temperaturę docieraka na założonym poziomie, ponieważ obrabiarka jest wyposażona w układ chłodzenia. Na rys. 2.7 i 2.8 przedstawiono przykłady docierarek jednotarczowych firmy Kemet [93].



Rys. 2.7. Docierarka jednotarczowa Kemet - model 300 L [93]



Rys. 2.8. Docierarka firmy Kemet - model 72 [93]

Producenci realizują również zamówienia ze względu na indywidualne wymagania, stawiane przez zamawiających. Jest to ogólnoświatowy trend, którego celem jest personalizowanie urządzeń pod kątem wymagań stawianych przez klienta. Przy takim podejściu producentów zamawiający jest niejako współtwórcą urządzenia. To on decyduje o stopniu zautomatyzowania obrabiarki i jej ostatecznym wyposażeniu. Tego typu „spersonalizowane” urządzenia przedstawiono na rys. 2.9 i 2.10 [94].



Rys. 2.9. Docierarka jednotarczowa typu FLM firmy STAHLI [94]



Rys. 2.10. Docierarka dwutarczowa DLM 705 firmy STAHLI [94]

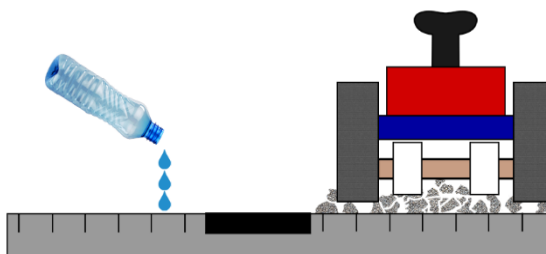
### 2.1.5. Sposoby dawkowania zawiesiny ścierniej podczas docierania powierzchni płaskich

Realizując proces docierania powierzchni płaskich należy sukcesywnie dawkować ziarna ściernie do strefy docierania [47]. Jest to możliwe, jeżeli ziarna ściernie zostaną umieszczone w nośniku [26], [86], [95], [14]. Najczęściej jako nośnik ziaren ściernych w przemyśle stosuje się olej maszynowy i naftę (np. kosmetyczną) lub wodę z odpowiednimi dodatkami. Występują również przygotowane przez odpowiednich producentów specjalistyczne zawiesiny ściernie. Przygotowane zawiesiny ułatwiają równomierne rozprowadzanie ziaren ściernych na powierzchni czynnej tarczy docierającej.

Wyróżniamy też inne odmiany zawiesin, które ze względu na swoją lepkość stanowią pastę ścierną. Pasta ścierna umożliwia także dobre rozprowadzanie ziaren ściernych na powierzchni czynnej narzędzia. Realizując proces docierania można wyróżnić dwa główne sposoby zbrojenia (aktywizacji ścierniwem docieraka):

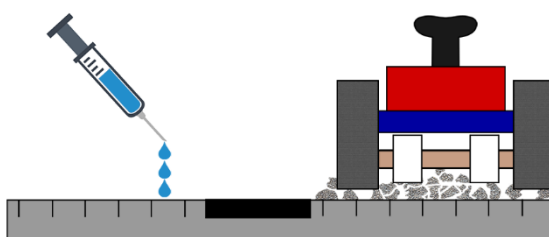
- zbrojenie w sposób swobodny,
- zbrojenie w sposób wymuszony.

Zbrojenie docieraka w sposób swobodny może odbywać się na kilka sposobów. Na rys. 2.11 przedstawiono nanoszenie ręczne, polegające na bezpośrednim podawaniu zawiesiny ścierniej na tarczę wprost z pojemnika z substancją. Sposób ten wymaga dużego doświadczenia od operatora obrabiarki, ponieważ w tej metodzie jest możliwe zbyt obfite i mało kontrolowane dawkowanie.

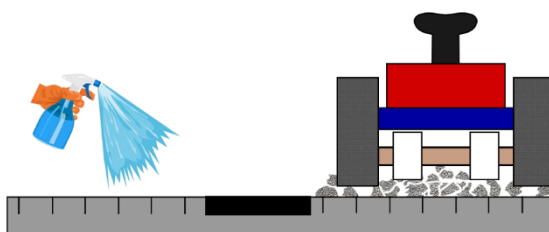


Rys. 2.11. Dawkowanie zawiesiny ścierniej dozowanej w sposób ręczny bezpośrednio z pojemnika

Innym sposobem dawkowania jest dostarczanie zawiesiny ścierniej na powierzchnię docieraka przy pomocy ręcznych aplikatorów. Przy takim sposobie nakładania operator po jednym naciśnięciu spustu dostarcza zawiesinę o określonej dawce, zależną od wydajności aplikatora. Substancja наносzona jest na powierzchnię docieraną już nie w postaci strugi, lecz bardziej rozproszonego strumienia zawiesiny. Sposób dozowania zawiesin i past przy pomocy aplikatora przedstawiono na rys. 2.12 i 2.13.

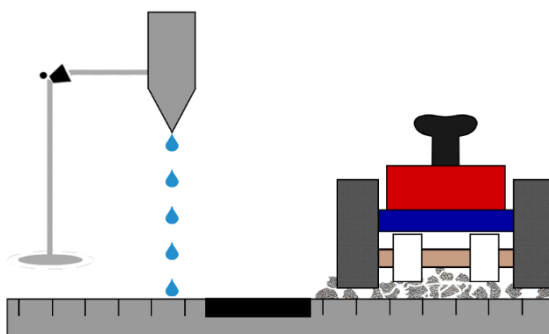


Rys. 2.12. Dozowanie past ściernych przy pomocy zintegrowanego z pojemnikiem aplikatora



Rys. 2.13. Dozowanie zawiesiny ścierniej przy pomocy aplikatora ręcznego

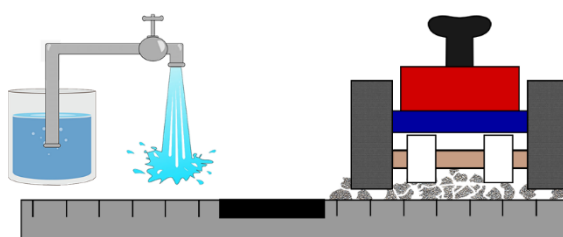
W następnej metodzie pojemnik zamocowany jest nad tarczą docierającą i pod wpływem siły grawitacji zachodzi wypływ substancji bezpośrednio na docierak [96]. W tej sytuacji istotny wpływ ma rozmiar otworu wylotowego z pojemnika, przez który wypływa substancja ścierna. Zazwyczaj rozmiar otworu wypływowego jest tak dopasowany, aby zawiesina mogła wypływać w sposób kropłowy lub bardzo ciekłą strugą (rys. 2.14).



Rys. 2.14. Dawkowanie grawitacyjne zawiesiny ścierniej na powierzchnię roboczą docieraka

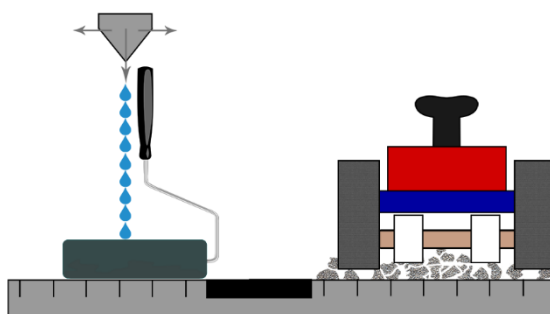
Kolejnym sposobem dawkowania jest dostarczanie płynnej zawiesiny przy pomocy pompy [93]. Taki układ pobiera ze zbiornika przygotowaną zawiesinę ścierną i dostarcza ją do elementu spustowego. Doprowadzona zawiesina sływa bezpośrednio na tarczę docierającą w postaci niewielkiej strugi - co schematycznie przedstawia rys. 2.15.





Rys. 2.15. Dozowanie zawiesiny ścierniej przy pomocy pompy podającej

Zbrojenie docieraka w sposób wymuszony może odbywać się przy pomocy ręcznego narzędzia. Na powierzchnię docieraka metalowego, po wcześniejszym oczyszczeniu, nanoszona jest pasta ścierna [93], [15]. Nanoszenie powinno odbywać się równomiernie na całej powierzchni tarczy. Kolejnym etapem wymuszonego zbrojenia jest wgniatanie mikroziaren zawartych w paście przy użyciu specjalnego ręcznego narzędzia. Czynność tę należy powtarzać kilkakrotnie w różnych kierunkach. Przed bezpośrednim wykorzystaniem tak uzbrojonego narzędzia powierzchnię czynną docieraka należy zmyć i osuszyć. Czas zbrojenia ręcznego jest stosunkowo długi, zaś jakość tego procesu nie jest wysoka z powodu trudności w równomiernym rozprowadzeniu i zakotwieniu mikroziaren na powierzchni tarczy docierającej. Schemat wymuszonego zbrojenia docieraka przedstawiono na rys. 2.16.



Rys. 2.16. Wymuszony sposób zbrojenia docieraka

## **2.2. Wpływ dawkowania zawiesiny ścierniej na przebieg i efekty docierania**

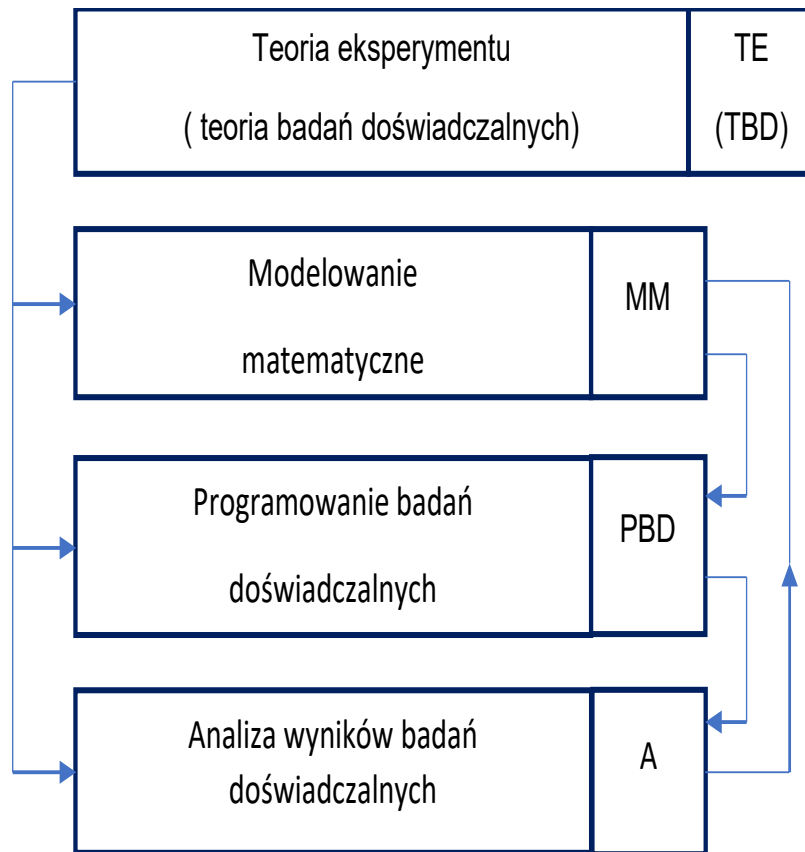
Dozowanie zawiesiny ścierniej ma istotny wpływ na przebieg i końcowy efekt procesu docierania powierzchni płaskich [93], [96], [74], [68]. W przemyśle najczęściej jest stosowane dawkowanie ręczne lub przy wykorzystaniu pompy podającej. Te metody są nieprecyzyjne, co jest powodem powstawania zakłóceń w przebiegu docierania.

Zbyt obfite dawkowanie zawiesiny ścierniej może być przyczyną unoszenia (tzw. „pływania”) elementów na powierzchni narzędzia. Taka sytuacja ma miejsce przy większych prędkościach względnych w układzie docierak - przedmiot obrabiany i małych naciskach jednostkowych wywieranych na przedmiot. Nadmierne dawkowanie wpływa również na podwyższenie kosztów realizacji procesu, ponieważ część zawiesiny ścierniej, podanej w nadmiarze, w ogóle nie bierze udziału w docieraniu z powodu usunięcia przez pierścienie prowadzące.

Dawkowanie zawiesiny ścierniej w niedomiarze jest również zjawiskiem niekorzystnym. Taki stan może doprowadzić do bezpośredniego kontaktu przedmiotów z powierzchnią metalowego docieraka. Zazwyczaj w praktyce przemysłowej dawkowanie zawiesiny ścierniej jest uzależnione od udziału procentowego ziaren ściernych w cieczy (nośniku) [43], [71], [80]. Zużycie zawiesiny ścierniej w głównym stopniu jest uzależnione od średnicy tarczy docierającej oraz sposobu dawkowania. Należy również zwrócić uwagę na to, że zawiesiny ściernie (na bazie np. węgla krzemowego) mają bardzo dużą skłonność do sedymentacji, dlatego tak przygotowane w zbiorniku zawiesiny należy ciągle mieszać. Podczas dawkowania ziarna często osiadają w przewodach i elementach bezpośrednio odpowiadających za wypływ zawiesiny na tarczę docierającą. To jest również powodem powstawania zakłóceń. W procesie obróbkowym zwykle utrzymanie stałych parametrów dawkowania i nanoszenia nie jest prostym zabiegiem [78], [44], [34], [85]. Tak przebiegający proces wymaga stałego monitorowania przez operatora, należy więc poszukiwać takich rozwiązań, które zminimalizują powstawanie zakłóceń podczas dozowania zawiesiny. Należy zastosować taki sposób dawkowania, aby na tarczę docieraka dostarczać założoną warstwę zawiesiny ścierniej. Z tego powodu zasadne jest zastosowanie wymuszonego systemu dawkowania i nanoszenia, co zmniejszy zużycie zawiesiny ścierniej, nie pogarszając jednocześnie jakości docieranych powierzchni.

## **2.3. Zasady programowania badań doświadczalnych**

Teoria eksperymentu jest nauką o badaniu procesów, realizacji pomiarów i badań doświadczalnych [70], [65], [64], [67]. Programowanie badań doświadczalnych może mieć zastosowanie niezależnie od dyscypliny naukowej, do której ją stosujemy. Na rys. 2.17 przedstawiono układ problematyki i teorii eksperymentu. Przyjęcie odpowiedniego planu badań jest podstawowym zadaniem badacza. Wybór niewłaściwego planu badań może spowodować duże straty finansowe i niepotrzebne przedłużenie kosztownych badań.



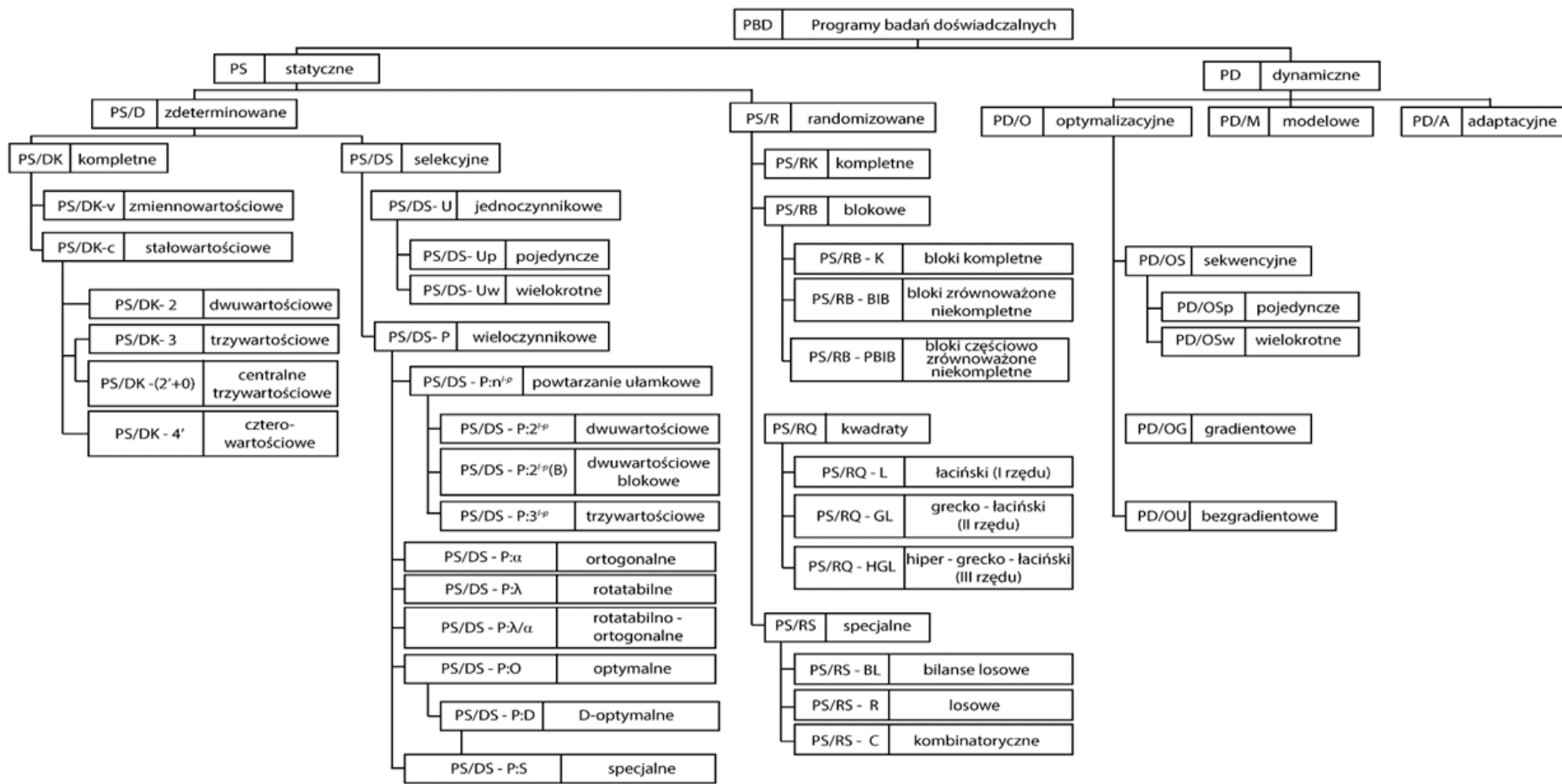
Rys. 2.17. Układ problematyki teorii eksperymentu (teoria badań doświadczalnych) z określeniem możliwych sprzężeń informacyjnych [70]

### 2.3.1. Programy stosowane do badań doświadczalnych w technologii maszyn

Programy badań doświadczalnych można podzielić na dwie podstawowe grupy: programy statystyczne (jednoczesne), oznaczone symbolem **PS** oraz programy dynamiczne (sekwencyjne), oznaczone symbolem **PD** [70], [64]. Określenia przedstawiane jako dynamiczne i statyczne określają cechy programu, a nie cechy obiektu badań. Programy statystyczne mogą dotyczyć badań układów, jak i procesów. Na rys. 2.18 przedstawiono opisane w literaturze podstawowe programy badań doświadczalnych. Cechą podstawową programów statystycznych jest to, że dla wszystkich wartości czynników badanych  $X$ , są przeprowadzane pomiary wartości czynnika wynikowego, które są określone przed rozpoczęciem badań doświadczalnych, a kolejne wyniki realizowanych pomiarów nie mają wpływu na program. Cechą programów dynamicznych jest to, iż przed rozpoczęciem badań doświadczalnych określamy jedynie jeden wybrany układ wartości czynników badanych  $X$ , od którego rozpoczynamy pomiary, stanowiące tzw. wartość centralną, która jest pierwszym punktem startu dla programu. Program dynamiczny przypomina procedurę iteracyjną i składa się z ciągu sekwencji pomiarowych, realizowanych według przyjętych reguł, różnych dla różnych programów dynamicznych [70], [64].

Pomiędzy wymienionymi programami istnieje silne powiązanie, ponieważ pewne programy o zbliżonych zasadach można traktować jako statystyczne lub po niewielkich zmianach stają się programami dynamicznymi. Analizując programy nie można jednoznacznie z góry określić, jaki z wyżej wymienionych typów programów jest lepszy. Programy statystyczne umożliwiają określenie rodzaju, ilości i warunków pomiarów już przed rozpoczęciem badań, co w

znaczny sposób ułatwia przygotowanie techniczno-organizacyjne całego procesu badawczego. Programy dynamiczne mają nieco odmienny charakter, a mianowicie sekwencyjny, który uwzględnia wyniki poprzednich pomiarów. Z takiego punktu widzenia ta sytuacja przynosi niewątpliwe korzyści, jednak, w przeciwieństwie do programu statystycznego, utrudnia techniczno-organizacyjną stronę badań. W takim przypadku należy w sposób ciągły analizować zebrane wyniki za pomocą różnych technik i urządzeń obliczeniowych.



Rys. 2.18. Podstawowe programy badań doświadczalnych [70]

### 2.3.2. Kryteria oceny programów badawczych

Programy badawcze posiadają szereg zalet, ale wybór właściwego programu wymaga określonej wiedzy i doświadczenia osoby decydującej o zastosowaniu konkretnego rozwiązania badawczego. Oceny programu można dokonać na podstawie uniwersalnych kryteriów, które charakteryzują każdy z programów badawczych, to jest informatywność i efektywność badań doświadczalnych [70], [64]. Informatywność programu badań jest określona ilością informacji uzyskanych w wyniku realizacji doświadczeń. Miarą informatywności może być stosunek liczby pomiarów, wymaganych do realizacji danego programu, do liczby pomiarów w programie statystycznym kompletnym. Stosunek obliczamy dla takich samych czynników badanych i ich wartości.

$$I_{(N)} = \frac{N_{(P)}}{N_{\left(\frac{PS}{DK}\right)}}, \quad (2.29)$$

gdzie:

$I_{(N)}$  – informatywność programu badań,

$N_{(P)}$  – liczba pomiarów dowolnego programu,

$N_{\left(\frac{PS}{DK}\right)}$  – liczba pomiarów w programie statystycznym kompletnym.

Przyjęcie jedynie miary  $I_{(N)}$  jest niewystarczające. W wielowymiarowej przestrzeni czynnikowej  $\Pi^{i+1}$ , przy założeniu dyskretnej wartości  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k, \dots, x_i$  otrzymujemy dla każdego z analizowanych programów pewną możliwą liczbę pomiarów wartości czynnika wynikowego  $z$ , dla różnych układów dyskretnej wartości  $x_k$ . Liczba pomiarów nie jest wystarczającym wskaźnikiem informatywności programu, ponieważ za ważniejsze uważa się rozmieszczenie na powierzchni określonej funkcji obiektu badań w wielowymiarowej przestrzeni czynnikowej [70]. W dość prosty sposób, na przykładzie funkcji obiektu, możemy wykazać jaką jest funkcją, co zostało przedstawione w następującej postaci:

$$z = F(x_1), \quad (2.30)$$

gdzie:

$z$ -wartość czynnika wynikowego,

$F(x_1)$  - funkcja wartości  $x_1$ .

Efektywność programu badań doświadczalnych to pojęcie dotyczące kosztów i czasu potrzebnego na ich realizację. Efektywność programu badawczego należy określać jedynie metodą porównawczą, porównując co najmniej dwa programy [70], [64], [65], [1], [38], [41].

Analizując metodykę badań doświadczalnych niezwykle ważne jest określenie liczby układów pomiarowych określających całkowitą liczbą pomiarów do realizacji programów [70].

### 2.3.3. Programy statyczne selekcyjne wieloczynnikowe

Jednym z programów, który można wykorzystać do programowania badań doświadczalnych jest program statystyczny zdeterminowany selekcyjny wieloczynnikowy **PS/DS-P**. Istotną cechą tego programu jest zmiana wartości wielu czynników badanych w czasie kolejnych pomiarów. Program **PS/DS-P** prowadzi do uzyskania jednej funkcji obiektu, w skład której wchodzi wszystkie istotne czynniki badane  $X$  oraz czynnik wynikowy  $z$ . W takim przypadku należy wybrać jedną funkcję, która najczęściej jest wielomianem [70]. Stopień wielomianu jest dowolny, ale ze względów praktycznych przyjmuje się wielomian drugiego stopnia:

$$z = b_0 + \sum_{k=1}^i b_k x_k + \sum_{k=1}^i b_{kk} x_k^2 + \sum_{k < q}^i b_{kq} x_k x_q \quad (2.31)$$

gdzie:

$z$  - czynnik wynikowy,

$x_k, x_q$  - czynniki badane ( $k=1, 2, \dots, i; q=2, 3, \dots, i; k < q$ ),

$i$  - liczba czynników badanych,

$b_k, b_{kk}, b_{kq}$  - współczynnik regresji.

Do programów statystycznych zdeterminowanych selekcyjnych wieloczynnikowych zaliczamy [70], [48]:

- program **PS/DS-P:  $n^{i-P}$**  zwanym powtarzalnym ułamkowym,
- program **PS/DS-P:  $\alpha$** , zwany programem ortogonalnym,
- program **PS/DS-P:  $\lambda$** , zwany programem rototabilnym.

W niniejszym rozdziale w sposób szczególny przedstawiono opis programów badań, które były rozważane jako plany możliwe do zastosowania w badaniach opisanych w rozprawie.

Program **PS/DS-P:  $n^{i-P}$** .

Jest to program, który posiada określoną liczbę czynników badanych, każdy może przyjmować  $n$  wartości. Najbardziej znanym programem jest tu program dwuwartościowy „binarny”, dla którego:  $n=n_k=2, k=1, 2, \dots, i$ , a funkcja obiektu przyjmuje postać:

$$z = F(x_1) \quad (2.32)$$

Stosując podstawowe zasady układów binarnych otrzymujemy wartość czynnika  $x_1$ , która wynosi:  $x_{1max}$  („+”) oraz  $x_{1min}$  („-”) z tego wynika, iż  $i = 1, n_1 = 2$ . Na tej podstawie można określić ostateczną liczbę pomiarów, które przedstawia tabela 2.4. W tym przypadku  $N = 2$  dla  $r = 1$  [70].

**Tabela 2.4.** Układ wartości czynnika badanego  $x_1$  dla elementarnego programu PS/Dk-21 [70]

Lp.	$x_1$
1	-
2	+

}  $2^1$

Program tego typu nazywamy *elementarnym programem PS/DK-2<sup>1</sup>*. Prowadząc dalsze rozważania nad tym rozwiązaniem można podać, jak będzie wyglądała kompletacja funkcji obiektu dla czynników badanych  $x_1$  i  $x_2$  [70]:

$$z = F(x_1, x_2) \quad (2.33)$$

Każdy z czynników zgodnie z zaprezentowaną zasadą przyjmuje następujące dwie wartości:

$$x_1 = \begin{cases} x_{1max(+)} \\ x_{1min(-)} \end{cases}$$

$$x_2 = \begin{cases} x_{2max(+)} \\ x_{2min(-)} \end{cases}$$

Całkowita liczba pomiarów, dlatego przypadku wynosi  $N = 4$ , dla  $r = 1$ .

Można więc wprowadzić ogólny schemat programu dotyczący funkcji obiektu obejmującego  $X$  czynników badanych [70]:

$$z = F(x_1, x_2, \dots, x_i) \quad (2.34)$$

Na tej podstawie został sformułowany wzór, którym można się posłużyć, aby obliczyć wymaganą liczbę pomiarów dla tego programu [70].

$$N = r \cdot 2^i, \text{ dla } r = \text{const.} \quad (2.35)$$



W tabeli 2.5 przedstawiono wartości czynników badanych  $x_1, x_2, x_3$  dla programu PS/DK-2<sup>3</sup> przy założeniu:  $r = 1, n_1 = n_2 = n_3 = 2, i = 3$  [70]

**Tabela 2.5.** Układ wartości czynników badanych  $x_1, x_2, x_3$ , dla programu PS/DK-2<sup>3</sup> przy założeniu:  $r = 1, n_1 = n_2 = n_3 = 2, i = 3$  [70]

Lp.	$x_1$	$x_2$	$x_3$
1.	-	-	-
2.	+	-	-
3.	-	+	-
4.	+	+	-
5.	-	-	+
6.	+	-	+
7.	-	+	+
8.	+	+	+

Diagram illustrating the grouping of rows in the table:

- Rows 1 and 2 are grouped by a bracket labeled  $2^1$ .
- Rows 3 and 4 are grouped by a bracket labeled  $2^1$ .
- Rows 5 and 6 are grouped by a bracket labeled  $2^1$ .
- Rows 7 and 8 are grouped by a bracket labeled  $2^1$ .
- Rows 1 and 3 are grouped by a bracket labeled  $2^2$ .
- Rows 2 and 4 are grouped by a bracket labeled  $2^2$ .
- Rows 5 and 7 are grouped by a bracket labeled  $2^2$ .
- Rows 6 and 8 are grouped by a bracket labeled  $2^2$ .
- A large bracket on the right side groups all 8 rows and is labeled  $2^3$ .

Pomimo występowania znacznej liczby pomiarów, informatywność tego programu jest na poprawnym poziomie. Opracowanie wyników badań doświadczalnych opiera się na analizie statystycznej **modelu liniowego** (*analiza regresji i wariancji*). Wykorzystując do badań program **PS/DS-P: 2<sup>i-p</sup>** na podstawie uzyskanych informacji z programu **PS/DK-2<sup>1</sup>** można wykazać pewną „**nadmiarowość uzyskanych informacji**” niezbędnych do analizy modelu liniowego. Jeżeli ogólną postać funkcji obiektu aproksymujemy wielomianem liniowym, to otrzymamy model liniowy obiektu badań [70]:

$$z = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k + \dots + b_ix_i \quad (2.36)$$

W takim modelu wielkości niewiadome określamy na drodze doświadczalnej następującymi współczynnikami:  $b_0, b_1, b_2, \dots, b_k, \dots, b_i$ . W przyjętym modelu liniowym liczba niewiadomych współczynników  $b_0, b_1, \dots, b_i$ , wynosi:  $i+1$ , a każdy współczynnik, może być wyznaczony na podstawie wyników jednego pomiaru.

Dla dwóch pomiarów można ustalić równania modelu liniowego przy  $r = 1$ , które przyjmują postać:

$$z_1 = b_0 + b_1x_{11},$$

$$z_2 = b_0 + b_1x_{12},$$

a następnie obliczyć współczynniki funkcji  $b_0$  i  $b_i$ :

$$b_1 = \frac{z_2 - z_1}{x_{12} - x_{11}},$$

$$b_0 = z_1 - b_1 x_{11}.$$

Na tej podstawie stwierdzono, iż w programie **PS/DK-2<sup>i</sup>** wymagana liczba  $N$  przekracza liczbę pomiarów niezbędnych do określenia współczynników modelu liniowego. Można wręcz odnotować „nadwyżkę” równań [70]:

$$R = N - (i + 1) = 2^i - (i + 1), \text{ dla } r = 1 \quad (2.37)$$

Program **PS/DS-P: 2<sup>i-p</sup>**.

W tym programie liczba pomiarów wymaganych do realizacji kompletnego programu zostaje ograniczona, przy zachowaniu cech związanych z analizą modelu liniowego np. symetrią, ortogonalnością i równością sum kwadratów [70], [65].

Liczba pomiarów wymaganych do realizacji programu **PS/DS-P: 2<sup>i-p</sup>** określona jest wzorami i w stosunku do programu **PS/DK-2<sup>i</sup>** nie może być dowolna, lecz musi spełnić następujące warunki:

$$N = r \cdot 2^{i-p}, \text{ dla } r = \text{const.} \quad (2.38)$$

$$N \geq i + 1, \text{ dla } R \geq 0,$$

$$2^{i-p} \geq i + 1, \text{ dla } r = 1$$

$$p \leq -\frac{\log(i+1)}{\log 2} \approx i - 3,3 \log(i + 1). \quad (2.40)$$

Analizując charakterystykę programów **PS/DS-P: 2<sup>i-p</sup>** stwierdzono, że można zastosować je do badań obiektów, dla których wartość czynników badanych może być ograniczona do dwóch, czyli do układów binarnych, przy czym w takim przypadku jest możliwe przyjęcie modelu liniowego z pominięciem możliwych interakcji [70], [65]. Na bazie programów **PS/DS-P: 2<sup>i-p</sup>** powstały programy trzywartościowe **PS/DS-P: 3<sup>i-p</sup>**. Jest to koncepcja, dotycząca sytuacji, w której liczba wartości czynników badanych przyjmuje odpowiednio trzy poziomy: poziom („+”), poziom („0”), poziom (-). W badaniach eksperymentalnych programy typu: **PS/DK-2<sup>i</sup>**, **PS/DS-P: 2<sup>i-p</sup>**, **PS/DS-P: 3<sup>i-p</sup>**, **PS/DS-P: n<sup>i-p</sup>** są związane z modelem liniowym, co stwarza pewne wątpliwości związane z tym, iż model liniowy opisuje płaszczyzny, które nie posiadają punktów ekstremalnych wewnątrz badanych przedziałów. Programy związane z modelem nieliniowym, to znaczy z **wielomianem drugiego stopnia** i wyższymi, wydają się bardziej przydatne do przeprowadzenia optymalizacji procesu badań. Do takich programów zaliczamy [70], [64], [2], [46]:

- program **PS/DS-P:  $\alpha$** , zwany programem ortogonalnym,
- program **PS/DS-P:  $\lambda$** , zwany programem rototabilnym.

W praktycznym podejściu do realizacji badań eksperymentalnych można przyjąć pewną etapowość związaną z planowaniem i realizacją badań. W pierwszym podejściu można zastosować najpierw program **PS/DS-P:  $n^{i-p}$**  lub program **PS/DK-2<sup>i</sup>**, wykorzystując w tym przypadku model liniowy. Należy również przeanalizować techniczne możliwości przeprowadzenia pomiarów dla założonych wartości granicznych czynników badanych. Jeżeli ten etap zostanie poddany całościowej analizie, to będzie można podjąć odpowiedzialną decyzję, stwierdzając, czy model liniowy spełnia, czy nie spełnia naszych oczekiwań. Jeżeli nie spełnia, to przechodzimy do realizacji jednego z programów: **PS/DS-P:  $\alpha$**  lub **PS/DS-P:  $\lambda$**  lub **PS/DS-P:  $\lambda/\alpha$** .

Istnieje również inne podejście do planowania badań, a mianowicie oparte na założeniu od początku modelu nieliniowego za właściwy, który ostatecznie też może być zredukowany do modelu liniowego. W takim przypadku, jeżeli nie ma ograniczeń technicznych związanych z przeprowadzaniem pomiarów, od razu stosujemy jeden z trzech programów tj: **PS/DS-P:  $\alpha$** , **PS/DS-P:  $\lambda$**  lub **PS/DS-P:  $\lambda/\alpha$** , przyjmując model nieliniowy w postaci wielomianu drugiego stopnia [70], [20]. Zastosowanie wielomianu drugiego stopnia pozwala w ewidentny sposób na zmniejszenie liczby wymaganych pomiarów oraz na zastosowanie analizy statystycznej i analizy regresji.

Podstawową cechą programu ortogonalnego **PS/DS-P:  $\alpha$**  jest wprowadzenie specjalnych kompozycji (układów) wartości czynników badanych, zapewniających **ortogonalność**, a w przypadku programu **PS/DS-P:  $\lambda$**  **rototabilność** [70], [64], [46], [20]. W programie **PS/DS-P:  $\alpha$**  przed przystąpieniem do realizacji badań należy zakodować rzeczywiste wartości czynników badanych  $x_k$  symbolami kodowymi  $\tilde{x}_k$  oznaczonymi:  $\pm\alpha$ ,  $\pm 1$ , oraz 0. Aby tego dokonać, należy dysponować zakresem czynników badanych:

$$\begin{aligned}
 &x_{1min} \div x_{1max} \\
 &x_{2min} \div x_{2max} \\
 &\dots \dots \dots \dots \dots \\
 &x_{kmin} \div x_{kmax} \\
 &\dots \dots \dots \dots \dots \\
 &x_{imin} \div x_{imax}
 \end{aligned}$$

Następnym krokiem jest ustalenie „**centrum programu**” oznaczonego według kodu symbolem **0** zgodnie ze wzorem:

$$x_{k0} = \frac{x_{kmax} + x_{kmin}}{2} \quad (2.50)$$

Następnie należy przystąpić do określenia „**jednostki zmienności**” ze wzoru:

$$\Delta x_k = \frac{x_{k \max} - x_{k0}}{\alpha} \quad (2.51)$$

Wartość  $\alpha$  nazywamy „ramieniem gwiazdowym”, określającym tak zwane „punkty gwiazdne”, oznaczone symbolem kodowym:  $\mp\alpha$ . Wartość  $\alpha$  można określić z równania :

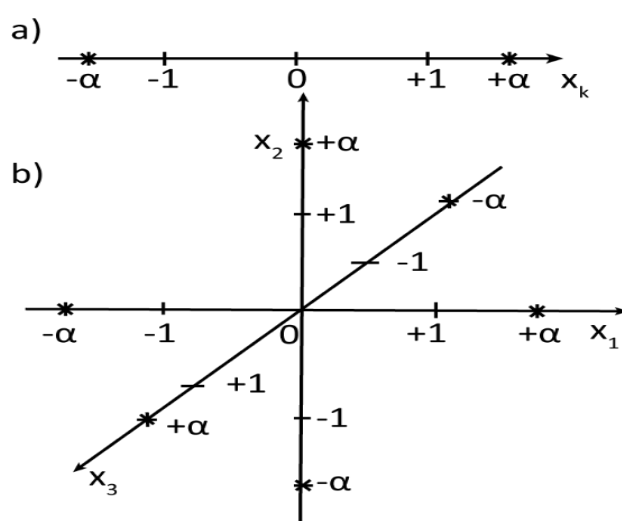
$$\alpha^4 + 2^{i-i} \alpha^2 - 2^{i-2}(i + 0,5n_0) = 0 \quad (2.52)$$

gdzie:

$i$  - liczba czynników badanych,

$n_0$  – liczba pomiarów powtarzanych w centrum programu.

Na rys. 2.19 zostały zilustrowane wartości  $\alpha$  dla dowolnego czynnika  $x_k$ , i dla trzech czynników  $x_1, x_2, x_3$  [70].



Rys. 2.19. Schemat kompozycji kodowych wartości czynników badanych: a) dla dowolnego czynnika  $x_k$ , b) dla trzech czynników  $x_1, x_2, x_3$  [70]

Dla program **PS/DS-P**:  $\alpha$  odpowiednie dane są przedstawione w formie tabelarycznej (tabela 2.6) [70].

**Tabela 2.6.** Wartości charakteryzujące program PS/DS.-P:  $\alpha$  [70]

$i$	2	3	4	5
$\alpha$	1,000	1,215	1,414	1,547
$n_i$	3	4	5	5
$n_k$	$2^2$	$2^3$	$2^4$	$2^{5-1}$
$n_0$	1	1	1	1
$n_\alpha$	4	6	8	10
$n$	9	15	25	27

gdzie:

$\alpha$  – „punkty gwiazdne oznaczone symbolem kodowym  $\mp\alpha$ ”

$n_i$  – poziomy,

$n_k$  – „jądro programu”,

$n_0$  – „centrum programu”,

$n_\alpha$  – „punkty gwiazdne”,

$n$  – liczba pomiarów, jaką należy zrealizować dla programu w zależności od liczby czynników badanych.

Analizując zalety programu **PS/DS-P:  $\alpha$**  można stwierdzić, że zachowuje on jedynie „ortogonalność”, jednak nie zapewnia „rotabilności”, ponieważ centrum programu wynosi  $n_0=1$ . Program w praktyce jest zbliżony do programu **PS/DS-P:  $\alpha$** , lecz istnieje zasadnicza różnica, która polega na tym, iż program **PS/DS-P:  $\lambda$**  przyjmuje inne wartości  $\alpha$  niż program **PS/DS-P:  $\alpha$** , jak również inną liczbę pomiarów w centrum programu ( $n_0 > 1$ ), inne schematy obliczania współczynników regresji funkcji obiektu [65], [20], [28]. Wartości charakteryzujące program **PS/DS-P:  $\lambda$**  przedstawiono w tabeli 2.7 [70].

**Tabela 2.7.** Wartości charakteryzujące program PS/DS.-P:  $\lambda$  [70]

i	2	3	4	5	5
$\alpha$	1,414	1,682	2,000	2,000	2,378
$n_i$	5	5	5	5	5
$n_k$	$2^2$	$2^3$	$2^4$	$2^{5-1}$	$2^5$
$n_0$	5	6	7	6	10
$n_\alpha$	4	6	8	10	10
$n$	13	20	31	32	52

gdzie:

$\alpha$  – „punkty gwiazdne oznaczone symbolem kodowym  $\mp\alpha$ ”

$n_i$  – poziomy,

$n_k$  – „jądro programu”,

$n_0$  – „centrum programu”,

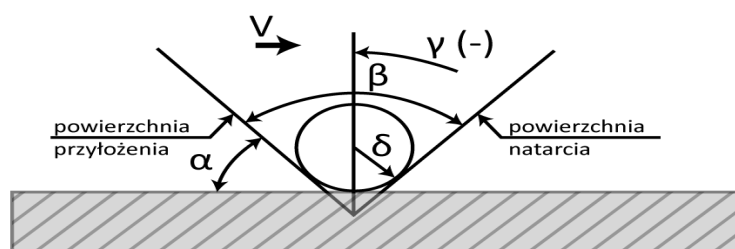
$n_\alpha$  – „punkty gwiazdne”,

$n$  – liczba pomiarów, jaką należy zrealizować dla programu w zależności od liczby czynników badanych.

## 2.4. Wnioski ogólne i uzasadnienie podjęcia tematu rozprawy

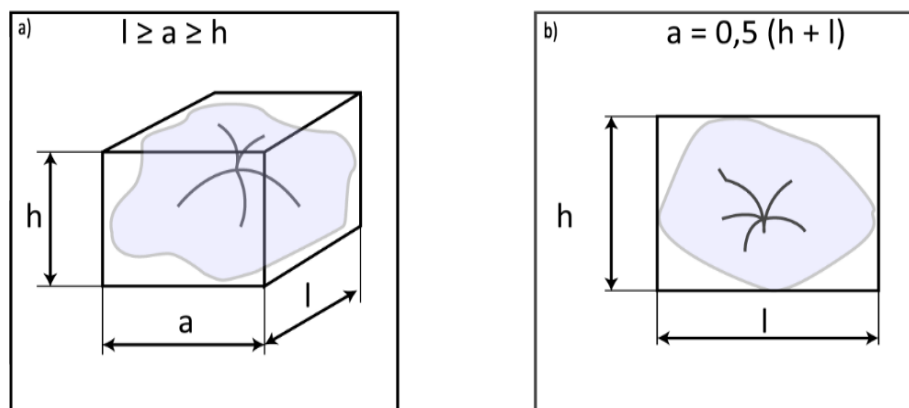
Na podstawie analizy literatury można jednoznacznie stwierdzić, iż proces docierania powierzchni płaskich jest bardzo złożoną obróbką. Jest to proces, na który ma wpływ wiele czynników [32], [63], [83], [88],[87], [74], [78].

Dominującym [16], [17] procesem jest skrawanie za pomocą dawkowanych ziaren ściernych. Stosowane ziarna ścierne posiadają strukturę monokryształów i ich odłamków, przybierają również strukturę kryształów bliźniaczych lub strukturę polikrystaliczną. Pojedyncze ziarno ścierne może posiadać regularny, przestrzenny kształt geometryczny lub przyjmuje postać nieregularnej bryły o wielu narożach, podobnych do piramid. Na rys. 2.20 przedstawiono wielkości charakteryzujące geometrię naroża ziarna. Istotnymi dla procesu obróbki są: kąt naroża  $\beta$  (odpowiednik kąta ostrza) oraz promień zaokrąglenia naroża  $\delta$ , wyznaczany w płaszczyźnie odpowiadającej przekrojowi głównemu [97].



Rys. 2.20. Wielkości charakteryzujące geometrię naroża ziarna ściernego: kąt naroża  $\beta$  i promień zaokrąglenia  $\delta$  na rysunku  $\alpha$  i  $\gamma$  oznaczają kąty przyłożenia i kąt natarcia [97]

Na prawidłowy przebieg docierania ma wpływ również odpowiednia wielkość ziaren. Podstawowym kryterium klasyfikacji ziaren są ich wymiary [95], [86], [45]. Wymiar charakterystyczny pojedynczego ziarna opisano jako szerokość prostopadłościanu opisanego na ziarnie lub dla materiałów super twardych średnią boków prostokąta opisanego na mierzonym ziarnie w płaszczyźnie obserwacji, co zostało przedstawione na rys. 2.21 [97]. Na realizację procesu docierania ma również wpływ rodzaj materiału obrabianego jak i rozmieszczenie docieranych elementów wewnątrz pierścienia prowadzącego (w separatorze).



Rys. 2.21. Wymiary charakterystyczne ziarna ściernego [97]

Na przebieg procesu docierania jednotarczowego powierzchni płaskich mają również wpływ warunki kinematyczne, (prędkość obrotowa tarczy docierającej oraz prędkość obrotowa pierścienia prowadzącego) [51], [5], [6], [7], [97]. Jeżeli istnieje stała nastawiona prędkość obrotowa tarczy docierającej, to już na prędkość pierścienia prowadzącego ma wpływ wiele czynników. Kolejnym czynnikiem mającym wpływ na przebieg i końcowy efekt docierania, jest nacisk jednostkowy. Zbyt duży nacisk może wpływać niekorzystnie na parametry chropowatości powierzchni po docieraniu [11], [22], [49], [56], [84]. Na realizację procesu ma również wpływ mechanizm zbrojenia tarczy docierającej oraz sposób przygotowania, dozowania i nanoszenia zawiesiny ścierniej. Z analizy literatury wynika, że proces dawkowania jest jednym z głównych czynników determinujących wydajność docierania, wpływa również na jego kosztocłonność.

Na podstawie analizy stanu wiedzy można sformułować następujące wnioski ogólne:

1. Dostarczenie mikroziaren ściernych (o nieokreślonej geometrii ostrzy) do strefy obróbki jest niezbędnym warunkiem realizacji procesu docierania.
2. Ziarna ściernie są przenoszone w substancji nośnej o określonej lepkości.
3. W praktyce przemysłowej dostarczanie zawiesiny ścierniej odbywa się w sposób punktowy (w określonym miejscu na tarczę docierającą) z nadmiarem.
4. W konwencjonalnych układach dawkowania znaczna część dostarczanej zawiesiny ścierniej, po pierwszym kontakcie z pierścieniem prowadzącym, jest usunięta z tarczy docierającej i stanowi szkodliwy odpad, wymagający utylizacji.
5. Należy zmodyfikować układ dostarczania zawiesiny ścierniej tak, aby można było przy pomocy tego samego urządzenia dostarczać zawiesiny ściernie o różnym składzie i właściwościach (lepkości).
6. Nanoszenie zawiesiny powinno odbywać się w sposób zaplanowany, zaś rozprowadzenie tak równomierne, aby utworzyć film ścierny o zaplanowanej grubości.
7. Zmodyfikowany system dostarczania zawiesiny ścierniej powinien być podzielony na:
  - a. układ przygotowania i dawkowania zawiesiny ścierniej,
  - b. układ nanoszenia zawiesiny ścierniej,
  - c. układ sterujący.
8. Układ przygotowania i dawkowania oraz nanoszenia powinny być połączone z układem sterowania tak, aby uzyskać oszczędności w zużyciu zawiesiny ścierniej, jednocześnie nie pogarszając wydajności i jakości obróbki.
9. Zmodyfikowane urządzenie przygotowania i dawkowania oraz nanoszenia zawiesiny ścierniej powinno być skonstruowane w taki sposób, aby można było je adaptować do pracy z różnymi modelami docierarek jednotarczowych.

### 3. CELE PRACY I HIPOTEZY BADAWCZE

Podjęcie tematu badawczego związanego z dozowaniem i nanoszeniem zawiesiny ścierniej wynika z potrzeby zastosowania rozwiązania, które pozwoli na precyzyjne dozowanie zawiesiny ścierniej bezpośrednio na tarczę docierającą w postaci mgły. W efekcie czego doprowadzi to do znacznego ograniczenia jej zużycia. Ze względu na możliwość wprowadzenia rozwiązania, które w sposób zaplanowany i zautomatyzowany nakłada założoną grubość warstwy ścierniej (w przeliczeniu na jeden obrót docieraka) podjęto realizację pracy własnej.

#### 3.1. Cele pracy

Celem rozprawy jest określenie wpływu parametrów dawkowania wymuszonego zawiesiny ścierniej, to jest zawartości procentowej ziaren ściernych  $K$  dawki zawiesiny ścierniej  $V_s$ , i lepkości nośnika zawiesiny  $L_e$ , na efekty docierania jednotarczowego powierzchni płaskich wykonanych z ceramiki technicznej ( $Al_2O_3$ ). Zastosowanie wymuszonego systemu przygotowania, dozowania i nanoszenia pozwoli na znaczące zmniejszenie zużycia zawiesiny ścierniej w porównaniu z konwencjonalnym systemem dawkowania

#### 3.2. Hipotezy badawcze

Na podstawie szczegółowej analizy rozpatrywanego zagadnienia naukowego oraz dotychczasowych badań własnych można sformułować następujące hipotezy naukowe:

1. Podstawowe parametry dawkowania wymuszonego, a więc **zawartość procentowa ziaren ściernych w nośniku  $K$ , wielkość dawki zawiesiny ścierniej  $V_s$  oraz lepkość nośnika ziaren  $L_e$** , mają istotny wpływ na parametry chropowatości powierzchni oraz ubytek docieranych elementów wykonanych z ceramiki  $Al_2O_3$ .
2. Istnieje możliwość opracowania modelu matematycznego, który pozwoli na: **optymalizację badanego procesu docierania.**



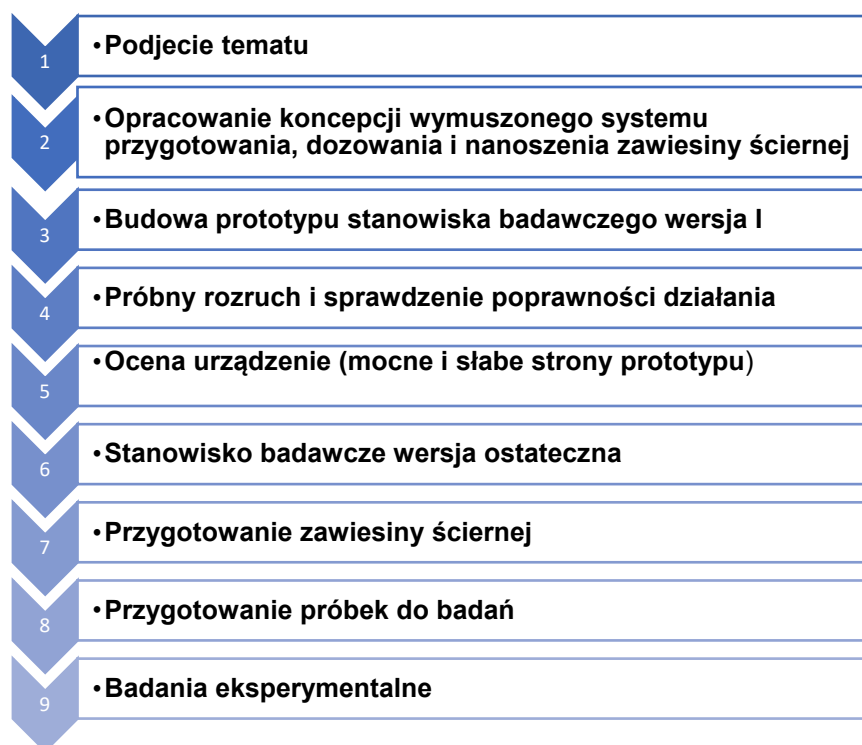
## 4. OGÓLNY SCHEMAT REALIZACJI BADAŃ WŁASNYCH

### 4.1. Zakres rozprawy

Aby osiągnąć wytyczone cele ogólne należy zrealizować w kolejności:

1. Opracowanie koncepcji wymuszonego układu przygotowania, dozowania i nanoszenia zawiesin ściernych wraz z układem sterowania.
2. Zbudowanie prototypu innowacyjnego urządzenia mechanicznego.
3. Zbudowanie prototypu układu sterowania.
4. Przeprowadzenie prób technicznych wykonanych urządzeń.
5. Wdrożenie ewentualnych zmian i poprawek.
6. Wybór materiału obrabianego w celu przeprowadzenia eksperymentów.
7. Wybór materiału ściernego i nośnika ziaren, na bazie których zostanie przygotowana zawiesina ścierna.
8. Wybór programu badań.
9. Przeprowadzenie badań wstępnych.
10. Przeprowadzenie badań zasadniczych w celu określenia wydajności docierania w funkcji  $K$ ,  $V_s$ ,  $L_e$ .
11. Analiza wyników i sformułowanie wniosków.

Przed przystąpieniem do eksperymentów opracowano schemat przygotowania i realizacji badań własnych, co przedstawiono na rys. 4.1.

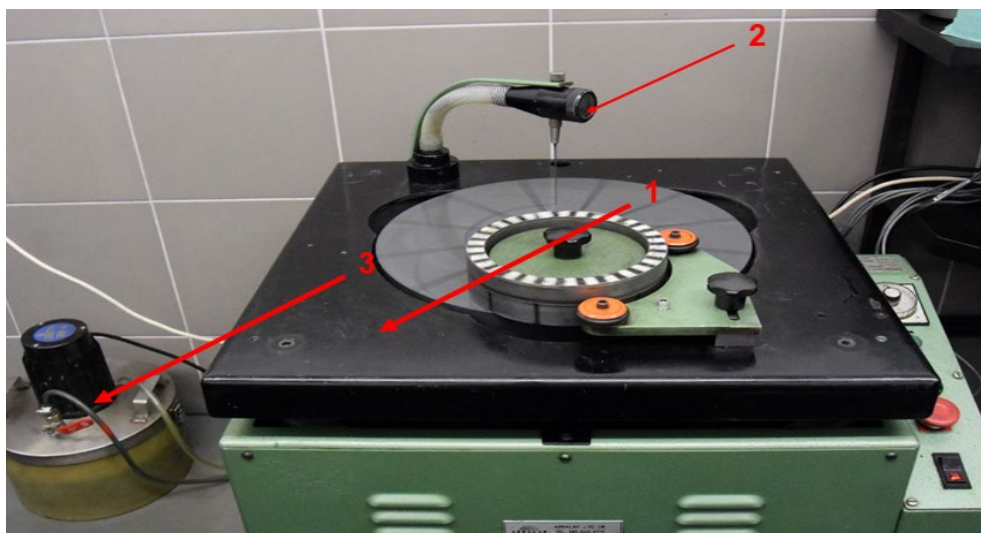


Rys. 4.1 Ogólny schemat realizacji badań własnych

## 5. PRZYGOTOWANIE BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

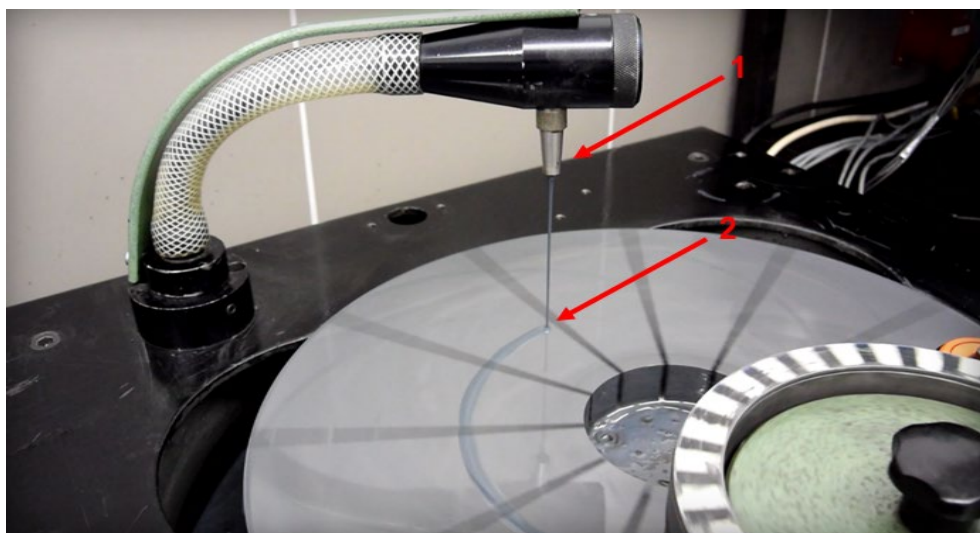
### 5.1. Konwencjonalny system dozowania zawiesiny ściernej docierarki Abralap 380

Urządzenie, które wykorzystano do przeprowadzenia eksperymentów badawczych, to docierarka jednotarczowa Abralap 380. Obrabiarka jest wyposażona w konwencjonalny system dozowania zawiesiny ściernej, w skład systemu wchodzi element spustowy i pompa (rys. 5.1).



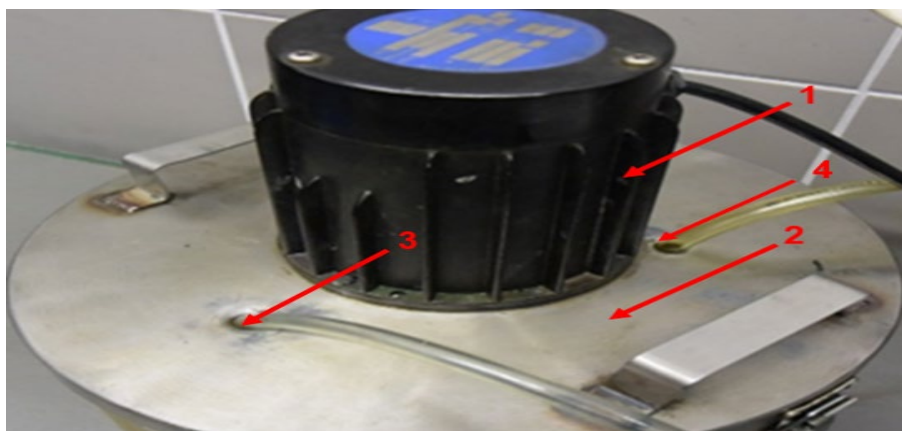
Rys. 5.1. Docierarka jednotarczowa z konwencjonalnym systemem dozowania zawiesiny ściernej (1- obrabiarka Abralap 380, 2- element spustowy, 3- pompa)

W konwencjonalnym systemie dozowania zawiesina wypływa z elementu spustowego w sposób swobodny, co przedstawiono na rys. 5.2.



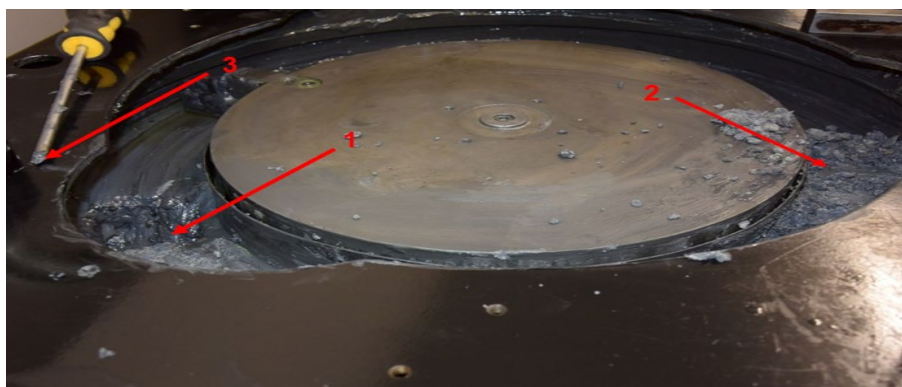
Rys. 5.2. Obrabiarka Abralap 380 z fabrycznie zamontowanym systemem dozowania (1-element spustu zawiesiny bez możliwości dokładnej regulacji strumienia, 2- ciągła struga zawiesiny podawana na docierak)

Taki sposób dozowania jest mało precyzyjny, zaś zawiesina ścierna wyływa z dużym naddatkiem. Wyniki badań wydajności pompy dozującej (rys. 5.3) w dalszej części pracy posłużą do analizy porównawczej zużycia zawiesiny ścierniej, przy zastosowaniu wymuszonego systemu dawkowania.



Rys. 5.3. Pompa wraz ze zbiornikiem na zawiesinę ścierną (1-pompa, 2-zbiornik, 3-przewód zasilający, 4-przewód powrotny)

Analizując konwencjonalny system dawkowania obrabiarki Abralap 380, można stwierdzić, że na wydajność dozowania w tym rozwiązaniu ma jedynie wpływ lepkość przygotowanej zawiesiny, która zależy od procentowej zawartości jej składników [26], [10]. W wyniku przeprowadzonych prób określono wydatek na poziomie 26 ml/min na obrabiarce Abralap 380 (1,56 dm<sup>3</sup>/h). Wadą konwencjonalnego systemu dawkowania jest to, że przygotowana zawiesina nie podlega stałemu mieszaniu (w czasie postoju obrabiarki), co skutkuje sedymentacją cząstek i zaburza założoną procentową zawartość mikroziaren ściernych dawkowanych podczas procesu obróbkowego. Kolejną wadą jest dawkowanie zawiesiny ścierniej z dużym naddatkiem. Duży wydatek zawiesiny podawanej strumieniem powoduje większe zanieczyszczenie obrabiarki (rys. 5.4). W takim przypadku konieczna jest dodatkowa obsługa związana z częstym oczyszczaniem obrabiarki z osadów (szlamu).

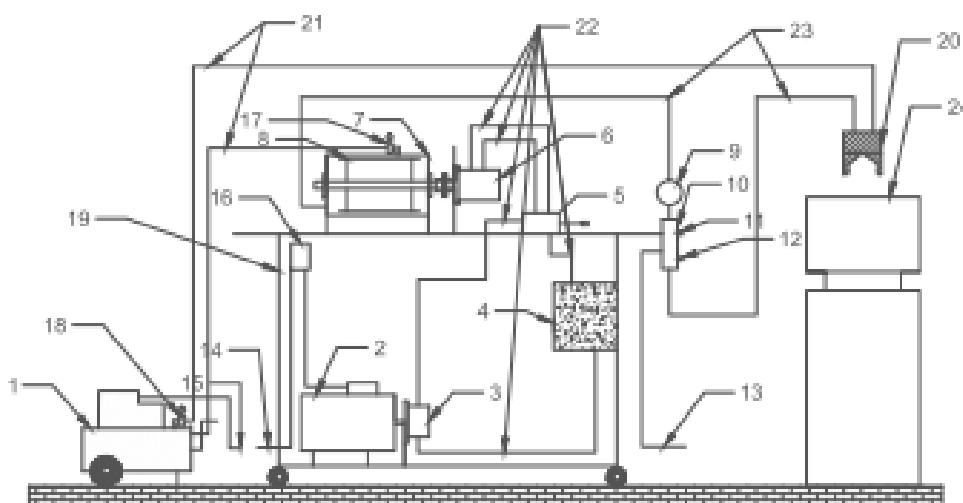


Rys. 5.4. Osadzanie szlamu na wewnętrznej części obrabiarki Abralap 380 (1-odpływ substancji, 2-gęsty osad przywarły do ścian rynny spustowej, 3- narzędzie do usuwania osadu)

## 5.2. Stanowisko badawcze z wymuszonym układem dozowania zawiesiny ścierniej - wersja I

### 5.2.1. Koncepcja układu

Dla zrealizowania celu rozprawy opracowano koncepcję wymuszonego systemu dozowania i nanoszenia zawiesiny ścierniej, którego schemat przedstawiono na rys. 5.5. Układ dozowania został podzielony na dwa zasadnicze zespoły. W skład pierwszego zespołu wchodzi ciśnieniowy zbiornik zamknięty wraz z mieszadłem o napędzie hydraulicznym, do którego, po napełnieniu zawiesiną ścierną, wprowadza się powietrze pod ciśnieniem. W skład drugiego zespołu wchodzi elektrozawór z regulatorem czasu włączenia i wyłączenia. System posiada precyzyjny rozpylacz, który uruchamia zawór sterujący [35].



Rys. 5.5. Schemat wymuszonego systemu dozowania i nanoszenia zawiesiny ścierniej – koncepcja I

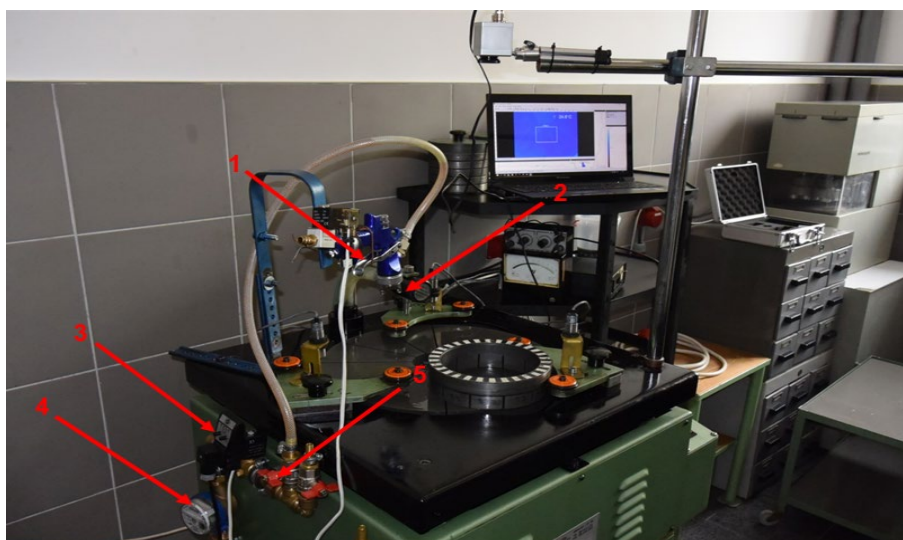
Wymuszony system (według koncepcji I) dozowania i nanoszenia zawiesiny ścierniej składa się z następujących elementów (rys. 5.5):

- 1) kompresor powietrza,
- 2) silnik elektryczny do napędu pompy,
- 3) pompa hydrauliczna,
- 4) zbiornik oleju,
- 5) rozdzielacz oleju hydraulicznego,
- 6) silnik hydrauliczny do napędu mieszadła,
- 7) ciśnieniowy zbiornik zawiesiny ścierniej,
- 8) mieszadło zawiesiny ścierniej,
- 9) licznik przepływu zawiesiny ścierniej,
- 10) elektrozawór sterujący wypływem zawiesiny ścierniej,
- 11) potencjometr nastawy czasu między otwarciem (nastawa OFF) 0,5-45 min,
- 12) potencjometr czasu otwarcia (nastawa ON) 0,5-10 s.,
- 13) zasilanie elektryczne elektrozaworu (230 V),
- 14) zasilanie silnika elektrycznego napędu pompy (230 V),

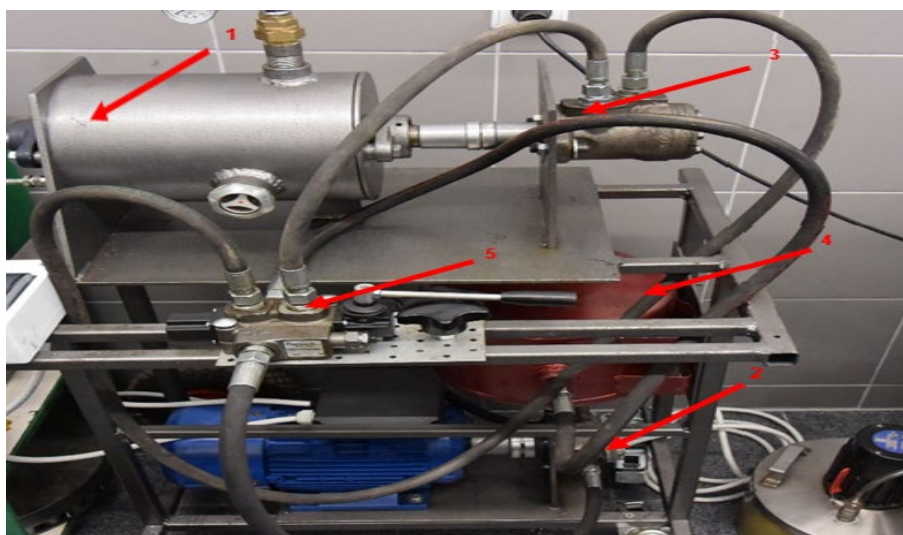
- 15) zasilanie elektryczne kompresora powietrza (230V),
- 16) włącznik silnika elektrycznego,
- 17) regulator ciśnienia powietrza wpływającego do zbiornika z zawiesziną ścierną,
- 18) regulator ciśnienia powietrza wpływającego do rozpylacza,
- 19) rama układu dozowania wraz z podwoziem,
- 20) rozpylacz,
- 21) przewód zasilający w sprężone powietrze zbiornik ciśnieniowy z zawiesziną ścierną i rozpylacz,
- 22) przewody wysokiego ciśnienia dostarczające olej do napędu mieszadła,
- 23) przewód dostarczający sprężoną zawieszinę ścierną do rozpylacza,
- 24) docierarka jednotarczowa Abralap 380.

### 5.2.2. Opis budowy stanowiska

Na podstawie opracowanej I koncepcji wymuszonego układu dozowania zbudowano prototyp, który jest przystosowany do współpracy z docierarką Abralap 380. Wymuszony system dawkowania i nanoszenia zawiesziny ścierniej podzielono na dwa układy (rys. 5.6 i 5.7).



Rys. 5.6. Układ pierwszy wymuszonego systemu dawkowania i nanoszenia zawiesziny ścierniej (1 - zespół nanoszenia, 2 - rozpylacz, 3 - elektrozwór wraz potencjometrami, 4 - licznik zużycia substancji ścierniej, 5 - zawór odcinający)



Rys. 5.7. Układ drugi wymuszonego systemu dawkowania i nanoszenia zawiesiny ścierniej (1 - zbiornik z zawiesiną ścierną, do którego dostarczane jest sprężone powietrze, 2 - hydrauliczny układ napędowy systemu mieszania, 3 - silnik napędu mieszadła wewnętrznego, 4 - zbiornik oleju hydraulicznego, 5 - rozdzielacz hydrauliczny)

Układ pierwszy odpowiedzialny jest za bezpośrednie nanoszenie zawiesiny ścierniej na tarczę docierającą. Składa się z elektrozaworu, kompresora z dwoma regulatorami ciśnienia i rozpylacza. Tak zbudowany system nanoszenia, równomiernie i w sposób zaplanowany pokrywa warstwą zawiesiny powierzchnię docieraka. Zawiesina jest podawana okresowo, a następnie następuje przerwa do czasu ponownego uruchomienia elektrozaworu. Operator ma możliwość zaplanowania czasu otwarcia rozpylacza i czasu przerw pomiędzy kolejnym nanoszeniem dawki.

Układ drugi odpowiedzialny jest za przygotowanie zawiesiny ścierniej. Głównym elementem tego podzespołu jest zamknięty zbiornik wraz z mieszadłem, do którego po napełnieniu zawiesiną ścierną wprowadza się sprężone powietrze. Sprężone powietrze wypycha ciecz ze zbiornika, w którym odbywa się proces ciągłego mieszania [35]. Tak przygotowana zawiesina ścierna przewodem wysokiego ciśnienia dostarczana jest do elektrozaworu zespołu pierwszego.

Prototyp ten poddano wstępnym próbom w celu sprawdzenia poprawności działania.

### 5.2.3. Wyniki prób docierania i ich ocena

Szczegółowej weryfikacji poddano wszystkie zespoły, aby określić wady i zalety zaprojektowanego rozwiązania. Analizując system stwierdzono, że:

- System pozwala w znaczący sposób ograniczyć zużycie substancji ścierniej w porównaniu do układu dozowania konwencjonalnego, w jaki jest wyposażona docierarka jednotarczowa.
- Układ umożliwia nanoszenie zawiesiny ścierniej o lepkości przekraczającej, 300 [mPa·s].
- Ciśnienie powietrza w zbiorniku z substancją ścierną w zależności od lepkości cieczy powinno zawierać się w przedziale od 0,1 do 2,5 bara. Wartość ciśnienia wypływu należy ustawić przy pomocy regulatora indywidualnie dla danej lepkości. Ciśnienie to nie może

przewyższać ciśnienia nanoszenia przez rozpylacz na docierak, ponieważ spowoduje to zakłócenia w dawkowaniu.

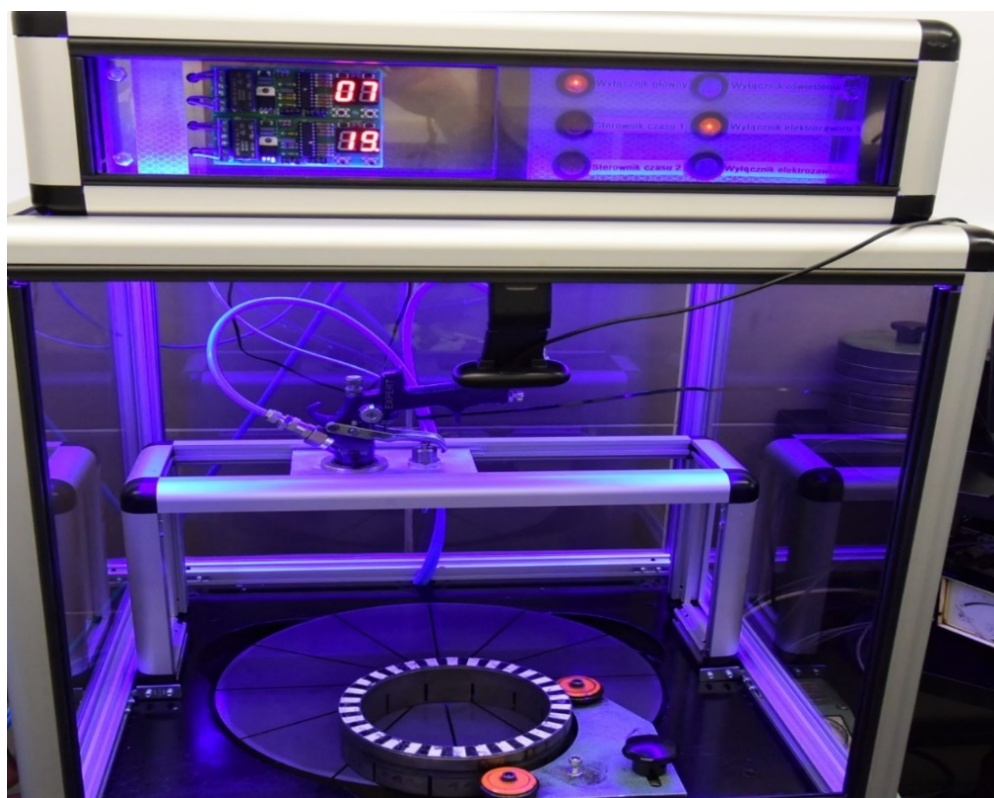
- Zainstalowany kompresor o wydajności 180 l/min i poborze mocy 2,2 KWh jest wystarczający.
- Zainstalowany układ hydrauliczny odpowiedzialny za mieszanie substancji w celu zapobiegania sedymentacji jest wydajny, ale zużywa dużo energii (około 3 KWh) i jest głośny.
- Rozdzielacz hydrauliczny sterujący przepływem oleju do silnika hydraulicznego ma wystarczający przepływ.
- Zawór sterujący otwarciem i zamknięciem wypływu substancji ścierniej ze zbiornika do rozpylacza działa poprawnie.
- Sterownik elektrozaworu pozwala ustawiać czas między otwarciem w przedziale od 0,5 s do 45 min oraz czas otwarcia w przedziale od 0,5 s do 10 s. Zakres tej pracy jest niezadawalający, ponieważ uniemożliwia to dawkowanie w szerszym zakresie, który dotyczy czasu nakładania i odstępu pomiędzy kolejnymi cyklami.
- Urządzenie nanoszące posiada szeroki zakres regulacji strumienia i dawki, jednak wypływ jest możliwy tylko przy zwolnionej iglicy. W tym rozwiązaniu iglica służy jedynie do regulacji wypływu dawki. Jest to pewien mankament tego rozwiązania, ponieważ po zamknięciu zaworu sterującego pewne ilości zawiesiny ścierniej spływają na tarczę docierającą w sposób niekontrolowany.
- Kolejną kwestią do rozwiązania jest zmiana sposobu podawania powietrza do rozpylacza. W tym rozwiązaniu powietrze jest podawane w sposób ciągły, co powoduje pewne zapylenie cząsteczkami substancji ścierniej w pomieszczeniu. Inne niepożądane skutki to zbędne zużycie sprężonego powietrza w sytuacji, gdy nie odbywa się nanoszenie substancji ścierniej.

Po przeprowadzeniu analizy skuteczności działania opracowanego wymuszonego systemu dozowania i nanoszenia podjęto decyzję o wprowadzeniu pewnych modyfikacji, które poprawią wydajność, dokładność dozowania i sposób mieszania. Zostanie również zbudowany elektroniczny układ sterowania. Wszystkie te zabiegi podyktowane są faktem, iż prototypowe rozwiązanie, choć działa poprawnie, to dla celów eksperymentu nie spełnia wszystkich oczekiwań. Na tej podstawie podjęto decyzję o modyfikacji pierwszej wersji urządzenia. Ostateczne rozwiązanie ma mieć charakter użytkowy, co może spowodować wdrożenie tego rozwiązania do produkcji przemysłowej [35], [10], [36].

### 5.3. Stanowisko badawcze z wymuszonym układem dozowania zawiesiny ściernej - wersja ostateczna

Nowy układ, który umownie został nazywany „wersją ostateczną”, został zmodyfikowany w taki sposób, aby zwiększyć jego skuteczność działania. Poprawiono w nim system sterowania, sposób nanoszenia zawiesiny ściernej, zmodyfikowano zespół ciągłego mieszania i zbiornik zawiesiny. Układ zawiera również dwa elektroniczne sterowniki sprzężone z dwoma elektrozaworami. Zastosowano precyzyjne sterowanie iglicą urządzenia nanoszącego, wykorzystując do tego celu siłownik pneumatyczny. Zintegrowano system sterowania oraz wyposażono układ w kamerę, której zadaniem jest rejestracja procesu na dysku komputera. W zmodyfikowanym układzie zbudowano kabinę przestrzeni roboczej, co zmniejszyło zapylenie pomieszczenia. System jest również przystosowany do współpracy z innymi docierarkami jednotarczowymi. Do jego konstrukcji użyto modułowych profili aluminiowych, a strefę roboczą w całości podświetlono w kolorze ułatwiającym obserwację obróbki.

Na rys. 5.8 przedstawiono zmodyfikowany układ dawkowania i nanoszenia zawiesiny ściernej zainstalowany na docierarce Abralap 380.



Rys. 5.8. Widok ogólny zmodyfikowanego układu wymuszonego dawkowania zawiesiny na tarczę docierającą



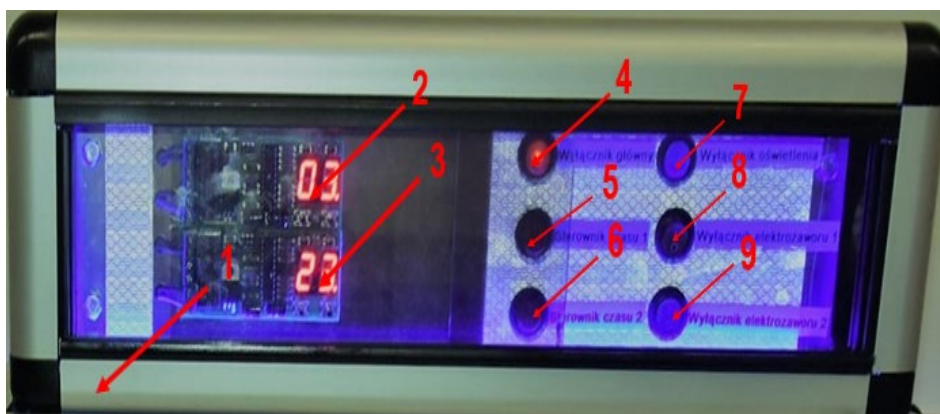
Na rys. 5.9 przedstawiono pozostałe zespoły wchodzące w skład zmodyfikowanego układu .



Rys. 5.9. Elementy wymuszonego układu dozowania (1-kompresor, 2-napęd wirnika mieszadła, 3-regulator ciśnienia wewnątrz zbiornika, 4-pokrywa zbiornika wraz z elementami mocującymi)

### 5.3.1. Opis konstrukcji stanowiska

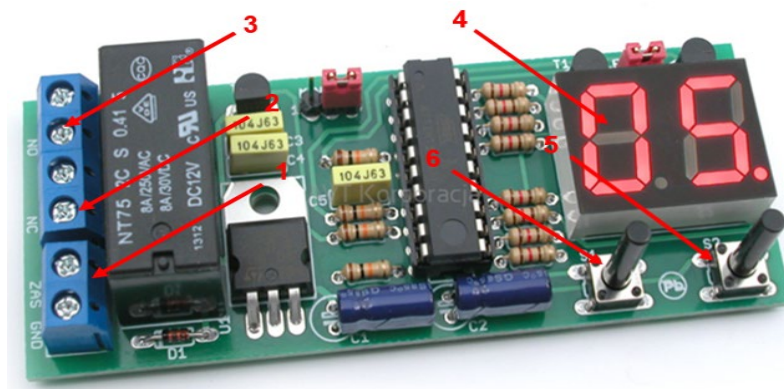
Na rys. 5.10 przedstawiono układ sterowania systemem wymuszonego dawkowania, wraz z opisem klawiszy funkcyjnych.



Rys. 5.10. Elektroniczny układ sterowania (1 - aluminiowa obudowa, 2 - wyświetlacz sterownika elektrozaworu 3 - wyświetlacz sterownika, 4 - wyłącznik główny zasilania układu sterowania, 5 - włącznik sterownika, 6 - włącznik sterownika, 7 - włącznik oświetlenia, 8 - włącznik elektrozaworu, 9 - włącznik elektrozaworu)

Układ sterowania powstał, na bazie autorskiego pomysłu, z następujących podzespołów:

- dwóch programowanych przekaźników czasowych z wyświetlaczami. Są to układy cyklicznego przełączania, o możliwości zaprogramowania czasu załączenia i czasu wyłączenia przekaźnika (rys. 5.11) [99],

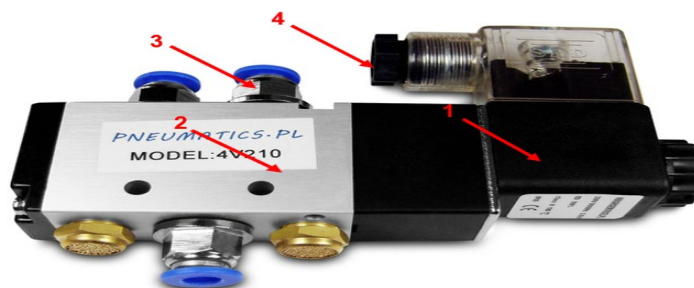


Rys. 5.11. Programowany przekaźnik czasowy (1 - zasilanie układu, 2 - układ wyjściowy NC, 3 - układ wyjściowy NO, 4 - cyfrowy, 5 - przycisk ustawienia czasu wyłączenia przekaźnika, 6 - przycisk ustawienia czasu załączenia przekaźnika) [99]

- zaworów elektromagnetycznych: MODEL:2V08-1/4 (rys.5.12) i MODEL: 4V210-1/4 (rys. 5.13), [100] które spełniają ważną funkcję w układzie sterowania,

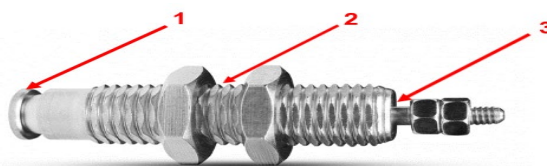


Rys. 5.12. Zawór elektromagnetyczny 2/2 drożny bezpośredniego działania - MODEL:2V08-1/4, (1 - cewka elektrozaworu, 2 - aluminiowy korpus, 3 - podejście gwintowe 1/4", 4 - podejście elektryczne 230V) [100]



Rys. 5.13. Elektrozawór siłownika 5/2 MODEL: 4V210-1/4, (1 - cewka elektrozaworu 2 - aluminiowy korpus, 3 - złączka wtykowa prosta 1/4", 4 - podejście elektryczne 230V) [100]

- mini siłownika pneumatycznego (rys. 5.14), który steruje otwarciem iglicy rozpylacza,



Rys. 5.14. Mini siłownik pneumatyczny CJPB 15x15 (1 – podejście sprężonego powietrza, 2 – mocowanie, 3 – tłoczysko siłownika [100]

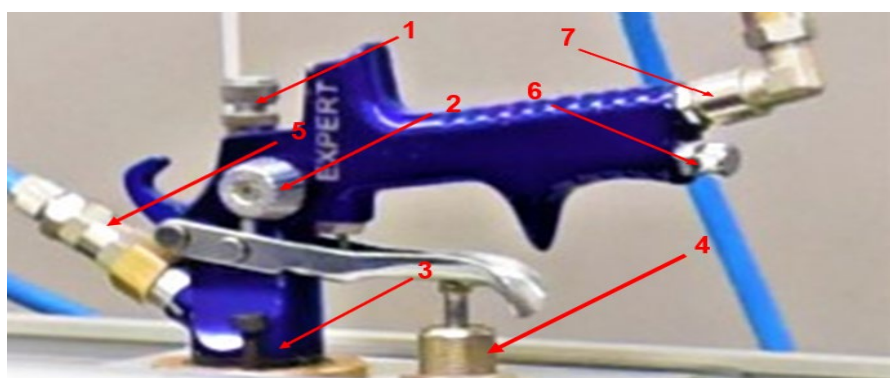
- zasilacza (rys. 5.15) [99].



Rys. 5.15. Zasilacz 12V 5A [99]

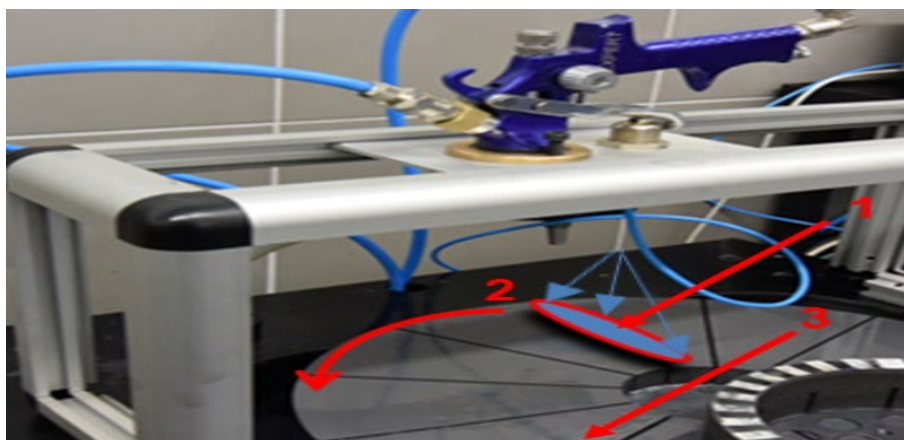
Układ sterujący, skonfigurowany z elementów przedstawionymi wcześniej, ma za zadanie sterowanie systemem wymuszonego dawkowania, dozowania i nanoszenia zawiesiny. Do jego zadań należy sterowanie czasem nanoszenia substancji ścierniej na docierak oraz sterowanie czasem przerwy pomiędzy kolejnymi cyklami nanoszonej warstwy. Układ pozwala na programowanie w szerokim zakresie i to programista ustala skalę czasową (minutową lub sekundową), co daje możliwość precyzyjnego zaplanowania procesu. Znając prędkość obrotową docieraka oraz dawkę i czas nanoszenia, można przewidzieć, jak gruba warstwa pokryje powierzchnię roboczą tarczy docierającej po jednym obrocie. Daje to duże oszczędności w zużyciu zawiesiny ścierniej.

Na rys. 5.16 przedstawiono zintegrowany system dawkowania i nanoszenia zawiesiny ścierniej po wprowadzeniu zaplanowanych modyfikacji, który współpracuje z elektronicznym układem sterowania.



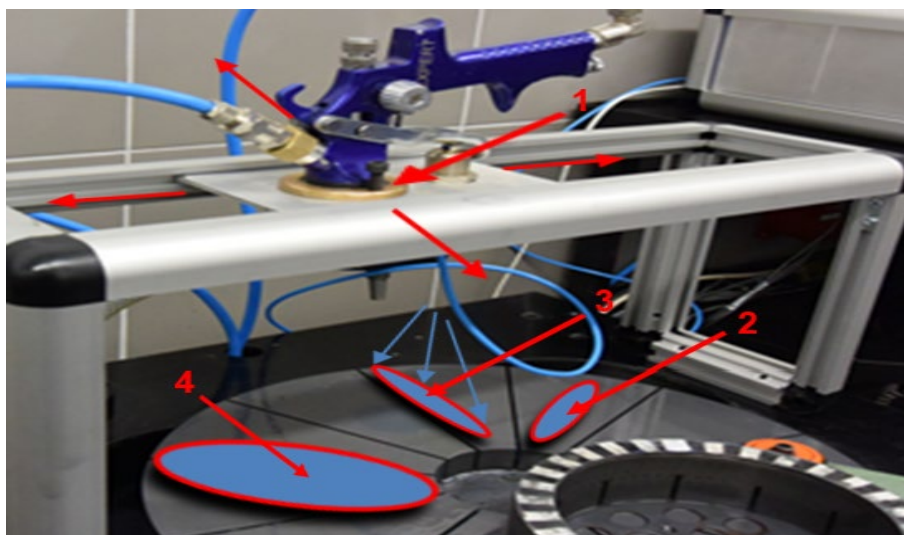
Rys. 5.16. Zintegrowany system dawkowania i nanoszenia zawiesiny (1 - Iglica dyszy natryskowej, 2 - regulator wielkości płamy nanoszonej na docierak, 3 - dysza rozpylająca z gniazdem, 4 - siłownik pneumatyczny sterujący iglicą, 5 - przyłącze doprowadzające sprężoną zawiesinę ścierną do systemu, 6 - zawór odcinający dopływ powietrza do rozpylacza, 7 - regulator powietrza dostarczanego do układu)

W tym rozwiązaniu zaproponowano nowy sposób dostarczania zawiesiny do urządzenia bezpośrednio nanoszącego warstwę ścierną na docierak, jak również zamontowano specjalny siłownik pneumatyczny, który steruje iglicą rozpylacza. Tak skonstruowany układ (rys. 5.17) pozwala nanosić zawiesinę ścierną w sposób zaplanowany i kontrolowany [35],[36], [10].



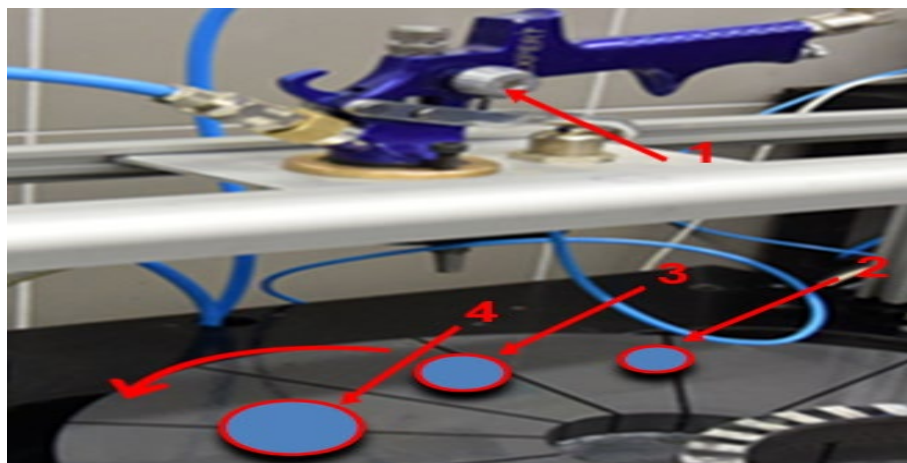
Rys. 5.17. Układ nanoszący substancję ścierną na docierak (1 - kształt plamy, którą tworzy nanoszona zawiesina ścierna, 2 - kierunek obrotu tarczy docierającej, 3 - nałożona warstwa zawiesiny)

Zmodyfikowany układ nanoszenia umożliwia zmianę kształtu plamy nanoszonej warstwy. Na rys. 5.18 zaznaczono poglądowo eliptyczne pola, jakie tworzy naniesiona warstwa zawiesiny ścierną. Pole może być umieszczane w różnych miejscach docieraka, pod różnym kątem i o różnej powierzchni.



Rys. 5.18. Eliptyczny kształt jaki przyjmuje strumień nakładanej warstwy, z możliwością umiejscowienia go w różnych miejscach docieraka (1 - położenie rozpylacza, 2, 3, 4 - różne położenia plamy i jej wielkość)

Urządzenie umożliwia również nanoszenie plamy zbliżonej kształtem do okręgu, jak również punktowe i kropkowe dozowanie zawiesiny ścierniej (rys. 5.19).



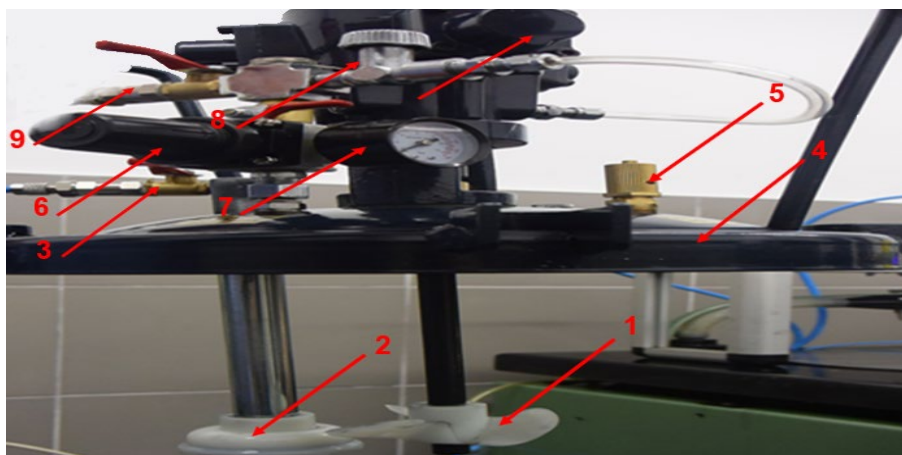
Rys. 5.19. Kształt zbliżony do okręgu jaki przyjmuje strumień nakładanej warstwy (1-regulator kształtu plamy nanoszonej na tarczę docierającą, 2, 3, 4 - różne położenia plamy zawiesiny ścierniej)

Jak można zaobserwować, wielkość i kształt plamy zależy od zadanych ustawień. Można również stwierdzić, iż układ pozwala na dozowanie wielkości pojedynczej dawki zawiesiny, co przekłada się na możliwość zaplanowania całkowitego zużycia substancji ścierniej w zaplanowanym procesie. System nanoszenia zapewnia utrzymanie pewnej założonej grubości nanoszonej warstwy na powierzchni docieraka podczas procesu docierania. Na rys. 5.20 przedstawiono pokrycie powierzchni docieraka zawiesiną po zastosowaniu opisywanego systemu. Można zauważyć jednolite pokrycie całej powierzchni tarczy docierającej, o czym świadczy charakterystyczny połysk jaki tworzy naniesiona zawiesina ścierna [10].



Rys. 5.20. Pokrycie powierzchni docieraka po zastosowaniu wymuszonego systemu przygotowania dozowania substancji ścierniej (1 - połyskująca powierzchnia po naniesieniu zawiesiny ścierniej)

Kolejnym ważnym elementem systemu jest układ odpowiedzialny za przygotowanie zawiesiny ścierniej w zamkniętym zbiorniku, do którego doprowadzane jest sprężone powietrze. Konstrukcja dna zbiornika zapewnia dobre warunki mieszania zawiesiny w sposób ciągły. Mieszadło ma napęd pneumatycznym oraz wirnik o kształcie śrubowym (rys. 5.21).



Rys. 5.21. Układ przygotowania zawiesiny ścierniej (1 - śruba mieszadła, 2 - smok, 3 - zasilenie substancją ścierną aparatu nanoszącego, 4 - pokrywa zbiornika, 5 - zawór bezpieczeństwa, 6 - regulator ciśnienia powietrza dostającego się do zbiornika mieszającego, 7 - manometr ciśnienia powietrza, 8 - regulator prędkości obrotowej mieszadła, 9 - przyłączy sprężonego powietrza)

### 5.3.2. Wyniki i analiza badań wstępnych

Głównym celem badań wstępnych było określenie wartości ubytku masowego i liniowego elementów wykonanych z ceramiki technicznej  $Al_2O_3$  oraz oszacowanie zużycia zawiesiny ścierniej przy konwencjonalnym systemie dawkowania. W badaniach wstępnych mierzono również lepkość nośnika ziaren ściernych na bazie oleju maszynowego LAN-68 i nafty kosmetycznej (w zależności od proporcji zmieszania tych dwóch składników) [101].

Przed przystąpieniem do badań zasadniczych przyjęto stałe warunki docierania, które zapisano w tabeli 5.1.

**Tabela 5.1.** Zestawienie stałych warunków docierania

<b>Prędkość obrotowa tarczy docierającej</b>	60 obr/min
<b>Nacisk jednostkowy</b>	0,0446 MPa
<b>Czas docierania</b>	20 min

Następnie dokonano pomiaru wydatku konwencjonalnego systemu dawkowania zawiesiny. Ustalono, że zużycie zawiesiny ścierniej jest na poziomie 26 ml/min (1560 ml/h). W wyniku badań wstępnych ustalono również, że układ nie zapewnia prawidłowego ciągłego mieszania zawiesiny ścierniej. Nie ma możliwości dokładnej regulacji ilości wypływającej zawiesiny ścierniej po włączeniu pompy dozującej. Wpływa to na przyspieszony proces sedymentacji ziaren ściernych już w zbiorniku mieszania.

Wyniki badań lepkości nośnika zawiesiny ścierniej przygotowanej na bazie oleju maszynowego LAN-68 i nafty kosmetycznej, w zależności od różnych proporcji składników, przedstawiono w tabeli 5.2.

**Tabela 5. 2.** Lepkość nośnika zawiesiny ścierniej

Stosunek oleju maszynowego do nafty kosmetycznej (wagowo)	Lepkość nośnika zawiesiny ścierniej $L_e$ [mPa·s]
10/10	10,3
18/10	16,5
30/10	23
42/10	29,5
50/10	34

W kolejnym etapie badań wstępnych ustalono poziom ubytku masowego i liniowego elementów wykonanych z ceramiki  $Al_2O_3$  przy zastosowaniu konwencjonalnej metody dawkowania. Substancja ścierna, której użyto, składała się z 10% (wagowo) ziaren ściernych. W tabeli 5.3 i 5.4 przedstawiono wyniki badań wstępnych docierania powierzchni płaskich przy następujących warunkach:

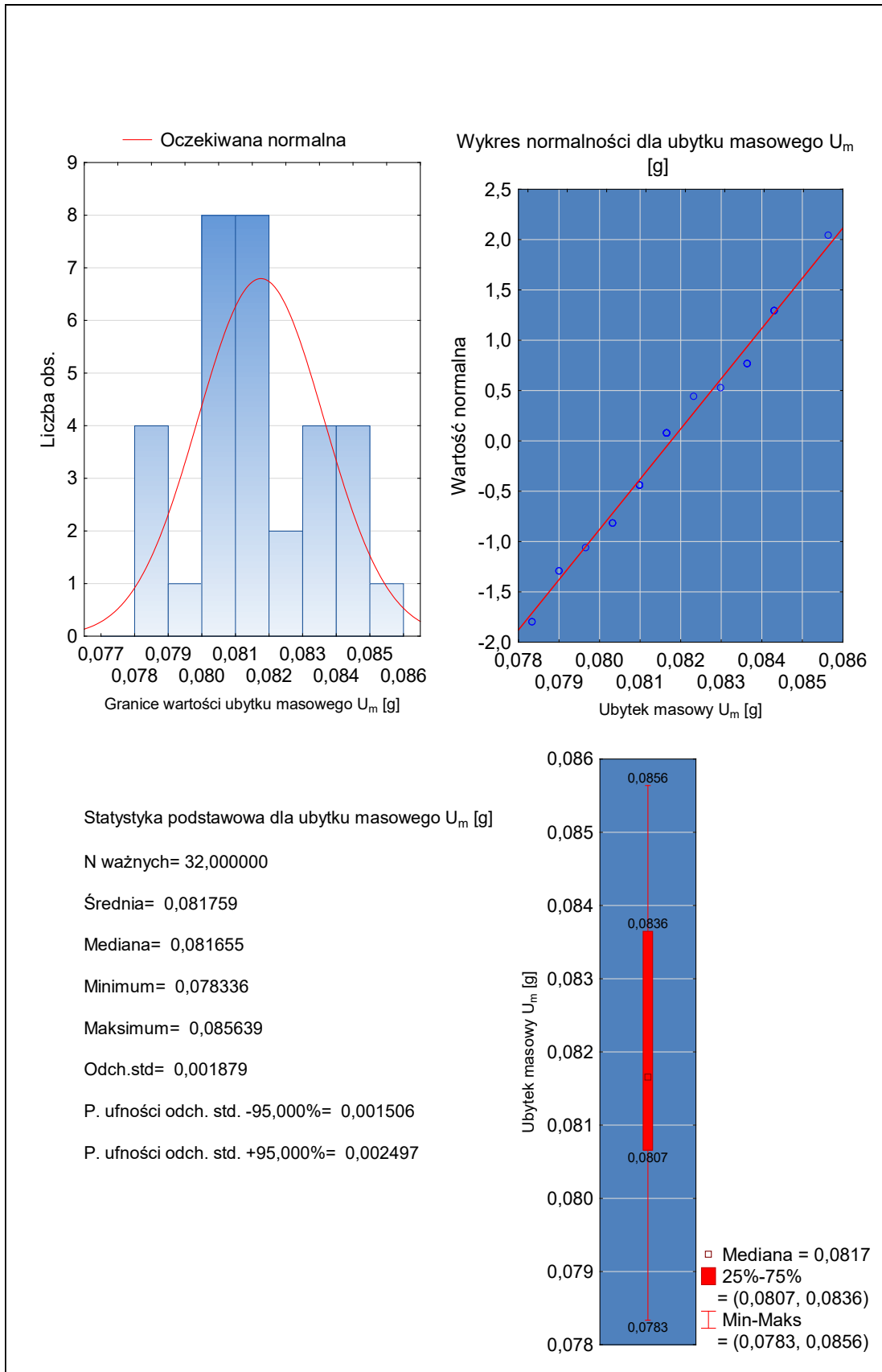
- prędkość obrotowa tarczy docierającej 60 obr/min,
- nacisk jednostkowy 0,0446 MPa,
- zawartość ziaren ściernych  $K = 10 \%$ ,
- lepkość nośnika ziaren ściernych 10,3 mPa·s,
- dawka zawiesiny ścierniej  $V_s = 260$  ml/10 min,
- czas realizacji procesu  $t = 10$  min.

W tabeli 5.5 i 5.6 przedstawiono zaś wyniki badań wstępnych docierania powierzchni płaskich elementów z  $Al_2O_3$  przy następujących warunkach:

- prędkość tarczy docieracza 60 obr/min,
- nacisk jednostkowy 0,0446 MPa,
- zawartość ziaren ściernych  $K = 10 \%$ ,
- lepkość nośnika ziaren ściernych 10,3 mPa·s,
- dawka zawiesiny ścierniej  $V_s = 260$  ml/10 min,
- czas realizacji procesu  $t = 20$  min.

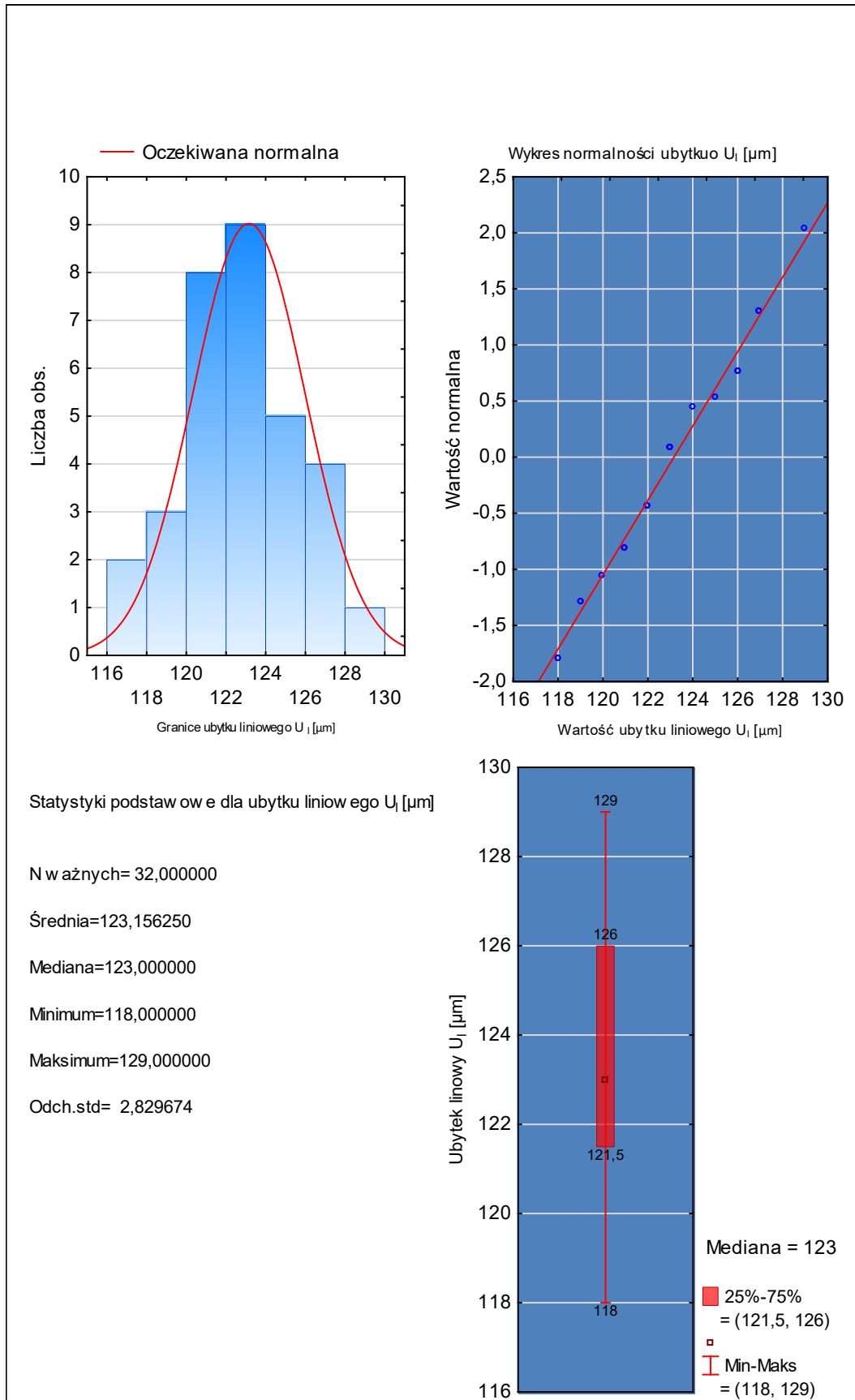
Stwierdzono, iż po 10 min docierania elementów wykonanych z  $Al_2O_3$  i konwencjonalnej metodzie dozowania zawiesiny ścierniej, ubytek masowy średnio osiąga wartość 0,0816 g, a średni ubytek liniowy ma wartość 121,1  $\mu m$ . Po wydłużeniu czasu docierania do 20 min ubytek masowy wyniósł 0,151 g, a ubytek liniowy 227,8  $\mu m$ . Wyniki te pozwoliły na oszacowanie wielkości ubytku masowego i liniowego elementów docieranych przy użyciu konwencjonalnego systemu dozowania zawiesiny ścierniej, w jaki jest wyposażona przez producenta obrabiarka Abralap 380. Uzyskane wyniki posłużą jako dane porównawcze do oceny wymuszonego systemu dozowania i nanoszenia, w który, dla potrzeb przeprowadzenia eksperymentów, została wyposażona docierarka jednotarczowa.

**Tabela 5.3.** Zestawienie analizy wyników ubytku masowego (czas docierania  $t = 10$  min)

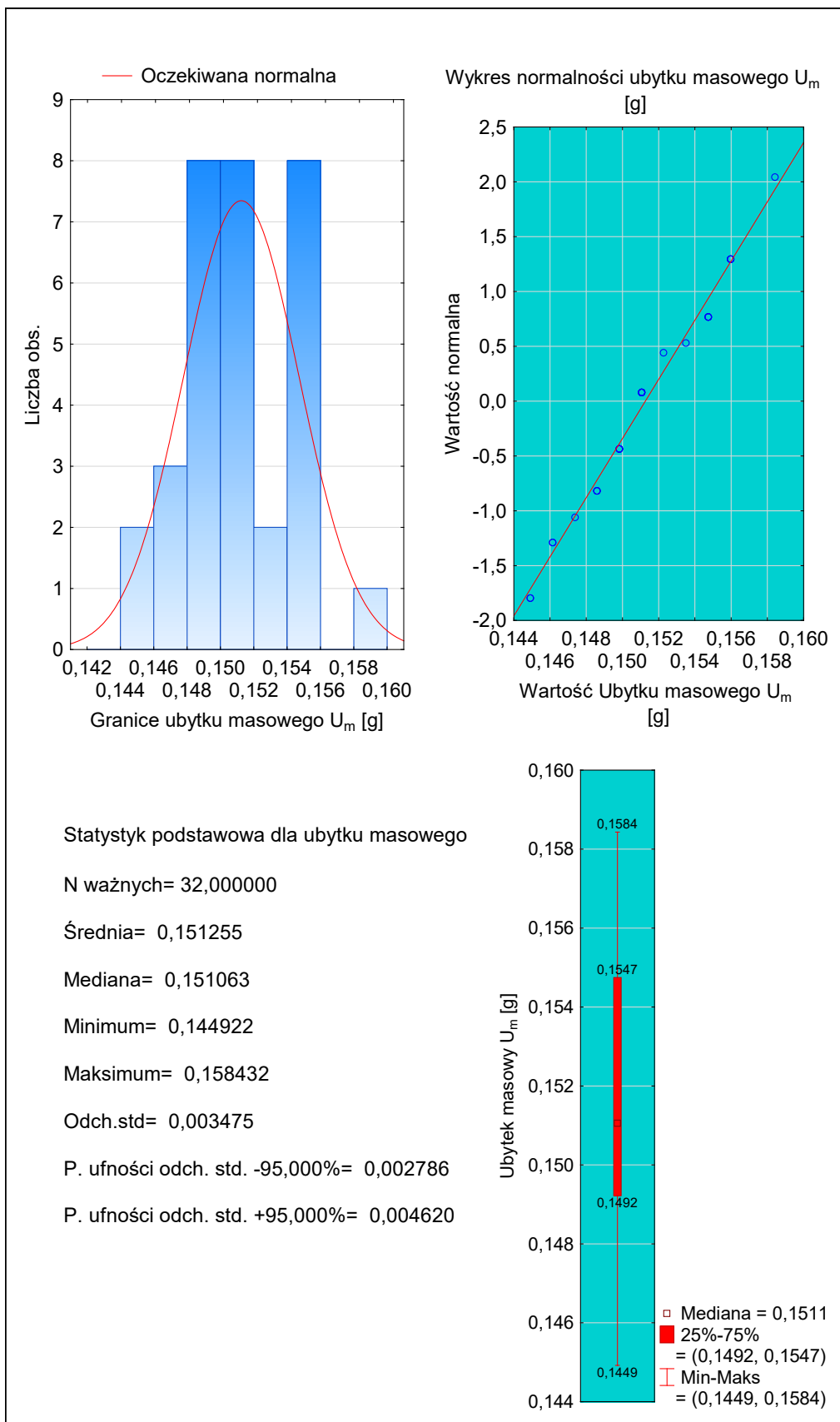




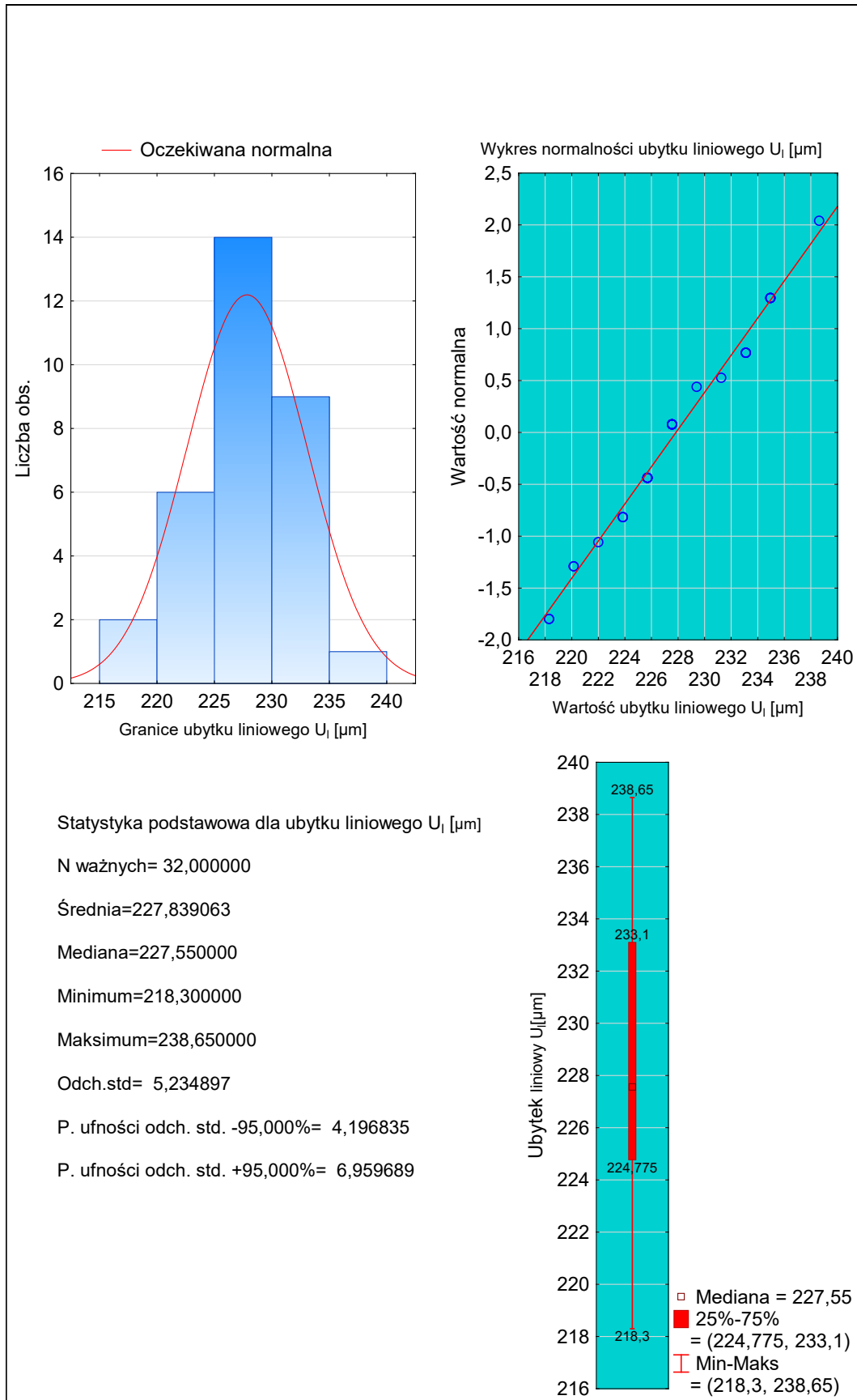
**Tabela 5.4.** Zestawienie analizy wyników ubytku liniowego (czas docierania  $t = 10$  min)



**Tabela 5.5.** Zestawienie analizy wyników ubytku masowego (czas docierania  $t = 20$  min)



**Tabela 5.6.** Zestawienie analizy wyników ubytku liniowego (czas docierania  $t = 20$  min)



#### 5.4. Charakterystyka docieranych próbek

Dla przeprowadzenia eksperymentów związanych z wykorzystaniem wymuszonego systemu dozowania i nanoszenia zawiesiny ścierniej użyto próbek z ceramiki technicznej  $Al_2O_3$ , o przekroju walcowym (rys. 5.22).



Rys. 5.22. Elementy docierane z ceramiki  $Al_2O_3$  [102]

Materiał zastosowany do badań to ceramika w stanie surowym, wytworzona na potrzeby eksperymentu i dostarczona przez producenta (Zakład Ceramiki Specjalnej Ceramit, Brzeźnica) po zakończeniu procesu wypalania. Ceramika  $Al_2O_3$  ma właściwości podane w tabeli 5.7 [102].

Tabela 5.7. Właściwości ceramiki  $Al_2O_3$

Właściwości	Jednostka	$Al_2O_3$
Gęstość	kg/dm <sup>3</sup>	3,93
Twardość Vickersa	HV	1800
Twardość Rockwella	HRC	80
Współczynnik rozszerzalności cieplnej $\alpha$	$\alpha \times 10^{-6}/K$	9,10
Przewodność cieplna	W/mk	25
Maks. temp pracy	°C	1850
Moduł Younga	GPa	380
Wytrzymałość na zginanie przy (800°C)	MPa	220
Wytrzymałość na ściskanie przy (800°C)	MPa	1500
Odporność na pęknięcia kruche	MPa m <sup>1/2</sup>	4,6
Oporność elektryczna przy (600°C)	Oh/m	108

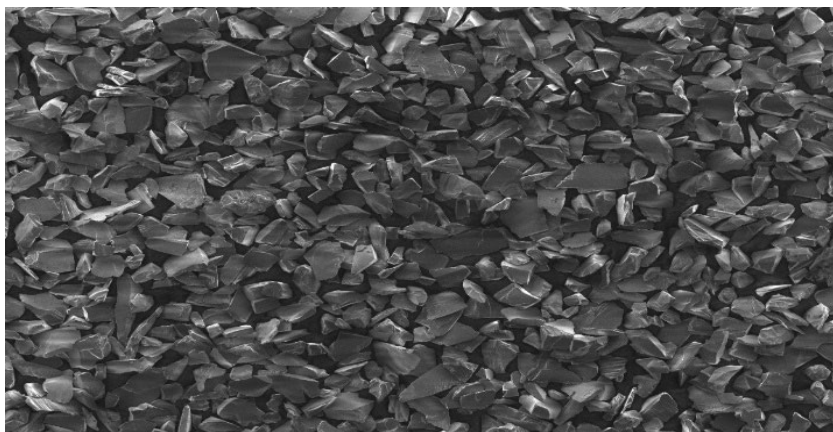
Ceramika  $Al_2O_3$  wykorzystana do badań to materiał o bardzo wysokiej twardości. Wykazuje również wysoką odporność na działanie wysokich temperatur, posiada wysoką oporność elektryczną, wykazuje bardzo dobre właściwości w trudnym środowisku chemicznym i gazowym. Ceramika jest materiałem kruchym [72], [81], [36], [63]. Odształca się sprężysto, aż do momentu zniszczenia. W tabeli 5.8 przedstawiono wymiary badanych elementów ceramicznych.

**Tabela 5.8.** Średnie wymiary próbek przed docieraniem

<b>Materiał</b>	<b>Wysokość</b> [mm]	<b>Średnica</b> [mm]	<b>Pole docieranej</b> <b>powierzchni</b> <b>elementu</b> [mm <sup>2</sup> ]	<b>Masa</b> [g]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,85	17,82	85,89	4,66

### 5.5. Przygotowanie zawiesiny ścierniej

Przeprowadzenie eksperymentów wymaga przygotowania substancji ścierniej dedykowanej do obróbki danego materiału. W tym przypadku materiał obrabiany to ceramika  $Al_2O_3$ , a materiał ścierny to ziarna węgla krzemu 98C F400/17 [66], [86], [95]. Na rys. 5.23 przedstawiono zdjęcie zastosowanych ziaren węgla krzemu (przy 200 krotnym powiększeniu roboczym) [103].



Rys. 5.23. Użyty w badaniach węgiel krzemu 98C F400/17 w 200 krotnym powiększeniu roboczym, (mikroskop skaningowy JOEL JSM-7800F) [103]

Ziarna ściernie w procesie docierania muszą być zatopione w nośniku. W tym przypadku nośnikiem jest mieszanina oleju maszynowego LAN-68 i nafty kosmetycznej. W celu sprawdzenia wpływu podstawowych czynników dawkowania, to jest: zawartości procentowej ziaren K [%], dawki zawiesiny  $V_s$  [ml/20 min] oraz lepkości nośnika  $L_e$  [mPa·s], sporządzono zestaw zawiesin (tabela 5.9).

**Tabela 5.9.** Stosowane udział procentowe ziaren ściernych i wartości lepkości nośnika (w różnych konfiguracjach)

Lp.	Zawartość ziaren ściernych K [%]	Lepkość nośnika $L_e$ [mPa s]
1	15	10,3
2	9	16,5
3	21	16,5
4	5	23
5	15	23
6	25	23
7	9	29,5
8	21	29,5
9	15	34

Skład opracowano na podstawie badań wstępnych. Następnie określono wartości maksymalne i minimalne K i  $L_e$ , zaś na podstawie wybranego planu badań określono pozostałe wartości czynników badanych.



### **5.5. Sposób oczyszczania powierzchni próbek po docieraniu**

Oczyszczenie elementów po docieraniu jest niezbędnym zabiegiem przed przystąpieniem do pomiarów. Jako urządzenia myjącego użyto myjki ultradźwiękowej TYP UM-0,5. Proces mycia próbek odbył się w kąpeli benzyny ekstrakcyjnej, co zapewnia wysoką jakość powierzchni po umyciu. Na tak przygotowanych próbkach dokonano pomiarów unikając niepotrzebnych zakłóceń.

### **5. 6. Metody badań i aparatura**

#### **5.6.1 Sposób oceny kształtu ziaren ściernych**

Realizacja badań własnych wymagała specjalistycznej aparatury badawczej i pomiarowej. Na podstawie opracowanej koncepcji wymuszonego przygotowania, dozowania i nanoszenia zawiesiny zbudowano specjalistyczne stanowisko, na którym docierano płaskie elementy z ceramiki  $Al_2O_3$ . Do pomiarów użyto kilku urządzeń. Pierwszym jest mikroskop skaningowy (rys. 5.24) [103]. Mikroskop posłużył do jakościowej analizy kształtu ziaren ściernych użytych w badaniach.



Rys. 5.24. Mikroskop skaningowy JOEL JSM-7800F [103]

### 5.6.2. Sposób oceny lepkości nośnika płynnego ziaren ściernych

Kolejnym urządzeniem pomiarowym był wiskozymetr rotacyjny, który przedstawiono na rys. 5.25 [104]. Urządzenie to pozwoliło na pomiar lepkości przygotowanego płynu.



Rys. 5. 25. Wiskozymetr rotacyjny [104]

### 5.6.3. Sposób oceny ubytku masowego próbek

Do pomiaru ubytku masowego próbek użyto wagi laboratoryjnej (rys. 5.26) [105]. Dane techniczne tego urządzenia przedstawiono w tabeli 5.10.



Rys. 5.26. Widok wagi laboratoryjnej Radwag Was 220/X [105]



**Tabela 5.10.** Dane techniczne urządzenia Radwag Was 220/X [105]

<b>Obciążenie maksymalne</b>	220 g
<b>Obciążenie minimalne</b>	10mg
<b>Dokładność odczytu</b>	0,1 mg
<b>Zakres tary</b>	-220 g
<b>Powtarzalność (5%, max)</b>	0,08mg
<b>Liniowość</b>	±0,2 mg
<b>Czas stabilizacji</b>	2s
<b>Adiustacja wewnętrzna</b>	automatyczna
<b>Klasa dokładności OIML</b>	I
<b>Wyświetlacz</b>	5"(pojemnościowy, dotykowy)
<b>Obsługa bezdotykowa</b>	2 czujniki podczerwieni
<b>Bazy danych</b>	7 baz
<b>Interfejs</b>	2×RS232, USB-A, USB-B, Wi-Fi®,
<b>Zasilanie</b>	100 ÷ 240 V AC 50 / 60 Hz
<b>Maksymalny pobór mocy</b>	250 mA
<b>Temperatura pracy</b>	+10 ÷ +40°C
<b>Wymiar szalki</b>	ø100 mm

#### 5.6.4. Sposób oceny ubytku liniowego próbek

Pomiaru ubytku liniowego dokonano przy pomocy mikromierza zewnętrznego (rys. 5.27) [106]. Zastosowany przetwornik elektroniczny wraz z cyfrowym wyświetlaczem zapewniają żądaną dokładność pomiaru. Szczegółowe dane techniczne mikromierza zostały zawarte w tabeli 5.11.



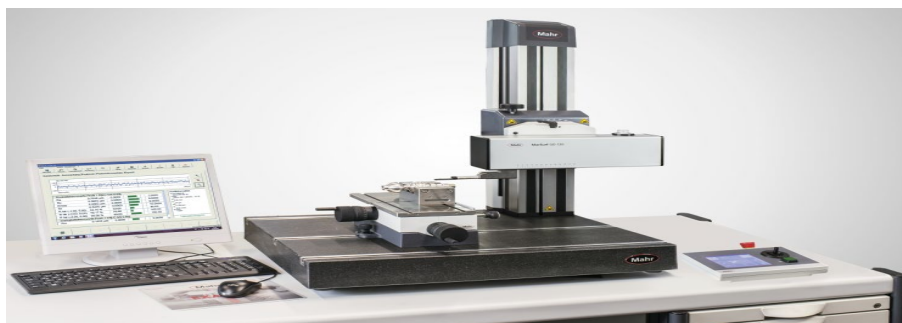
Rys. 5.27. Mikromierz cyfrowy [106]

**Tabela 5.11.** Dane techniczne mikrometru cyfrowego Mitutoyo-Quantunike [106]

<b>Zakres pomiarowy</b>	0-25 mm
<b>Rozdzielczość</b>	0,001 mm
<b>Błąd maksymalny</b>	0,001 mm
<b>Stopień zabezpieczenia</b>	IP65
<b>Powierzchnie pomiarowe</b>	węgiel spiekany
<b>Dodatkowe informacje</b>	funkcja ABS, funkcja oszczędzania baterii (automatyczne wyłączenie), sygnalizacja wyczerpania baterii, skok śruby mikrometrycznej 2 mm/obr.
<b>Zgodność z normami</b>	DIN 863

### 5.6.5. Sposoby oceny chropowatości powierzchni próbek po docieraniu

Pomiaru chropowatości powierzchni obrobionych elementów dokonano wykorzystując dwa urządzenia. Pierwsze urządzenie to MarSurf XR 20 z GD 120 (rys. 5.28) [107]. Szczegółowe dane techniczne urządzenia zostały zawarte w tabeli 5.12.



Rys. 5.28. Referencyjne stanowisko do pomiaru chropowatości i falistości MarSurf XR 20 z GD 120 firmy Mahr [107]

**Tabela 5.12.** Dane techniczne urządzenia MarSurf XR 20 z GD 120

<b>Zasada pomiaru</b>	Metoda profilometryczna
<b>Czujnik</b>	Czujnik R, MFW 250 B
<b>Zakres pomiarowy mm</b>	MFW 250: $\pm 25 \mu\text{m}$ , $\pm 250 \mu\text{m}$ , (do $\pm 750 \mu\text{m}$ ); $\pm 1,000 \mu\text{m}$ , $\pm 10,000 \mu\text{m}$ (do $\pm 30,000 \mu\text{m}$ )
<b>Filtr wg ISO/JIS</b>	Filtr wg ISO 16610-21 (wcześniej ISO 11562), odporny filtr Gaussa wg ISO 16610-31, filtr wg ISO 13565
<b>Odcinki odwzorowania</b>	Automatycznie; 0,56 mm; 1,75 mm; 5,6 mm; 17,5 mm, 56 mm*, pomiar do zatrzymania, zmienny * Odcinek pomiarowy zależny od mechanizmu posuwowego
<b>Liczba n pojedynczych odcinków pomiarowych wg ISO/JIS</b>	1 do 50 (standard: 5)
<b>Parametry</b>	Ponad 100 parametrów dla profili R, P, W według aktualnych norm ISO/JIS lub MOTIF (ISO 12085)

Drugim urządzeniem, jakiego użyto do pomiaru powierzchni, był mikroskop laserowy 3D Laser Scanning Confocal Microscope VK-X Series (rys. 5.29) [108].



Rys. 5.29. Mikroskop laserowy (Keyence 3D Laser Scanning Confocal Microscope VK-X Series) [108]

## 5.7. Metodyka planowania doświadczeń

Po wykonaniu badań wstępnych oraz zaprojektowaniu i wykonaniu stanowiska do przygotowania, dozowania i nanoszenia zawiesiny ścierniej, przystąpiono do badań zasadniczych wpływu podstawowych warunków dawkowania zawiesiny, na efekty docierania płaskich elementów ceramicznych.

### 5.7.1. Model badań zasadniczych

Metodyka planowania doświadczeń w niniejszej pracy została skoncentrowana na takiej optymalizacji parametrów technologicznych dawkowania, by osiągnąć maksymalny ubytek liniowy docieranych elementów. Tak więc celem pracy było wdrożenie układu dozowania, który znacząco, w porównaniu do konwencjonalnego dawkowania, zmniejszy zużycie zawiesiny ścierniej. Za cel przyjęto również określenie wpływu trzech czynników wejściowych dawkowania na efektywność obróbki.

### 5.7.2. Wybór planu eksperymentów

Przystąpienie do prac własnych wymaga oceny możliwości technicznych dotyczących dokonania pomiarów badanych elementów oraz wytworzenie innowacyjnego stanowiska badawczego. W tym celu dokonano rozpoznania na podstawie omówionych w rozdziale 2.3 kryteriów, takich jak: efektywność i informatywność poszczególnych programów badawczych [70], [65], [59], [2], [28]. Aby możliwe było porównanie, należy określić liczbę czynników badanych oraz niezbędną liczbę prób tak, aby uzyskać informacje o wysokiej wiarygodności [48], [20].

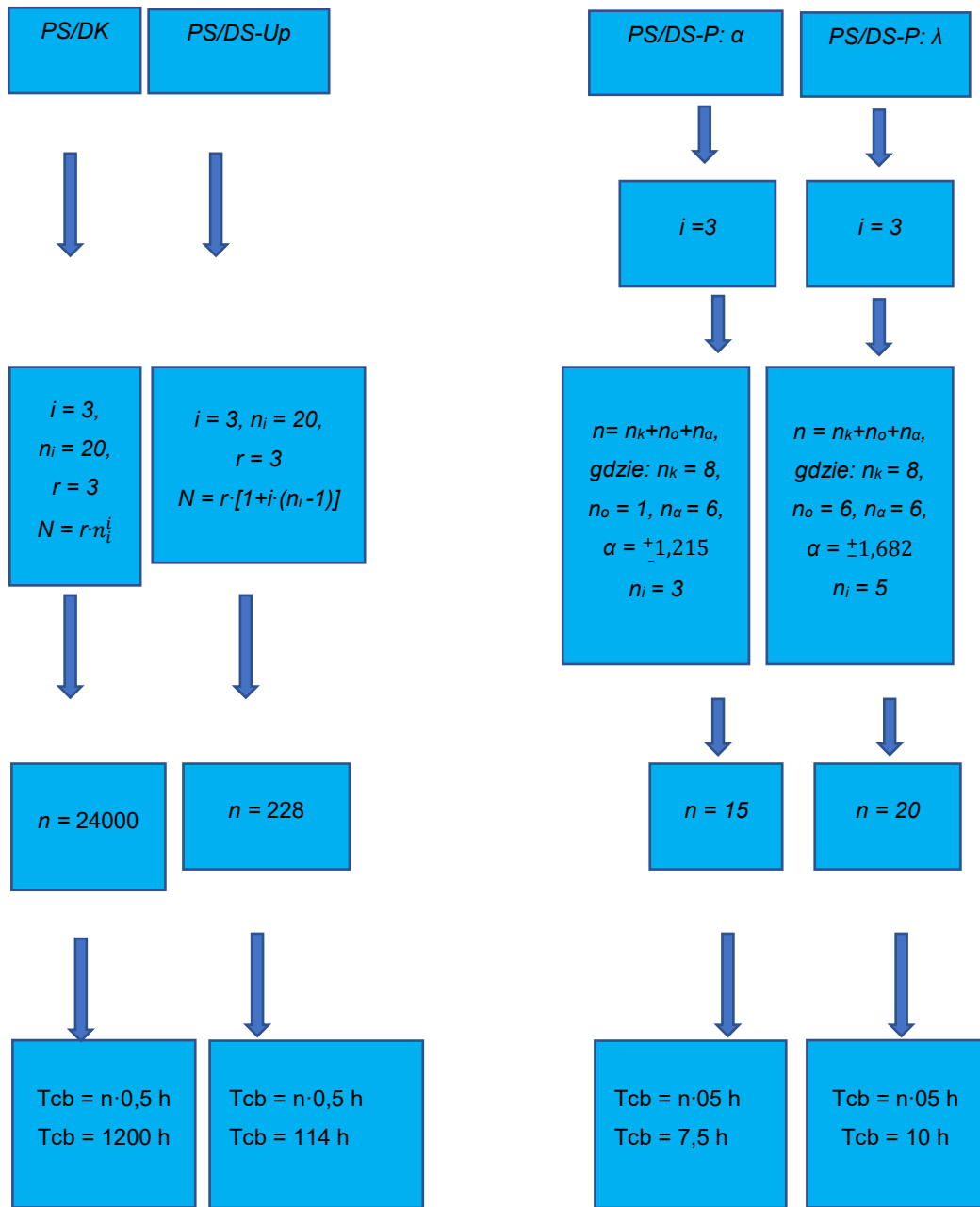
Program **PS/DK** w swym założeniu wykorzystuje wszystkie możliwe układy czynników badanych. Przy założeniu liczby czynników  $i = 3$ , liczba prób  $n_i = 20$  oraz dla  $r = 3$  powtórzeń otrzymano całkowitą liczbę prób  $N = 24000$ . Zakładając czas pojedynczej próby  $t = 0,5$  h, daje to czas realizacji badań  $T_{cb} = 1200$  h. Oceniając przydatność programu **PS/DK** stwierdzono, że informatywność programu jest silnie zależna od liczby czynników badanych oraz ich rozmieszczeniu w przedziałach  $[x_{max}, x_{min}]$ , co wpływa na długi czas badań. Z tego powodu nie zastosowano programu **PS/DK** do badań własnych [70]. Przeanalizowano również pod kątem możliwego wykorzystania do badań własnych program **PS/DS-Up**. Program opiera się na dokonywaniu selekcji czynników badanych  $X$  i ustaleniu ich centralnych wartości. Ustalone wartości centralne nie ulegają zmianie w czasie kolejnych prób wpływu pojedynczego czynnika  $X$ . Aby była możliwość ustalenia wartości centralnej, należy w pierwszej kolejności przeprowadzić analizę wstępną obiektu badań. Program **PS/DS-Up** ma charakter procedury jednoznacznie określonej przed rozpoczęciem badań, po określeniu w pierwszej kolejności wartości centralnych programu. Informatywność programu **PS/DS-Up** jest nieco ograniczona w stosunku do programu **PS/DK** i w znacznym stopniu, zależy od arbitralnego wyboru wartości centralnych. Liczbę wymaganych pomiarów w programie **PS/DS-Up** jest to znacznie mniejsza i wynosi  $N = 228$  przy takich samych założeniach:  $i = 3$ ,  $n_i = 20$ ,  $r = 3$ . Całkowity czas badań oszacowano na  $T_{cb} = 114$  h. Czas realizacji badań radykalnie się zmniejszył.

Kolejny program to **PS/DK-2<sup>i</sup>**. Program w swym założeniu opiera się na analizie statystycznej modelu liniowego i następnie na analizie regresji oraz wariancji. W tym programie wymagana liczba prób wynosi  $N = 24$ . Rozwinięciem programu **PS/DK-2<sup>i</sup>** jest program **PS/DS-2<sup>i-p</sup>**. Program ten ma pewną zaletę, względem programu **PS/DK-2<sup>i</sup>**, a mianowicie charakteryzuje się własnością zwaną nadmiarowością informacyjną, która pozwala na analizę modelu liniowego. W tym modelu występują niewiadome, które określamy doświadczalnie (dla  $i = 3$ ,  $n_i = 20$  oraz  $r = 1$  niewiadome przyjmują postać  $b_0, b_1, b_2, b_3 \dots b_k, \dots, b_i$ ).

W tym przypadku większa liczba równań zwiększa dokładność modelu liniowego, który obliczamy wielokrotnie z równań, a następnie określamy ich miary położenia (np. średnią arytmetyczną). Program ten w przypadku  $i = 3$  czynników badanych wykazuje nadwyżkę równań  $r = 4$ , należy określić jedynie, które 4 pomiary z 8 wybieramy. Podsumowując, możliwość zastosowania programu **PS/DS-2<sup>i-p</sup>**, który dla założonego  $i = 3$  i  $p = 1$  pozwala na ograniczenie w znacznym stopniu błędów pomiarowych, jest jego zaletą. Po analizie programu **PS/DK-2<sup>i</sup>** i jego rozwiniętej formy, to jest programu **PS/DS-2<sup>i-p</sup>** nie zdecydowano się na wybór tego rozwiązania, choć całkowity czas niezbędnych badań w tym programie wynosi  $T_{cb} = 4$  h (tylko samego docierania). Zdecydował o tym fakt, iż ten program wykorzystuje jedynie model liniowy, co może być niewystarczającym rozwiązaniem w tym przypadku.

Programy **PS/DS-P:α** i program **PS/DS-P:λ**, w swym założeniu, wykorzystują model nieliniowy w postaci wielomianu drugiego stopnia. Podstawową cechą programów **PS/DS-P:α** i **PS/DS-P:λ** jest wprowadzanie specjalnych kompozycji (układów) wartości czynników badanych zapewniających tzw. ortogonalność - dotyczy to programu **PS/DS-P:α** oraz pojęcie rotatabilności związane z programem **PS/DS-P:λ**. Analizując przydatność powyższych programów do badań własnych stwierdzono, że przy wyborze programu **PS/DS-P:α**, badania powinny być realizowane na czterech poziomach, a łączna liczba układów pomiarów  $n = 15$ . Czas realizacji badań przy pomocy tego programu wyniesie  $T_{cb} = 7,5$  h. W programie **PS/DS-P:λ** badania powinny być realizowane na pięciu poziomach, a łączna liczba układów do realizacji pomiarów  $n = 20$ , czas realizacji badań przy pomocy tego programu wyniesie  $T_{cb} = 10$  h.

Ostatecznie, do przeprowadzenia badań własnych, wybrano program **PS/DS-P:λ** ponieważ jego czasochłonność jest względnie mała a informatywność stosunkowo wysoka. Model opisany w tym programie jest wielomianem drugiego stopnia, co pozwoli na interpretację graficzną postaci funkcji [70], [65], [64], [48], [20]. Na rys. 5.30 przedstawiono schemat postępowania podczas wartościowania przydatności poszczególnych programów badawczych [37].



Rys. 5.30. Schemat porównawczy analizowanych programów badawczych [37]

### 5.7.3. Opis ogólny wnioskowania statystycznego

Do badań zasadniczych eksperymentalnych wykorzystano plan badań statyczny, zdeterminowany, selekcyjny, wieloczynnikowy, quasi-rotabilny drugiego rzędu opracowany przez Boxa i Huntera, o kulistym rozkładzie informacji [20]. Zapewnia to stałość oszacowania funkcji regresji w pewnym otoczeniu punktu centralnego planu **PS/DS-P: λ**.

Wartości czynników wyjściowych **Y** są zmiennymi o charakterze losowym. Takie założenie pozwala zakładać, iż występujące zakłócenia **U** oraz warunki stałe **C** są parametrami pozornie stałymi przy założonych warunkach badań. W pracy funkcję obiektu określono w wielowymiarowej przestrzeni czynnikowej jako równanie regresji:

$$Y=f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k) \quad (5.1)$$

gdzie:

$k$  - liczba analizowanych zmiennych,

Wyznaczane współczynniki  $B = [b_1, b_2, \dots, b_k]$  dotyczą równania regresji:

$$Y = b_0x_1 + b_1x_2 + b_2x_3 + b_3x_4 + b_4x_2^2 + b_5x_3^2 + b_6x_4^2 + b_7x_2x_3 + b_8x_2x_4 + b_9x_3x_4, \quad (5.2)$$

gdzie:

$Y = U_i$  to wartość czynnika wyjściowego z modelu, zaś zmienne niezależne odpowiednio:

$$x_1 = 1, x_2 = K, x_3 = V_s, x_4 = L_e$$

(5.3)

Plan **PS/DS-P: λ** charakteryzuje się dużą informatywnością i efektywnością oraz wymaga przeprowadzenia  $n = 20$  prób [70], [20].

Wyniki przeprowadzonych badań poddano następnie analizie statystycznej [69], [109]. Podstawowym zadaniem było wyznaczenie równania regresji opisującego ubytek liniowy  $U_i$  obrabianych elementów w funkcji zmiennych czynników wejściowych ( $K$ ,  $V_s$  oraz  $L_e$ ).

Pierwszym zadaniem była estymacja współczynników  $B = [b_1, b_2, \dots, b_k]$  równania regresji. Jeśli przez  $X$  oznaczymy macierz planu eksperymentu, a przez  $Y$  kolumnę wyników pomiarów, to wektor  $B$  estymuje się za pomocą wzoru macierzowego w postaci:

$$B^T = (X^T X)^{-1} X^T Y, \quad (5.4)$$

gdzie  $X^T$  oznacza symbol transpozycji macierzy  $X$ , a  $X^{-1}$  jest macierzą odwrotną do macierzy  $X$ . Estymacja wektora  $B$  jest oparta na metodzie najmniejszych kwadratów. Nieobciążonym estymatorem wariancji  $\sigma^2$  składnika losowego jest statystyka  $s^2$  określona wzorem:

$$s^2 = \frac{1}{n-k-1} \sum_{i=1}^n (y(i) - yt(i))^2, \quad (5.5)$$

gdzie  $y(i)$  jest  $i$ -tym punktem pomiarowym ( $i$ -tym punktem planu eksperymentu),  $yt(i)$  wartością funkcji regresji w  $i$ -tym punkcie,  $n$  liczbą punktów planu, zaś  $k+1$  liczbą współczynników równania regresji. Wzór (5.5) w postaci macierzowej to:

$$s^2 = (Y^T Y - b^T X^T Y) / (n - k - 1). \quad (5.6)$$

Założenie o normalności rozkładu czynnika losowego umożliwia, wyznaczenie przedziałów ufności i wykorzystanie właściwych testów statystycznych dla współczynników  $b_i$  ( $i=1,2, \dots, k$ ) równania regresji. Parametrem opisującym jakość przybliżenia równaniem zależności empirycznej jest współczynnik korelacji wielokrotnej  $R$ . Współczynnik  $R$  mierzy stopień zależności (skorelowania) zmiennej  $Y$  od zmiennych niezależnych  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Kwadrat współczynnika korelacji jest współczynnikiem determinacji  $R^2$ , przy czym  $yt(i)$  jest wartością funkcji w  $i$ -tym punkcie planu eksperymentu,  $ye(i)$  wartością zmierzoną (empiryczną), zaś  $ys$  wartością średnią obliczoną z wszystkich wyników eksperymentu. Tak więc:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (ye(i) - yt(i))^2}{\sum_{i=1}^n (ys - yt(i))^2}. \quad (5.7)$$

Im bliższa jedności jest wartość współczynnika korelacji  $R$ , tym stopień wyjaśnionej zmienności przez funkcję regresji jest większy. Wartość  $R$  bliska zeru oznacza brak zależności między zmienną  $Y$  a zbiorem zmiennych ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ). W celu zbadania, czy współczynnik korelacji jest istotnie różny od zera, wykonano test istotności regresji. W tym przypadku hipoteza zerowa testu ma postać:

$$H_0: R = 0. \quad (5.8)$$

Statystyka testowa dla tej hipotezy wyraża się wzorem:

$$F = \frac{n-k-1}{k} \frac{R^2}{1-R^2}. \quad (5.9)$$

Zmienna losowa  $F$  ma rozkład  $F$  – Snedecora o stopniach swobody  $df_1 = k$  (licznika) i  $df_2 = n - k - 1$  (mianownika). Wartość krytyczną  $F_{\alpha, df_1, df_2}$  dla zadanego poziomu istotności  $\alpha$  odczytano z tablic statystycznych. Podczas budowy równania regresji wieloczynnikowej uwzględniono zmienne badane, które mogą mieć wpływ na wartość zmiennej zależnej  $Y$ . Aby sprawdzić, które ze zmiennych  $X$  istotnie wpływają na zmienną  $Y$ , koniecznym jest wykonanie testu istotności dla wszystkich współczynników regresji wyznaczanego równania. Hipoteza zerowa ma wtedy postać:



$$H_0: b_i = \beta_i. \quad (5.10)$$

Statystyka testowa to:

$$t = \frac{b_i - \beta_i}{s_{b_i}}, \quad (5.11)$$

gdzie:

$b_i$  -  $i$ -ty współczynnik równania regresji (5.2),

zaś:

$$s_{b_i} = s \sqrt{d_{ii}}, \quad (5.12)$$

przy czym  $s$  jest odchyleniem standardowym równania (2), zaś  $d_{ii}$   $i$ -tą wartością diagonalną macierzy  $(X^T X)^{-1}$ .

Statystyka  $t$  określona wzorem (5.11) ma przy założeniu prawdziwości hipotezy  $H_0$  rozkład  $t$ -Studenta o  $n - k - 1$  stopniach swobody. Obszar krytyczny dla tej hipotezy to:  $(-t_{n-k-1, \alpha}, t_{n-k, \alpha})$ . Wartość  $t_{n-k-1, \alpha}$  wyznaczona jest z tablicy  $t$ -Studenta dla  $n - k - 1$  stopni swobody i poziomu istotności  $\alpha$ .

Rozrzut wartości współczynnika  $b_i$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ ) opisuje przedział ufności:

$$(b_i - t_{\alpha s_{b_i}}, b_i + t_{\alpha s_{b_i}}), \quad \text{dla } i=1, 2, \dots, k, \quad (5.13)$$

gdzie:

$$P\{b_i - t_{\alpha s_{b_i}}, b_i + t_{\alpha s_{b_i}}\} = 1 - \alpha, \quad (5.14)$$

zaś  $1 - \alpha$  jest poziomem ufności.

Znaczenie współczynników  $t_\alpha$  i  $s_{b_i}$  jest takie samo, jak w przypadku omawianego wcześniej testu istotności dla współczynników równania regresji.

Korelację wielokrotną dla równania (5.3) można wyznaczyć z:

$$R_{1.23\dots k} = \sqrt{1 - \frac{\det D}{\det R}} \quad (5.15)$$

gdzie:

$R_{1.23\dots k}$  - współczynnik korelacji wielokrotnej pomiędzy zmienną 1, a pozostałymi zmiennymi od 2 do  $k$ ,

$\det D$  - macierz współczynników korelacji zmiennych od 2 do  $k$  i zmiennej 1,

$\det R$  - macierz współczynników korelacji zmiennych od 2 do  $k$ .

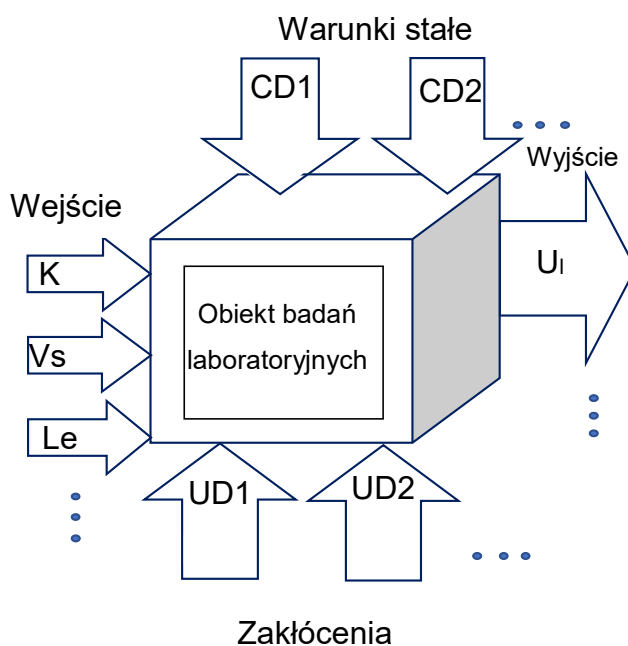


## 6. ZASADNICZE BADANIA EKSPERYMENTALNE DOCIERANIA PRZY WYMUSZONYM DAWKOWANIU ZAWIESINY ŚCIERNEJ PŁASKICH ELEMENTÓW CERAMICZNYCH

Aby zrealizować postawiony cel pracy, przeprowadzono badania eksperymentalne, które mają na celu określenie wpływu parametrów dawkowania wymuszonego zawiesiny ścierniej, a więc: zawartości procentowej ziaren ściernych  $K$  [%], dawki zawiesiny ścierniej  $V_s$  [ml/20 min] i lepkości nośnika zawiesiny  $L_e$  [mPa·s] na efekty docierania jednotarczowego powierzchni płaskich elementów wykonanych z ceramiki  $Al_2O_3$ .

### 6.1. Ogólny program badań

Badania eksperymentalne przeprowadzono w kilku etapach. W pierwszym etapie został ustalony ogólny model badań oraz warunki realizacji procesu (stałe i zmienne), co przedstawiono na rys. 6.1.



Rys. 6.1. Schemat doświadczalnych badań laboratoryjnych [70]

gdzie:

$K$  – zawartość procentowa ziaren ściernych (wagowo) [%],

$V_s$  – dawka zawiesiny ścierniej [ml/20 min],

$L_e$  – lepkość nośnika zawiesiny ścierniej [mPa·s],

$U_i$  – ubytek liniowy próbek docieranych [ $\mu\text{m}$ ],

CD1, CD2... – warunki stałe procesu docierania,

UD1, UD2... – zakłócenia w procesie docierania.

Warunki stałe eksperymentów to:

- elementy docierane (kształt, materiał),
- stanowisko i warunki kinematyczne docierania,
- rowkowana żeliwna tarcza docierająca,
- sposób dawkowania zawiesiny ścierniej,
- czas docierania elementów  $t = 20$  min,
- nacisk jednostkowy  $p = 0,0446$  MPa,
- prędkość obrotowa docieraka  $n_t = 60$  obr/min.

Czynniki zakłócające to:

- zmienność wymiarów geometrycznych ziaren ściernych,
- koncentracja mikroziaren w strefie obróbki,
- zmienność obciążenia mikroziaren podczas docierania,
- rozrzut wysokości próbek umieszczonych w separatorze,
- prędkość punktów leżących na powierzchni obrabianej,
- stereometria powierzchni roboczej tarczy docierającej.

W następnym etapie określono wartości czynników badanych, zgodnie z planem **PS/DS-P:  $\lambda$** , co przedstawiono w tabeli 6.1.

**Tabela 6.1.** Plan eksperymentu **PS/DS-P:  $\lambda$**  i wartości czynników badanych

Numer próby	K [%] - zawartość ziaren ściernych w zawiesinie	$V_s$ [ml/20 min] - ilość dawkowanej zawiesiny ścierniej	$L_e$ [mPa·s] - lepkość nośnika ziaren ściernych
1	9	26	16,5
2	21	26	16,5
3	9	74	16,5
4	21	74	16,5
5	9	26	29,5
6	21	26	29,5
7	9	74	29,5
8	21	74	29,5
9	5	50	23
10	25	50	23
11	15	10	23
12	15	90	23
13	15	50	10,3
14	15	50	34
15	15	50	23
16	15	50	23
17	15	50	23
18	15	50	23
19	15	50	23
20	15	50	23

Po zakodowaniu wartości czynników badanych przystąpiono do realizacji eksperymentów. Otrzymane wyniki badań poddano analizie statystycznej. W efekcie końcowym powstał model matematyczny wpływu parametrów dawkowania wymuszonego na ubytek liniowy  $U_l = f(K, V_s, L_e)$ . Opracowane zostały wykresy powierzchniowe i warstwiczne ilustrujące wpływ badanych czynników na wyniki docierania. W końcowym etapie badań dokonano optymalizacji procesu z uwzględnieniem korelacji poszczególnych parametrów chropowatości powierzchni badanej ceramiki po docieraniu.

## 6. 2. Wyniki badań wpływu warunków dawkowania zawiesiny ścierniej na ubytek liniowy docieranych elementów

Dla oceny wpływu parametrów wymuszonego dawkowania zawiesiny ścierniej na ubytek liniowy docieranych elementów z ceramiki  $Al_2O_3$  przeprowadzono badania na docierarce jednotarczowej Abralap 380. Celem badań było określenie funkcji:

$$U_l = f(K, V_s, L_e) \quad (6.1)$$

gdzie:

$K$  - procentowa (wagowa) zawartość ziaren ściernych w nośniku,

$V_s$  - dawka zawiesiny ścierniej [ml/20 min],

$L_e$  - lepkość nośnika ziaren ściernych [mPa·s].

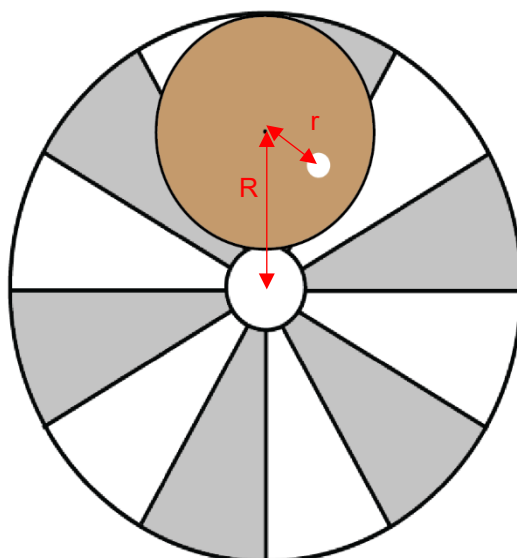
Założono, że model matematyczny ma postać wielomianu drugiego stopnia z interakcjami w postaci:

$$U_l = b_0 + b_1K + b_2K^2 + b_3V_s + b_4V_s^2 + b_5L_e + b_6L_e^2 + b_7KV_s + b_8KL_e + b_9V_sL_e \quad (6.2)$$

Na podstawie przeprowadzonych badań wstępnych, jak i badań opisanych w literaturze [24], [79], [42], [17], [18] przyjęto zakresy wartości czynników badanych:  $K = 5 \div 25 \%$ ,  $V_s = 10 \div 90$  ml/20 min,  $L_e = 16,5 \div 34$  mPa·s. Warunki stałe docierania jednotarczowego zamieszczono w tabeli 6.2.

**Tabela 6.2.** Stałe warunki docierania

L.p.	Stałe warunki docierania	Wartość	Jednostka
1	Nacisk jednostkowy	0,0446	MPa
2	Średnica tarczy docierającej	380	mm
3	Prędkość obrotowa tarczy docierającej	60	obr/min
4	Czas docierania	20	min
5	Średnica dyszy natryskowej	2	mm
6	Prędkość obrotowa mieszadła zawiesiny ścierniej	120	obr/min
7	Ciśnienie zawiesiny w zbiorniku	0,8	MPa
8	Ciśnienie nanoszenia zawiesiny ścierniej na docierak	2,2	MPa
9	Pole powierzchni naniesionej dawki („plamy” w kształcie elipsy)	188,4	cm <sup>2</sup>
10	Położenie środka separatora na docieraku (rys. 6.2)	$R = 115$	mm
11	Położenie środka docieranego elementu w separatorze (rys. 6.2)	$r = 45$	mm



Rys. 6. 2. Położenie elementów docieranych w separatorze (R - odległość od środka docieraka do środka separatora, r - odległość środka separatora do środka przedmiotu obrabianego)

W celu przeprowadzenia badań zastosowano plan **PS/DS-P:  $\lambda$**  (statyczny, zdeterminowany, selekcyjny, wieloczynnikowy, quasi-rotabilny drugiego rzędu) o kulistym rozkładzie informacji.

Realizacja programu **PS/DS-P:  $\lambda$**  wymaga wykonania  $n = 20$  prób. Na podstawie ustalonego zakresu wartości czynników wejściowych utworzona została macierz planu, tabela 6.3. Znając warunki stałe, (tabela 6.2) i macierz planu (tabela 6.3), obliczono również wysokości warstw zawiesiny ścierniej przypadającą na jeden obrót tarczy ścierniej (tabela 6.4).

Na rys. 6.3, 6.4 i 6.5 zaznaczono kilka punktów charakterystycznych, na podstawie których można określić, dla jakich zmiennych objaśnianych ubytek liniowy przyjmuje określone wartości.

Tabela 6.3. Zastosowany program badań (PS/DS-P:  $\lambda$ )

Nr próby	Wartości kodowe czynników badanych		
	K [%] - zawartość ziaren ściernych w zawieszynie	V <sub>s</sub> [ml/20 min] - ilość dawkowanej zawiesziny ścierniej	L <sub>e</sub> [mPa·s] - lepkość nośnika zawiesziny ścierniej
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1
9	-1,682	0	0
10	1,682	0	0
11	0	-1,682	0
12	0	1,682	0
13	0	0	-1,682
14	0	0	1,682
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0
19	0	0	0
20	0	0	0
Wartości kodowe	Wartości czynników badanych przed kodowaniem		
	K [%]	V <sub>s</sub> [ml/20 min]	L <sub>e</sub> [mPa·s]
-1,682	5	10	10,3
-1	9	26	16,5
0	15	50	23
1	21	74	29,5
1,682	25	90	34

**Tabela 6.4** Obliczona wysokość warstwy zawiesiny ścierniej

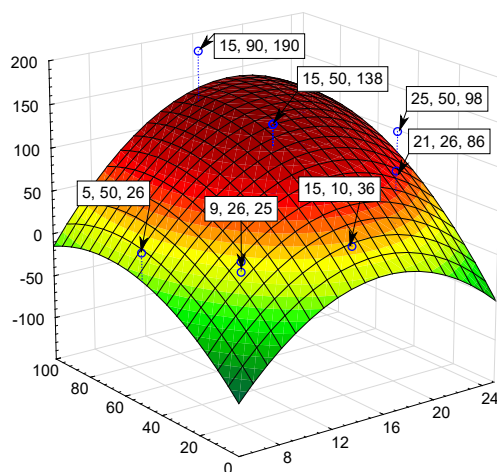
<b>Dawka</b> [ml / 20 min]	<b>Wysokość warstwy zawiesiny po wykonaniu jednego obrotu tarczy</b> [ $\mu\text{m}$ ]	<b>Całkowita wysokość naniesionej warstwy po t = 20min</b> [ $\mu\text{m}$ ]
<b>10</b>	0,0074	8,8219
<b>26</b>	0,0191	22,9370
<b>50</b>	0,0368	44,1096
<b>74</b>	0,0544	65,2822
<b>90</b>	0,0662	79,3973

**Tabela 6.4.** Warunki wymuszonego dawkowania zawiesiny ścierniej i wielkości ubytku liniowego próbek ceramicznych (podano wartości średnie z 3 pomiarów)

<b>Nr</b>	<b>K [%]</b>	<b>Vs [ml/20 min]</b>	<b>Le [mPa·s]</b>	<b>U<sub>i</sub> [<math>\mu\text{m}</math>]</b>
1	15	10	23	36
2	15	50	23	138
3	15	50	23	138
4	15	50	23	138
5	15	50	23	138
6	15	50	23	138
7	15	50	23	138
8	15	90	23	190
9	5	50	23	26
10	25	50	23	98
11	21	74	29,5	74
12	21	26	29,5	30
13	9	74	29,5	48
14	9	26	29,5	13
15	15	50	34	63
16	15	50	10,3	68
17	21	74	16,5	109
18	21	26	16,5	86
19	9	74	16,5	31
20	9	26	16,5	25

Wykorzystując program Statistica zbudowano wykresy przestrzenne i warstwiczne przedstawiające wpływ poszczególnych czynników badanych (K, V<sub>s</sub>, L<sub>e</sub>) na wielkość ubytku liniowego próbek docieranych.

$U_l$  [ $\mu\text{m}$ ]

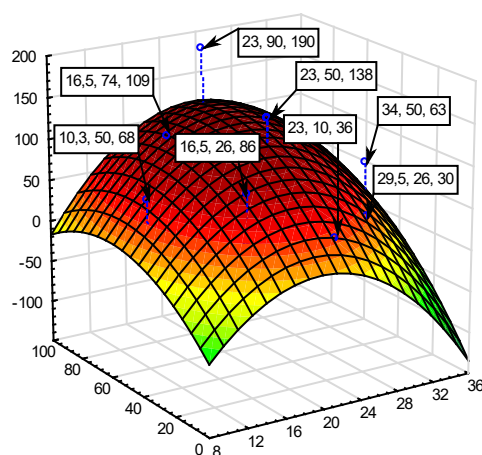


$V_s$  [ml/20min]

$K$  [%]

Rys. 6.3. Wykres powierzchniowy wartości ubytku liniowego próbek ceramicznych w funkcji czynników wejściowych  $K$  i  $V_s$

$U_l$  [ $\mu\text{m}$ ]

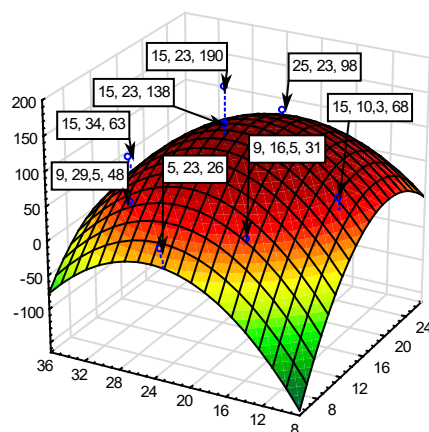


$V_s$  [ml/20min]

$L_e$  [mPa·s]

Rys. 6.4. Wykres powierzchniowy wartości ubytku liniowego próbek ceramicznych w funkcji czynników wejściowych  $L_e$  i  $V_s$

$U_l$  [ $\mu\text{m}$ ]



$L_e$  [mPa·s]

$K$  [%]

Rys. 6.5. Wykres powierzchniowy wartości ubytku liniowego próbek ceramicznych w funkcji czynników wejściowych  $K$  i  $L_e$



Analizując wykresy tabelę 6.4 można zauważyć, iż największy ubytek liniowy w zrealizowanych badaniach doświadczalnych ( $U_l = 190 \mu\text{m}$ ) osiągnięto przy następujących wartościach parametrów wejściowych:  $K = 15 \%$ ,  $V_s = 90 \text{ ml}/20 \text{ min}$  oraz  $L_e = 23 \text{ [mPa}\cdot\text{s]}$ . Uzyskane wyniki potwierdzają skuteczność zastosowania wymuszonego dawkowania zawiesiny ścierniej, a wielkość ubytku liniowego z wykorzystaniem tej metody jest porównywalna do wartości uzyskanych w docieraniu konwencjonalnym, gdzie zawiesina jest podawana w sposób ciągły (ze znacznym nadmiarem).

W celu sprawdzenia istotności statystycznej otrzymanych wyników przeprowadzono odpowiednią analizę. Na podstawie danych zawartych w tabeli 6.4 przeprowadzono test SS dla pełnego modelu. Dla wyznaczonego równania regresji obliczono kolejno współczynniki korelacji wielokrotnej oraz współczynnik determinacji. Wyniki testu SS pełnego modelu przedstawiono w tabeli 6.5.

**Tabela 6.5.** Wyniki analizy modelu

Zależna zmienna	Test SS dla pełnego modelu										
	Wielokr. R	Wielokr. R <sup>2</sup>	Skorygow. R <sup>2</sup>	SS Model	df Model	MS Model	SS Reszta	df Reszta	MS Reszta	F	p
$U_l$	0,939112	0,881931	0,775668	45387,46	9	5043,051	6076,290	10	607,6290	8,299556	0,001367

Następnie przeprowadzono jednowymiarowe testy istotności równania  $U_l = f(K, V_s, L_e)$ . Wyniki analizy przedstawiono w tabeli 6.6.

**Tabela 6.6.** Jednowymiarowe testy istotności równania  $U_l = f(K, V_s, L_e)$

Efekt	Jednowymiarowe testy istotności dla $U_l$ Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez; błąd standardowy oceny: 24,6501				
	SS	Stopnie swobody	MS	F	p
<b>Wyraz wolny</b>	10322,20	1	10322,20	16,98766	0,002072
K	12752,76	1	12752,76	20,98774	0,001009
K <sup>2</sup>	15574,03	1	15574,03	25,63083	0,000490
$V_s$	966,54	1	966,54	1,59068	0,235857
$V_s^2$	3169,55	1	3169,55	5,21625	0,045482
$L_e$	9663,60	1	9663,60	15,90379	0,002568
$L_e^2$	13311,63	1	13311,63	21,90750	0,000867
$K \cdot V_s$	84,50	1	84,50	0,13907	0,716995
$K \cdot L_e$	1152,00	1	1152,00	1,89589	0,198579
$V_s \cdot L_e$	312,50	1	312,50	0,51429	0,489698
Błąd	6076,29	10	607,63		

Dla analizowanego równania regresji otrzymano  $F = 8,2995$ . Tej wartości odpowiada poziom istotności  $p\text{-value} = 0,001367$ . Wartość poziomu istotności świadczy o wysokiej istotności zbudowanego równania regresji. Błąd standardowy oceny testu wynosi 24,6501, co świadczy o tym, że wszystkie parametry modelu zostały oszacowane wystarczająco dokładnie.

Model uznano za pozytywny. Analizę równania regresji rozszerzono o testowanie istotności współczynników równania (tabela 6.7).

**Tabela 6.7.** Wartości współczynników regresji i poziom ich istotności

Efekt	Oceny parametrów Parametryzacja z sigma-ograniczeniami									
	$U_i$ Param.	$U_i$ Bł. std.	$U_i$ t	$U_i$ p	-95,00% Gr. ufn.	+95,00% Gr. ufn.	$U_i$ Beta ( $\beta$ )	$U_i$ Bł.Std. $\beta$	-95,00% Gr. ufn.	+95,00% Gr. ufn.
<b>Wyraz wolny</b>	-587,166	142,4604	-4,12161	0,002072	-904,587	-269,745				
K	37,537	8,1936	4,58124	0,001009	19,280	55,793	3,65525	0,797873	1,87747	5,43302
K <sup>2</sup>	-0,929	0,1835	-5,06269	0,000490	-1,338	-0,520	-2,77089	0,547315	-3,99038	-1,55139
V <sub>s</sub>	2,481	1,9669	1,26122	0,235857	-1,902	6,863	0,96627	0,766140	-0,74079	2,67334
V <sub>s</sub> <sup>2</sup>	-0,026	0,0115	-2,28391	0,045482	-0,052	-0,001	-1,05089	0,460126	-2,07611	-0,02566
Le	29,885	7,4937	3,98796	0,002568	13,188	46,582	3,28053	0,822608	1,44764	5,11341
Le <sup>2</sup>	-0,626	0,1337	-4,68055	0,000867	-0,924	-0,328	-3,12991	0,668707	-4,61989	-1,63994
K*V <sub>s</sub>	0,023	0,0605	0,37291	0,716995	-0,112	0,157	0,17637	0,472946	-0,87742	1,23016
K*Le	-0,308	0,2235	-1,37691	0,198579	-0,806	0,190	-0,86832	0,630627	-2,27345	0,53681
V <sub>s</sub> *Le	0,040	0,0559	0,71714	0,489698	-0,084	0,165	0,42808	0,596926	-0,90195	1,75812

Na tej podstawie uzyskano model matematyczny, który jest wielomianem drugiego stopnia z trzema zmiennymi (K, V<sub>s</sub>, Le):

$$U_i = -587,166 + 37,5369K - 0,9291K^2 + 2,4807V_s - 0,0261V_s^2 + 29,88456Le - 0,6259Le^2 + 0,0226KV_s - 0,3077KLe + 0,0401V_sLe \quad (6.3)$$

Znając równanie regresji, obliczono wartości teoretyczne ubytku liniowego  $U_{it}$ . Porównanie wyników rzeczywistych  $U_i$  i przewidywanych  $U_{it}$  przedstawiono w tabeli 6.8.

**Tabela 6.8.** Porównanie ubytków liniowych zaobserwowanych i przewidywanych

	Wartości obserwowane, przewidywane i reszty Parametryzacja z sigma-ograniczeniami		
	$U_i$ Obserw.	$U_{it}$ Przewid.	$U_{it}$ Reszty
1	36,00000	51,68005	-15,68005
2	138,00000	138,43365	-0,43365
3	138,00000	138,43365	-0,43365
4	138,00000	138,43365	-0,43365
5	138,00000	138,43365	-0,43365
6	138,00000	138,43365	-0,43365
7	138,00000	138,43365	-0,43365
8	190,00000	141,35218	48,64782
9	26,00000	8,38497	17,61503
10	98,00000	82,64726	15,35274
11	74,00000	100,24266	-26,24266
12	30,00000	27,43938	2,56062
13	48,00000	73,18528	-25,18528
14	13,00000	13,38200	-0,38200
15	63,00000	45,96700	17,03300
16	68,00000	56,78950	11,21050
17	109,00000	131,51228	-22,51228
18	86,00000	83,70900	2,29100
19	31,00000	56,45491	-25,45491
20	25,00000	21,65163	3,34837

Wprowadzono też pojęcie parametru funkcji użyteczności (tabela 6.9). Wartość maksymalna parametru  $U_{it}$  jaką przewidziano w wyniku optymalizacji to:

$$U_{it} = 190,3390 \text{ } \mu\text{m dla } U_{\text{użyty.}} = 1,$$

a w przypadku, gdy:

$$U_{it} = -17,8390 \text{ to } U_{\text{użyty.}} = 0$$

**Tabela 6.9.** Parametry funkcji użyteczności

Zmienna	Parametry funkcji użyteczności Ustawienia funkcji użyteczności dla każdej zmiennej zależnej							
	Niska Wartość	Użytecz. Wartość	Pośr. Wartość	Użytecz. Wartość	Wysoka Wartość	Użytecz. Wartość	s Param.	t Param.
$U_{\text{użyty.}}$	-17,8390	0,00	86,25000	0,500000	190,3390	1,000000	1,000000	1,000000

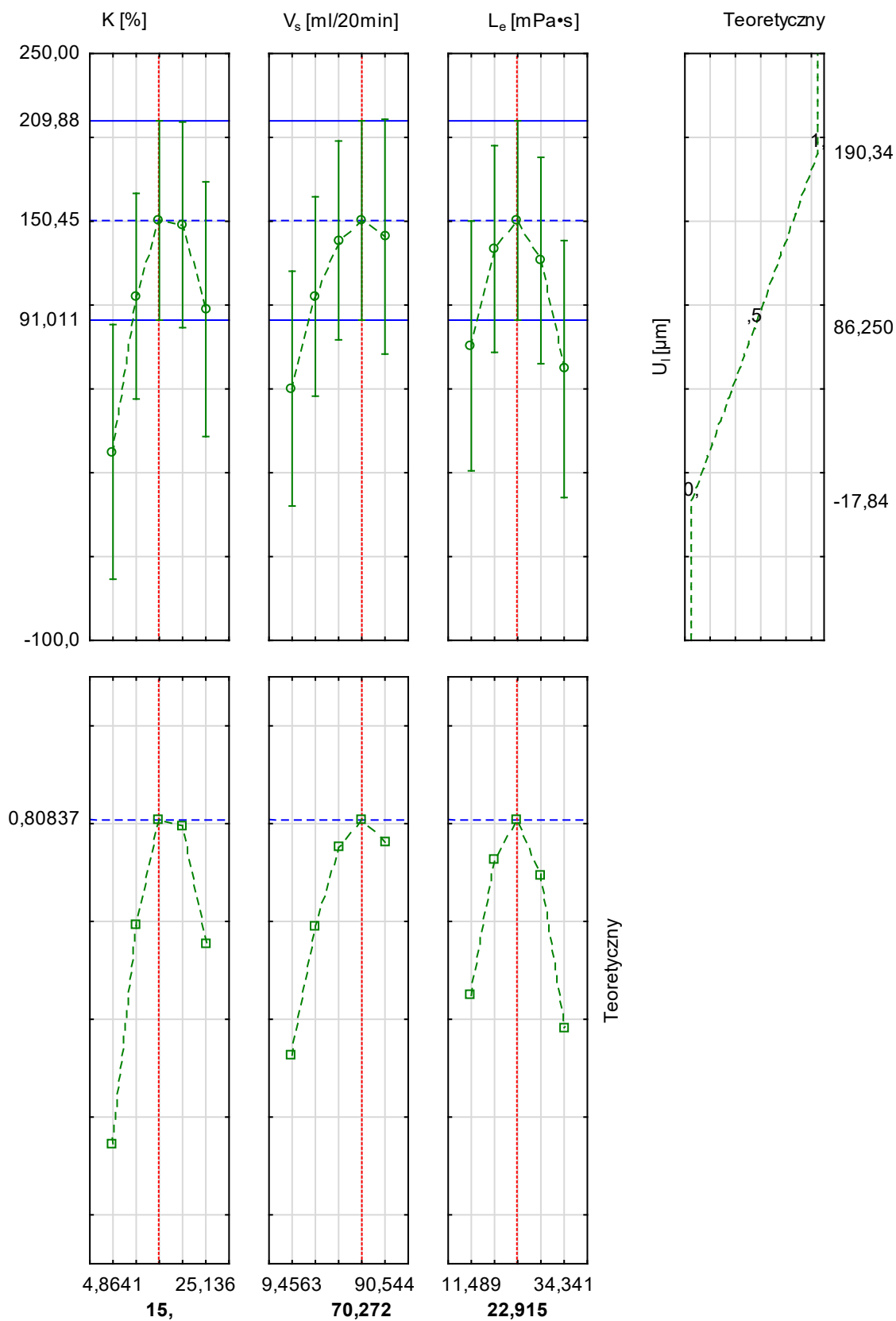
Taka parametryzacja pozwala na lepszą interpretację wyników graficznych wygenerowanych przez program Statistica.

Po przeprowadzeniu optymalizacji, zestawienie wartości wejściowych ( $K_t$ ,  $V_{st}$ ,  $L_{et}$ ) i odpowiadający im teoretyczny ubytek liniowy  $U_{it}$  elementów docieranych zamieszczono w tabeli 6.10.

**Tabela 6.10.** Zestawienie odpowiedzi dotyczące przewidywanego ubytku liniowego próbek

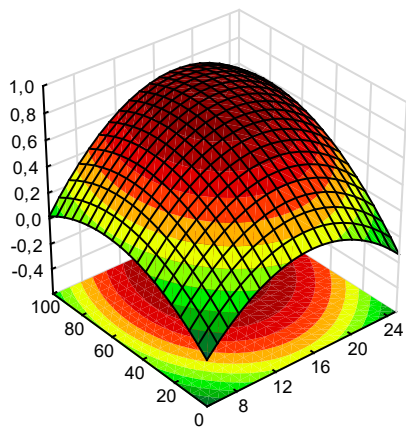
Czynnik	Poziomy czynnik i przewidywane odpowiedzi				
	Czynnik Poziom	Przewid. $U_{it}$	Użytecz. Wartość	-95% P $U_{it}$	+95% P $U_{it}$
K	4,864082	12,4470	0,145481	-63,5052	88,3992
K	9,932041	105,3116	0,591564	43,9881	166,6351
K	15,00000	150,4459	0,808370	91,0115	209,8803
K	20,06796	147,8499	0,795900	86,5265	209,1734
K	25,13592	97,5237	0,554154	21,5715	173,4759
Vs	9,456326	50,1862	0,326765	-19,8131	120,1855
Vs	29,72816	105,1385	0,590732	45,7041	164,5729
Vs	50,00000	138,5584	0,751268	79,2464	197,8704
Vs	70,27184	150,4459	0,808370	91,0115	209,8803
Vs	90,54367	140,8010	0,762040	70,8018	210,8003
Le	11,48885	75,6057	0,448869	1,1364	150,0749
Le	17,20192	133,4559	0,726758	71,8264	195,0855
Le	22,91500	150,4459	0,808370	91,0115	209,8803
Le	28,62808	126,5756	0,693707	65,0295	188,1217
Le	34,34115	61,8450	0,382769	-14,7987	138,4887

Profile wartości aproksymowanych i teoretycznego ubytku liniowego w funkcji czynników wejściowych przedstawiono na rys.6.6. W tym przypadku zmienną zależną jest  $U_{it} = U_{\text{użyty.}}$ , a predyktory to  $K_t$ ,  $V_{st}$ , i  $L_{et}$ . Na rys. 6.7, 6.8, i 6.9 zamieszczono wykresy przestrzenne  $U_{\text{użyty.}} = f(K_t, V_{st}, L_{et})$



Rys. 6.6. Profile wartości aproksymowanych i teoretyczny ubytek liniowy w funkcji czynników wejściowych  $K_t$ ,  $V_{st}$ , i  $L_{et}$

$U_{\text{uzyt}}$

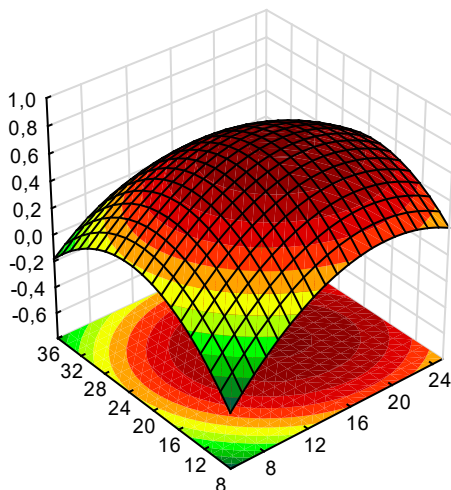


$V_{\text{st}}$  [ml/20min]

$K_t$  [%]

Rys. 6.7. Wykres powierzchniowy i warstwowy teoretycznej wartości ubytku liniowego użytecznego w funkcji czynników  $K_t$  i  $V_{\text{st}}$

$U_{\text{uzyt}}$

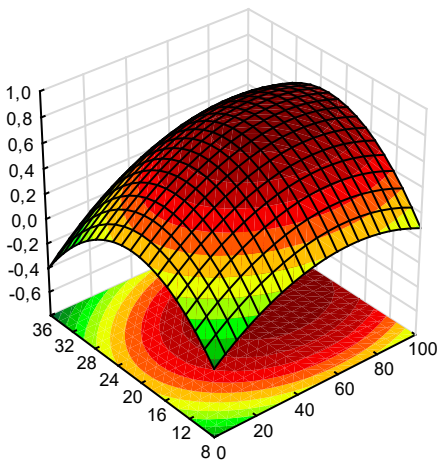


$L_{\text{et}}$  [mPa\*s]

$K_t$  [%]

Rys. 6.8. Wykres powierzchniowy i warstwowy teoretycznej wartości ubytku liniowego użytecznego w funkcji czynników  $K_t$  i  $L_{\text{et}}$

$U_{\text{uzyt}}$



$L_{\text{et}}$  [mPa\*s]

$V_{\text{st}}$  [ml/20min]

Rys. 6.9 Wykres powierzchniowy i warstwowy teoretycznej wartości ubytku liniowego użytecznego w funkcji czynników  $V_{\text{st}}$  i  $L_{\text{et}}$

Analizując powyższe wykresy, można określić, jaki wpływ wywierają predyktory na zmienną objaśnianą. Dzięki tej metodzie, można prognozować przewidywane odpowiedzi dotyczące ubytku liniowego w funkcji czynników wejściowych.

W badaniach doświadczalnych ubytek liniowy  $U_l$  przyjmował wartości:

$U_{lmin} = 25 \mu\text{m}$  dla parametrów wejściowych  $K = 15 \%$ ,  $V_s = 26 \text{ ml/20 min}$  oraz  $L_e = 16,5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$

$U_{lmax} = 190 \mu\text{m}$  dla parametrów wejściowych  $K = 15 \%$ ,  $V_s = 90 \text{ ml/20 min}$  i  $L_e = 23 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ .

Dokonując optymalizacji prognozy przewidywanych odpowiedzi ustalono, że ubytek liniowy  $U_{ltmax}$  wyniesie:

$U_{ltmax} = 150 \mu\text{m}$  dla czynników wejściowych  $K = 15 \%$ ,  $V_s = 70 \text{ ml/20 min}$  oraz  $L_e = 22,9 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ .

Opracowany model matematyczny pozwala przeprowadzić optymalizację procesu. W badaniach potwierdzono, że wymuszony system przygotowania, dawkowania i nanoszenia zawiesiny pozwala na zmniejszenie zużycia zawiesiny ścierniej w porównaniu z konwencjonalnym systemem dawkowania. Potwierdzono też, że opracowany układ pozwala na dozowanie zawiesin ściernych o różnych lepkościach nośnika.

### 6.3. Wyniki badań chropowatości powierzchni po docieraniu

#### 6.3.1. Badania wpływu warunków dawkowania zawiesiny ścierniej na parametr chropowatości $R_v$

W celu oceny wpływu parametrów wymuszonego dawkowania na parametr chropowatości powierzchni  $R_v$  docieranych elementów z ceramiki  $Al_2O_3$  przeprowadzono badania doświadczalne (na docierarce jednotarczowej Abralap 380). Celem głównym badań było określenie funkcji:

$$R_v = f(K, V_s, L_e) \quad (6.4)$$

Założono, że model matematyczny ma postać wielomianu drugiego stopnia z interakcjami:

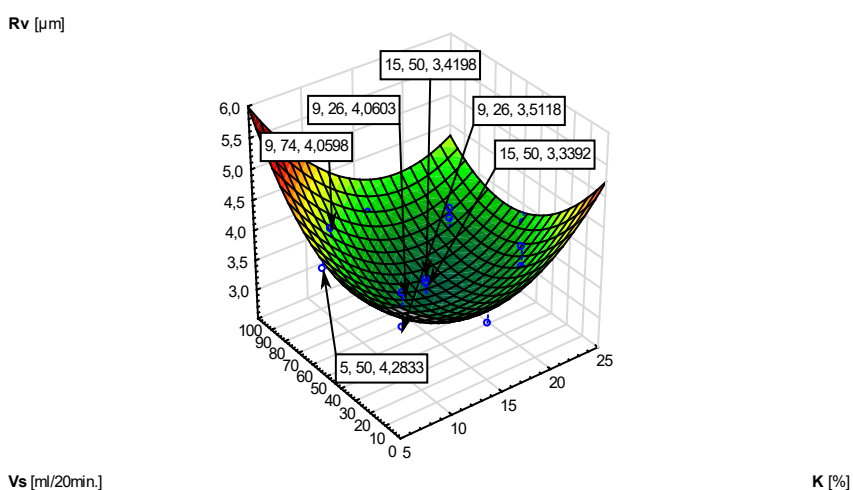
$$R_v = b_0 + b_1K + b_2K^2 + b_3V_s + b_4V_s^2 + b_5L_e + b_6L_e^2 + b_7KV_s + b_8KL_e + b_9V_sL_e \quad (6.5)$$

Celem badań było też potwierdzenie założenia, że wymuszony system przygotowania, dawkowania i nanoszenia zawiesiny pozwala na uzyskanie parametru chropowatości  $R_v$  na zbliżonym poziomie, co przy zastosowaniu konwencjonalnej metody dawkowania. Do badań zastosowano ten sam plan, co w eksperymencie dotyczącym ubytku liniowego. Warunki stałe docierania zachowano, jak przy poprzednim eksperymencie (tabela 6.2). Na podstawie ustalonego zakresu wartości czynników wejściowych utworzona została macierz planu w postaci zakodowanej (tabela 6.3).

**Tabela 6.11.** Warunki wymuszonego dawkowania zawiesiny ścierej i wyniki pomiarów parametru chropowatości powierzchni Rv (podano wartości średnie z 3 pomiarów)

Nr	K [%]	Vs [ml/20 min]	Le [mPa·s]	Rv [μm]
1	15	10	23	3,4616
2	15	50	23	3,0876
3	15	50	23	3,0851
4	15	50	23	3,0967
5	15	50	23	3,0303
6	15	50	23	3,0716
7	15	50	23	3,0786
8	15	90	23	3,8043
9	5	50	23	4,2833
10	25	50	23	3,7032
11	21	74	29,5	3,5886
12	21	26	29,5	3,9819
13	9	74	29,5	4,2404
14	9	26	29,5	4,0603
15	15	50	34	3,3392
16	15	50	10,3	3,4198
17	21	74	16,5	3,7786
18	21	26	16,5	3,6503
19	9	74	16,5	4,0598
20	9	26	16,5	3,5118

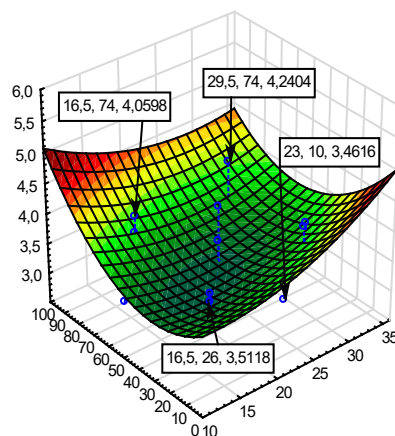
Wykorzystując program Statistica zbudowano wykresy przestrzenne przedstawiające wpływ czynników wejściowych (K, Vs, Le), na parametr chropowatości powierzchni Rv (rys.6.10 ÷ 6.12).



Rys. 6.10. Wykres powierzchniowy parametru chropowatości powierzchni Rv w funkcji czynników wejściowych K i Vs



Rv [ $\mu\text{m}$ ]

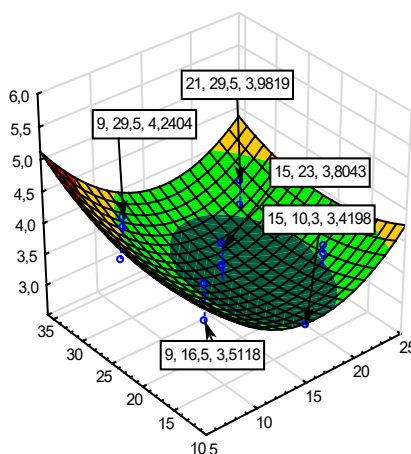


$V_s$  [ml/20min.]

$L_e$  [mPa·s]

Rys. 6.11. Wykres powierzchniowy parametru chropowatości powierzchni  $R_v$  w funkcji czynników wejściowych  $L_e$  i  $V_s$

Rv [ $\mu\text{m}$ ]



$L_e$  [mPa·s]

$K$  [%]

Rys. 6.12. Wykres powierzchniowy parametru chropowatości powierzchni  $R_v$  w funkcji czynników wejściowych  $K$  i  $L_e$

Uzyskane wartości parametru chropowatości w badaniach mają wartości zbliżone do wartości parametru chropowatości  $R_v$  elementów docieranych z zastosowaniem konwencjonalnej metody dawkowania zawiesiny ścierniej, [17] otrzymano:

$R_{v \min} = 3,03 \mu\text{m}$  dla  $K = 15 \%$ ,  $V_s = 50 \text{ ml}/20 \text{ min}$  oraz  $L_e = 23 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ , zaś

$R_{v \max} = 4,28 \mu\text{m}$  dla  $K = 5 \%$ ,  $V_s = 50 \text{ ml}/20 \text{ min}$  i  $L_e = 23 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ .

W celu sprawdzenia istotności otrzymanych wyników przeprowadzono odpowiednią analizę statystyczną. Na podstawie danych zawartych w tabeli 6.11 przeprowadzono test SS dla pełnego modelu. Dla wyznaczonego równania regresji obliczono kolejno współczynniki korelacji wielokrotnej oraz współczynnik determinacji. Wyniki testu SS „pełnego” modelu przedstawiono w tabeli 6.12.

**Tabela 6.12.** Wyniki analizy modelu

Zależna zmienna	Test SS dla pełnego modelu										
	Wielokr. R	Wielokr. R2	Skorygow R2	SS Model	df Model	MS Model	SS Reszta	df Reszta	MS Reszta	F	p
Rv	0,978308	0,957086	0,914172	3,108230	9	0,345359	0,139368	9	0,015485	22,30237	0,000041

Następnie przeprowadzono jednowymiarowe testy istotności równania,  $R_v = f(K, V_s, L_e)$ , wyniki przedstawiono w tabeli 6.13.

**Tabela 6.13.** Jednowymiarowy test istotności równania parametru chropowatości Rv

Efekt	Jednowymiarowe testy istotności dla Rv Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez; błąd standardowy oceny : 0,1244				
	SS	Stopnie swobody	MS	F	p
Wyraz wolny	0,952315	1	0,952315	61,4980	0,000026
K	0,534598	1	0,534598	34,5229	0,000236
K <sup>2</sup>	1,775202	1	1,775202	114,6378	0,000002
V <sub>s</sub>	0,012954	1	0,012954	0,8365	0,384243
V <sub>s</sub> <sup>2</sup>	0,731984	1	0,731984	47,2696	0,000073
L <sub>e</sub>	0,045846	1	0,045846	2,9606	0,119426
L <sub>e</sub> <sup>2</sup>	0,279607	1	0,279607	18,0563	0,002145
K*V <sub>s</sub>	0,118012	1	0,118012	7,6209	0,022090
K*L <sub>e</sub>	0,018136	1	0,018136	1,1711	0,307307
V <sub>s</sub> *L <sub>e</sub>	0,051092	1	0,051092	3,2994	0,102684
Błąd	0,139368	9	0,015485		

Dla analizowanego równania regresji otrzymano  $F = 22,3024$ . Tej wartości odpowiada poziom istotności  $p\text{-value} = 0,000041$ . Niska wartość poziomu istotności świadczy o wysokiej istotności uzyskanego równania regresji. Błąd standardowy oceny testu wynosi 0,1244, co świadczy, że wszystkie parametry modelu zostały oszacowane wystarczająco dokładnie. Model oceniono za pozytywny. Analizę równania regresji rozszerzono o testowanie istotności współczynników równania (tabeli 6.14).

**Tabela 6.14.** Wartości współczynników regresji i poziom ich istotności

Efekt	Oceny parametrów Parametryzacja z sigma-ograniczeniami									
	Rv Param.	Rv Bł. std.	Rv t	Rv p	-95,00% Gr.ufn.	+95,00% Gr.ufn.	Rv Beta (β)	Rv Bł.Std.β	-95,00% Gr.ufn.	+95,00% Gr.ufn.
Wyraz wolny	5,908551	0,753443	7,84207	0,000026	4,204144	7,612957				
K	-0,244316	0,041581	-5,87562	0,000236	-0,338379	-0,150253	-2,87626	0,489524	-3,98364	-1,76888
K <sup>2</sup>	0,010068	0,000940	10,70691	0,000002	0,007941	0,012195	3,61644	0,337767	2,85236	4,38052
V <sub>s</sub>	-0,009111	0,009962	-0,91462	0,384243	-0,031647	0,013424	-0,42906	0,469112	-1,49026	0,63215
V <sub>s</sub> <sup>2</sup>	0,000404	0,000059	6,87529	0,000073	0,000271	0,000537	1,95172	0,283874	1,30955	2,59389
L <sub>e</sub>	-0,069490	0,040386	-1,72064	0,119426	-0,160849	0,021870	-0,92611	0,538237	-2,14369	0,29147
L <sub>e</sub> <sup>2</sup>	0,002878	0,000677	4,24927	0,002145	0,001346	0,004410	1,75068	0,411995	0,81868	2,68267
K*V <sub>s</sub>	-0,000986	0,000357	-2,76060	0,022090	-0,001793	-0,000178	-0,85824	0,310890	-1,56153	-0,15496
K*L <sub>e</sub>	-0,001427	0,001318	-1,08220	0,307307	-0,004409	0,001556	-0,50682	0,468326	-1,56625	0,55261
V <sub>s</sub> *L <sub>e</sub>	-0,000599	0,000330	-1,81643	0,102684	-0,001344	0,000147	-0,80482	0,443078	-1,80713	0,19749

Na tej podstawie uzyskano model matematyczny, który jest wielomianem drugiego stopnia z trzema zmiennymi wejściowymi (K, V<sub>s</sub>, L<sub>e</sub>):

$$R_v = 5,9086 - 0,2443K + 0,0100K^2 - 0,0091V_s + 0,0004V_s^2 - 0,0695L_e + 0,0029L_e^2 - 0,0009KV_s - 0,0014KL_e - 0,0006VsL_e \quad (6.5)$$

Porównanie wyników rzeczywistych parametru  $R_v$  i przewidywanego  $R_{vt}$  przedstawiono w tabeli 6.15.

**Tabela 6.15.** Porównanie wyników zaobserwowanych parametru  $R_v$  i przewidywanych  $R_{vt}$

	Wartości obserwowane, przewidywane i reszty Parametryzacja z sigma-ograniczeniami		
	$R_v$ Obserw.	$R_v$ Przewid.	$R_v$ Reszty
1	3,46160	3,60470	-0,14310
2	3,08760	3,06785	0,01975
3	3,08510	3,06785	0,01725
4	3,09670	3,06785	0,02885
5	3,03030	3,06785	-0,03755
6	3,07160	3,06785	0,00375
7	3,07860	3,06785	0,01075
8	3,80430	3,82402	-0,01972
9	4,28330	4,31836	-0,03506
10	3,70320	3,83096	-0,12776
11	3,58860	3,48831	0,10029
12	3,98190	3,82737	0,15453
13	4,24040	4,17591	0,06449
14	4,06030	3,94723	0,11307
15	3,33920	3,54311	-0,20391
16	3,41980	3,38531	0,03449
18	3,65030	3,60172	0,04858
19	4,05980	4,10125	-0,04145
20	3,51180	3,49901	0,01279

Następnie wprowadzono pojęcie parametru funkcji użyteczności (tabela 6.16). Wartość maksymalna parametru  $R_v$  jaką otrzymano w wyniku optymalizacji to:

$R_{vt} = 4,4050 \mu\text{m}$  dla  $R_{v\text{uzyt.}} = 1$  (100%), zaś w przypadku, gdy

$R_{vt} = 2,7059 \mu\text{m}$  to  $R_{v\text{uzyt.}} = 0$  (0%).

**Tabela 6.16.** Parametry funkcji użyteczności parametru chropowatości powierzchni  $R_v$

Zm.	Parametry funkcji użyteczności Ustawienia funkcji użyteczności dla każdej zmiennej zależnej							
	Niska Wartość	Użytecz. Wartość	Pośr. Wartość	Użytecz. Wartość	Wysoka Wartość	Użytecz. Wartość	s Param.	t Param.
$R_v$	2,705970	0,00	3,555490	0,500000	4,405020	1,000000	1,000000	1,000000

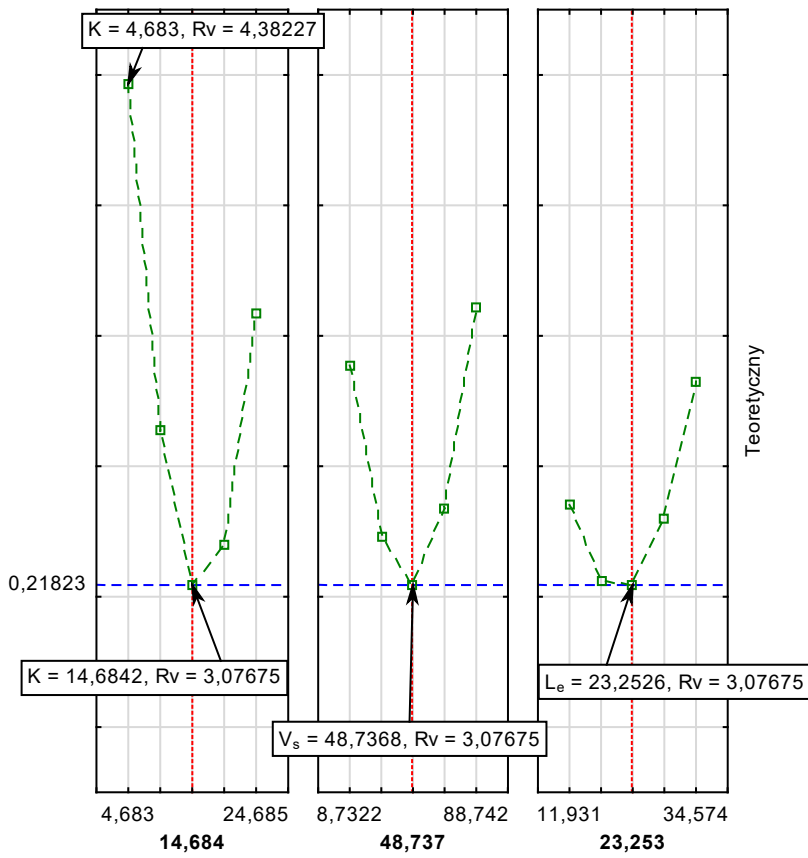
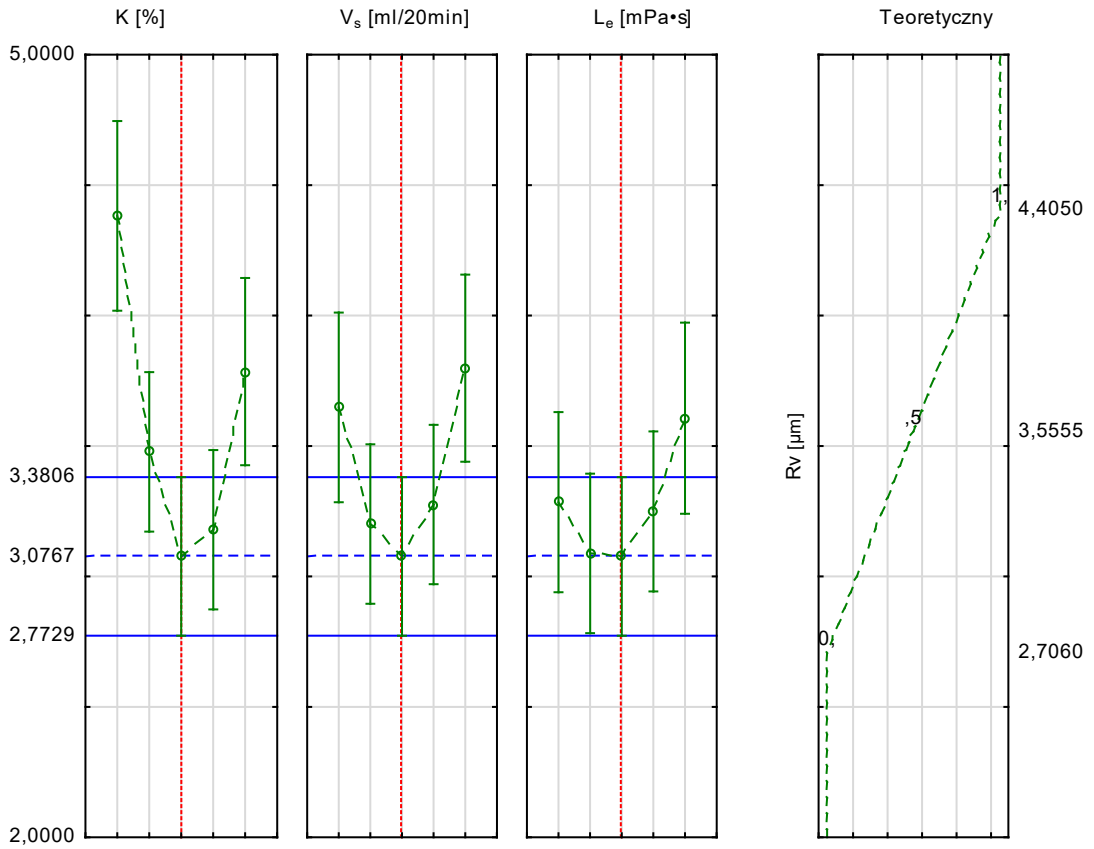
Parametryzacja ta pozwala na lepszą interpretację wyników wygenerowanych przez program Statistica.

Kolejnym krokiem było przeprowadzenie optymalizacji. Znając równanie  $R_v = f(K, V_s, L_e)$ , na podstawie przeprowadzonego eksperymentu z zastosowaniem programu **PS/DS-P:  $\lambda$** , można poszukiwać odpowiedzi na pytanie, jaki będzie przewidywany (teoretyczny) parametr  $R_v$  (tabela 6.17).

**Tabela 6.17.** Zestawienie odpowiedzi dotyczące przewidywanej wysokości parametru chropowatości Rv

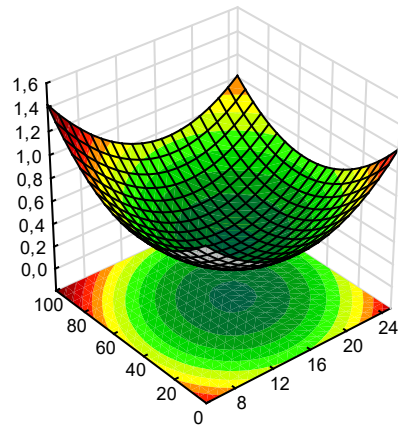
Czynnik	Poziomy czynnika i przewidywane odpowiedzi				
	Czynnika Poziom	Przewid. Rv	Użytecz. Wartość	-95% P Rv	+95% P Rv
K	4,683041	4,382271	0,986611	4,018919	4,745623
K	9,683626	3,477750	0,454245	3,172100	3,783399
K	14,68421	3,076750	0,218229	2,772862	3,380637
K	19,68480	3,179271	0,278570	2,873842	3,484700
K	24,68538	3,785314	0,635265	3,426663	4,143964
Vs	8,732164	3,648172	0,554549	3,284820	4,011524
Vs	28,73450	3,200796	0,291239	2,895146	3,506446
Vs	48,73684	3,076750	0,218229	2,772862	3,380637
Vs	68,73918	3,276032	0,335520	2,970604	3,581461
Vs	88,74152	3,798644	0,643111	3,439993	4,157295
Le	11,93080	3,284727	0,340638	2,939453	3,630001
Le	17,59172	3,088521	0,225157	2,782912	3,394130
Le	23,25263	3,076750	0,218229	2,772862	3,380637
Le	28,91355	3,249414	0,319854	2,942790	3,556039
Le	34,57446	3,606515	0,530031	3,240172	3,972857

Profile wartości aproksymowanych i teoretycznego ubytku liniowego w funkcji czynników wejściowych przedstawiono na rys. 6.13. W tym przypadku zmienną zależną jest parametr  $Rv_t = Rv_{użyty}$ . a predyktory to  $K_t$ ,  $V_{st}$ ,  $L_{et}$ . Na rys. 6.14, 6.15, i 6.16 zamieszczono wykresy przestrzenne i warstwowe  $Rv_{użyty} = f(K_t, V_{st}, L_{et})$ .



Rys. 6.13. Profile wartości aproksymowanych i użytecznych badanych czynników  $K_t$ ,  $V_{st}$  i  $L_{et}$ , mających wpływ na wartość parametru chropowatości powierzchni  $R_v$

Rv teoretyczny

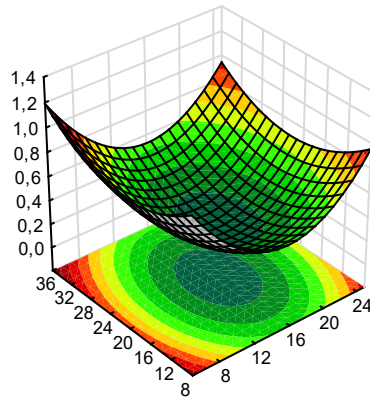


$V_s$  [m/20min]

$K$  [%]

Rys. 6.14. Wykres powierzchniowy przewidywanej wartości parametru chropowatości  $R_v$  względem czynników  $K$  i  $V_s$

Rv teoretyczny

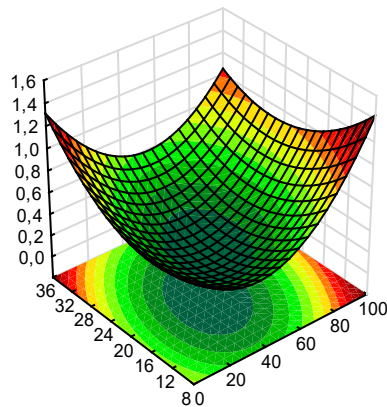


$L_e$  [mPa\*s]

$K$  [%]

Rys. 6.15. Wykres powierzchniowy przewidywanej wartości parametru chropowatości  $R_v$  względem czynników  $K$  i  $L_e$

Rv teoretyczny



$L_e$  [mPa\*s]

$V_s$  [m/20min]

Rys. 6.16. Wykres powierzchniowy przewidywanej wartości parametru chropowatości  $R_v$  względem czynników  $V_s$  i  $L_e$

W badaniach doświadczalnych parametr chropowatości powierzchni  $R_v$  przyjmował wartości:

$R_{v_{\min}} = 3,39 \mu\text{m}$  dla parametrów wejściowych  $K = 15 \%$ ,  $V_s = 50 \text{ ml}/20 \text{ min}$ ,  $L_e = 34 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ , natomiast  $R_{v_{\max}} = 4,28 \mu\text{m}$  osiągnięto dla  $K = 5 \%$ ,  $V_s = 50 \text{ ml}/20 \text{ min}$  i  $L_e = 23 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ .

Dokonując optymalizacji prognozy przewidywanych odpowiedzi ustalono, że parametr chropowatości powierzchni  $R_{v_{\min}}$  wyniesie:

$R_{v_{\min}} = 3,08 \mu\text{m}$  dla czynników wejściowych  $K = 14 \%$ ,  $V_s = 48,737 \text{ ml}/20 \text{ min}$  oraz  $L_e = 23 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ .

Opracowany model matematyczny w postaci:

$$R_v = 5,9086 - 0,2443K + 0,0100K^2 - 0,0091V_s + 0,0004V_s^2 - 0,0695L_e + 0,0029L_e^2 - 0,0009KV_s - 0,0014KL_e - 0,0006V_sL_e$$

pozwala na przeprowadzenie optymalizacji, zaś wykonane badania potwierdziły, że wymuszony system przygotowania, dawkowania i nanoszenia zawiesiny pozwala na uzyskanie parametrów  $R_v$  na poziomie zbliżonym do tych, które otrzymano stosując konwencjonalnym systemie dawkowania.

### 6.3.2. Badania wpływu warunków dawkowania zawiesiny ścierniej na parametr chropowatości $R_p$

W celu oceny wpływu parametrów wymuszonego dawkowania na parametr chropowatości powierzchni  $R_p$  docieranych elementów wykonanych z ceramiki  $Al_2O_3$  przeprowadzono badania doświadczalne (na docierarce jednotarczowej Abralap 380). Celem głównym badania było określenie funkcji:

$$R_p = f(K, V_s, L_e) \quad (6.6)$$

Założono, że model matematyczny ma postać wielomianu drugiego stopnia z interakcjami:

$$R_p = b_0 + b_1K + b_2K^2 + b_3V_s + b_4V_s^2 + b_5L_e + b_6L_e^2 + b_7KV_s + b_8KL_e + b_9V_sL_e \quad (6.7)$$

Celem badań było też potwierdzenie założenia, że wymuszony system przygotowania dawkowania i nanoszenia zawiesiny pozwala na uzyskanie parametru chropowatości  $R_p$  na zbliżonym poziomie, co przy zastosowaniu konwencjonalnej metody dawkowania. Do badań zastosowano ten sam plan, co w eksperymencie dotyczącym ubytku liniowego. Warunki stałe docierania zachowano jak przy poprzednim eksperymencie (tabela 6.2). Na podstawie ustalonego zakresu wartości czynników wejściowych utworzona została macierz planu w postaci zakodowanej (tabela 6.3).

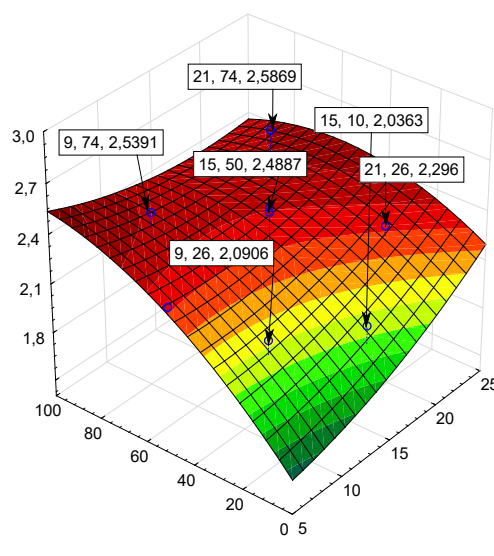


**Tabela 6.18.** Warunki wymuszonego dawkowania zawiesiny ścierej i wyniki pomiarów parametru chropowatości Rp (podano wartości średnie z 3 pomiarów)

Nr	K [%]	V <sub>s</sub> [ml/20 min]	L <sub>e</sub> [mPa·s]	Rp [μm]
1	15	10	23	2,0363
2	15	50	23	2,1886
3	15	50	23	2,1841
4	15	50	23	2,1833
5	15	50	23	2,1815
6	15	50	23	2,1852
7	15	50	23	2,1887
8	15	90	23	2,2154
9	5	50	23	2,2943
10	25	50	23	2,3608
11	21	74	29,5	2,5869
12	21	26	29,5	2,1639
13	9	74	29,5	2,5391
14	9	26	29,5	2,0906
15	15	50	34	2,4887
16	15	50	10,3	2,4585
17	21	74	16,5	2,2891
18	21	26	16,5	2,2960
19	9	74	16,5	2,2995
20	9	26	16,5	1,7916

Wykorzystując program Statistica zbudowano wykresy przestrzenne przedstawiające wpływ czynników wejściowych (K, V<sub>s</sub>, L<sub>e</sub>), na parametr chropowatości powierzchni Rp (rys.6.17 ÷ 6.19).

Rp [μm]

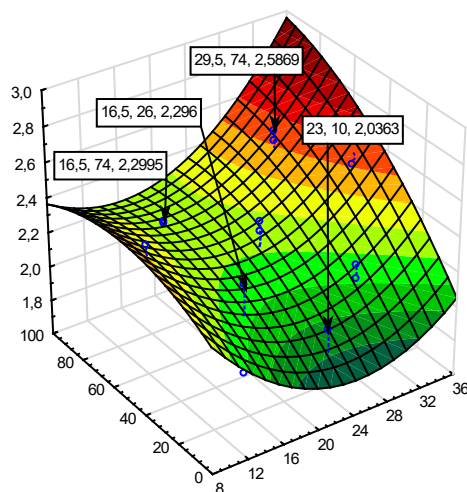


Vs [ml/20min.]

K [%]

Rys. 6.17. Wykres powierzchniowy wysokości parametru chropowatości powierzchni Rp względem czynników wejściowych K i V<sub>s</sub>

Rp [ $\mu\text{m}$ ]

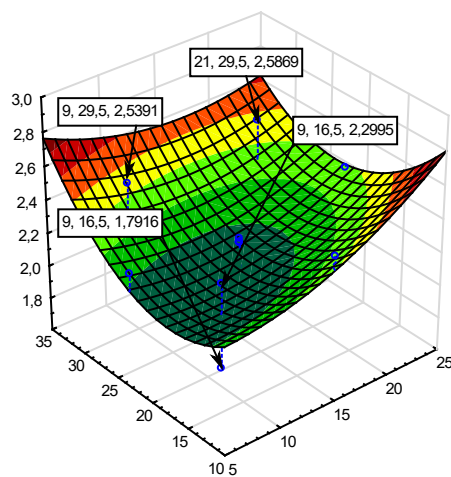


$V_s$  [ml/20min]

$L_e$  [mPa·s]

Rys. 6.18. Wykres powierzchniowy wysokości parametry chropowatości powierzchni  $R_p$  względem czynników wejściowych  $V_s$  i  $K$

Rp [ $\mu\text{m}$ ]



$L_e$  [mPa·s]

$K$  [%]

Rys. 6.19. Wykres powierzchniowy wysokości parametry chropowatości powierzchni  $R_p$  względem czynników wejściowych  $K$  i  $L_e$

Uzyskane wartości parametru chropowatości w badaniach mają wartości zbliżone do wartości parametru chropowatości  $R_p$  elementów docieranych z zastosowaniem konwencjonalnej metody dawkowania zawiesiny ścierniej [17] otrzymano:

$R_{p_{\min}} = 1,79 \mu\text{m}$  dla  $K = 9 \%$ ,  $V_s = 26 \text{ ml}/20 \text{ min}$  oraz  $L_e = 16,5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ , zaś

$R_{p_{\max}} = 2,59 \mu\text{m}$  dla  $K = 21 \%$ ,  $V_s = 74 \text{ ml}/20 \text{ min}$  i  $L_e = 29,5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ .

W celu sprawdzenia istotności otrzymanych wyników przeprowadzono odpowiednią analizę statystyczną. Na podstawie danych zawartych w tabeli 6.18 przeprowadzono test SS dla pełnego modelu. Dla wyznaczonego równania regresji obliczono kolejno współczynniki korelacji wielokrotnej oraz współczynnik determinacji. Wyniki testu SS „pełnego” modelu przedstawiono w tabeli 6.19.

**Tabela 6.19.** Wyniki regresji pełnego modelu

Zależna zmienna	Test SS dla pełnego modelu względem SS										
	Wielokr. R	Wielokr. R2	Skorygow R2	SS Model	df Model	MS Model	SS Reszta	df Reszta	MS Reszta	F	p
Rp	0,915891	0,838857	0,677713	0,529611	9	0,058846	0,101738	9	0,011304	5,205653	0,010967

Następnie przeprowadzono jednowymiarowe testy istotności równania,  $R_v = f(K, V_s, L_e)$ , wyniki przedstawiono w tabeli 6.20.

**Tabela 6.20.** Jednowymiarowy test istotności równania parametru Rp

Efekt	Jednowymiarowe testy istotności dla Rp Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez; błąd standardowy oceny: 0,1063				
	SS	Stopnie swobody	MS	F	p
Wyraz wolny	0,134351	1	0,134351	11,88504	0,007304
K	0,006787	1	0,006787	0,60036	0,458314
K^2	0,026485	1	0,026485	2,34294	0,160210
Vs	0,019470	1	0,019470	1,72236	0,221870
Vs^2	0,010853	1	0,010853	0,96012	0,352761
Le	0,049609	1	0,049609	4,38854	0,065661
Le^2	0,138536	1	0,138536	12,25526	0,006716
K*Vs	0,017193	1	0,017193	1,52096	0,248713
K*Le	0,021071	1	0,021071	1,86400	0,205314
Vs*Le	0,006360	1	0,006360	0,56265	0,472348
Błąd	0,101738	9	0,011304		

Dla analizowanego równania regresji  $F = 5,2057$ . Tej wartości odpowiada poziom istotności  $p\text{-value} = 0,10967$ . Wysoka wartość poziomu istotności świadczy o niskiej istotności uzyskanego równania regresji. Błąd standardowy oceny testu wynosi 0,1063, co świadczy, że wszystkie parametry modelu zostały oszacowane wystarczająco dokładnie. Model oceniono negatywnie. Analizę równania regresji rozszerzono o testowanie istotności współczynników równania (tabeli 6.21).

**Tabela 6.21.** Jednowymiarowy test istotności równania

Efekt	Oceny parametrów Parametryzacja z sigma-ograniczeniami									
	Rp Param.	Rp Bł. std.	Rp t	Rp p	-95,00% Gr.ufn.	+95,00% Gr.ufn.	Rp Beta (β)	Rp Bł. Std.β	-95,00% Gr.ufn.	+95,00% Gr.ufn.
Wyraz wolny	2,219272	0,643739	3,44747	0,007304	0,763032	3,675512				
K	0,027527	0,035527	0,77483	0,458314	-0,052840	0,107895	0,73500	0,948593	-1,41087	2,880863
K^2	0,001230	0,000803	1,53067	0,160210	-0,000588	0,003047	1,00185	0,654521	-0,47878	2,482485
Vs	0,011170	0,008511	1,31239	0,221870	-0,008084	0,030424	1,19301	0,909040	-0,86338	3,249404
Vs^2	-0,000049	0,000050	-0,97985	0,352761	-0,000163	0,000064	-0,53901	0,550089	-1,78339	0,705380
Le	-0,072286	0,034506	-2,09489	0,065661	-0,150343	0,005772	-2,18494	1,042989	-4,54435	0,174463
Le^2	0,002026	0,000579	3,50075	0,006716	0,000717	0,003334	2,79486	0,798359	0,98884	4,600868
K*Vs	-0,000376	0,000305	-1,23327	0,248713	-0,001066	0,000314	-0,74297	0,602439	-2,10578	0,619841
K*Le	-0,001538	0,001126	-1,36528	0,205314	-0,004086	0,001010	-1,23902	0,907517	-3,29196	0,813929
Vs*Le	0,000211	0,000282	0,75010	0,472348	-0,000426	0,000848	0,64403	0,858591	-1,29824	2,586296

Analiza statystyczna modelu matematycznego pozwoliła na ustalenie wartości współczynników równania regresji, ale nie są one statystycznie istotne. Tak oszacowane współczynniki równania regresji nie pozwalają na budowę adekwatnego równania prognozy parametru chropowatości powierzchni Rp. Należy sprawdzić możliwość budowy modelu matematycznego opartego na parametrze chropowatości Rz.

### 6.3.3. Badania wpływu warunków dawkowania zawiesiny ścierniej na parametr chropowatości Rz

W celu oceny wpływu parametrów wymuszonego dawkowania na parametr chropowatości Rz docieranych elementów wykonanych z ceramiki  $Al_2O_3$  przeprowadzono badania doświadczalne (na docierarce jednotarczowej Abralap 380). Celem głównym badania było określenie funkcji:

$$Rz = f(K, V_s, L_e) \quad (6.7)$$

Założono, że model matematyczny ma postać wielomianu drugiego stopnia z interakcjami:

$$Rz = b_0 + b_1K + b_2K^2 + b_3V_s + b_4V_s^2 + b_5L_e + b_6L_e^2 + b_7KV_s + b_8KL_e + b_9V_sL_e \quad (6.8)$$

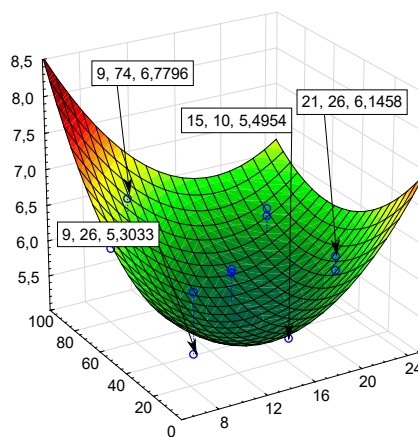
Celem badań też było potwierdzenie założenia, że wymuszony system przygotowania dawkowania i nanoszenia zawiesiny pozwala na uzyskanie parametru chropowatości Rz na zbliżonym poziomie, co przy zastosowaniu konwencjonalnej metody dawkowania. Do badań zastosowano ten sam plan, co w eksperymencie dotyczącym ubytku liniowego. Warunki stałe docierania zachowano jak przy poprzednim eksperymencie (tabela 6.2). Na podstawie ustalonego zakresu wartości czynników wejściowych utworzona została macierz planu, w postaci zakodowanej (tabela 6.3).

**Tabela 6.22.** Warunki wymuszonego dawkowania zawiesiny ścierej i wyniki pomiarów parametru chropowatości Rz (podano wartości średnie z 3 pomiarów)

Nr	K [%]	V <sub>s</sub> [ml/20 min]	L <sub>e</sub> [mPa·s]	Rz [μm]
1	15	10	23	5,4954
2	15	50	23	5,2069
3	15	50	23	5,2567
4	15	50	23	5,225
5	15	50	23	5,2269
6	15	50	23	5,2869
7	15	50	23	5,2673
8	15	90	23	6,0191
9	5	50	23	6,5775
10	25	50	23	6,064
11	21	74	29,5	6,1754
12	21	26	29,5	6,1458
13	9	74	29,5	6,7796
14	9	26	29,5	6,1509
15	15	50	34	5,8279
16	15	50	10,3	5,8783
17	21	74	16,5	6,0677
18	21	26	16,5	5,9464
19	9	74	16,5	6,3593
20	9	26	16,5	5,3033

Wykorzystując program Statistica zbudowano wykresy przestrzenne przedstawiające wpływ czynników wejściowych (K, V<sub>s</sub>, L<sub>e</sub>), na parametr chropowatości powierzchni Rz (rys.6.20 ÷ 6.22).

Rz [μm]

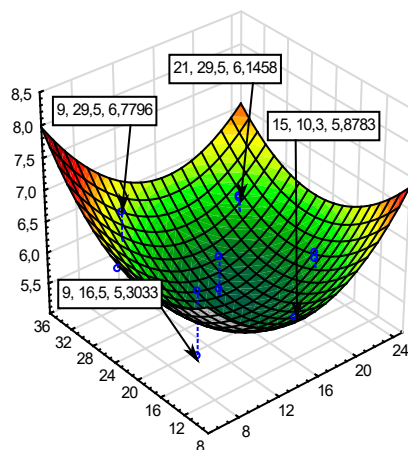


V<sub>s</sub> [ml/20min]

K [%]

Rys. 6.20. Wykres powierzchniowy wysokości parametru chropowatości powierzchni Rz względem czynników wejściowych K i V<sub>s</sub>

Rz [ $\mu\text{m}$ ]

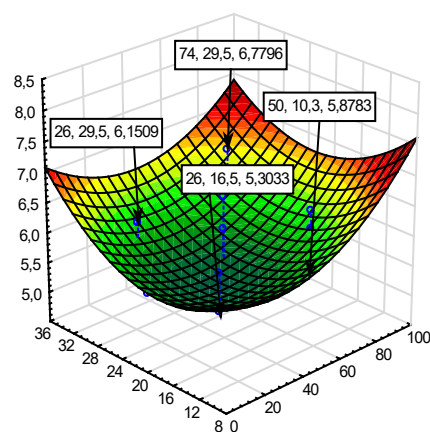


Le [mPa·s]

K [%]

Rys. 6.21. Wykres powierzchniowy wysokości parametry chropowatości powierzchni Rz względem czynników wejściowych K i  $L_e$

Rz [ $\mu\text{m}$ ]



Le [mPa·s]

Vs [ml/20min]

Rys. 6.22. Wykres powierzchniowy wysokości parametry chropowatości powierzchni Rz względem czynników wejściowych  $V_s$  i  $L_e$

Uzyskane wartości parametru chropowatości w badaniach mają wartości zbliżone do wartości parametru chropowatości Rz elementów docieranych z zastosowaniem konwencjonalnej metody dawkowania zawiesiny ścierniej [17] otrzymano:

$$R_{z_{\min}} = 5,21 \mu\text{m} \text{ dla } K = 15 \%, V_s = 50 \text{ ml}/20 \text{ min}, L_e = 23 \text{ mPa}\cdot\text{s}$$

$$R_{z_{\max}} = 6,78 \mu\text{m} \text{ dla } K = 9 \%, V_s = 74 \text{ ml}/20 \text{ min i } L_e = 29,5 \text{ mPa}\cdot\text{s}.$$

W celu sprawdzenia istotności otrzymanych wyników przeprowadzono analizę statystyczną. Na podstawie danych zawartych w tabeli 6.22 przeprowadzono test SS dla pełnego modelu. Dla wyznaczonego równania regresji obliczono kolejno współczynniki korelacji wielokrotnej, współczynnik determinacji. Wyniki testu SS „pełnego” modelu przedstawiono w tabeli 6.23.

**Tabela 6.23.** Wyniki regresji pełnego modelu

Zależna zmienna	Test SS dla pełnego modelu										
	Wielokr. R	Wielokr. R2	Skorygow R2	SS Model	df Model	MS Model	SS Reszta	df Reszta	MS Reszta	F	p
Rz	0,976365	0,953289	0,906578	4,384325	9	0,487147	0,214832	9	0,023870	20,40820	0,000059

Następnie przeprowadzono jednowymiarowe testy istotności równania,  $R_v = f(K, V_s, L_e)$ , wyniki przedstawiono w tabeli 6.24.

**Tabela 6.24.** Jednowymiarowy test istotności równania parametru Rz

Efekt	Jednowymiarowe testy istotności dla Rz Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez; błąd standardowy oceny: 0,1545				
	SS	Stopnie swobody	MS	F	p
Wyraz wolny	1,845040	1	1,845040	77,29479	0,000010
K	0,438896	1	0,438896	18,38678	0,002026
K <sup>2</sup>	2,296131	1	2,296131	96,19248	0,000004
V <sub>s</sub>	0,000226	1	0,000226	0,00947	0,924613
V <sub>s</sub> <sup>2</sup>	0,592263	1	0,592263	24,81185	0,000758
L <sub>e</sub>	0,204412	1	0,204412	8,56350	0,016857
L <sub>e</sub> <sup>2</sup>	0,847881	1	0,847881	35,52051	0,000213
K*V <sub>s</sub>	0,225768	1	0,225768	9,45816	0,013238
K*L <sub>e</sub>	0,078160	1	0,078160	3,27436	0,103814
V <sub>s</sub> *L <sub>e</sub>	0,021289	1	0,021289	0,89186	0,369633
Błąd	0,214832	9	0,023870		

Dla analizowanego równania regresji  $F = 20,40820$ . Tej wartości odpowiada poziom istotności  $p\text{-value} = 0,000059$ . Niska wartość poziomu istotności świadczy o wysokiej istotności uzyskanego równania regresji. Błąd standardowy oceny testu wynosi 0,1545, co świadczy, że wszystkie parametry modelu zostały oszacowane wystarczająco dokładnie. Model oceniono pozytywnie. Analizę równania regresji rozszerzono o testowanie istotności współczynników równania (tabeli 6.25).

**Tabela 6.25.** Wartości współczynników regresji i poziom ich istotności

Efekt	Oceny parametrów Parametryzacja z sigma-ograniczeniami									
	Rz Param.	Rz Bł. std.	Rz t	Rz p	-95,00% Gr.ufn.	+95,00% Gr.ufn.	Rz Beta (β)	Rz Bł.Std.β	-95,00% Gr.ufn.	+95,00% Gr.ufn.
Wyraz wolny	8,224198	0,935445	8,79175	0,000010	6,108073	10,34032				
K	-0,221370	0,051626	-4,28798	0,002026	-0,338155	-0,10458	-2,18996	0,510721	-3,34529	-1,03463
K <sup>2</sup>	0,011450	0,001167	9,80778	0,000004	0,008809	0,01409	3,45619	0,352393	2,65902	4,25336
V <sub>s</sub>	0,001204	0,012368	0,09731	0,924613	-0,026775	0,02918	0,04763	0,489425	-1,05953	1,15478
V <sub>s</sub> <sup>2</sup>	0,000363	0,000073	4,98115	0,000758	0,000198	0,00053	1,47525	0,296167	0,80527	2,14523
L <sub>e</sub>	-0,146732	0,050142	-2,92635	0,016857	-0,260161	-0,03330	-1,64327	0,561544	-2,91357	-0,37297
L <sub>e</sub> <sup>2</sup>	0,005011	0,000841	5,95991	0,000213	0,003109	0,00691	2,56178	0,429835	1,58942	3,53413
K*V <sub>s</sub>	-0,001363	0,000443	-3,07541	0,013238	-0,002366	-0,00036	-0,99752	0,324352	-1,73125	-0,26378
K*L <sub>e</sub>	-0,002962	0,001637	-1,80952	0,103814	-0,006664	0,00074	-0,88414	0,488605	-1,98944	0,22116
V <sub>s</sub> *L <sub>e</sub>	-0,000386	0,000409	-0,94439	0,369633	-0,001312	0,00054	-0,43656	0,462264	-1,48227	0,60916

Na tej podstawie uzyskano model matematyczny, który jest wielomianem drugiego stopnia z trzema zmiennymi wejściowym ( $K, V_s, L_e$ ):

$$Rz = 8,2242 - 0,2214K + 0,0115K^2 + 0,0012V_s + 0,0004V_s^2 - 0,1467L_e + 0,0050L_e^2 - 0,0013KV_s - 0,0030KL_e - 0,0004V_sL_e \quad (6.9)$$

Porównanie wyników rzeczywistych parametru Rz i przewidywanego  $Rz_t$  przedstawiono w tabeli 6.26.

**Tabela 6.26.** Porównanie wyników zaobserwowanych chropowości Rz i przewidywanej

	Wartości obserwowane, przewidywane i reszty Parametryzacja z sigma-ograniczeniami		
	Rz Obserw.	Rz Przewid.	Rz Reszty
1	5,49540	5,48923	0,00617
2	5,20690	5,23618	-0,02928
3	5,25670	5,23618	0,02052
4	5,22500	5,23618	-0,01118
5	5,22690	5,23618	-0,00928
6	5,28690	5,23618	0,05072
7	5,26730	5,23618	0,03112
8	6,01910	6,14621	-0,12711
9	6,57750	6,52266	0,05484
10	6,06400	6,23978	-0,17578
11	6,17540	5,93979	0,23561
12	6,14580	6,05880	0,08700
13	6,77960	6,73317	0,04643
14	6,15090	6,06692	0,08398
15	5,82790	6,06287	-0,23497
16	5,87830	5,79003	0,08827
18	5,94640	5,90885	0,03755
19	6,35930	6,36231	-0,00301
20	5,30330	5,45493	-0,15163

Następnie wprowadzono pojęcie parametru funkcji użyteczności (tabela 6.27). Wartość maksymalna parametru  $Rz_t$  jaką przewidziano w wyniku optymalizacji to:

$Rz_t = 6,81057 \mu\text{m} = Rz_{\text{użyte}} = 1$  (100%), zaś w przypadku, gdy

$Rz_t = 4,7886 \mu\text{m} = Rz_{\text{użyte}} = 0$  (0%)

**Tabela 6.27.** Parametry funkcji użyteczności parametru chropowości Rz

Zm.	Parametry funkcji użyteczności Ustawienia funkcji użyteczności dla każdej zmiennej zależnej							
	Niska Wartość	Użytecz. Wartość	Pośr. Wartość	Użytecz. Wartość	Wysoka Wartość	Użytecz. Wartość	s Param.	t Param.
Rz	4,788650	0,00	5,799610	0,500000	6,810570	1,000000	1,000000	1,000000

Parametryzacja ta pozwala na lepszą interpretację wyników wygenerowanych przez program Statistica.

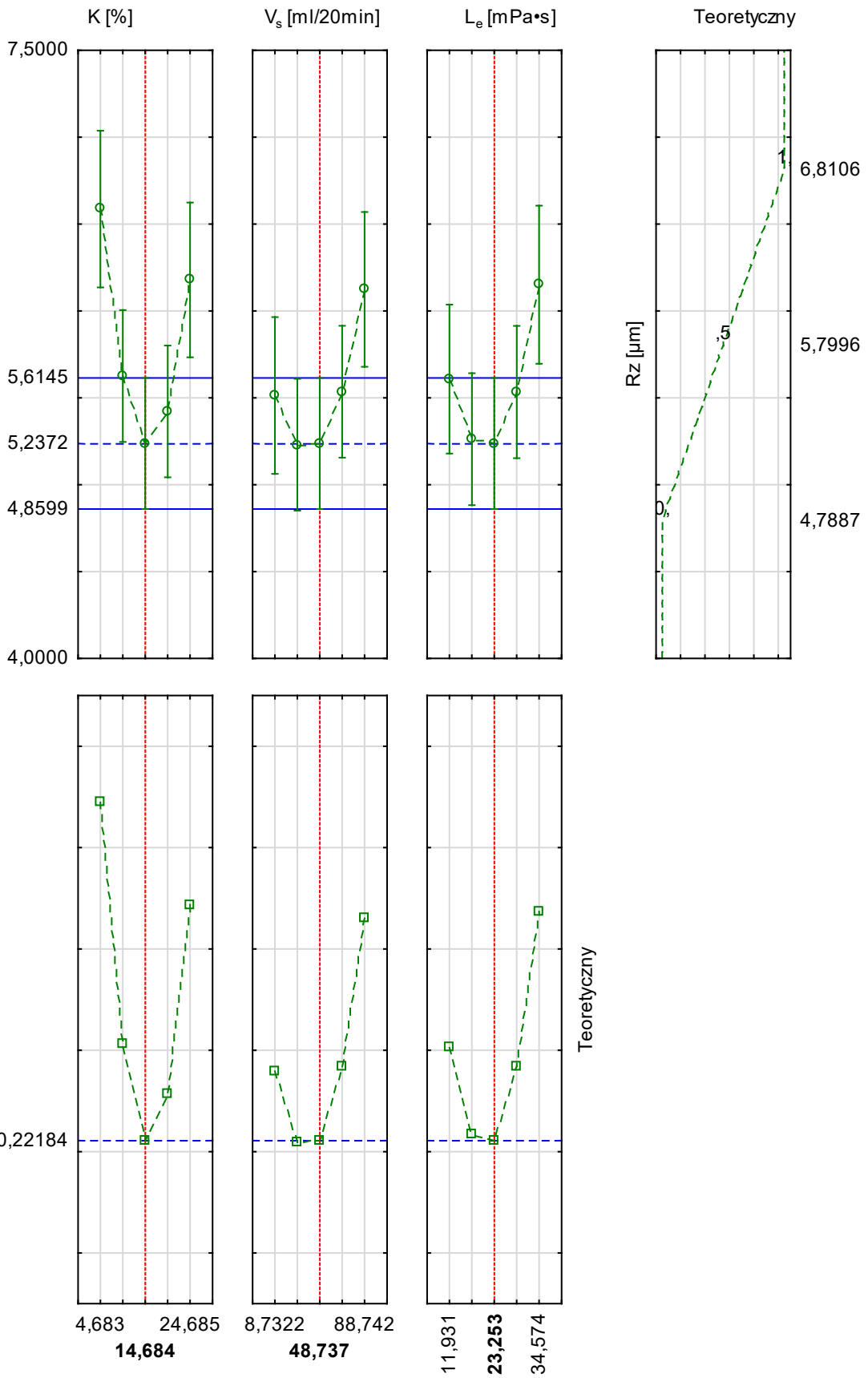
Kolejnym krokiem było przeprowadzenie optymalizacji. Znając równanie  $Rz = f(K, V_s, L_e)$ , na podstawie przeprowadzonego eksperymentu z zastosowaniem programu **PS/DS-P: λ**, można, poszukiwać odpowiedzi na pytanie, jaki będzie przewidywany (teoretyczny) parametr Rz (tabela 6.28).



**Tabela 6.28.** Zestawienie odpowiedzi dotyczące przewidywanej wysokości parametru chropowatości Rz

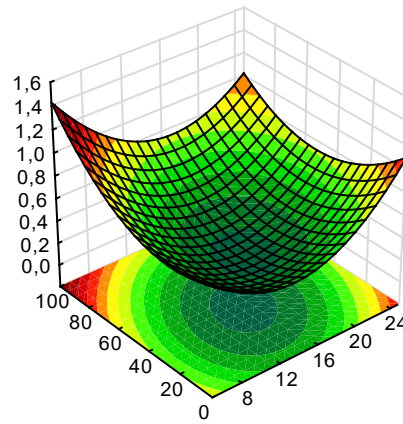
Czynnik	Poziomy czynnika i przewidywane odpowiedzi				
	Czynnika Poziom	Przewid. Rz	Użytecz. Wartość	-95% P Rz	+95% P Rz
K	4,683041	6,586539	0,889199	6,135415	7,037663
K	9,683626	5,625537	0,413907	5,246054	6,005020
K	14,68421	5,237189	0,221838	4,859895	5,614484
K	19,68480	5,421495	0,312992	5,042287	5,800704
K	24,68538	6,178456	0,687369	5,733169	6,623742
Vs	8,732164	5,513755	0,358622	5,062631	5,964878
Vs	28,73450	5,230053	0,218309	4,850570	5,609536
Vs	48,73684	5,237189	0,221838	4,859895	5,614484
Vs	68,73918	5,535164	0,369210	5,155955	5,914372
Vs	88,74152	6,123976	0,660425	5,678690	6,569263
Le	11,93080	5,607963	0,405215	5,179284	6,036642
Le	17,59172	5,261990	0,234104	4,882558	5,641422
Le	23,25263	5,237189	0,221838	4,859895	5,614484
Le	28,91355	5,533561	0,368418	5,152868	5,914254
Le	34,57446	6,151105	0,673842	5,696269	6,605942

Profile wartości aproksymowanych i teoretycznego ubytku liniowego w funkcji czynników wejściowych na rys.6.23. W tym przypadku zmienną zależną jest parametr  $Rz_t = Rz_{użyty}$ , a predyktory to  $K_t$ ,  $V_{st}$ ,  $L_{et}$ . Na rys. 6.24, 6.25, i rys.6.26 zamieszczono wykresy przestrzenne i warstwowe  $Rz_{użyty}$ .  $f = (K_t, V_{st}, L_{et})$ .



Rys. 6.23. Profile wartości aproksymowanych i użytecznych badanych czynników K, Vs, Le, mających wpływ na wysokość parametru chropowatości powierzchni Rz

Rz teoretyczny

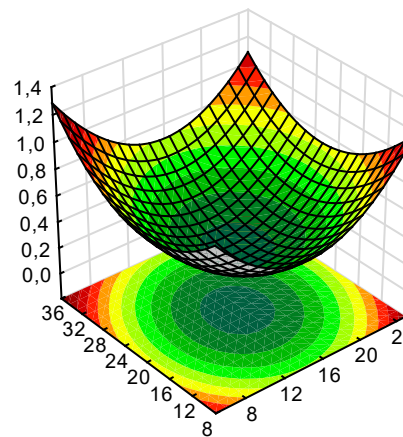


$V_s$  [ml/20min]

$K$  [%]

Rys. 6.24. Wykres powierzchniowy przewidywanej wartości parametru chropowatości  $R_z$  względem czynników  $K$  i  $V_s$

Rz teoretyczny

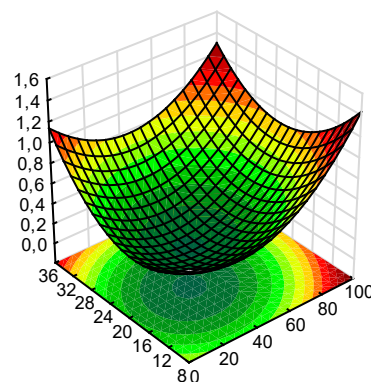


$L_e$  [mPa · s]

$K$  [%]

Rys. 6.25. Wykres powierzchniowy przewidywanej wartości parametru chropowatości  $R_z$  względem czynników  $K$  i  $L_e$

Rz teoretyczny



$L_e$  [mPa · s]

$V_s$  [ml/20min]

Rys. 6.26. Wykres powierzchniowy przewidywanej wartości parametru chropowatości  $R_z$  względem czynników  $V_s$  i  $L_e$

W badaniach doświadczalnych parametr chropowatości powierzchni Rz przyjmował wartości:

$Rz_{\min} = 5,225 \mu\text{m}$  dla parametrów wejściowych  $K = 15 \%$ ,  $V_s = 50 \text{ ml}/20 \text{ min}$ ,  $L_e = 23 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ , natomiast  $Rz_{\max} = 6,777 \mu\text{m}$  osiągnięto dla  $K = 9 \%$ ,  $V_s = 74 \text{ ml}/20 \text{ min}$ ,  $L_e = 29,5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ .

Dokonując optymalizacji prognozy przewidywanych odpowiedzi ustalono, że parametr chropowatości powierzchni  $Rz_{\min}$  wyniesie:

$Rz_{\min} = 5,237 \mu\text{m}$  dla czynników wejściowych  $K = 14,6 \%$ ,  $V_s = 48,7 \text{ ml}/20 \text{ min}$ ,  $L_e = 23,2 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ .

Opracowano model matematyczny ma postaci:

$$Rz = 8,2242 - 0,2214K + 0,0115K^2 + 0,0012V_s + 0,0004V_s^2 - 0,1467L_e + 0,0050L_e^2 - 0,0013KV_s \\ - 0,0030KL_e - 0,0004V_sL_e$$

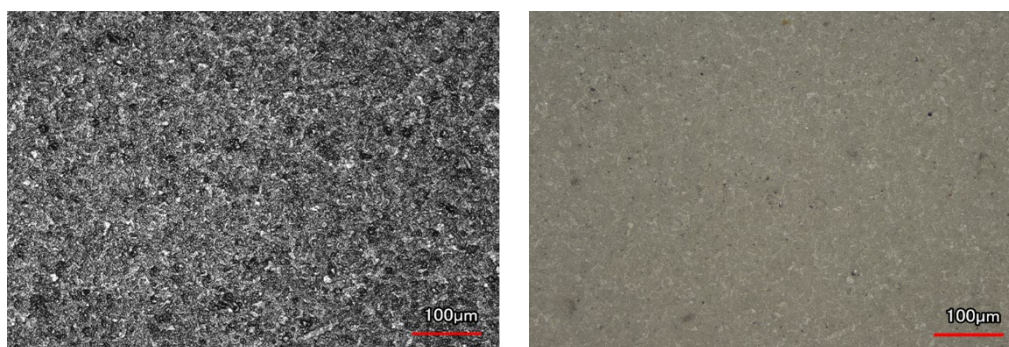
pozwała na przeprowadzenie optymalizacji, zaś wykonane badania potwierdziły, że wymuszony system przygotowania, dawkowania i nanoszenia zawiesiny pozwala na uzyskanie parametrów Rz na poziomie zbliżonym do tych, które otrzymano przy konwencjonalnym systemie dawkowania [17].

#### 6.3.4. Badania wpływu warunków dawkowania zawiesiny ścierniej na korelacje podstawowych parametrów struktury geometrycznej powierzchni po docieraniu

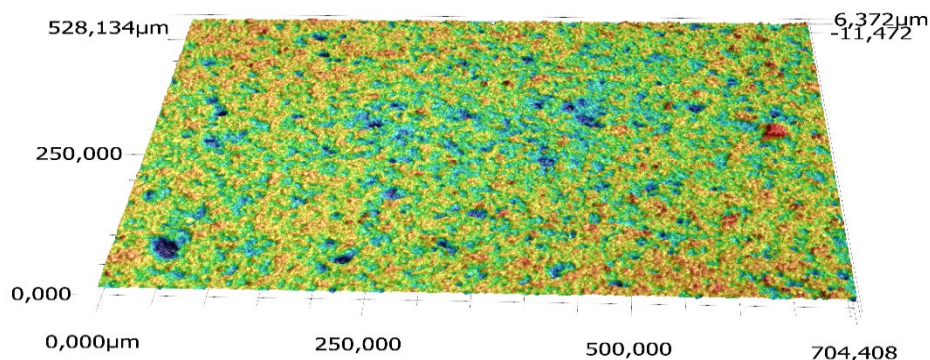
W celu oceny wpływu wymuszonego dawkowania zawiesiny ścierniej na parametry chropowatości dokonano pomiarów docieranych próbek ceramicznych metodą optyczną i laserową. Na rys. 6.27 ÷ 6.42 przedstawiono wyniki przykładowych pomiarów powierzchni (przy różnych parametrach dawkowania):

- rys. 6.27 ÷ 6.30,  $K = 15 \%$ ,  $V_s = 10 \text{ ml}/20 \text{ min}$ ,  $L_e = 10,3 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,
- rys. 6.31 ÷ 6.34,  $K = 15 \%$ ,  $V_s = 90 \text{ ml}/20 \text{ min}$ ,  $L_e = 23 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,
- rys. 6.35 ÷ 6.38,  $K = 5 \%$ ,  $V_s = 50 \text{ ml}/20 \text{ min}$ ,  $L_e = 23 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,
- rys. 6.39 ÷ 6.42,  $K = 9 \%$ ,  $V_s = 26 \text{ ml}/20 \text{ min}$ ,  $L_e = 16,5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ .

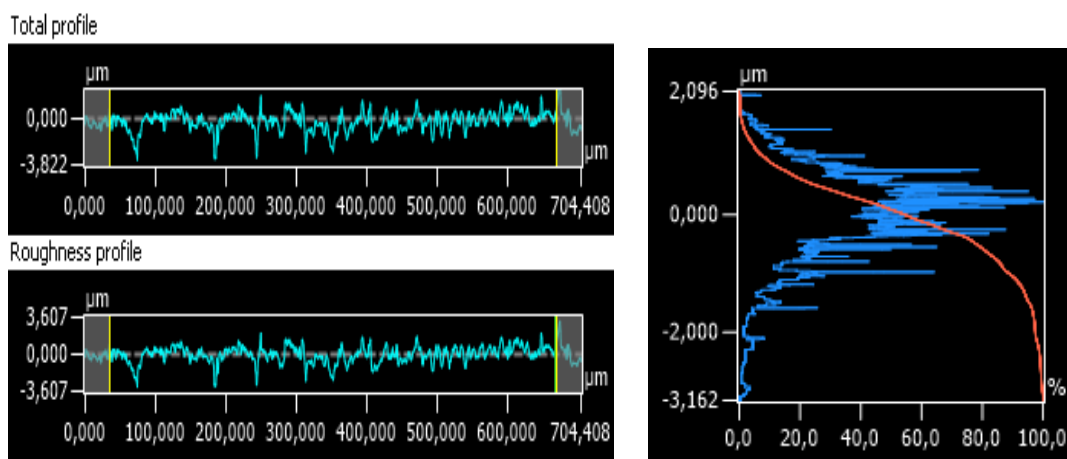
Elementy ceramiczne docierano przez 20 minut przy nacisku  $p = 0,044 \text{ MPa}$ , prędkość obrotowa tarczy docierającej wynosi 60obr/min uzyskując ubytek liniowy próbek ( $U_l = 36 \mu\text{m}$ ). Jak można zauważyć, powierzchnie są wygładzone, z pozostałą w wyniku docierania porowatością. Następnie sporządzono profile chropowatości 3D oraz wykresy nośności materiału.



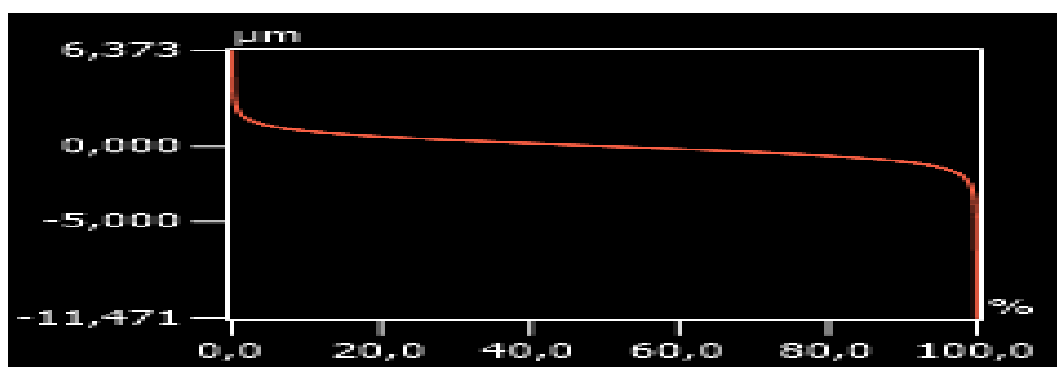
Rys. 6.27. Widok powierzchni docieranej ceramiki  $\text{Al}_2\text{O}_3$ : a) obraz z mikroskopu skaningowego, b) zdjęcie optyczne (warunki dawkowania zawiesiny ścierniej:  $K = 15 \%$ ,  $V_s = 10 \text{ ml}/20 \text{ min}$ ,  $L_e = 10,3 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ )



Rys. 6.28. Profil 3D powierzchni próbki ceramicznej  $\text{Al}_2\text{O}_3$  po docieraniu (warunki dawkowania zawiesiny ścierniej:  $K = 15 \%$ ,  $V_s = 10 \text{ ml}/20 \text{ min}$ ,  $L_e = 10,3 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ )



Rys. 6.29. Profile chropowości powierzchni docieranej i krzywa rotacji materiału (warunki dawkowania zawiesiny ścierniej:  $K = 15\%$ ,  $V_s = 10$  ml/20 min,  $L_e = 10,3$  mPa·s)



Rys. 6.30. Krzywa udziału materiałowego po docieraniu (warunki dawkowania:  $K = 15\%$ ,  $V_s = 10$  ml/20 min,  $L_e = 10,3$  mPa·s)

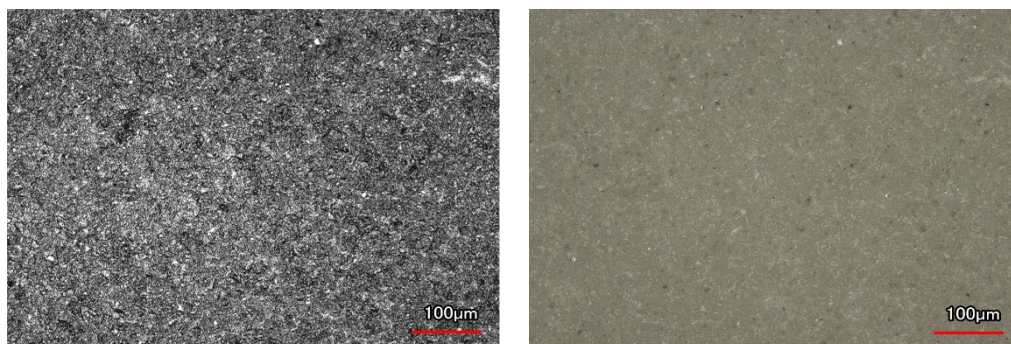
Analizując powyższy przypadek stwierdzono, że parametry chropowości uzyskują następujące wartości:

- $Rz = 5,28 \mu\text{m}$ ,  $Rp = 2,096 \mu\text{m}$ ,  $Rv = 3,162 \mu\text{m}$ ,
- $Sz = 17,844 \mu\text{m}$ ,  $Sp = 6,373 \mu\text{m}$ ,  $Sv = 11,471 \mu\text{m}$ ,  $Ssk = -0,583$ ,  $Sku = 9,226$ ,
- $Sk = 1,940 \mu\text{m}$ ,  $Spk = 1,027 \mu\text{m}$ ,  $Svk = 1,221 \mu\text{m}$ ,
- $Smr1 = 10,782\%$ ,  $Smr2 = 88,802\%$ ,
- $V_{vv} = 0,117$  ml/m<sup>2</sup>,  $V_{vc} = 0,956$  ml/m<sup>2</sup>,  $V_{mp} = 0,051$  ml/m<sup>2</sup>,  $V_{mc} = 0,700$  ml/m<sup>2</sup>.

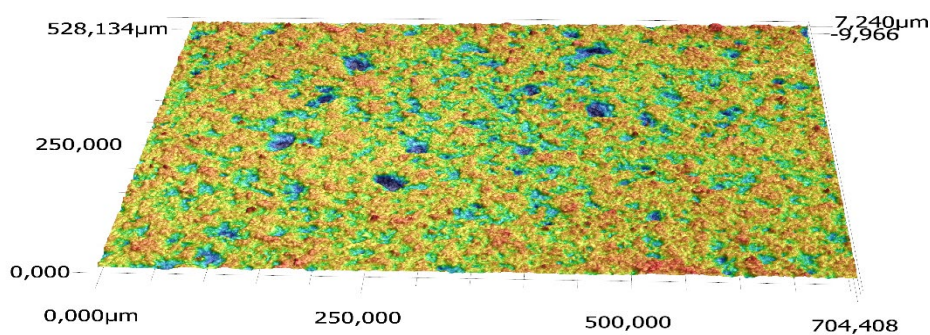
Uzyskane parametry świadczą o tym, że przy zastosowaniu wymuszonego systemu dawkowania zawiesiny ścierniej zachowując stałe warunki ( $p = 0,0446$  MPa,  $t = 20$  min,  $V_d = 60$  obr/min) oraz warunki dawkowania ( $K = 15\%$ ,  $V_s = 10$  ml/20 min,  $L_e = 10,3$  mPa·s) osiągnięto stosunkowo niewielki ubytek liniowy ( $36 \mu\text{m}$ ), ale dobrą nośność powierzchni.

Na (rys. 6.31 ÷ 6.34) przedstawiono kolejny przypadek, przy zastosowaniu innych parametrów dawkowania oraz z zachowaniem takich samych stałych warunków procesu. Powierzchnie elementów docierano uzyskując ubytek liniowy  $U_l = 190 \mu\text{m}$ . Założone parametry dawkowania spowodowały pięciokrotne zwiększenie wydajności w porównaniu do poprzedniego przypadku.

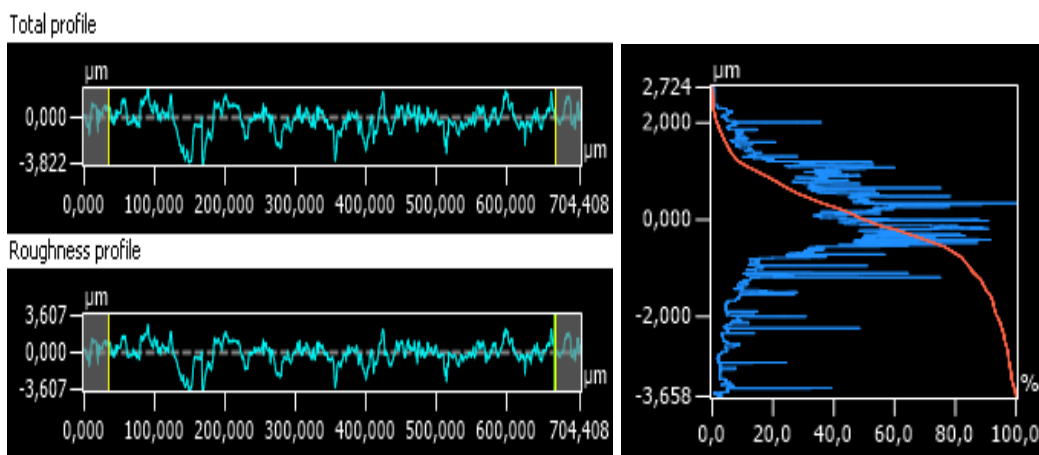
Analizując powierzchnię elementu można stwierdzić, że jest wygładzona, choć posiada nadal porowatą strukturę.



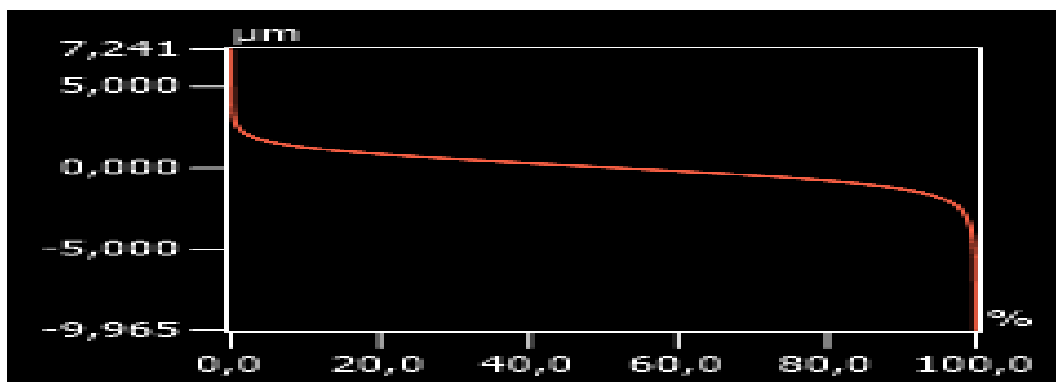
Rys. 6.31. Widok powierzchni docieranej ceramiki  $Al_2O_3$ : a) obraz z mikroskopu skaningowego, b) zdjęcie optyczne (warunki dawkowania zawiesiny ścierniej:  $K = 15\%$ ,  $V_s = 90\text{ ml/20 min}$ ,  $L_e = 23\text{ mPa}\cdot\text{s}$ )



Rys. 6.32. Profil falistości 3D powierzchni ceramicznej  $Al_2O_3$  po docieraniu (warunki dawkowania zawiesiny ścierniej:  $K = 15\%$ ,  $V_s = 90\text{ ml/20 min}$ ,  $L_e = 23\text{ mPa}\cdot\text{s}$ )



Rys. 6.33. Profile chropowatości powierzchni i krzywa rotacji materiału (warunki dawkowania zawiesiny ścierniej:  $K = 15\%$ ,  $V_s = 90\text{ ml/20 min}$ ,  $L_e = 23\text{ mPa}\cdot\text{s}$ )



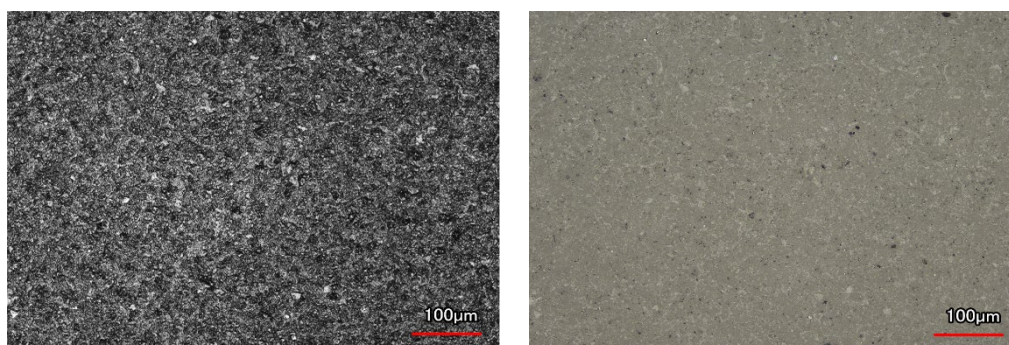
Rys. 6.34. Krzywa udziału materiałowego po docieraniu (warunki dawkowania:  $K = 15\%$ ,  $V_s = 90 \text{ ml}/20 \text{ min}$ ,  $L_e = 23 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ )

Analizując powyższy przypadek stwierdzono, że parametry chropowatości uzyskują następujące wartości:

- $R_z = 6,382 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $R_p = 2,724 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $R_v = 3,658 \text{ }\mu\text{m}$ ,
- $S_z = 17,206 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $S_p = 7,241 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $S_v = 9,96 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $S_{sk} = -0,615$ ,  $S_{ku} = 5,728$ ,
- $S_k = 2,450 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $S_{pk} = 1,035 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $S_{vk} = 1,577 \text{ }\mu\text{m}$ ,
- $S_{mr1} = 9,697 \%$ ,  $S_{mr2} = 88,216 \%$ ,
- $V_{vv} = 1,153 \text{ ml}/\text{m}^2$ ,  $V_{vc} = 1,160 \text{ ml}/\text{m}^2$ ,  $V_{mp} = 0,052 \text{ ml}/\text{m}^2$ ,  $V_{mc} = 0,886 \text{ ml}/\text{m}^2$ .

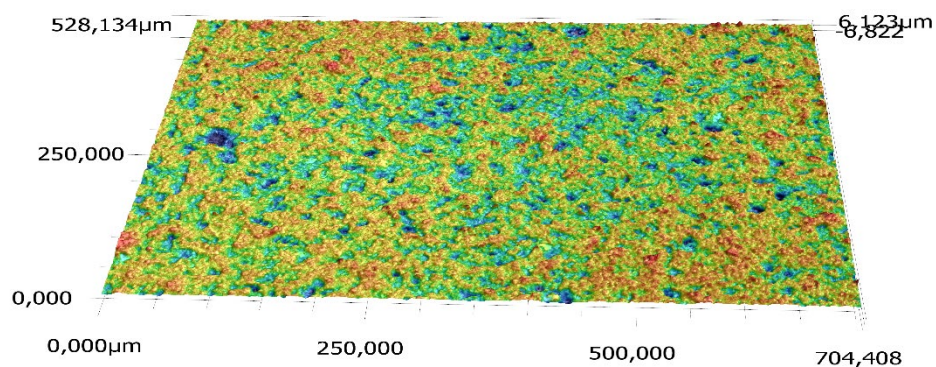
W tym przypadku (warunki dawkowania  $K = 15 \%$ ,  $V_s = 90 \text{ ml}/20 \text{ min}$ ,  $L_e = 23 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ) były przyczyną zwiększenia wydajności docierania elementów ceramicznych w powiązaniu z zachowaniem dobrych parametrów nośności.

Następny przykład (rys. 6.35 ÷ 6.38) dotyczy docierania elementów, gdzie uzyskano ubytek liniowy na poziomie  $U_l = 26\mu\text{m}$ . Przyjęte warunki dawkowania ( $K = 5 \%$ ,  $V_s = 50 \text{ ml}/20 \text{ min}$ ,  $L_e = 23 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ) spowodowały zmniejszenie wydajności obróbki (do poziomu 0,7 pierwszego przykładu). Powierzchnia ceramiczna  $\text{Al}_2\text{O}_3$  po zakończonym procesie docierania wykazuje dobrą nośność, jest gładka, choć posiada charakterystyczne ślady typowe dla tej obróbki.

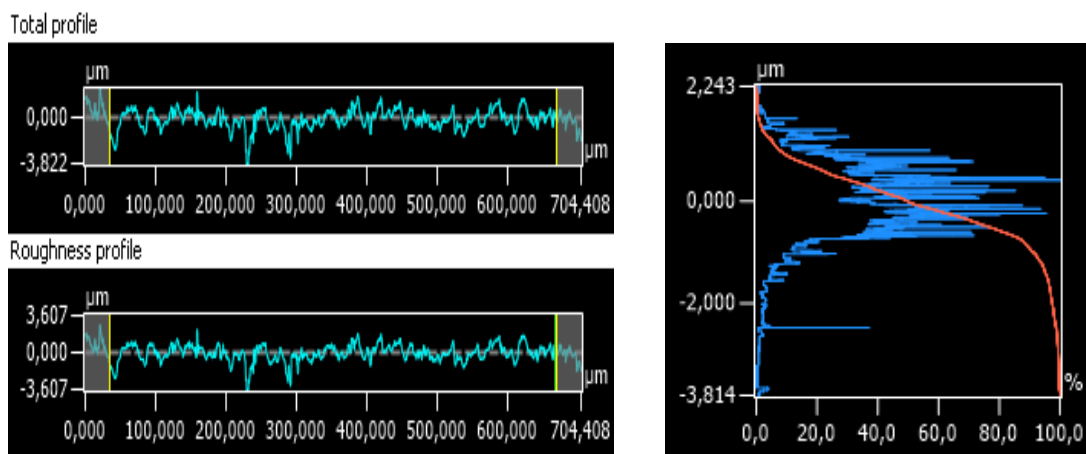


Rys. 6.35. Widok powierzchni docieranej ceramiki  $\text{Al}_2\text{O}_3$ : a) obraz z mikroskopu skaningowego, b) zdjęcie optyczne (warunki dawkowania zawiesiny ścierniej:  $K = 5 \%$ ,  $V_s = 50 \text{ ml}/20 \text{ min}$ ,  $L_e = 23 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ )

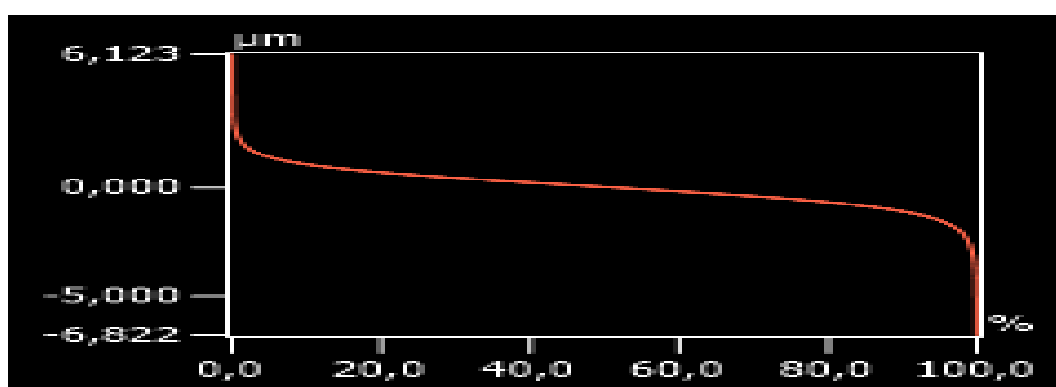




Rys. 6.36. Profil falistości 3D powierzchni próbki ceramicznej  $Al_2O_3$  (warunki dawkowania zawiesiny ścierniej:  $K = 5\%$ ,  $V_s = 50$  ml/20 min,  $L_e = 23$  mPa·s)



Rys. 6.37. Profile chropowatości powierzchni i krzywa rotacji materiału (warunki dawkowania zawiesiny ścierniej:  $K = 5\%$ ,  $V_s = 50$  ml/20 min,  $L_e = 23$  mPa·s)

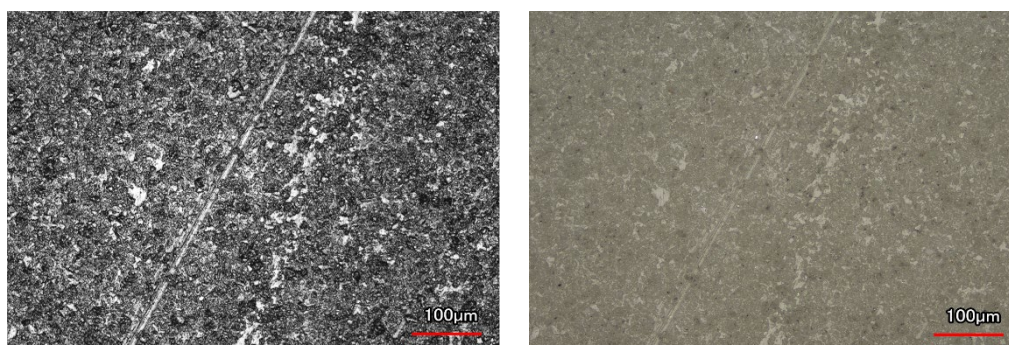


Rys. 6.38. Krzywa udziału materiałowego po docieraniu (warunki dawkowania:  $K = 5\%$ ,  $V_s = 50$  ml/20 min,  $L_e = 23$  mPa·s)

Analizując powyższy przypadek stwierdzono, że parametry chropowatości uzyskują następującą wartość:

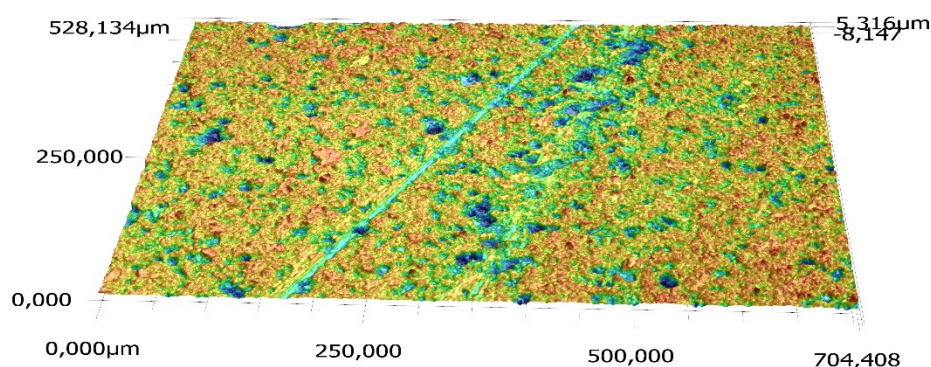
- $R_z = 6,05 \mu\text{m}$ ,  $R_p = 2,243 \mu\text{m}$ ,  $R_v = 3,814 \mu\text{m}$ ,
- $S_z = 12,945 \mu\text{m}$ ,  $S_p = 6,123 \mu\text{m}$ ,  $S_v = 6,822 \mu\text{m}$ ,  $S_{sk} = -0,326$ ,  $S_{ku} = 4,828$ ,
- $S_k = 2,064 \mu\text{m}$ ,  $S_{pk} = 0,978 \mu\text{m}$ ,  $S_{vk} = 1,230 \mu\text{m}$ ,
- $S_{mr1} = 10,237 \%$ ,  $S_{mr2} = 88,376 \%$ ,
- $V_{vv} = 0,123 \text{ ml/m}^2$ ,  $V_{vc} = 0,996 \text{ ml/m}^2$ ,  $V_{mp} = 0,049 \text{ ml/m}^2$ ,  $V_{mc} = 0,746 \text{ ml/m}^2$ .

Ostatni przykład (rys. 6.39 ÷ 6.42) dotyczy docierania elementów, gdzie uzyskano ubytek liniowy na poziomie  $U_l = 25 \mu\text{m}$

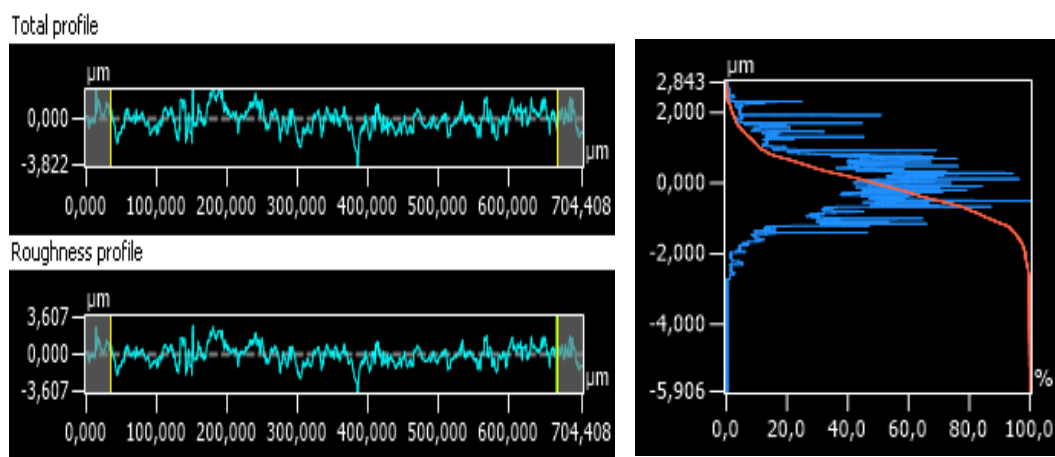


Rys. 6.39. Widok powierzchni docieranej ceramiki  $\text{Al}_2\text{O}_3$ : a) obraz z mikroskopu skaningowego, b) zdjęcie optyczne (warunki dawkovania:  $K = 9\%$ ,  $V_s = 26 \text{ ml/20 min}$ ,  $L_e = 16,5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ )

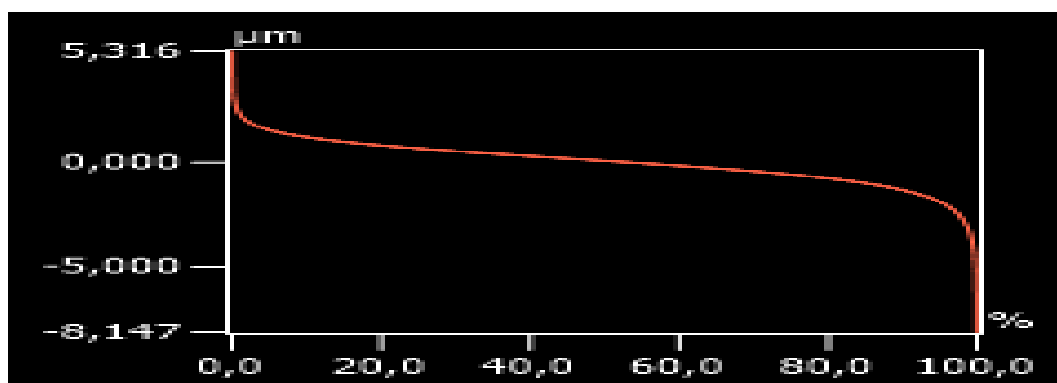
Powierzchnia jest wygładzona i posiada charakterystyczne dla docierania ślady. W tym przykładzie zawartość ziaren ściernych wyniosła  $K = 9 \%$ , ale znacząco obniżono dawkę do poziomu  $V_s = 26 \text{ ml/20 min}$ , co spowodowało zmniejszenie wydajności obróbki (do poziomu 0,69 pierwszego przykładu).



Rys. 6.40. Profil 3D powierzchni próbki ceramicznej  $\text{Al}_2\text{O}_3$  docieraniu (warunki dawkovania zawiesiny ścierniej:  $K = 9 \%$ ,  $V_s = 26 \text{ ml/20 min}$ ,  $L_e = 16,5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ )



Rys. 6.41. Profile chropowości powierzchni i krzywa rotacji materiału (warunki dawkowania zawiesiny ścierniej:  $K = 9\%$ ,  $V_s = 26$  ml/20 min,  $L_e = 16,5$  mPa·s)



Rys. 6.42. Krzywa udziału materiałowego po docieraniu (warunki dawkowania:  $K = 9\%$   $V_s = 26$  ml/20 min,  $L_e = 16,5$  mPa·s)

Analizując powyższy przypadek stwierdzono, że parametry chropowości uzyskują następujące wartości:

- $Rz = 8,749 \mu\text{m}$ ,  $Rp = 2,843 \mu\text{m}$ ,  $Rv = 5,906 \mu\text{m}$ ,
- $Sz = 13,463 \mu\text{m}$ ,  $Sp = 5,316 \mu\text{m}$ ,  $Sv = 8,143 \mu\text{m}$ ,  $Ssk = -0,717$ ,  $Sku = 5,256$ ,
- $Sk = 2,339 \mu\text{m}$ ,  $Spk = 0,969 \mu\text{m}$ ,  $Svk = 1,659 \mu\text{m}$ ,
- $Smr1 = 9,459\%$ ,  $Smr2 = 86,867\%$ ,
- $V_{vv} = 0,164$  ml/m<sup>2</sup>,  $V_{vc} = 1,107$  ml/m<sup>2</sup>,  $V_{mp} = 0,049$  ml/m<sup>2</sup>,  $V_{mc} = 0,866$  ml/m<sup>2</sup>.

Oceniając wpływ parametrów wymuszonego dawkowania zawiesiny na jakość powierzchni, należy rozpatrywać to w powiązaniu z wydajnością obróbki. Zagadnienie jest stosunkowo złożone, ponieważ trudno mieć jednoczesny wpływ na wiele parametrów chropowości powierzchni ceramiki. Skupienie się na jednym parametrze chropowości może spowodować pogorszenie innych, np. takich jak udział materiałowy. Istotne parametry powinny wynikać z relacji między określonymi parametrami 2D (jak rozmieszczenie wierzchołków) w kierunkach wzajemnie prostopadłych.

Szczególnie ważny jest kształt i rozmieszczenie obszarów styku kontaktujących się powierzchni. W celu oceny wpływu badanych warunków dawkowania zawiesiny na wybrane parametry chropowatości 2D dokonano ich zestawienia w tabeli 6. 29.

**Tabela 6.29.** Zestawienie parametrów wyznaczonych dla układu 2D (wartości średnie)

Nr	K	V <sub>s</sub>	L <sub>e</sub>	Ra	Rq	Rt	Rv	Rz	Rp	Rku	Rsm	Rsk
1	15	10	23	0,9171	1,4636	6,5887	3,4616	5,4954	2,0363	4,0670	48,0559	-0,5857
2	15	50	23	0,6329	0,9371	7,0647	3,0876	5,2069	2,1886	4,3347	36,0138	-0,4355
3	15	50	23	0,6361	0,9372	7,0124	3,0851	5,2567	2,1841	4,3110	36,0850	-0,4386
4	15	50	23	0,6361	0,9333	7,0321	3,0967	5,2250	2,1833	4,3387	36,0429	-0,4366
5	15	50	23	0,6255	0,9353	7,0345	3,0303	5,2269	2,1815	4,3550	36,0934	-0,4375
6	15	50	23	0,6381	0,9329	7,0579	3,0716	5,2869	2,1852	4,3110	36,0811	-0,4357
7	15	50	23	0,6328	0,9381	7,0078	3,0786	5,2673	2,1887	4,3013	36,0246	-0,4350
8	15	90	23	0,8107	1,0716	8,8133	3,8043	6,0191	2,2154	9,5737	39,6956	-1,3440
9	5	50	23	0,6868	0,9582	10,0875	4,2833	6,5775	2,2943	9,7350	35,1398	-1,5710
10	25	50	23	0,7956	1,0345	7,3878	3,7032	6,0640	2,3608	4,1340	42,5203	-0,4247
11	21	74	29,5	0,7429	0,9713	7,7281	3,5886	6,1754	2,5869	3,9137	43,4665	-0,3703
12	21	26	29,5	0,7431	0,9649	7,8105	3,9819	6,1458	2,1639	4,5010	41,2469	-0,7273
13	9	74	29,5	0,7034	0,9077	8,8420	4,2404	6,7796	2,5391	5,4597	6,0630	-0,7630
14	9	26	29,5	0,7697	0,9941	7,7722	4,0603	6,1509	2,0906	4,5857	6,0630	-0,8240
15	15	50	34	0,7391	0,9583	7,4016	3,3392	5,8279	2,4887	3,6740	6,0630	-0,3223
16	15	50	10,3	0,6884	0,9023	7,1104	3,4198	5,8783	2,4585	3,6877	41,7411	-0,3997
17	21	74	16,5	0,6876	0,9030	8,0437	3,7786	6,0677	2,2891	5,3783	40,5722	-0,8247
18	21	26	16,5	0,7438	0,9833	7,3874	3,6503	5,9464	2,2960	4,4053	41,1710	-0,5543
19	9	74	16,5	0,7796	1,0073	8,1021	4,0598	6,3593	2,2995	4,3187	45,3597	-0,7023
20	9	26	16,5	0,6444	0,8546	6,2794	3,5118	5,3033	1,7916	4,8453	36,4907	-0,8787

Następnie przeprowadzono analizę wpływu czynników zmiennych na badane parametry chropowatości powierzchni (tabela 6.30 i 6.31)

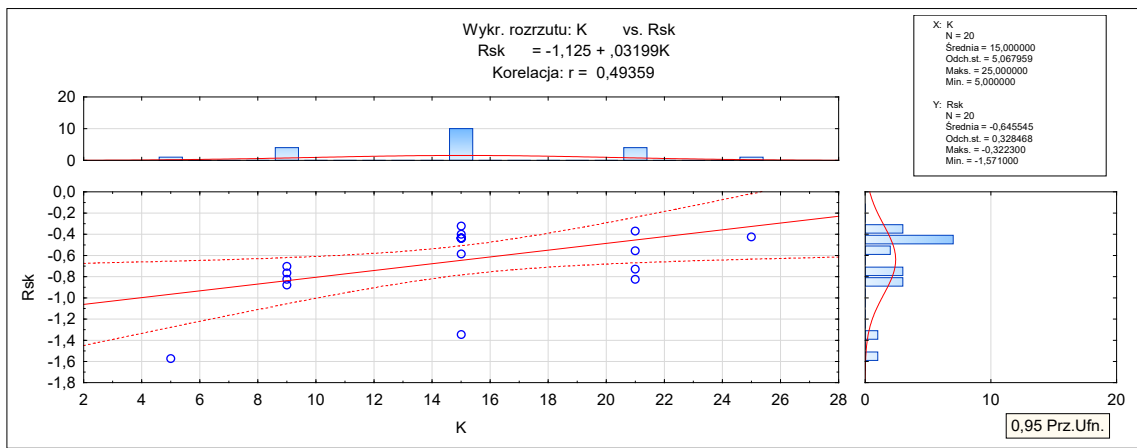
**Tabela 6.30.** Wykonane testy istotności współczynników korelacji między zmiennymi: K, Vs, Le, Ra, Rq, Rt, Rv, Rz, Rp, Rku, Rsm, Rsk

Zmienna	Oznaczone współczynniki korelacji są istotne z $p < ,05000$ N=20											
	K	Vs	Le	Ra	Rq	Rt	Rv	Rz	Rp	Rku	Rsm	Rsk
K	1,0000	,0000	,0000	,1624	,0934	-,3196	-,2753	-,1400	,2478	-,3831	,4137	,4936
	p=---	p=1,00	p=1,00	p=,494	p=,695	p=,169	p=,240	p=,556	p=,292	p=,095	p=,070	p=,027
Vs	,0000	1,0000	-,0000	-,1327	-,3321	,5067	,1548	,3405	,5705	,3670	-,0168	-,1783
	p=1,00	p=---	p=1,00	p=,577	p=,153	p=,023	p=,515	p=,142	p=,009	p=,111	p=,944	p=,452
Le	,0000	-,0000	1,0000	,1516	,0989	,2006	,1111	,1779	,2301	-,0068	-,6051	,0624
	p=1,00	p=1,00	p=---	p=,524	p=,678	p=,396	p=,641	p=,453	p=,329	p=,977	p=,005	p=,794
Ra	,1624	-,1327	,1516	1,0000	,8141	,1694	,4820	,4467	,0888	,0974	,1080	-,1955
	p=,494	p=,577	p=,524	p=---	p=,000	p=,475	p=,031	p=,048	p=,710	p=,683	p=,650	p=,409
Rq	,0934	-,3321	,0989	,8141	1,0000	-,0955	,0673	-,0048	-,1729	,0187	,2716	-,0491
	p=,695	p=,153	p=,678	p=,000	p=---	p=,689	p=,778	p=,984	p=,466	p=,938	p=,247	p=,837
Rt	-,3196	,5067	,2006	,1694	-,0955	1,0000	,7651	,8085	,4334	,7807	-,2067	-,7498
	p=,169	p=,023	p=,396	p=,475	p=,689	p=---	p=,000	p=,000	p=,056	p=,000	p=,382	p=,000
Rv	-,2753	,1548	,1111	,4820	,0673	,7651	1,0000	,9318	,2194	,4897	-,2072	-,6820
	p=,240	p=,515	p=,641	p=,031	p=,778	p=,000	p=---	p=,000	p=,353	p=,028	p=,381	p=,001
Rz	-,1400	,3405	,1779	,4467	-,0048	,8085	,9318	1,0000	,5563	,3976	-,2514	-,5023
	p=,556	p=,142	p=,453	p=,048	p=,984	p=,000	p=,000	p=---	p=,011	p=,083	p=,285	p=,024
Rp	,2478	,5705	,2301	,0888	-,1729	,4334	,2194	,5563	1,0000	-,0464	-,2060	,2086
	p=,292	p=,009	p=,329	p=,710	p=,466	p=,056	p=,353	p=,011	p=---	p=,846	p=,383	p=,378
Rku	-,3831	,3670	-,0068	,0974	,0187	,7807	,4897	,3976	-,0464	1,0000	,0130	-,9242
	p=,095	p=,111	p=,977	p=,683	p=,938	p=,000	p=,028	p=,083	p=,846	p=---	p=,956	p=,000
Rsm	,4137	-,0168	-,6051	,1080	,2716	-,2067	-,2072	-,2514	-,2060	,0130	1,0000	,0210
	p=,070	p=,944	p=,005	p=,650	p=,247	p=,382	p=,381	p=,285	p=,383	p=,956	p=---	p=,930
Rsk	,4936	-,1783	,0624	-,1955	-,0491	-,7498	-,6820	-,5023	,2086	-,9242	,0210	1,0000
	p=,027	p=,452	p=,794	p=,409	p=,837	p=,000	p=,001	p=,024	p=,378	p=,000	p=,930	p=---

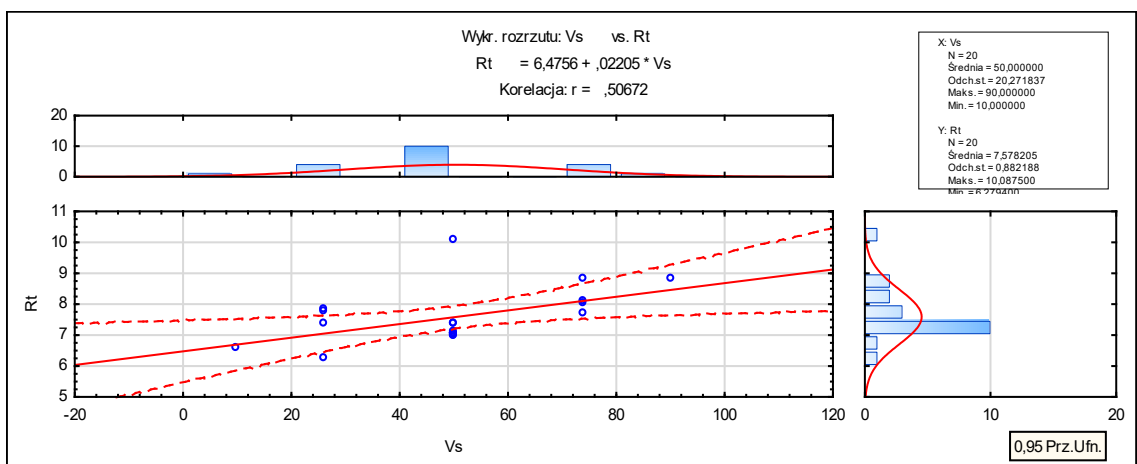
**Tabela 6.31.** Mapa istotności p dla współczynnika korelacji pomiędzy zmiennymi: K, Vs, Le, Ra, Rq, Rt, Rv, Rz, Rp, Rku, Rsm, Rsk

Zmienna	Mapa p dla współczynników korelacji N=20 p<=											
	K	Vs	Le	Ra	Rq	Rt	Rv	Rz	Rp	Rku	Rsm	Rsk
K												
Vs												
Le												
Ra												
Rq												
Rt												
Rv												
Rz												
Rp												
Rku												
Rsm												
Rsk												

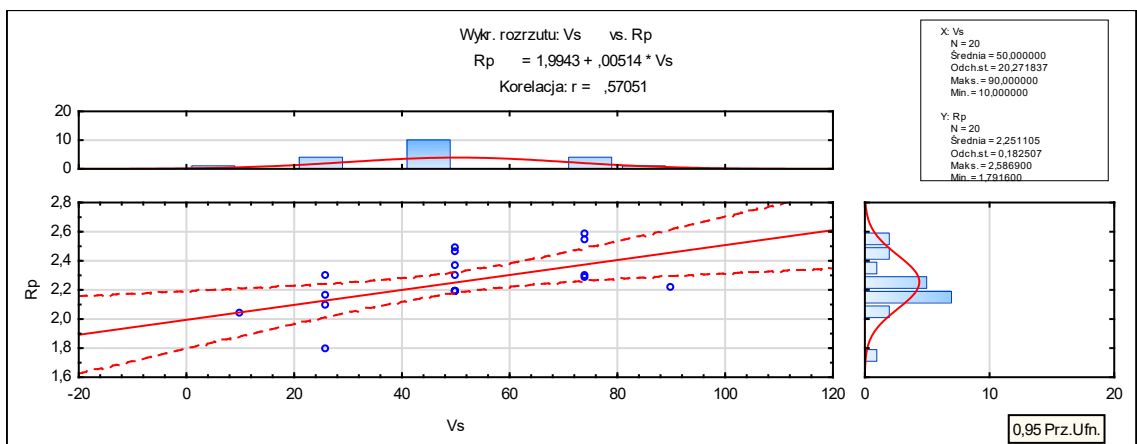
Analizując wpływ warunków wymuszonego dawkowania zawiesiny ścierniej podczas docierania na korelacje parametrów chropowatości (Ra, Rq, Rt, Rv, Rz, Rp, Rku, Rsm, Rsk) stwierdzono, że parametry dawkowania mają one wpływ na niektóre z nich. Istotne statystycznie korelacje czynników badanych zachodzą dla par: K - Rsk (rys. 6.43), Vs - Rt (rys. 6.44), Vs - Rp (rys. 6.45), Le - Rsm (rys. 6.46).



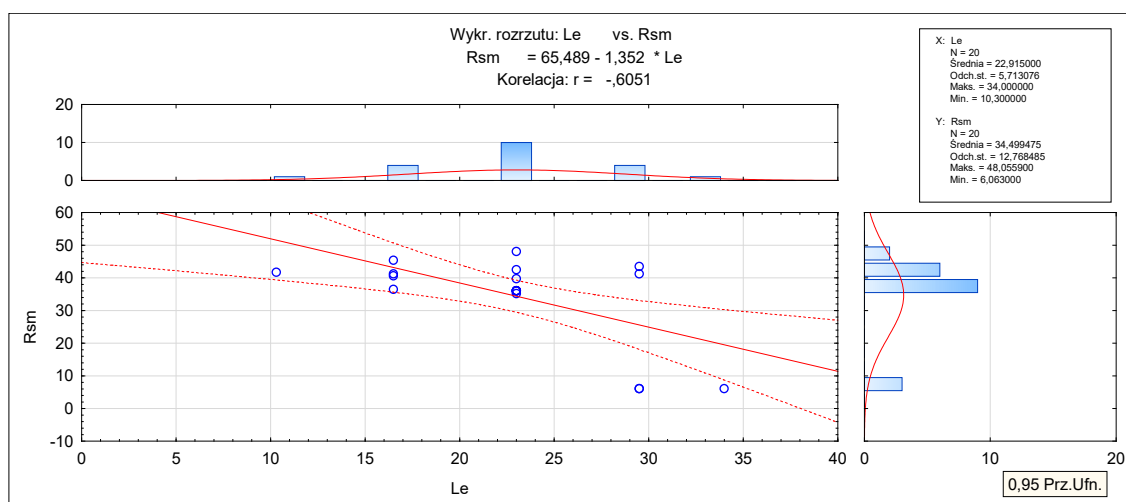
Rys. 6.43. Korelacja czynnika wejściowego K i parametru chropowatości powierzchni Rsk



Rys. 6.44. Korelacja czynnika wejściowego K i parametru chropowatości powierzchni Rt



Rys. 6.45. Korelacja czynnika wejściowego K i parametru chropowatości powierzchni Rp



Rys. 6.46. Korelacja czynnika wejściowego K i parametru chropowatości powierzchni  $R_{sm}$

Przeprowadzono także ocenę wpływu warunków wymuszonego dawkowania zawiesiny na wybrane parametry struktury geometrycznej chropowatości w układzie 3D (tabela 6.32).

**Tabela 6.32.** Parametry struktury geometrycznej powierzchni ceramiki po docieraniu w układzie 3D (parametry amplitudowe)

Nr	K	$V_s$	$L_e$	$S_a$	$S_q$	$S_p$	$S_v$	$S_{sk}$	$S_{ku}$	$S_z$
1	15	10	23	0,993	1,298	6,779	12,545	-0,576	5,654	19,324
2	15	50	23	0,660	0,899	6,373	11,471	0,583	9,226	17,844
3	15	50	23	0,824	1,081	9,036	6,972	-0,137	4,469	16,008
4	15	50	23	1,180	1,558	8,850	11,549	-0,670	5,422	20,399
5	15	50	23	0,895	1,178	12,690	11,390	0,073	5,974	24,080
6	15	50	23	1,355	1,744	12,290	10,920	0,412	3,994	23,210
7	15	50	23	0,792	1,045	11,002	8,837	-0,103	5,701	19,840
8	15	90	23	1,256	1,639	7,784	12,104	-0,584	4,661	19,888
9	5	50	23	1,042	1,356	8,337	9,431	-0,564	4,385	17,767
10	25	50	23	0,881	1,180	8,531	12,386	-0,661	6,482	20,917
11	21	74	29,5	0,827	1,114	6,798	9,930	-0,821	7,972	16,728
12	21	26	29,5	0,721	0,930	9,455	6,178	0,321	4,675	15,634
13	9	74	29,5	0,817	1,114	10,812	11,212	-1,150	8,945	22,024
14	9	26	29,5	0,900	1,190	6,087	9,560	-0,529	4,837	15,647
15	15	50	34	1,134	1,505	11,508	11,474	-0,552	5,119	22,983
16	15	50	10,3	0,981	1,299	10,222	9,803	-0,614	5,023	20,025
17	21	74	16,5	0,888	1,159	8,107	9,007	-0,396	4,305	17,113
18	21	26	16,5	0,777	1,031	11,183	8,947	-0,455	5,658	20,130
19	9	74	16,5	0,790	1,034	7,424	13,226	-0,285	4,432	20,650
20	9	26	16,5	0,813	1,137	20,886	7,474	2,120	37,008	28,360

Następnie przeprowadzono analizę korelacji wpływu czynników badanych na wybrane amplitudowe parametry chropowatości (tabela 6.33 i 6.34).

**Tabela 6.33.** Poziomy istotności dla testów istotności współczynników korelacji między zmiennymi: K, Vs, Le, Sa, Sq, Sp, Sv, Ssk, Sku, Sz

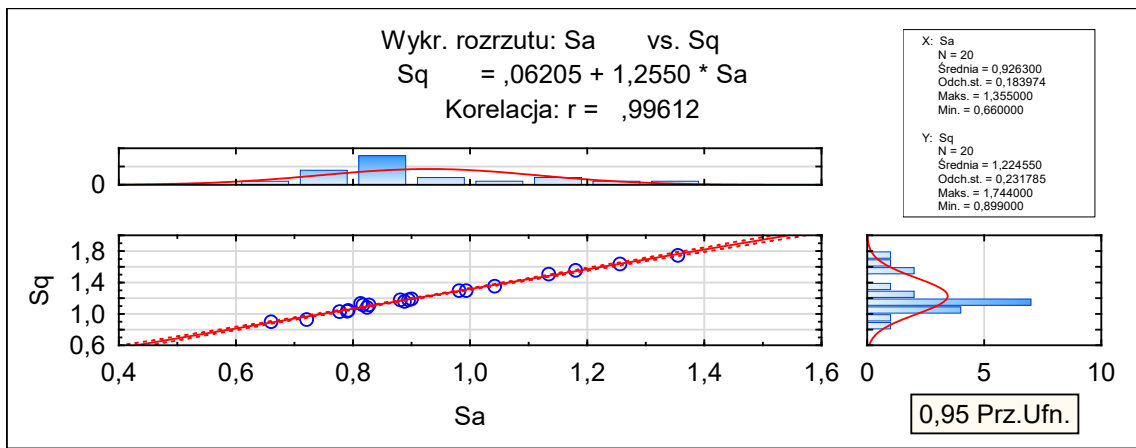
Zmienna	Korelacje Oznaczone współczynniki korelacji są istotne z $p < ,05000$ N=20									
	K	Vs	Le	Sa	Sq	Sp	Sv	Sz	Ssk	Sku
K	1,0000	,0000	,0000	-,1271	-,1436	-,1766	-,0800	-,2304	-,1481	-,2529
	p= ---	p=1,00	p=1,00	p=,593	p=,546	p=,737	p=,328	p=,533	p=,282	
Vs	,0000	1,0000	-,0000	,1861	,1885	-,2419	,3374	-,0451	-,3658	-,2448
	p=1,00	p= ---	p=1,00	p=,432	p=,426	p=,304	p=,146	p=,850	p=,113	p=,298
Le	,0000	-,0000	1,0000	,0786	,0817	-,2254	,0360	-,2105	-,2522	-,2024
	p=1,00	p=1,00	p= ---	p=,742	p=,732	p=,339	p=,880	p=,373	p=,283	p=,392
Sa	-,1271	,1861	,0786	1,0000	,9961	,0215	,3718	,2471	-,2039	-,2383
	p=,593	p=,432	p=,742	p= ---	p=0,00	p=,928	p=,106	p=,293	p=,388	p=,312
Sq	-,1436	,1885	,0817	,9961	1,0000	,0651	,3826	,2986	-,1842	-,1740
	p=,546	p=,426	p=,732	p=0,00	p= ---	p=,785	p=,096	p=,201	p=,437	p=,463
Sp	-,1766	-,2419	-,2254	,0215	,0651	1,0000	-,3435	,8227	,6865	,7631
	p=,456	p=,304	p=,339	p=,928	p=,785	p= ---	p=,138	p=,000	p=,001	p=,000
Sv	-,0800	,3374	,0360	,3718	,3826	-,3435	1,0000	,2513	-,4077	-,2783
	p=,737	p=,146	p=,880	p=,106	p=,096	p=,138	p= ---	p=,285	p=,074	p=,235
Sz	-,2304	-,0451	-,2105	,2471	,2986	,8227	,2513	1,0000	,4608	,6180
	p=,328	p=,850	p=,373	p=,293	p=,201	p=,000	p=,285	p= ---	p=,041	p=,004
Ssk	-,1481	-,3658	-,2522	-,2039	-,1842	,6865	-,4077	,4608	1,0000	,7526
	p=,533	p=,113	p=,283	p=,388	p=,437	p=,001	p=,074	p=,041	p= ---	p=,000
Sku	-,2529	-,2448	-,2024	-,2383	-,1740	,7631	-,2783	,6180	,7526	1,0000
	p=,282	p=,298	p=,392	p=,312	p=,463	p=,000	p=,235	p=,004	p=,000	p= ---

**Tabela 6.34.** Mapa istotności p dla współczynników korelacji pomiędzy zmiennymi: K, Vs, Le, Sa, Sq, Sp, Sv, Ssk, Sku, Sz

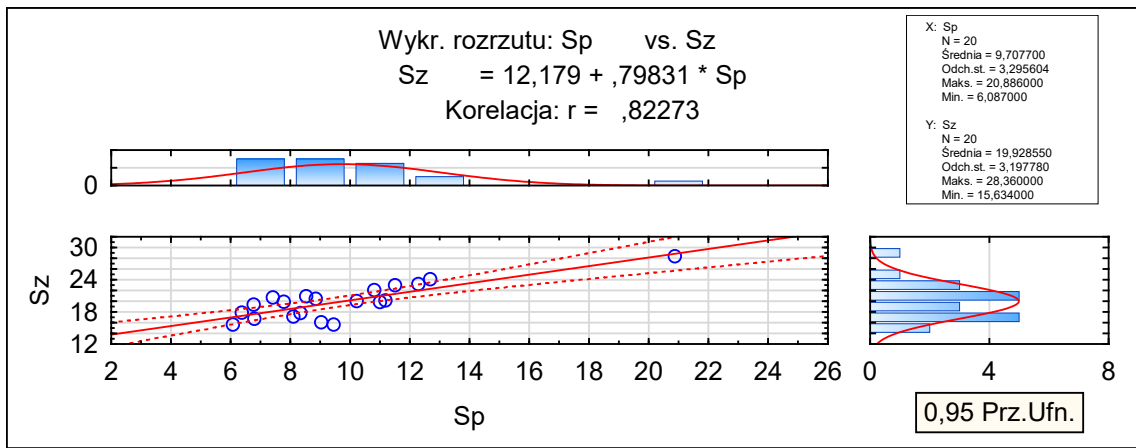
Zmienna	Mapa p dla wsp. korelacji N=20 p<=									
	K	Vs	Le	Sa	Sq	Sp	Sv	Sz	Ssk	Sku
K										
Vs										
Le										
Sa										
Sq										
Sp										
Sv										
Sz										
Ssk										
Sku										

Analizując wpływ warunków wymuszonego dawkowania zawiesiny na korelacje parametrów chropowatości powierzchni Sa, Sq, Sp, Sv, Ssk, Sku oraz Sz, stwierdzono, że nie mają istotnego statystycznie znaczenia. Statystycznie istotne zachodzą korelacje pomiędzy następującymi parami parametrów: Sa - Sq (rys. 6.47), Sp - Sz (rys. 6.48), Ssk - Sku (rys. 6.49), Sku - Sp (rys. 6.50).

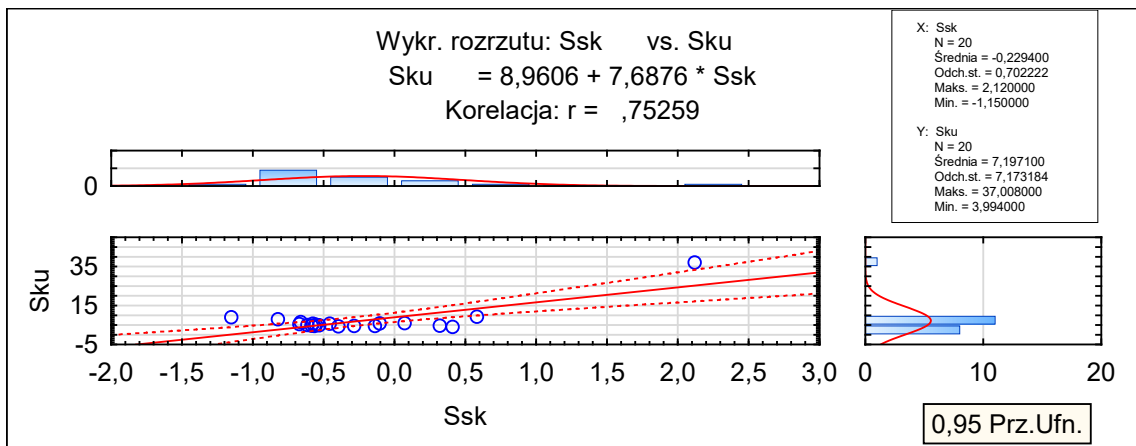




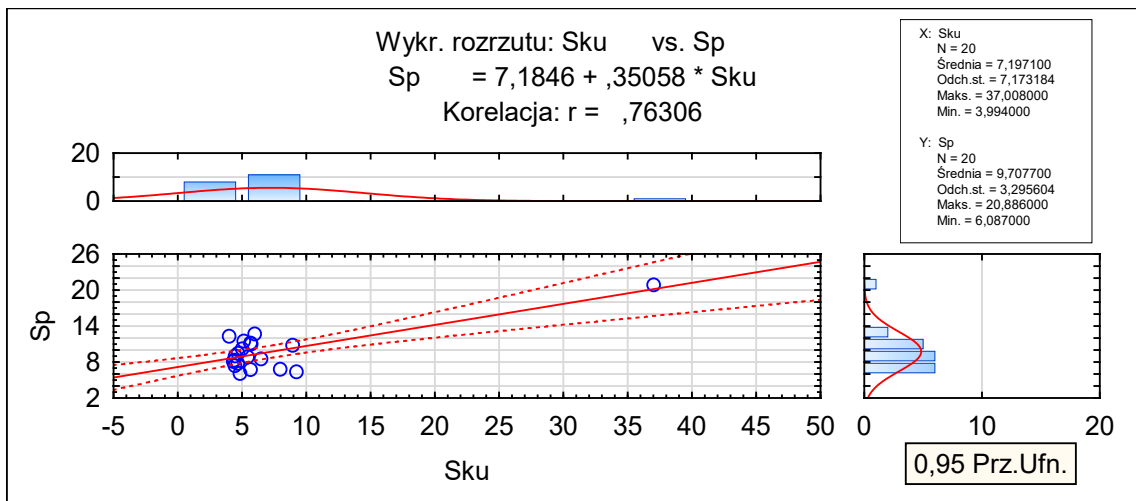
Rys. 6.47. Korelacja parametrów chropowatości powierzchni Sa i Sq



Rys. 6.48. Korelacja parametrów chropowatości powierzchni Sp i Sz



Rys. 6.49. Korelacja parametrów chropowatości powierzchni Ssk i Sku



Rys. 6.50. Korelacja parametrów chropowatości powierzchni Sku i Sp

Dokonano również pomiarów i analizę parametrów amplitudowych chropowatości powierzchni (tabela 6.35 ÷ 6.37).

**Tabela 6.35.** Parametry struktury geometrycznej powierzchni (parametry powierzchniowe amplitudowe) wyznaczone dla układu 3D

Nr	K	V <sub>s</sub>	L <sub>e</sub>	Sk	Spk	Svk	Smr1[%]	Smr2[%]
1	15	10	23	2,502	1,112	1,446	10,530	89,193
2	15	50	23	3,476	1,386	1,966	9,994	88,480
3	15	50	23	3,096	1,228	1,821	9,641	87,880
4	15	50	23	2,447	1,115	1,383	10,278	89,072
5	15	50	23	2,770	1,168	1,904	9,130	87,039
6	15	50	23	2,623	1,101	1,630	9,651	87,735
7	15	50	23	2,397	1,194	1,330	10,452	88,840
8	15	90	23	2,685	1,101	1,593	9,375	87,911
9	5	50	23	2,482	1,147	1,492	10,095	88,235
10	25	50	23	2,750	1,285	1,549	10,776	89,078
11	21	74	29,5	2,706	1,215	1,573	10,328	88,620
12	21	26	29,5	2,535	1,085	1,561	10,189	88,699
13	9	74	29,5	2,915	1,317	1,566	10,445	88,900
14	9	26	29,5	2,886	1,309	2,067	9,065	86,348
15	15	50	34	2,664	1,227	1,551	10,605	88,950
16	15	50	10,3	2,662	1,268	1,677	10,488	88,805
17	21	74	16,5	2,506	1,087	1,622	10,125	88,245
18	21	26	16,5	2,684	1,304	1,562	11,220	89,111
19	9	74	16,5	2,945	1,258	1,765	9,587	87,975
20	9	26	16,5	2,320	1,015	1,647	9,528	86,933

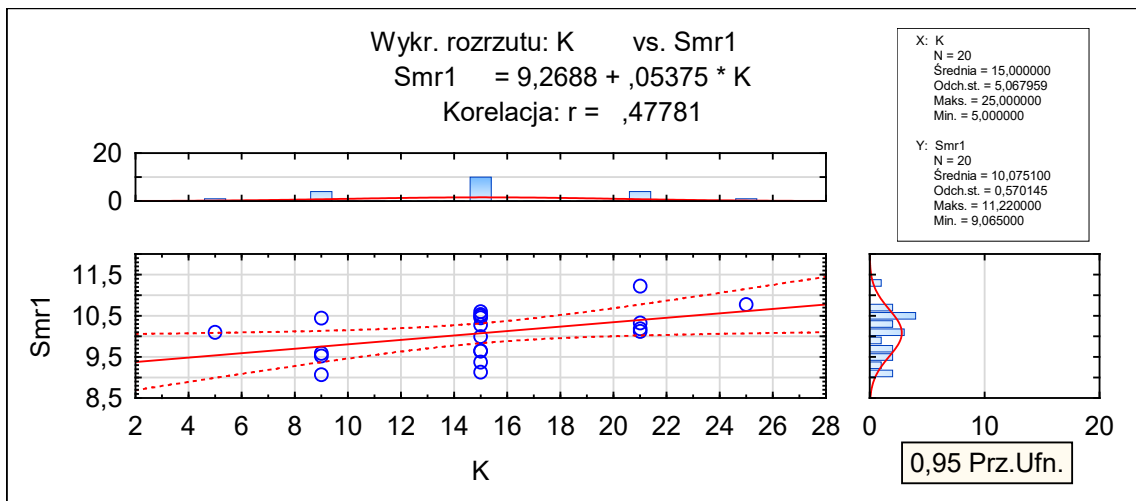
**Tabela 6.36.** Poziomy istotności dla testów istotności współczynników korelacji między zmiennymi: K, Vs, Le, Sk, Spk, Svk, Smr1, Smr2

Zmienna	Korelacje Oznaczone współczynniki korelacji są istotne z $p < ,05000$ N=20							
	K	Vs	Le	Sk	Spk	Svk	Smr1	Smr2
K	1,0000 p= ---	,0000 p=1,00	,0000 p=1,00	-,0437 p=,855	,0138 p=,954	-,2096 p=,375	,4778 p=,033	,4586 p=,042
Vs	,0000 p=1,00	1,0000 p= ---	-,0000 p=1,00	,2211 p=,349	,0917 p=,701	-,0219 p=,927	-,1576 p=,507	,0397 p=,868
Le	,0000 p=1,00	-,0000 p=1,00	1,0000 p= ---	,1341 p=,573	,1051 p=,659	-,0169 p=,943	-,0360 p=,880	,0310 p=,897
Sk	-,0437 p=,855	,2211 p=,349	,1341 p=,573	1,0000 p= ---	,7621 p=,000	,7106 p=,000	-,2005 p=,397	-,1100 p=,644
Spk	,0138 p=,954	,0917 p=,701	,1051 p=,659	,7621 p=,000	1,0000 p= ---	,4226 p=,063	,2479 p=,292	,1794 p=,449
Svk	-,2096 p=,375	-,0219 p=,927	-,0169 p=,943	,7106 p=,000	,4226 p=,063	1,0000 p= ---	-,6452 p=,002	-,6993 p=,001
Smr1	,4778 p=,033	-,1576 p=,507	-,0360 p=,880	-,2005 p=,397	,2479 p=,292	-,6452 p=,002	1,0000 p= ---	,9046 p=,000
Smr2	,4586 p=,042	,0397 p=,868	,0310 p=,897	-,1100 p=,644	,1794 p=,449	-,6993 p=,001	,9046 p=,000	1,0000 p= ---

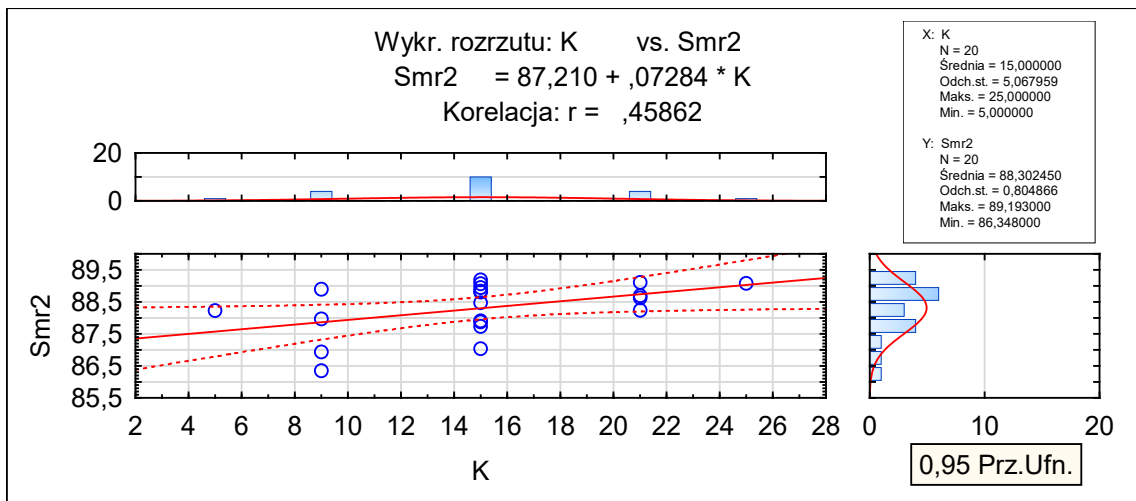
**Tabela 6.37.** Mapa istotności p dla współczynników korelacji pomiędzy zmiennymi: K, Vs, Le, Sk, Spk, Svk, Smr1, Smr2

Zmienna	Mapa p dla współczynników korelacji N=20 p<=							
	K	Vs	Le	Sk	Spk	Svk	Smr1	Smr2
K								
Vs								
Le								
Sk								
Spk								
Svk								
Smr1								
Smr2								

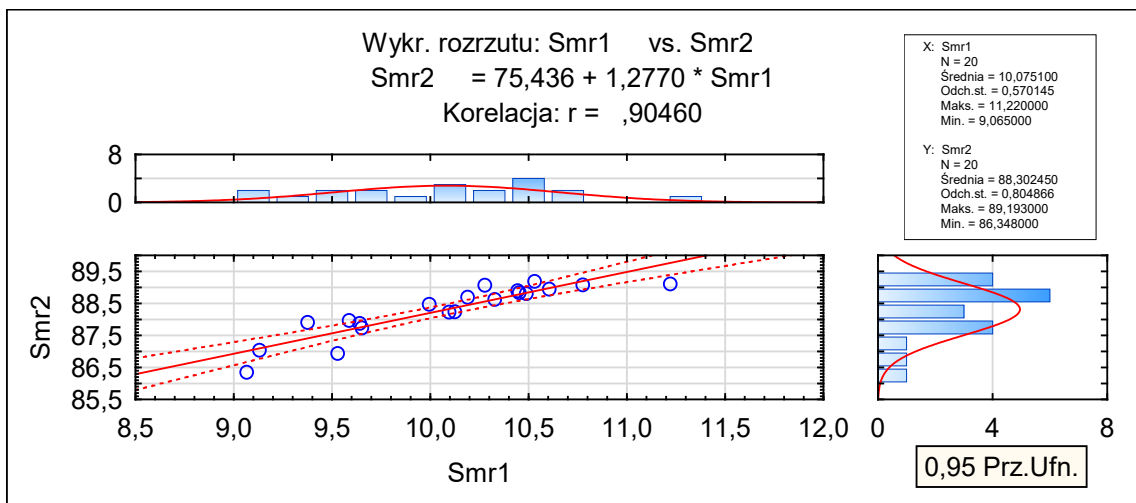
Analizując wpływ warunków wymuszonego dawkowania zawiesiny ścierniej na korelacje parametrów chropowatości Sk, Spk, Svk, Smr1 oraz Smr2, stwierdzono, że mają one wpływ tylko na niektóre z nich. Istotne statystycznie korelacje czynników badanych zachodzą dla par: K - Smr1 (rys. 6.51), K - Smr2 (rys. 6.52), Smr1 - Smr2 (rys. 6. 53), Sk - Spk (rys. 6.54), Sk - Svk (rys. 6.54).



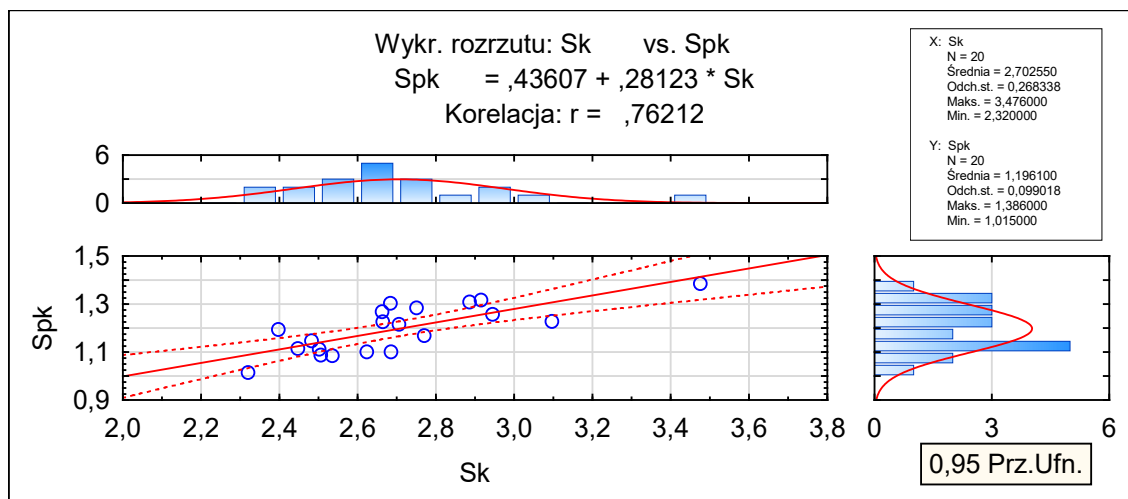
Rys. 6.51. Korelacja czynnika wejściowego K i parametru chropowatości powierzchni Smr1



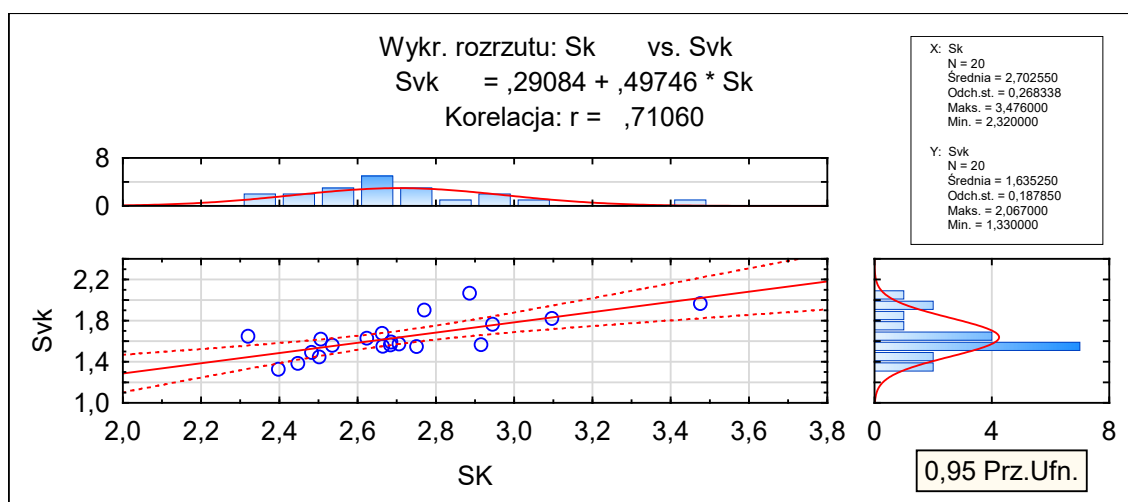
Rys. 6.52. Korelacja czynnika wejściowego K i parametru chropowatości powierzchni Smr2



Rys. 6.53. Korelacja parametrów chropowatości powierzchni Smr1 i Smr2



Rys. 6.54. Korelacja parametrów chropowatości powierzchni Sk i Spk



Rys. 6.55. Korelacja parametrów chropowatości powierzchni Sk i Svk

Analizując powyższe zestawienia można stwierdzić, że parametr wejściowy K (udział wagowy ziaren w zawieszynie) silnie koreluje z dwoma parametrami chropowatości, to jest: Smr1 i Smr2. Inne parametry wejściowe, to znaczy  $V_s$  i  $L_e$ , mają nieistotny statystycznie wpływ na analizowane parametry chropowatości.

W następnym sekwencji badań dokonano pomiarów objętościowych chropowatości powierzchni (tabela 6. 38).

**Tabela 6.38.** Parametry struktury geometrycznej powierzchni (parametry objętościowe) - wyznaczone dla powierzchni 3D

Nr	K	Vs	Le	Vvv [ml/m <sup>2</sup> ]	Vvc [ml/m <sup>2</sup> ]	Vmp [ml/m <sup>2</sup> ]	Vmc [ml/m <sup>2</sup> ]
1	15	10	23	0,141	1,213	0,056	0,894
2	15	50	23	0,201	1,656	0,070	1,250
3	15	50	23	0,186	1,464	0,062	1,132
4	15	50	23	0,138	1,180	0,056	0,878
5	15	50	23	0,189	1,294	0,058	1,025
6	15	50	23	0,164	1,242	0,055	0,958
7	15	50	23	0,134	1,165	0,060	0,863
8	15	90	23	0,161	1,258	0,055	0,975
9	5	50	23	0,150	1,192	0,057	0,898
10	25	50	23	0,155	1,350	0,064	0,986
11	21	74	29,5	0,158	1,312	0,061	0,978
12	21	26	29,5	0,152	1,218	0,054	0,914
13	9	74	29,5	0,160	1,414	0,066	1,049
14	9	26	29,5	0,205	1,352	0,064	1,090
15	15	50	34	0,153	1,301	0,061	0,957
16	15	50	10,3	0,162	1,293	0,063	0,956
17	21	74	16,5	0,158	1,205	0,054	0,908
18	21	26	16,5	0,154	1,343	0,065	0,968
19	9	74	16,5	0,178	1,392	0,063	1,068
20	9	26	16,5	0,162	1,100	0,051	0,859

Następnie przeprowadzono analizę korelacji wpływu czynników badanych na wybrane objętościowe parametry chropowatości (tabela 6.39 i 6.40).

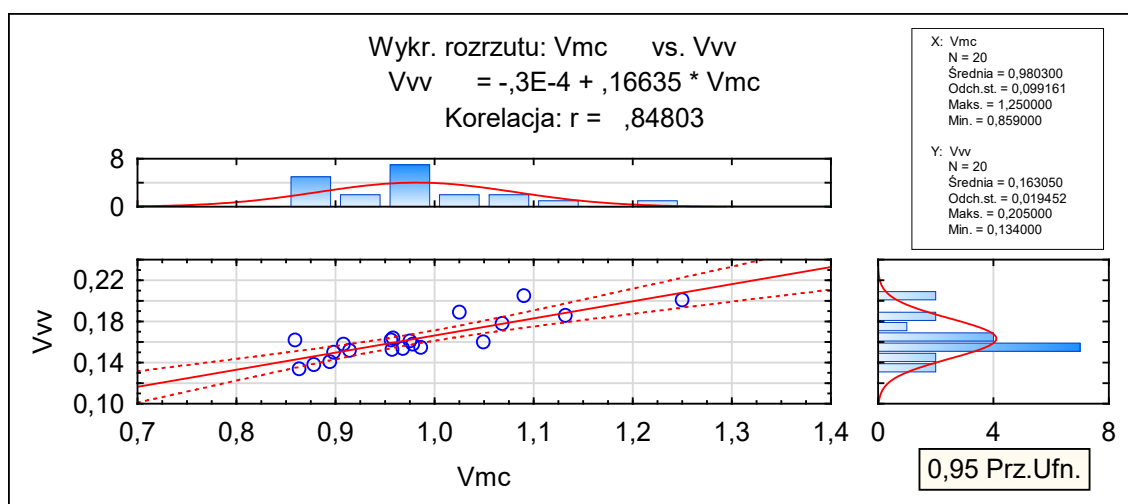
**Tabela 6.39.** Poziomy istotności dla testów istotności współczynników korelacji między zmiennymi: K, Vs, Le, Vvv, Vvc, Vm, Vmc

Zmienna	Korelacje Oznaczone współczynniki korelacji są istotne z $p < ,05000$ N=20						
	K	Vs	Le	Vvv	Vvc	Vmp	Vmc
K	1,0000 p= ---	,0000 p=1,00	,0000 p=1,00	-,2392 p=,310	,0417 p=,862	,0210 p=,930	-,0951 p=,690
Vs	,0000 p=1,00	1,0000 p= ---	-,0000 p=1,00	,0459 p=,848	,1925 p=,416	,1051 p=,659	,1929 p=,415
Le	,0000 p=1,00	-,0000 p=1,00	1,0000 p= ---	,0248 p=,917	,1301 p=,585	,0941 p=,693	,1425 p=,549
Vvv	-,2392 p=,310	,0459 p=,848	,0248 p=,917	1,0000 p= ---	,6809 p=,001	,4443 p=,050	,8480 p=,000
Vvc	,0417 p=,862	,1925 p=,416	,1301 p=,585	,6809 p=,001	1,0000 p= ---	,8529 p=,000	,9572 p=,000
Vmp	,0210 p=,930	,1051 p=,659	,0941 p=,693	,4443 p=,050	,8529 p=,000	1,0000 p= ---	,7467 p=,000
Vmc	-,0951 p=,690	,1929 p=,415	,1425 p=,549	,8480 p=,000	,9572 p=,000	,7467 p=,000	1,0000 p= ---

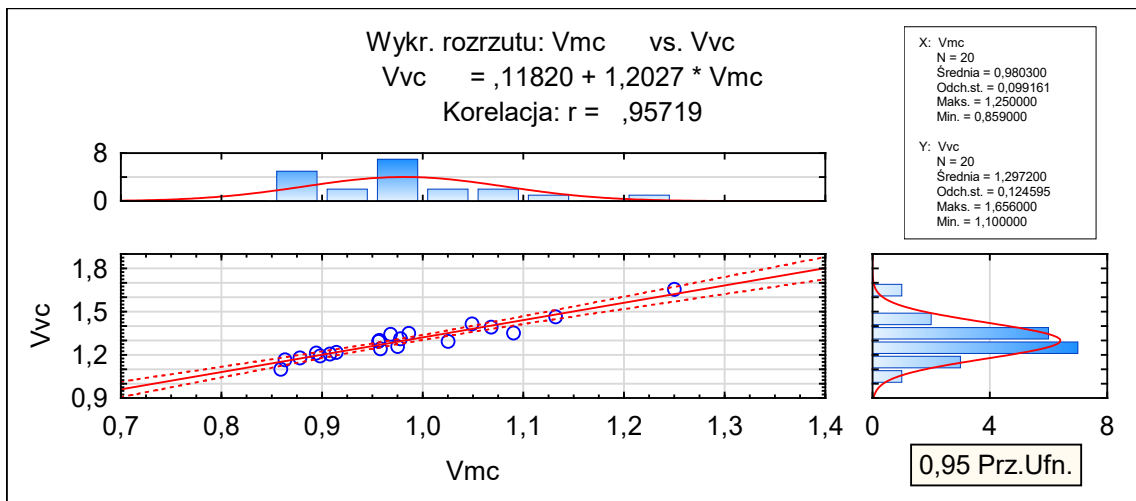
**Tabela 6.40.** Mapa istotności p dla współczynników korelacji pomiędzy zmiennymi: K, Vs, Le, Vvv, Vvc, Vm, Vmc

Zmienna	Mapa p dla współczynników korelacji						
	K	Vs	Le	Vw	Vvc	Vmp	Vmc
K							
Vs							
Le							
Vw							
Vvc							
Vmp							
Vmc							

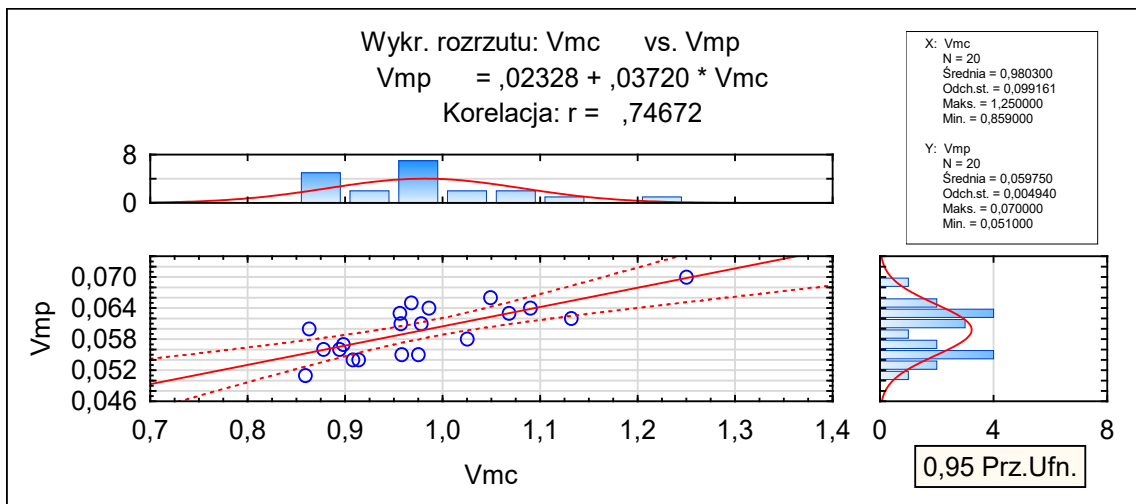
Analizując wpływ warunków wymuszonego dawkowania zawiesiny na korelacje parametrów chropowatości Vvv, Vvc, Vmp oraz Vmc, stwierdzono, że nie mają one istotnego statystycznie wpływu. Statystycznie istotne zachodzą korelacje pomiędzy następującymi parami parametrów: Vmc - Vvv (rys. 6.56), Vmc - Vvc (rys. 6.57), Vmc - Vmp (rys. 6.58), Vmp - Vvc (rys. 6.59), Vmp - Vvv (rys. 6.60).



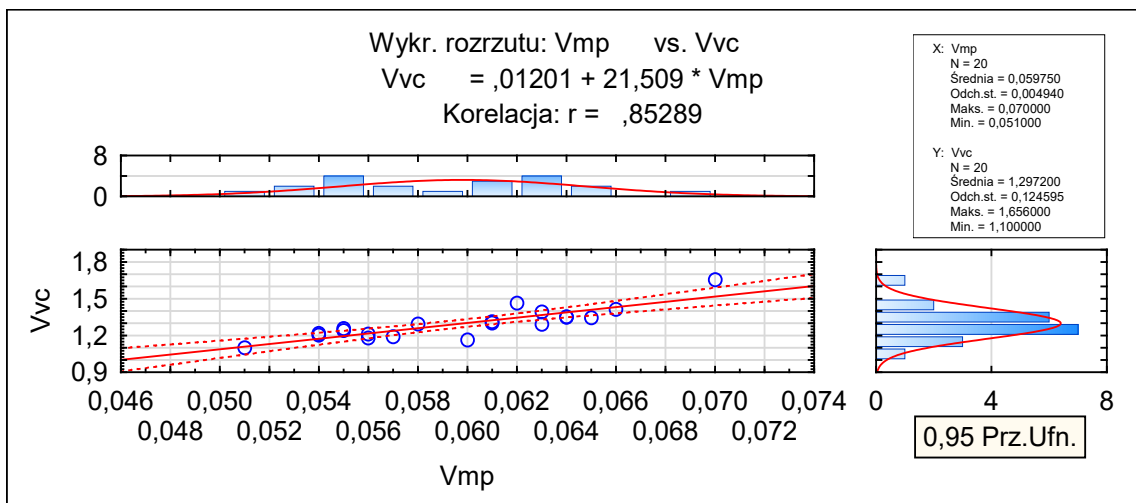
Rys. 6.56. Korelacja parametrów chropowatości powierzchni Vmc i Vvv



Rys. 6.57. Korelacja parametrów chropowatości powierzchni Vmc i Vvc

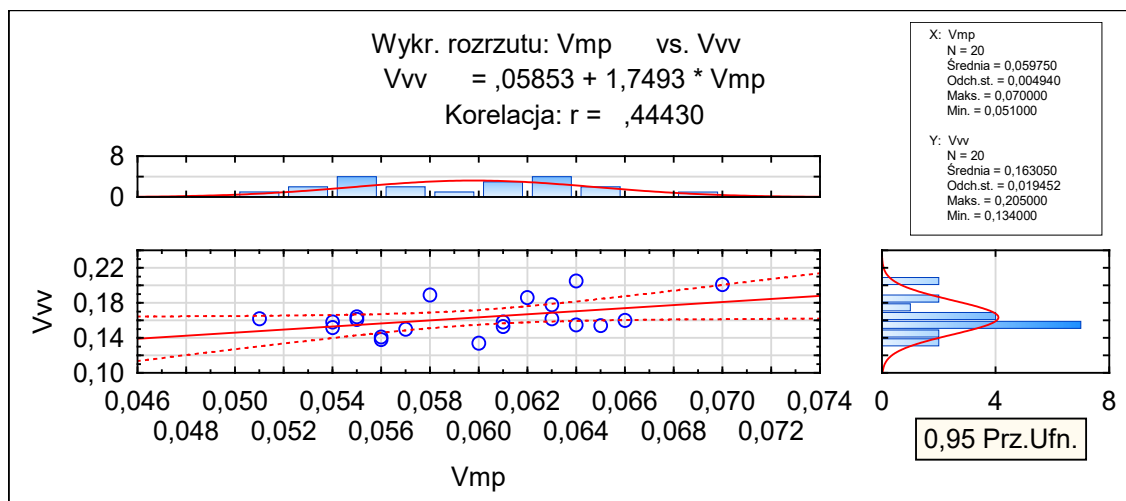


Rys. 6.58. Korelacja parametrów chropowatości powierzchni Vmc i Vmp



Rys. 6.59. Korelacja parametrów chropowatości powierzchni Vmp i Vvc





Rys. 6.60. Korelacja parametrów chropowatości powierzchni Vmp i Vvv

Podsumowując wpływ czynników wejściowych: K,  $V_s$ , oraz  $L_e$  na efekty docierania z zastosowaniem wymuszonego systemu dawkowania zawiesiny można stwierdzić że:

1. Parametry badane K,  $V_s$  oraz  $L_e$  mają wpływ na ubytek liniowy docieranych próbek ceramicznych ( $Al_2O_3$ ).
2. Parametry wejściowe dawkowania zawiesiny ścierniej mają wpływ na jakość procesu docierania, a więc na parametry chropowatości powierzchni po obróbce.
3. Przyjmując parametry wejściowe: K,  $V_s$  i  $L_e$ , możemy wyznaczyć wartości parametru  $R_v$  i  $R_z$  chropowatości powierzchni:

$$R_v = 5,9086 - 0,2443K + 0,0100K^2 - 0,0091V_s + 0,0004V_s^2 - 0,0695L_e + 0,0029L_e^2 - 0,0009KV_s - 0,0014KL_e - 0,0006V_sL_e$$

$$R_z = 8,2242 - 0,2214K + 0,0115K^2 + 0,0012V_s + 0,0004V_s^2 - 0,1467L_e + 0,0050L_e^2 - 0,0013KV_s - 0,0030KL_e - 0,0004V_sL_e$$

4. Z przeprowadzonych analiz wynika, iż planując proces docierania należy, również brać pod uwagę korelacje występujące pomiędzy parametrami chropowatości docieranych próbek ceramicznych.

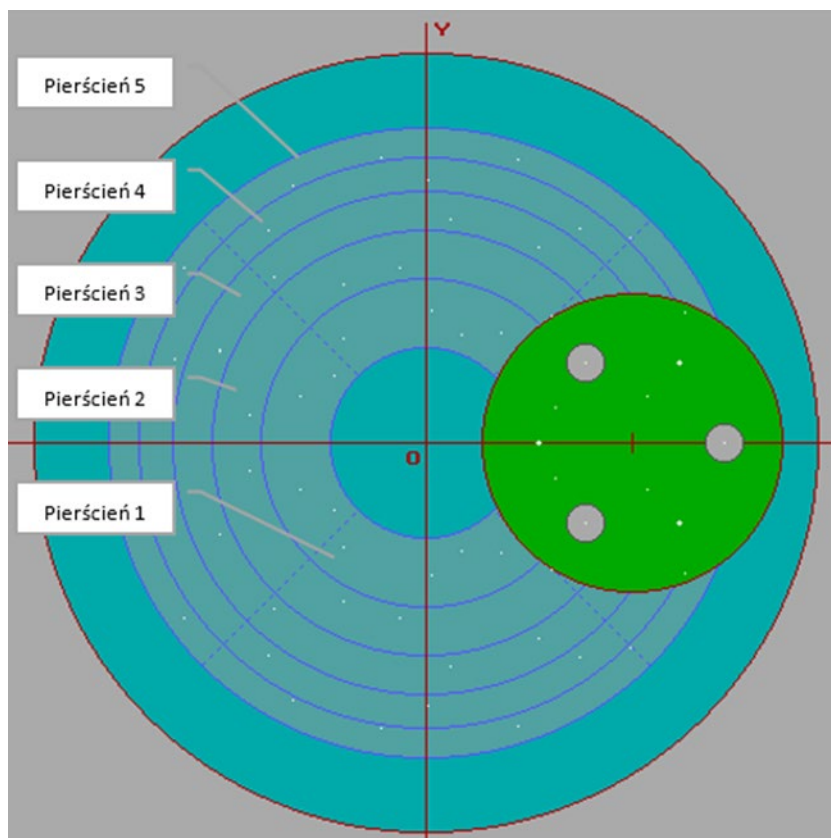
## 7. BADANIA UZUPEŁNIAJĄCE

Badania uzupełniające miały głównie na celu wyznaczenie wpływu warunków kinematycznych i lepkości mieszaniny składników płynnych dawkowanej zawiesiny ścierniej na nierównomierność zużycia powierzchni roboczej tarczy docierającej podczas docierania jednotarczowego.

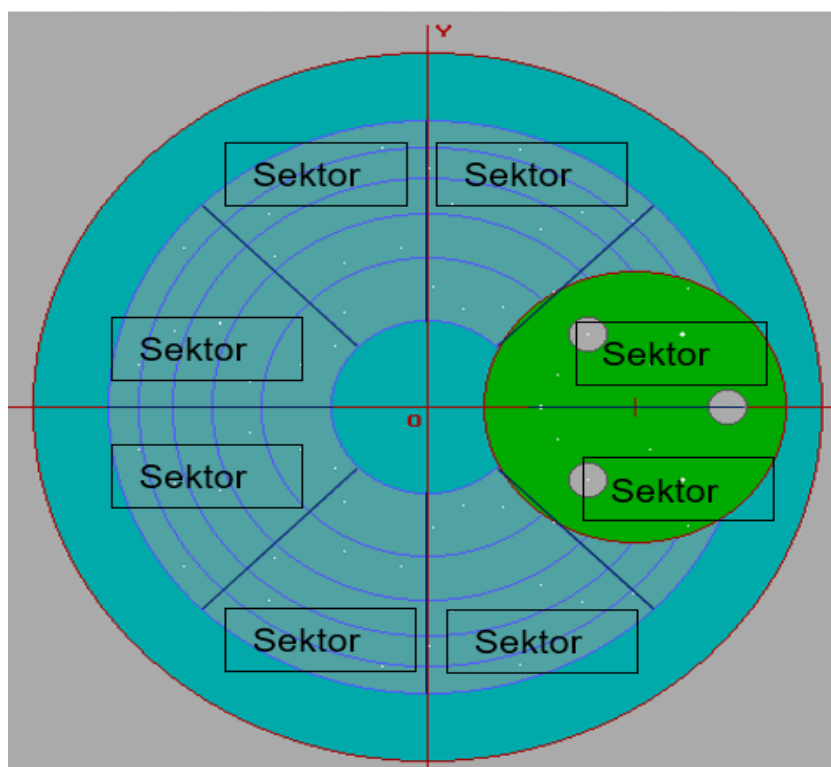
### 7.1. Wpływ lepkości mieszaniny składników płynnych w zawieszynie ścierniej na kinematykę docierania

Realizując badania zasadnicze zauważono, iż prędkość obrotowa separatora podczas operacji docierania może być zmienna i gdyby docierarka była wyposażona w układ wymuszający ruch separatora, to można by tak dobierać prędkości  $n_s$  i  $n_t$ , aby było to korzystne zarówno dla procesu docierania jak i ze względu na równomierność zużycia tarczy docierającej. W tej części badań postanowiono określić wpływ lepkości nośnika ziaren ściernych na kinematykę docierania. Przeprowadzone badania empiryczne pozwoliły na pozyskanie informacji dotyczących prędkości  $n_s$  podczas zastosowania różnych lepkości nośnika (dla określonych ziaren ściernych). We wszystkich przeprowadzonych eksperymentach prędkość tarczy docierającej była stała i wynosiła  $n_t = 60$  obr/min. Postanowiono zbadać, czy lepkość nośnika ziarna będzie miała wpływ na wartość prędkości separatora  $n_s$ , co w rezultacie może przełożyć się na czas zamknięcia pętli. Parametry te parametry mogą mieć istotny wpływ na zużycie tarczy docierającej i występującą nierównomierność prędkości docierania.

Opracowany program MGN39-7.Exe pozwala na analizę układu tworzącego pełny cykl ruchu kołowego elementu obrabianego, analizę kształtu trajektorii jaką przebędzie punkt centralny powierzchni docieranej lub sześć punktów rozmieszczonych na obwodzie elementu obrabianego, który jest walcem o średnicy od 8 do 20 mm. Aby móc dokonać analizy zużycia tarczy docierającej, podzielono powierzchnię roboczą docieraka na pięć pierścieni o tych samych polach powierzchni i na osiem sektorów, co przedstawiono na rys. 7.1 i 7.2. Program zlicza jak często analizowane punkty rozmieszczone na powierzchni obrabianej znajdą się w pięciu pierścieniach i oznaczonych sektorach docieraka. Daje nam to obraz udziału poszczególnych fragmentów narzędzia w procesie docierania elementów płaskich. Za współczynnik nierównomierności zużycia powierzchni roboczej tarczy docierającej przyjęto  $(P_{max} - P_{min}) / P_{max}$  [w %]. Określa on maksymalną względną gęstość punktów tworzących trajektorie na powierzchni tarczy docierającej (maksymalną względną „nierównomierność zużycia tarczy”). W tabeli 7.1 przedstawiono zestawienie wyników pomiaru prędkości obrotowej docieraka i separatora przedmiotowego, na tej podstawie obliczono współczynnik  $k_1 = n_s/n_t$  oraz przeprowadzono symulację kinematyki docierania.



Rys. 7.1. Sposób podziału powierzchni roboczej tarczy docierającej na pierścienie



Rys. 7.2. Sposób podziału powierzchni roboczej tarczy docierającej na osiem sektorów

**Tabela 7.1.** Zestawienie wyników pomiaru prędkości obrotowej docieraka i separatora dla różnych wartości lepkości nośnika ziaren ściernych

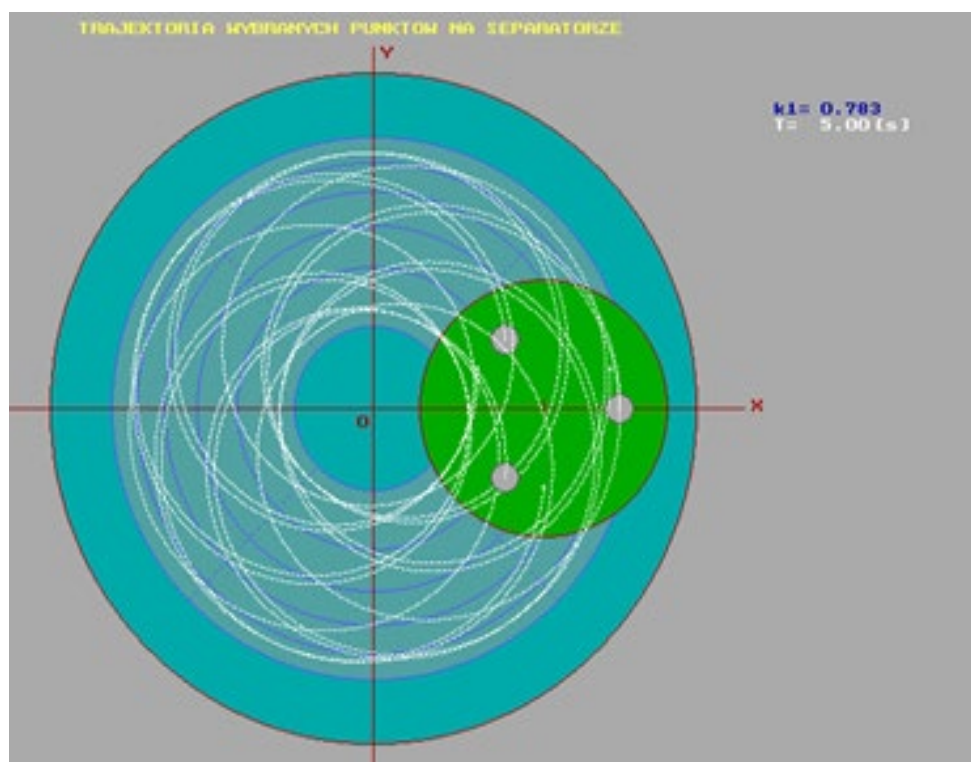
Nr	K [%]	V <sub>s</sub> [ml/20 min]	L <sub>e</sub> [mPa·s]	n <sub>t</sub> [obr/min]	n <sub>s</sub> [obr/min]	k <sub>1</sub> = n <sub>s</sub> /n <sub>t</sub>
1	15	10	23	60	50,0	0,883
2	15	50	23	60	47,0	0,783
3	15	50	23	60	47,4	0,790
4	15	50	23	60	47,3	0,780
5	15	50	23	60	47,3	0,780
6	15	50	23	60	47,2	0,787
7	15	50	23	60	47,4	0,790
8	15	90	23	60	45,0	0,750
9	5	50	23	60	54,7	0,912
10	25	50	23	60	45,0	0,790
11	21	74	29,5	60	44,9	0,748
12	21	26	29,5	60	47,7	0,795
13	9	74	29,5	60	48,6	0,810
14	9	26	29,5	60	52,7	0,878
15	15	50	34	60	42,7	0,712
16	15	50	10,3	60	47,3	0,800
17	21	74	16,5	60	42,1	0,702
18	21	26	16,5	60	41,7	0,695
19	9	74	16,5	60	43,4	0,723
20	9	26	16,5	60	49,9	0,832

Do badań wpływu lepkości L<sub>e</sub> mieszaniny składników płynnych w zawieszynie ścierniej na kinematykę docierania wybrano z tabeli 7.1 przypadek nr 2, 15 i 16. Badano wpływ lepkości przy zachowaniu takich samych pozostałych parametrów wejściowych, to jest K = 15 % oraz V<sub>s</sub> = 50 ml/20 min. W rozpatrywanych przypadkach w separatorze znajdowały się trzy elementy obrabiane (w ustalonym położeniu). W tabeli 7.2 przedstawiono odpowiednie dane wejściowe do obliczeń.

Tabela 7.2. Dane według planu (tabela 7.1 pozycja 2)

<b>Prędkość obrotowa docieraka <math>n_t</math></b>	60 obr/min	
<b>Prędkość obrotowa separatora <math>n_s</math></b>	47 obr/min	
<b>Parametr <math>k_1 = n_s/n_t</math></b>	0,783	
<b>Lepkość nośnika <math>L_e</math></b>	23 mPa·s	
<b>Zawartość ziaren ściernych <math>K</math></b>	15 %	
<b>Dawka zawiesiny ściernej <math>V_s</math></b>	50 ml/20 min	
<b>Położenie elementów w separatorze</b> (kąt $\beta_t$ – jak na rys. 2.4)	1.	R = 45 mm $\beta_t = 0^\circ$
	2.	R = 45 mm $\beta_t = 120^\circ$
	3.	R = 45 mm $\beta_t = 240^\circ$

Na podstawie danych wejściowych z tabeli 7.2 wykreślono przy pomocy programu MGN39-7.Exe trajektorie dla trzech punktów środkowych kołowych elementów docieranych (rys. 7.3).



Rys. 7.3. Trajektorie punktów centralnych powierzchni docieranej dla  $k_1 = 0,783$  (czas symulacji 5 s)

Znając trajektorie punktów środkowych elementów, obliczono ekstremalne prędkości, docierania, co przedstawiono w tabeli 7.3.

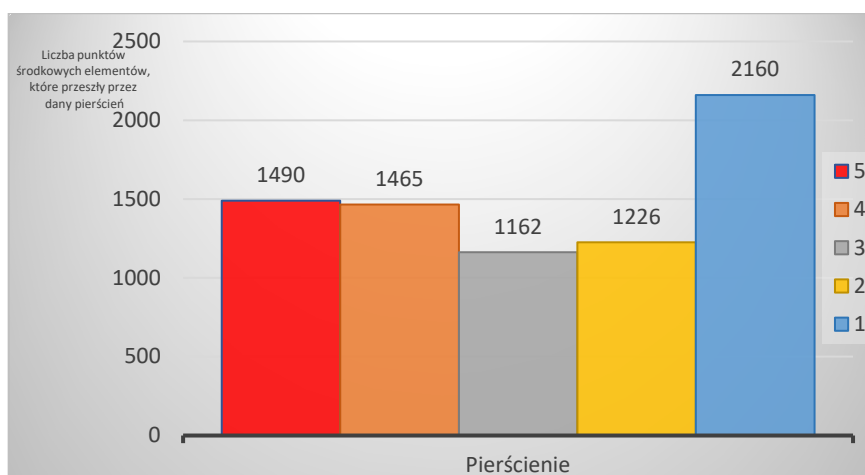
**Tabela 7.3.** Zestawienie wyników obliczeń długości trajektorii i prędkości docierania analizowanych elementów (dane z tabeli 7.2)

<b>Czas ruchu: 5 s</b>			
<b>Element</b>	<b>Długość trajektorii [mm]</b>	<b>V<sub>min</sub> [mm/s]</b>	<b>V<sub>max</sub> [mm/s]</b>
<b>1</b>	3142,95	567,05	689,58
<b>2</b>	3153,59	567,05	689,58
<b>3</b>	3150,57	567,05	689,58
<b>Współczynnik nierównomierności prędkości</b> (V <sub>max</sub> - V <sub>min</sub> ) / V <sub>max</sub> [w %]			17,8

Program MGN39-7.Exe umożliwia również obliczenia „nierównomierności zużycia” tarczy docierającej w ustalonych pierścieniach i sektorach, co przedstawiono w tabeli 7.4 i na rys. 7.4.

**Tabela 7.4.** Zestawienie wyników obliczeń intensywności zużycia tarczy docierającej na podstawie danych z tabeli 7.1

<b>Przypadek nr 2</b>	<b>Numer sektora</b>								<b>Liczba punktów środkowych elementów, które przeszły przez dany pierścień leżący na powierzchni docieraka</b>
	<b>Numer pierścienia</b>	1	2	3	4	5	6	7	
<b>5</b>	190	173	225	194	140	193	214	161	1490
<b>4</b>	182	182	156	166	236	181	168	194	1465
<b>3</b>	180	178	100	160	146	134	109	155	1162
<b>2</b>	131	149	182	133	171	137	162	161	1226
<b>1</b>	260	254	274	284	248	292	284	264	2160
<b>P<sub>min</sub></b>				<b>P<sub>max</sub></b>				<b>P<sub>min</sub></b>	<b>P<sub>max</sub></b>
<b>100</b>				<b>292</b>				<b>1162</b>	<b>2160</b>
<b>Współczynnik nierównomierności zużycia docieraka wyznaczony na podstawie analizy w przyjętych sektorach</b>								<b>Współczynnik nierównomierności zużycia docieraka wyznaczony na podstawie analizy w wyznaczonych pierścieniach</b>	
65,8%								46,2%	



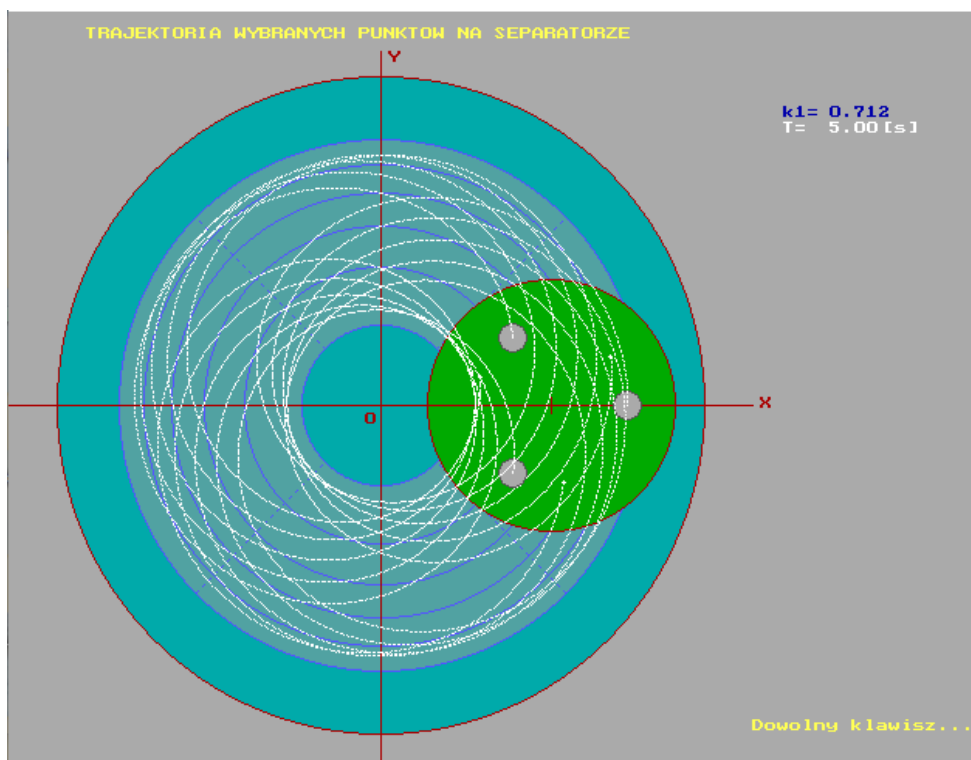
Rys. 7.4. Liczba punktów środkowych w pięciu pierścieniach dla  $k_1 = 0,783$

Na podstawie powyższej analizy można stwierdzić, iż najbardziej jest „obciążony” pierścień nr 1, ponieważ odpowiednio ma największą liczbę przecięć przez poruszający się element docierany. Świadczy to o względnie dużej nierównomierności zużycia tarczy docierającej. Badając wpływ lepkości przy zachowaniu takich samych parametrów wejściowych, to jest  $K = 15\%$  oraz  $V_s = 50 \text{ ml}/20 \text{ min}$  przeanalizowano przypadek z tabeli 7.5.

Tabela 7.5. Dane wg. planu z tabeli 7.19 - pozycja 15

<b>Prędkość obrotowa docieraka <math>n_t</math></b>	60 obr/min	
<b>Prędkość obrotowa separatora <math>n_s</math></b>	42,7 obr/min	
<b>Parametr <math>k_1 = n_s/n_t</math></b>	0,712	
<b>Lepkość nośnika <math>L_e</math></b>	34 mPa·s	
<b>Zawartość ziaren ściernych <math>K</math></b>	15 %	
<b>Dawka zawiesiny ścierniej <math>V_s</math></b>	50 ml/20 min	
<b>Położenie elementów w separatorze</b> (kąt $\beta_t$ – jak na rys. 2.4)	1.	$R = 45 \text{ mm}$ $\beta_t = 0^\circ$
	2.	$R = 45 \text{ mm}$ $\beta_t = 120^\circ$
	3.	$R = 45 \text{ mm}$ $\beta_t = 240^\circ$

Na podstawie danych wejściowych z tabeli 7.5 wykreślono przy pomocy programu MGN39-7.Exe trajektorie trzech punktów środkowych kołowych elementów docieranych (rys 7.5).



Rys. 7.5. Trajektoria punktów centralnych powierzchni docieranej dla  $k_1 = 0,712$  (czas symulacji 5 s)

Znając trajektorie punktów środkowych elementów obliczono ekstremalne prędkości docierania, co przedstawiono w tabeli 7.6.

**Tabela 7.6.** Zestawienie wyników obliczeń długości trajektorii i prędkości docierania (dla danych z tabeli 7.5)

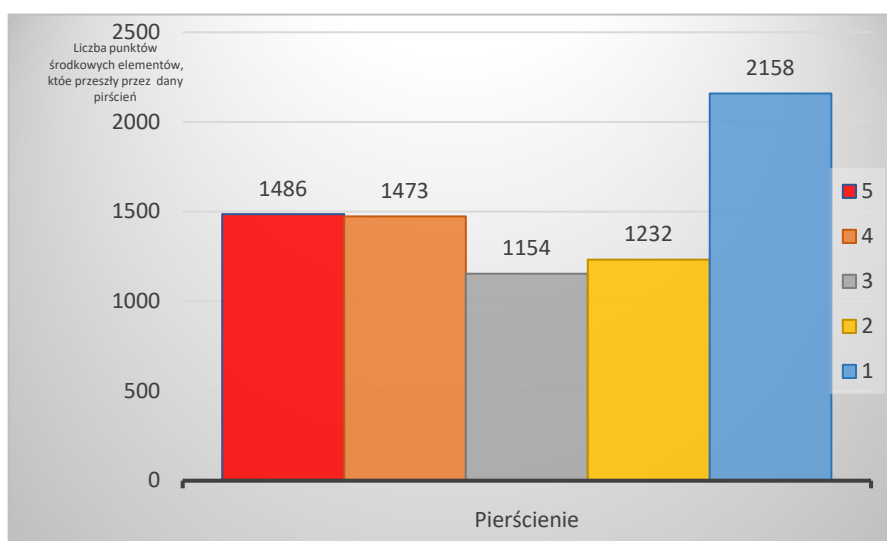
Czas ruchu: 5 s			
Element	Długość trajektorii [mm]	$V_{min}$ [mm/s]	$V_{max}$ [mm/s]
1	3148,08	546,79	709,84
2	3188,69	546,79	709,84
3	3127,63	546,79	709,84
<b>Współczynnik nierównomierności prędkości</b> ( $V_{max} - V_{min}$ ) / $V_{max}$ [w %]			23

„Nierównomierności zużycia” tarczy docierającej w ustalonych pierścieniach i sektorach, przedstawiono w tabeli 7.7 i na rys. 7.6.



**Tabela 7.7.** Zestawienie wybranych wyników obliczeń intensywności zużycia tarczy docierającej na podstawie danych z tabeli 7.1

Przypadek nr 15		Numer sektora								Liczba punktów środkowych elementów, które przeszły przez dany pierścień leżący na powierzchni docieraka
Numer pierścienia	1	2	3	4	5	6	7	8		
5	115	144	272	219	93	185	279	179	1486	
4	258	210	125	155	259	172	117	177	1473	
3	215	197	37	129	214	176	38	148	1154	
2	123	134	202	142	159	128	202	142	1232	
1	228	254	301	292	214	275	303	291	2158	
P <sub>min</sub>				P <sub>max</sub>				P <sub>min</sub>	P <sub>max</sub>	
37				303				11154	2158	
Współczynnik nierównomierności zużycia docieraka wyznaczony na podstawie analizy w przyjętych sektorach							Współczynnik nierównomierności zużycia docieraka wyznaczony na podstawie analizy w wyznaczonych pierścieniach			
87,8%							46,5			



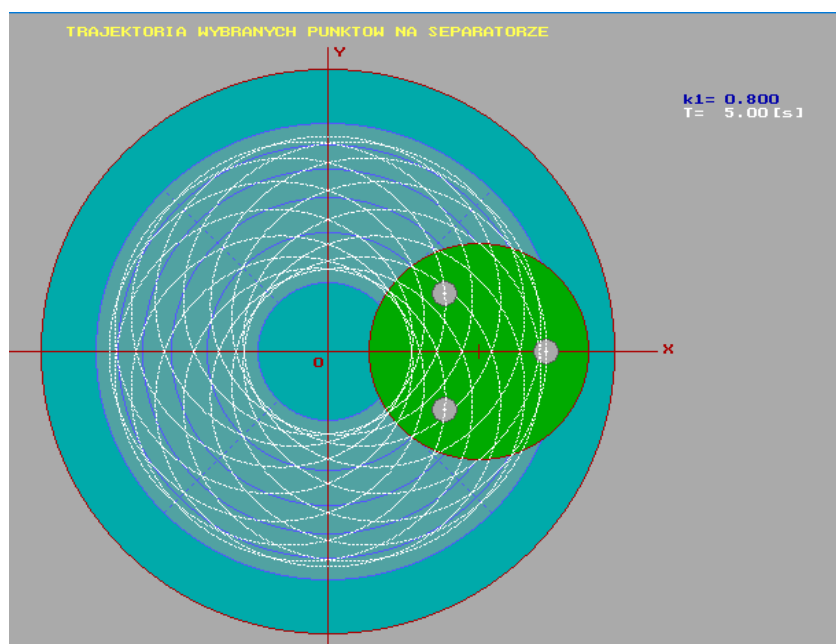
Rys. 7.6. Liczba punktów środkowych w pięciu pierścieniach dla  $k_1 = 0,712$

W tym przypadku w pierścieniu nr 1 występuje również największa liczba punktów. Ostatni omówiony przypadek dotyczy analizy danych zawartych w tabeli 7.8.

Tabela 7.8. Dane wg planu z tabeli 7.19 - pozycja 16

<b>Prędkość obrotowa docieraka <math>n_t</math></b>	60 obr/min	
<b>Prędkość obrotowa separatora <math>n_s</math></b>	48 obr/min	
<b>Parametr <math>k_1 = n_s/n_t</math></b>	0,800	
<b>Lepkość nośnika <math>L_e</math></b>	10,3 mPa·s	
<b>Zawartość ziaren ściernych K</b>	15 %	
<b>Dawka zawiesiny ściernej <math>V_s</math></b>	50 ml/20min	
<b>Położenie elementów w separatorze</b> (kąt $\beta_t$ – jak na rys. 2.4)	1.	R = 45 mm $\beta_t = 0^\circ$
	2.	R = 45 mm $\beta_t = 120^\circ$
	3.	R = 45 mm $\beta_t = 240^\circ$

Na podstawie danych wejściowych z tabeli 7.8 wykreślono przy pomocy programu MGN39-7.Exe trajektorie dla trzech punktów środkowych kołowych elementów docieranych (rys 7.7).



Rys. 7.7. Trajektoria punktów centralnych powierzchni docieranej dla  $k_1 = 0,800$  (czas symulacji 5 s)

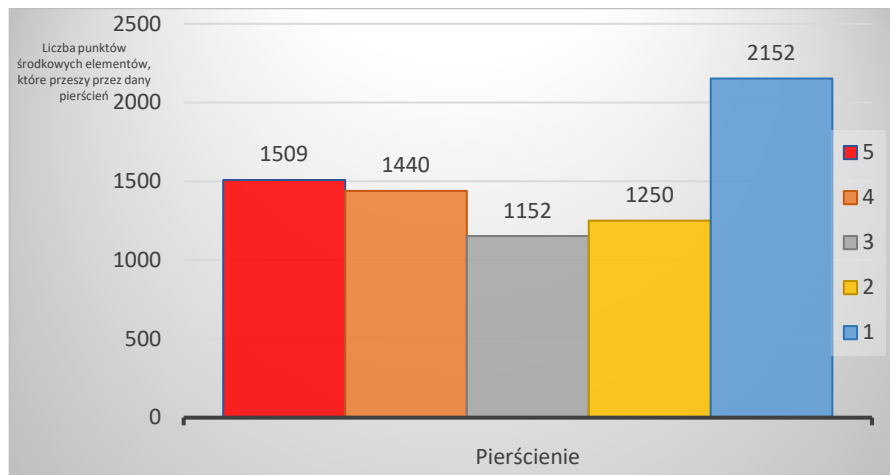
Znając trajektorie punktów środkowych elementów, obliczono ekstremalne prędkości docierania, co przedstawiono w tabeli 7.9. Zestawienie wybranych wyników nierównomierności zużycia tarczy przedstawiono w tabeli 7.10 i na rys. 7.8.

**Tabela 7.9.** Zestawienie wyników obliczeń długości trajektorii i prędkości docierania (dane z tabeli 7.8)

<b>Czas ruchu: 5 s</b>			
<b>Element</b>	<b>Długość trajektorii [mm]</b>	<b>V<sub>min</sub> [mm/s]</b>	<b>V<sub>max</sub> [mm/s]</b>
1	3147,94	571,77	684,86
2	3147,94	571,77	684,86
3	3147,94	571,77	684,86
<b>Współczynnik nierównomierności prędkości</b> $(V_{\max} - V_{\min}) / V_{\max}$ [W %]			16,5

**Tabela 7.10.** Zestawienie wybranych wyników obliczeń intensywności zużycia tarczy docierającej na podstawie danych z tabeli 7.1

<b>Przypadek nr 16</b>	<b>Numer sektora</b>								<b>Liczba punktów środkowych elementów, które przeszły przez dany pierścień leżący na powierzchni docieraka</b>
	<b>Numer pierścienia</b>	1	2	3	4	5	6	7	
5	190	189	188	188	189	188	189	188	1509
4	180	180	180	180	180	180	180	180	1440
3	144	144	144	144	144	144	144	144	1152
2	157	156	156	156	156	156	156	157	1250
1	269	269	269	269	269	269	269	269	2152
<b>P<sub>min</sub></b>				<b>P<sub>max</sub></b>				<b>P<sub>min</sub></b>	<b>P<sub>max</sub></b>
144				269				1152	2152
<b>Współczynnik nierównomierności zużycia docieraka wyznaczony na podstawie analizy w przyjętych sektorach</b>						<b>Współczynnik nierównomierności zużycia docieraka wyznaczony na podstawie analizy w wyznaczonych pierścieniach</b>			
46,5%						46,5%			



Rys. 7.8. Liczba punktów środkowych w pięciu pierścieniach dla  $k_1 = 0,800$

W tabeli 7.11 przedstawiono zbiorcze zestawienie przeprowadzonych symulacji.

Tabela 7.11. Zestawienie wyników symulacji

Nr próby	K [%]	$V_s$ [ml/20 min]	$L_e$ [mPa·s]	$n_t$ [obr/min]	$n_s$ [obr/min]	$k_1 = n_s/n_t$	$V_{min}$ [mm/s]	$V_{max}$ [mm/s]	Współczynnik „nierównomierności zużycia docieraka” wyznaczony na podstawie analizy w sektorach	Współczynnik „nierównomierności zużycia docieraka” wyznaczony na podstawie analizy w pierścieniach
2	15	50	23	60	47,0	0,783	567,05	689,58	65,8%	46,2%
15	15	50	34	60	42,7	0,712	546,79	709,84	87,8%	46,5
16	15	50	10,3	60	48	0,800	571,77	684,86	46,5%	46,5%

Na podstawie uzyskanych wyników symulacji można stwierdzić, że:

1. Lepkość nośnika ziaren ściernych ma wpływ na „nierównomierność zużycia docieraka”, zarówno w sektorach jak i pierścieniach na analizowanej powierzchni roboczej narzędzia.
2. Na podstawie przeprowadzonych symulacji, można stwierdzić, że dla  $K = 15\%$ ,  $V_s = 50$  ml/20 min i  $L_e = 23$  mPa·s „nierównomierność zużycia tarczy” w poszczególnych sektorach wynosi 65,8 %, zaś w analizowanych pierścieniach 46,2 %. Z punktu widzenia równomierności zużycia narzędzia są to warunki niekorzystne.
3. W przypadku gdy  $K = 15\%$ ,  $V_s = 50$  ml/20 min i  $L_e = 34$  mPa·s „nierównomierność zużycia tarczy docierającej” w poszczególnych sektorach jest na poziomie 87,8 %, zaś w analizowanych pierścieniach 46,5 %. Jest to wynik jeszcze mniej korzystny od opisanego powyżej.
4. Najkorzystniejszy współczynnik „nierównomierności” pomiędzy poszczególnymi sektorami i pierścieniami uzyskano dla  $K = 15\%$ ,  $V_s = 50$  ml/20min i  $L_e = 10,3$  mPa·s. „Nierównomierność zużycia tarczy” w sektorach wynosiła wtedy 46,5%, zaś w poszczególnych pierścieniach 46,5%. Z uwagi, iż w docieraniu jednotarczowym bazą obróbkową jest sama powierzchnia obrabiana, utrzymywanie względnie stałej intensywności zużycia kształtowego narzędzia na całej jego powierzchni czynnej jest problemem bardzo istotnym i wpływa na odchyłkę płaskości docieranej powierzchni.

## 7.2. Wpływ rozmieszczenia elementów docieranych w separatorze na kinematykę docierania

Rozmieszczenie elementów w separatorze oraz prędkości obrotowe separatora  $n_s$ , i tarczy docierającej  $n_t$  mają wpływ na standardową kinematykę docierania jednotarczowego powierzchni płaskich. W celu analizy tego problemu opracowano program komputerowy MGN39-7.Exe. Pozwoliło to na przeprowadzanie symulacji kinematyki dla warunków pracy docierarki Abralap 380. Przeprowadzono (kolejno) eksperymenty numeryczne w oparciu o następujące założenia:

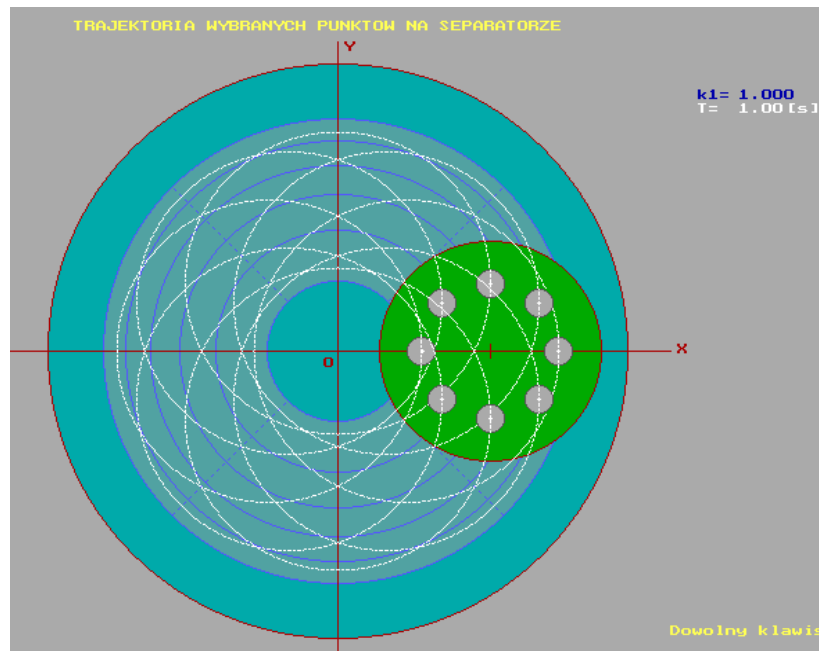
1. Rozmieszczenie elementów w separatorze ma układ zaplanowany i uporządkowany, prędkość obrotowa separatora jest równa prędkości obrotowej tarczy docierającej  $n_s = n_t$ .
2. Rozmieszczenie elementów w separatorze ma charakter przypadkowy (niezaplanowany), zaś prędkość obrotowa separatora jest równa prędkości obrotowej tarczy docierającej  $n_s = n_t$ .
3. Rozmieszczenie elementów w separatorze ma charakter zaplanowany i uporządkowany, a prędkość obrotowa separatora nie jest równa prędkości obrotowej tarczy docierającej  $n_s \neq n_t$ .
4. Rozmieszczenie elementów w separatorze ma charakter przypadkowy i (niezaplanowany), zaś prędkość obrotowa separatora nie jest równa prędkości obrotowej tarczy docierającej  $n_s \neq n_t$ .

W tabeli 7.12 przedstawiono parametry wejściowe niezbędne do przeprowadzenia symulacji w programie MGN39-7.Exe. Symulację komputerową przeprowadzono zakładając, że będzie analizowana obróbka ośmiu kołowych elementów rozmieszczonych w jednym separatorze.

**Tabela 7.12.** Parametry wejściowe symulacji I (rozміщення ośmiu elementów w separatorze w sposób zaplanowany dla  $n_s = n_t$ )

<b>Prędkość obrotowa docieraka <math>n_t</math></b>	60 obr/min	
<b>Prędkość obrotowa separatora <math>n_s</math></b>	60 obr/min	
<b>Parametr <math>k_1 = n_s/n_t</math></b>	1	
<b>Odległość środka separatora od środka układu kinematycznego</b>	100 mm	
<b>Liczba elementów obrabianych</b>	8	
<b>Średnica elementu docieranego (średnia wartość)</b>	17,82 mm	
<b>Czas ruchu elementów docieranych</b>	1 s	
<b>Położenie elementów w separatorze</b> (kąt $\beta_t$ – jak na rys. 2.4)	1.	R = 45 mm $\beta_t = 0^\circ$
	2.	R = 45 mm $\beta_t = 45^\circ$
	3.	R = 45 mm $\beta_t = 90^\circ$
	4.	R = 45 mm $\beta_t = 135^\circ$
	5.	R = 45 mm $\beta_t = 180^\circ$
	6.	R = 45 mm $\beta_t = 225^\circ$
	7.	R = 45 mm $\beta_t = 270^\circ$
	8.	R = 45 mm $\beta_t = 315^\circ$

Program umożliwia wykreślenie trajektorii ruchu ośmiu punktów środkowych elementów docieranych, co przedstawiono na rys. 7.9. Obliczono również długości trajektorii ruchu punktów centralnych analizowanych elementów (tabela 7.13).



Rys. 7.9. Trajektorie ośmiu punktów centralnych docieranych elementów rozmieszczonych w separatorze w sposób zaplanowany (dla  $k_1 = 1$ )

**Tabela 7.13.** Zestawienie wyników obliczeń długości trajektorii i prędkości w docieraniu analizowanych elementów (dla danych z tabeli 7.12)

Czas ruchu: 1s			
Element	Długość trajektorii		V <sub>min</sub> [mm/s]
	[mm]		
1	628,31		628,27
2	628,31		628,27
3	628,31		628,27
4	628,31		628,27
5	628,31		628,27
6	628,31		628,27
7	628,31		628,27
8	628,31		628,27
Współczynnik nierównomierności prędkości (V <sub>max</sub> - V <sub>min</sub> ) / V <sub>max</sub> [w %]			0,0

Na podstawie otrzymanych wyników symulacji można stwierdzić, iż każdy punkt środkowy docieranego elementu rozmieszczonego w sposób zaplanowany (dla  $n_s = n_t$ ) pokonał taką samą drogę osiągając stałą wartość prędkości. Program MGN39-7.Exe wygenerował również informacje dotyczące intensywności zużycia tarczy docierającej, co przedstawiono w tabeli 7.14.

**Tabela 7.14.** Zestawienie wyników obliczeń intensywności zużycia tarczy docierającej na podstawie danych z tabeli 7.12

Numer pierścienia	Numer sektora								Liczba punktów środkowych elementów, które przeszły przez dany pierścień powierzchni docieraka	
	1	2	3	4	5	6	7	8		
5	99	97	98	97	98	97	98	97	781	
4	98	97	98	97	98	97	98	98	781	
3	79	78	77	78	77	78	77	79	623	
2	84	84	84	84	84	84	84	84	672	
1	145	144	143	144	143	144	143	145	1151	
<b>P<sub>min</sub></b>					<b>P<sub>max</sub></b>				<b>P<sub>min</sub></b>	<b>P<sub>max</sub></b>
77					145				623	1151
Współczynnik nierównomierności zużycia docieraka wyznaczony na podstawie analizy w przyjętych sektorach					Współczynnik nierównomierności zużycia docieraka wyznaczony na podstawie analizy w wyznaczonych pierścieniach					
46,9%					45,9%					

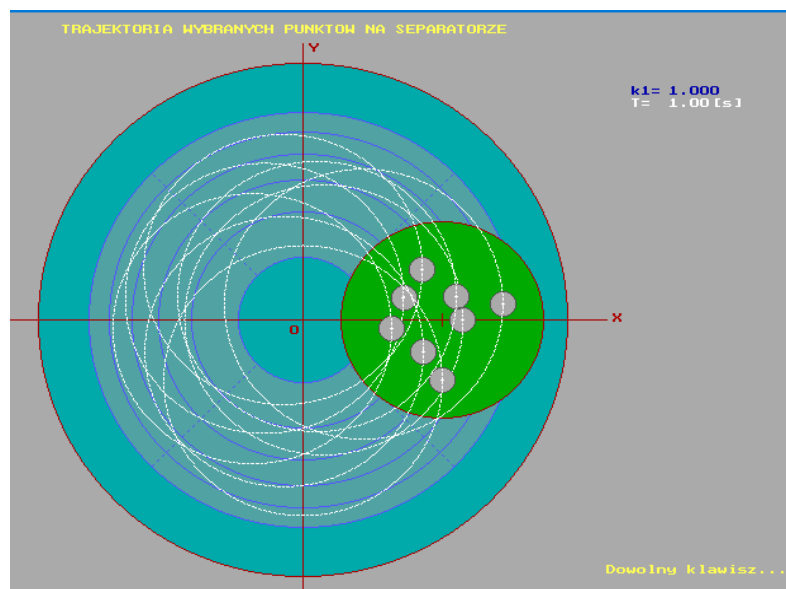
Analizując powyższe zestawienie można stwierdzić, iż z punktu widzenia zużycia tarczy docierającej zaplanowane rozmieszczenie elementów (według danych z tabeli 7.12) przy założeniu  $n_s = n_t$ , ma korzystny wpływ na równomierność zużycia tarczy docierającej w sektorach. Pozwala to również na zachowanie stałej prędkości docierania (dla wszystkich elementów).

Drugi eksperyment numeryczny dotyczy wpływu rozmieszczenia elementów docieranych w sposób przypadkowy (niezaplanowany), przy takim samym założeniu jak w poprzednim eksperymencie  $n_s = n_t$ . W tabeli 7.15 przedstawiono parametry wejściowe niezbędne do przeprowadzenia symulacji. Rozmieszczenie elementów w separatorze w sposób przypadkowy ma dać odpowiedź na pytanie, czy położenie elementów w separatorze (dla  $n_s = n_t$ ) ma wpływ na długości trajektorii każdego z ośmiu elementów, oraz czy zostaną zachowane takie same wartości prędkości  $V_{min}$  i  $V_{max}$  (dla wszystkich elementów). Na rys. 7.10 przedstawiono trajektorie ośmiu punktów środkowych dla elementów docieranych rozmieszczonych w separatorze w sposób przypadkowy. Obliczono również długości trajektorii (tabela 7.16).

**Tabela 7.15.** Parametry wejściowe symulacji II (rozmieszczenie ośmiu elementów w separatorze w sposób przypadkowy i niezaplanowany, dla  $n_s = n_t$ )

<b>Prędkość obrotowa docieraka <math>n_t</math></b>	60 obr/min		
<b>Prędkość obrotowa separatora <math>n_s</math></b>	60 obr/min		
<b>Parametr <math>k_1 = n_s/n_t</math></b>	1		
<b>Odległość środka separatora od środka układu kinematycznego</b>	100 mm		
<b>Liczba elementów obrabianych</b>	8		
<b>Średnica elementu docieranego (średnia wartość)</b>	17,82 mm		
<b>Czas ruchu</b>	1 s		
<b>Położenie elementów w separatorze (kąt <math>\beta_t</math> – jak na rys. 2.4)</b>	1.	R = 15 mm	$\beta_t = 0^\circ$
	2.	R = 45 mm	$\beta_t = 15^\circ$
	3.	R = 32 mm	$\beta_t = 150^\circ$
	4.	R = 45 mm	$\beta_t = 270^\circ$
	5.	R = 20 mm	$\beta_t = 60^\circ$
	6.	R = 50 mm	$\beta_t = 190^\circ$
	7.	R = 12 mm	$\beta_t = 3^\circ$
	8.	R = 27 mm	$\beta_t = 240^\circ$





Rys. 7.10. Trajektorie ośmiu punktów centralnych docieranych elementów rozmieszczonych w separatorze w sposób przypadkowy i niezaplanowany (dla  $k_1 = 1$ )

**Tabela 7.16.** Zestawienie wyników obliczeń długości trajektorii i prędkości w docieraniu analizowanych elementów (dane z tabeli 7.15)

Czas ruchu: 1 s			
Element	Długość trajektorii [mm]	$V_{min}$ [mm/s]	$V_{max}$ [mm/s]
1	628,31	628,30	629,33
2	628,31	628,27	628,36
3	628,31	628,28	628,35
4	628,31	628,27	628,36
5	628,31	628,27	628,36
6	628,31	628,29	628,34
7	628,31	628,28	628,35
8	628,31	628,29	628,34
Współczynnik nierównomierności prędkości ( $V_{max} - V_{min}$ ) / $V_{max}$ [w %]			0

Na podstawie otrzymanych wyników symulacji można stwierdzić, iż każdy punkt środkowy docieranego elementu rozmieszczonego w sposób przypadkowy (niezaplanowany) dla  $n_s = n_t$  pokonał taką samą drogę oraz osiągając niemal identyczne wartości  $V_{min}$  i  $V_{max}$  jak przy zaplanowanym rozmieszczeniu (dla  $n_s = n_t$ ). Program MGN39-7.Exe wygenerował również informacje dla tego przypadku dotyczące intensywności zużycia tarczy docierającej, co przedstawiono w tabeli 7.17.

**Tabela 7.17.** Zestawienie wyników obliczeń intensywności zużycia tarczy docierającej na podstawie danych z tabeli 7.15

Numer	Numer sektora								Liczba punktów środkowych elementów, które przeszły przez dany pierścień leżący na powierzchni docieraka	
	1	2	3	4	5	6	7	8		
5	80	0	36	0	0	48	49	18	231	
4	11	87	94	189	134	135	40	58	748	
3	157	207	132	78	155	50	134	149	1064	
2	95	87	167	174	182	157	166	130	1158	
1	149	118	77	75	42	111	103	132	807	
<b>P<sub>min</sub></b>					<b>P<sub>max</sub></b>				<b>P<sub>min</sub></b>	<b>P<sub>max</sub></b>
144					269				1152	2152
<b>Współczynnik nierównomierności zużycia docieraka wyznaczony na podstawie analizy w przyjętych sektorach</b>					<b>Współczynnik nierównomierności zużycia docieraka wyznaczony na podstawie analizy w wyznaczonych pierścieniach</b>					
100%					80,1%					

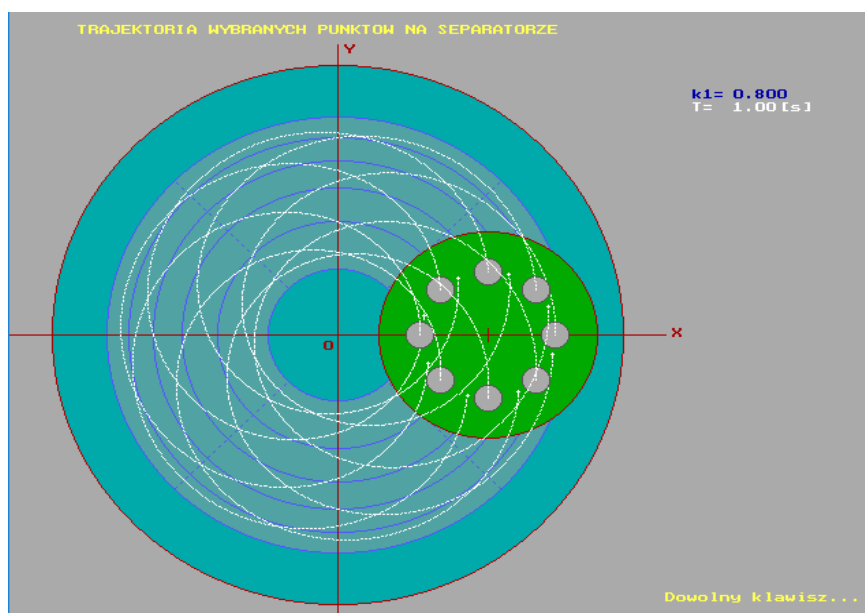
Porównując wyniki wpływu rozmieszczenia elementów w separatorze w sposób uporządkowany i przypadkowy (niezaplanowany) przy założeniu  $n_s = n_t$  stwierdzono, że rozmieszczenie elementów w separatorze nie ma wpływu na prędkości docierania poszczególnych elementów, nie ma również wpływu na długości trajektorii ruchu elementów. Ma jednak wpływ na nierównomierność zużycia tarczy docierającej.

Trzeci eksperyment dotyczył wpływu rozmieszczenia elementów docieranych w sposób zaplanowany i uporządkowany, przy założeniu, że  $n_s \neq n_t$ . W tabeli 7.18 przedstawiono parametry wejściowe niezbędne do przeprowadzenia tej symulacji.

**Tabela 7.18.** Parametry wejściowe symulacji III (rozміщення ośmiu elementów w separatorze w sposób zaplanowany, dla  $n_s \neq n_t$ )

<b>Prędkość obrotowa docieraka <math>n_t</math></b>	60 obr/min	
<b>Prędkość obrotowa separatora <math>n_s</math></b>	48 obr/min	
<b>Parametr <math>k_1 = n_s/n_t</math></b>	0,800	
<b>Odległość środka separatora od środka układu kinematycznego</b>	100 mm	
<b>Liczba elementów obrabianych</b>	8	
<b>Średnica elementu docieranego (średnia wartość)</b>	17,82 mm	
<b>Czas ruchu</b>	1 s	
<b>Położenie elementów w separatorze</b> (kąt $\beta_t$ – jak na rys. 2.4)	1.	R = 45 mm $\beta_t = 0^\circ$
	2.	R = 45 mm $\beta_t = 45^\circ$
	3.	R = 45 mm $\beta_t = 90^\circ$
	4.	R = 45 mm $\beta_t = 135^\circ$
	5.	R = 45 mm $\beta_t = 180^\circ$
	6.	R = 45 mm $\beta_t = 225^\circ$
	7.	R = 45 mm $\beta_t = 270^\circ$
	8.	R = 45 mm $\beta_t = 315^\circ$

Zgodnie z założeniami eksperymentu rozmieszczono elementy równomiernie w separatorze. Program MGN39-7.Exe symulując ruch wykreślił trajektorie ośmiu punktów środkowych elementów, co zostało przedstawione na rys. 7.11. Obliczono również długości poszczególnych trajektorii (tabela 7.19).



Rys. 7.11. Trajektorie ośmiu punktów centralnych docieranych elementów rozmieszczonych w separatorze w sposób zaplanowany (dla  $k_1 = 0,800$ )

**Tabela 7.19.** Zestawienie wyników obliczeń długości trajektorii i prędkości w docieraniu analizowanych elementów (dla danych z tabeli 7.18)

Czas ruchu: 1 s				
Element	Długość trajektorii [mm]	$V_{min}$ [mm/s]	$V_{max}$ [mm/s]	Współczynnik nierównomierności prędkości [%]
1	618,98	571,77	684,86	16,5
2	627,30	571,77	684,86	16,5
3	637,27	571,77	684,86	16,5
4	642,87	571,64	684,86	16,5
5	640,35	571,77	684,86	16,5
6	631,42	571,77	684,86	16,5
7	621,75	571,77	684,86	16,5
8	616,76	571,77	679,07	15,8

Analizując przeprowadzony eksperyment wpływu rozmieszczenia elementów w sposób zaplanowany na kinematykę docierania można zauważyć, iż w przypadku, kiedy  $k_1 = n_s/n_t$  nie przyjmuje wartości jeden, a prędkość separatora jest mniejsza od prędkości tarczy docierającej, występuje nierównomierność prędkości docierania. Nierównomierność prędkości poszczególnych elementów jest taka sama.

Stwierdzono więc, iż rozmieszczenie elementów w separatorze w sposób zaplanowany dla  $n_s \neq n_t$  ma wpływ na kinematykę docierania, powodując taką samą nierównomierność prędkości dla wszystkich rozmieszczonych ośmiu elementów w separatorze. Program MGN39-7.Exe wygenerował również informacje dotyczące intensywności zużycia tarczy docierającej, co przedstawiono w tabeli 7.20.

**Tabela 7.20.** Zestawienie wyników obliczeń intensywności zużycia tarczy docierającej na podstawie danych z tabeli 7.18

Numer pierścienia	Numer sektora								Liczba punktów środkowych elementów, które przeszły przez dany pierścień leżący na powierzchni docieraka	
	1	2	3	4	5	6	7	8		
5	115	100	83	102	101	101	102	73	777	
4	61	102	119	101	83	83	101	132	782	
3	119	67	60	67	96	96	67	56	628	
2	70	85	105	86	73	73	86	92	670	
1	148	147	132	145	146	146	145	142	1151	
<b>P<sub>min</sub></b>					<b>P<sub>max</sub></b>				<b>P<sub>min</sub></b>	<b>P<sub>max</sub></b>
56					148				628	1151
<b>Współczynnik nierównomierności zużycia docieraka wyznaczony na podstawie analizy w przyjętych sektorach</b>						<b>Współczynnik nierównomierności zużycia docieraka wyznaczony na podstawie analizy w wyznaczonych pierścieniach</b>				
62,2%						45,4%				

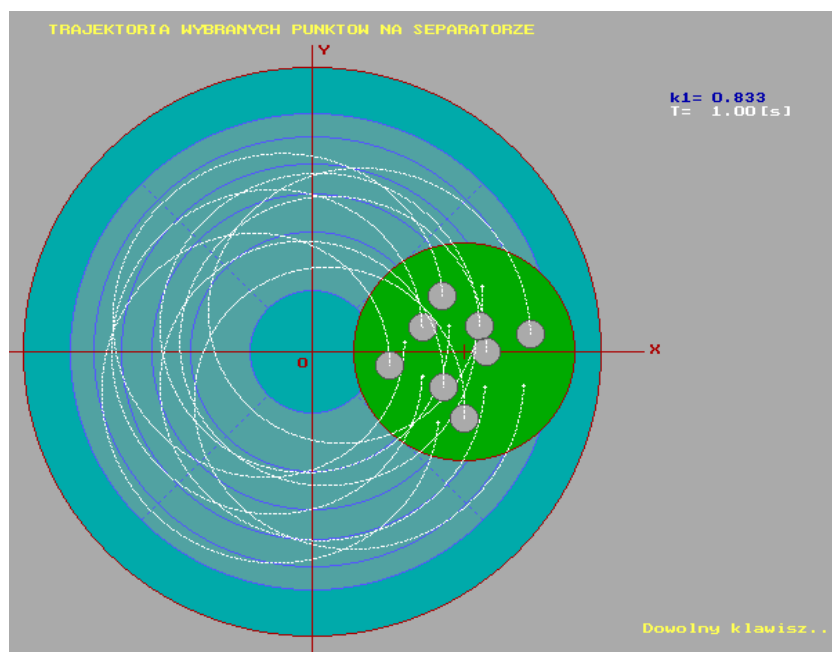
Analizując współczynnik nierównomierności zużycia tarczy docierającej w pierścieniach i sektorach można stwierdzić, że rozmieszczenie elementów w separatorze w sposób zaplanowany dla  $n_s \neq n_t$  ma wpływ na intensywność zużycia tarczy docierającej. Powoduje również powstanie nierównomierności predkości docierania i jest ona identyczna dla wszystkich ośmiu elementów znajdujących się w separatorze.

Czwarty eksperyment dotyczył wpływu rozmieszczenia ośmiu elementów w separatorze w sposób przypadkowy (niezaplanowany), dla  $n_s \neq n_t$ . W tabeli 7.21 przedstawiono parametry wejściowe niezbędne do przeprowadzenia symulacji **IV**.

**Tabela 7.21.** Parametry wejściowe symulacji **IV** (rozміщення ośmiu elementów w separatorze w sposób przypadkowy dla  $n_s \neq n_t$ )

<b>Prędkość obrotowa docieraka <math>n_t</math></b>	60 obr/min	
<b>Prędkość obrotowa separatora <math>n_s</math></b>	48 obr/min	
<b>Parametr <math>k_1 = n_s/n_t</math></b>	0,883	
<b>Odległość środka separatora od środka układu kinematycznego</b>	100 mm	
<b>Liczba elementów obrabianych</b>	8	
<b>Średnica elementu docieranego (średnia wartość)</b>	17,82 mm	
<b>Czas ruchu</b>	1 s	
<b>Położenie elementów w separatorze</b> (kąt $\beta_t$ – jak na rys. 2.4)	1.	R = 15 mm $\beta_t = 0^\circ$
	2.	R = 45 mm $\beta_t = 15^\circ$
	3.	R = 32 mm $\beta_t = 150^\circ$
	4.	R = 45 mm $\beta_t = 270^\circ$
	5.	R = 20 mm $\beta_t = 60^\circ$
	6.	R = 50 mm $\beta_t = 190^\circ$
	7.	R = 12 mm $\beta_t = 3^\circ$
	8.	R = 27 mm $\beta_t = 240^\circ$

Trajektorie ruchu ośmiu punktów środkowych elementów docieranych przedstawiono na rys. 7.12. Obliczono również długości trajektorii ruchu punktów centralnych analizowanych elementów (tabela 7.22).



Rys. 7.12. Trajektorie ośmiu punktów centralnych docieranych elementów rozmieszczonych w separatorze w sposób przypadkowy (niezaplanowany), dla  $k_1 = 0,833$

**Tabela 7.22.** Zestawienie wyników obliczeń długości trajektorii i prędkości w docieraniu analizowanych elementów (dla danych z tabeli 7.21)

Czas ruchu: 1 s			
Długość trajektorii [mm]	$V_{min}$ [mm/s]	$V_{max}$ [mm/s]	Współczynnik nierównomierności prędkości [%]
625,82	612,61	644,02	4,9
622,84	581,19	675,44	14,0
635,23	599,62	661,82	9,4
624,63	581,19	675,44	14,0
635,25	586,43	670,20	12,25
628,46	607,37	649,26	6,5
628,58	600,04	656,59	8,6
637,09	575,95	880,67	15,4

Analizując przeprowadzony eksperyment wpływu rozmieszczenia elementów w sposób przypadkowy (niezaplanowany) na kinematykę docierania można zauważyć, iż w przypadku kiedy  $k_1 = n_s/n_t$  nie przyjmuje wartości jeden, a prędkość separatora jest mniejsza od prędkości tarczy docierającej, dochodzi do nierównomierności prędkości docierania ( $V_{min}$  i  $V_{max}$ ). Nierównomierność prędkości poszczególnych elementów są różne, co ma niekorzystny wpływ na kinematykę docierania elementów, ponieważ każdy element jest docierany z różną  $V_{min}$  i  $V_{max}$ .

Program wygenerował również informacje dotyczące intensywności zużycia tarczy docierającej, co przedstawiono w tabeli 7.23.

**Tabela 7.23.** Zestawienie wyników obliczeń intensywności zużycia tarczy docierającej (na podstawie danych z tabeli 7.21)

Numer pierścienia	Numer sektora								Liczba punktów środkowych elementów, które przeszły przez dany pierścień leżący na powierzchni docieraka	
	1	2	3	4	5	6	7	8		
5	57	0	0	0	55	67	15	48	242	
4	19	77	81	176	110	30	169	19	681	
3	175	203	171	88	107	194	54	80	1072	
2	107	77	154	172	185	184	168	247	1294	
1	125	135	97	82	59	41	100	80	719	
<b>P<sub>min</sub></b>					<b>P<sub>max</sub></b>				<b>P<sub>min</sub></b>	<b>P<sub>max</sub></b>
0					247				242	1294
<b>Współczynnik nierównomierności zużycia docieraka wyznaczony na podstawie analizy w przyjętych sektorach</b>					<b>Współczynnik nierównomierności zużycia docieraka wyznaczony na podstawie analizy w wyznaczonych pierścieniach</b>					
100 %					81,3 %					

Analizując współczynnik nierównomierności zużycia tarczy docierającej w pierścieniach i sektorach można stwierdzić, że rozmieszczenie przypadkowe (niezaplanowane) elementów w separatorze dla  $n_s \neq n_t$  ma wpływ na intensywność zużycia tarczy docierającej.

Na podstawie uzyskanych wyników przeprowadzonych czterech symulacji można stwierdzić, że:

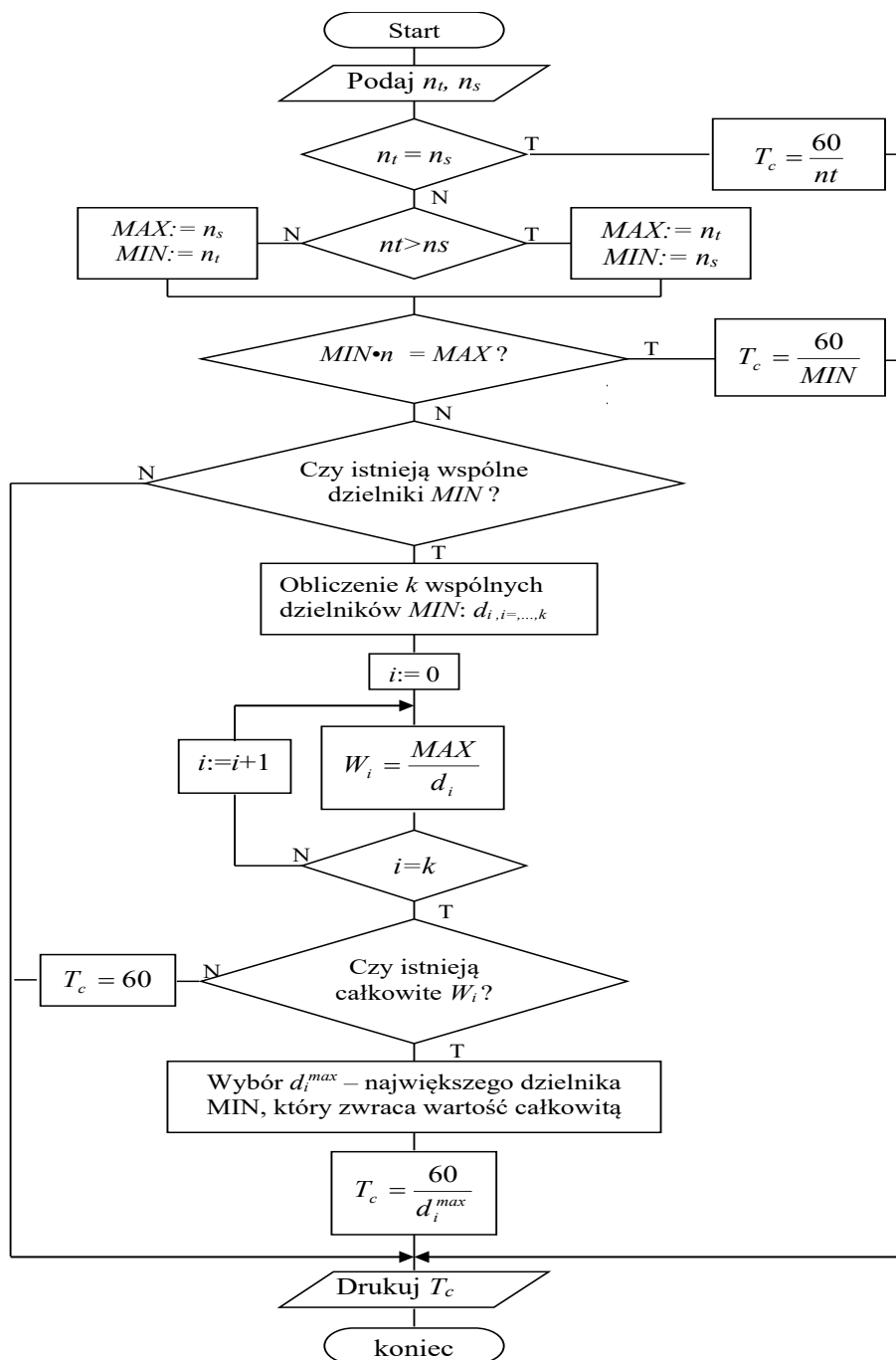
1. Każdy punkt środkowy docieranych elementów rozmieszczony w sposób zaplanowany dla  $n_s = n_t$  pokonał taką samą drogę równą 628,31 mm osiągając identyczną wartość prędkości  $V_{min} = 628,27$  mm/s oraz  $V_{max} = 628,36$  mm/s, a więc nierównomierność prędkości docierania wynosi 0%.
2. Zaplanowane rozmieszczenie elementów przy założeniu  $n_s = n_t$  ma korzystny wpływ na nierównomierność zużycia tarczy docierającej w pierścieniach, która wynosi 45,9% jak i sektorach równa 46,9%.
3. Każdy punkt środkowy docieranego elementu rozmieszczonego w sposób przypadkowy (niezaplanowany) dla  $n_s = n_t$  pokonał taką samą drogę osiągając niemal identyczne wartości  $V_{min}$  i  $V_{max}$ , jak przy zaplanowanym rozmieszczeniu dla  $n_s = n_t$ .
4. Przypadkowe (niezaplanowane) rozmieszczenie elementów w separatorze przy założeniu  $n_s = n_t$  ma niekorzystny wpływ na nierównomierność zużycia tarczy docierającej w pierścieniach, która wynosi 80,1%, zaś w sektorach 100%.



5. Rozmieszczenie elementów w separatorze w sposób zaplanowany dla  $n_s \neq n_t$  ma wpływ na kinematykę docierania powodując taką samą nierównomierność prędkości wszystkich elementów znajdujących się w separatorze, równą 16,5%.
6. Zaplanowane rozmieszczenie elementów w separatorze dla  $n_s \neq n_t$  ma wpływ na intensywność zużycia tarczy docierającej.
7. Analizując przeprowadzony eksperyment wpływu rozmieszczenia elementów w sposób przypadkowy (niezaplanowany) na kinematykę docierania można zauważyć, iż w przypadku kiedy  $k_1 = n_s/n_t$  nie przyjmuje wartości jeden a prędkość separatora jest mniejsza od prędkości tarczy docierającej, to dochodzi do nierównomierności prędkości docierania  $V_{\min}$  i  $V_{\max}$ . Nierównomierności prędkości poszczególnych elementów są różne, co ma niekorzystny wpływ na kinematykę docierania elementów, ponieważ każdy element jest docierany z różną  $V_{\min}$  i  $V_{\max}$ .
8. Analizując współczynnik nierównomierności zużycia tarczy docierającej w pierścieniach i sektorach można stwierdzić, że rozmieszczenie przypadkowe (niezaplanowane) elementów w separatorze dla  $n_s \neq n_t$  ma wpływ na intensywność zużycia tarczy docierającej.
9. Jeżeli prędkość  $n_s = n_t$ , to elementy o przekroju kołowym umieszczone w separatorze, niezależnie od ich lokalizacji w separatorze, przebywają tę samą drogę ze stałą prędkością. Jest to sytuacja bardzo korzystna ze względu na docieranie elementów, ale niekorzystna dla tarczy docierającej.
10. Jeżeli różnica pomiędzy prędkościami  $n_s$  i  $n_t$  będzie duża, tym większa będzie różnica w długości trajektorii punktów środkowych docieranych elementów, co za skutkuje powstaniem nierównomierności prędkości docierania elementów.

### 7.3 .Wpływ prędkości obrotowej docieraka i separatora na kinematykę docierania

W celu oceny wpływu prędkości obrotowej docieraka  $n_t$  i separatora  $n_s$  na kinematykę docierania przeprowadzono symulację przy użyciu programu T.Exe. Program został stworzony na potrzeby badań własnych i pozwala na analizę układu tworzącego pełen cykl ruchu elementu obrabianego oraz oblicza czas po jakim nastąpi zamknięcie pętli. Posiadając dane dotyczące wartości prędkości ( $n_t$  – prędkość obrotowa tarczy docierającej,  $n_s$  – prędkość obrotowa separatora), można obliczyć czas zamknięcia pętli punktu środkowego docieranego elementu kołowego. Algorytm programu T.Exe przedstawiono na rys.7.13.



Rys. 7.13. Schemat blokowy programu T.Exe

Wykorzystując program T.Exe przeprowadzono cztery symulacje, które mają pokazać, po jakim czasie nastąpi zamknięcie pętli punktu środkowego elementu kołowego osadzonego w separatorze.

Eksperymenty przeprowadzono dla założeń zawartych w tabeli 7.24.

**Tabela 7.24.** Analiza symulacji zamknięcia pętli dla czterech ustawień  $n_s/n_t$

Lp	$n_t$ [obr/min]	$n_s$ [obr/min]	$k_1 = n_s/n_t$
1	60	55	0,916
2	60	50	0,883
3	60	47	0,783
4	60	60	1

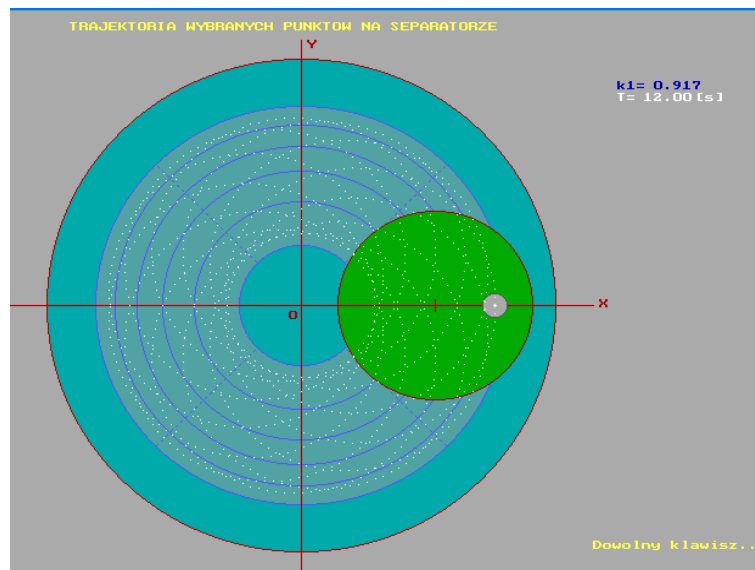
### Symulacja I.

Warunki symulacji I podano w tabeli 7.25.

**Tabela 7.25.** Obliczenia dotyczące czasu zamknięcia pętli (dane z tabeli 7.24, pozycja 1)

$n_t = 60$ [obr/min]		
$n_s = 55$ [obr/min]		
Dzielnik liczby $n_s = 55$	5	11
Wyniki dzielenia ( $n_t = 60$ przez dzielniki liczby $n_s=55$ )	12	5,45
Wybór całkowitych wyników dzielenia (liczby $n_t = 60$ przez dzielnik liczby $n_s =55$ )	5	12
Wybór największego dzielnik liczby $n_s = 55$ (całkowity)	5	-
Czas zamknięcia pętli $T_c = 60$ / całkowity dzielnik liczby $n_s = 5$	12 s	-

Na rys. 7.14 przedstawiono trajektorie punktu centralnego elementu (dla  $k_1 = 0,916$ ) czas zamknięcia pętli w tym przypadku nastąpił po 12 s.



Rys. 7.14. Trajektorie punktu centralnego symulowanej powierzchni docieranej dla  $k_1 = 0,917$  (czas po jakim nastąpiło zamknięcie pętli punktu środkowego to 12 s)

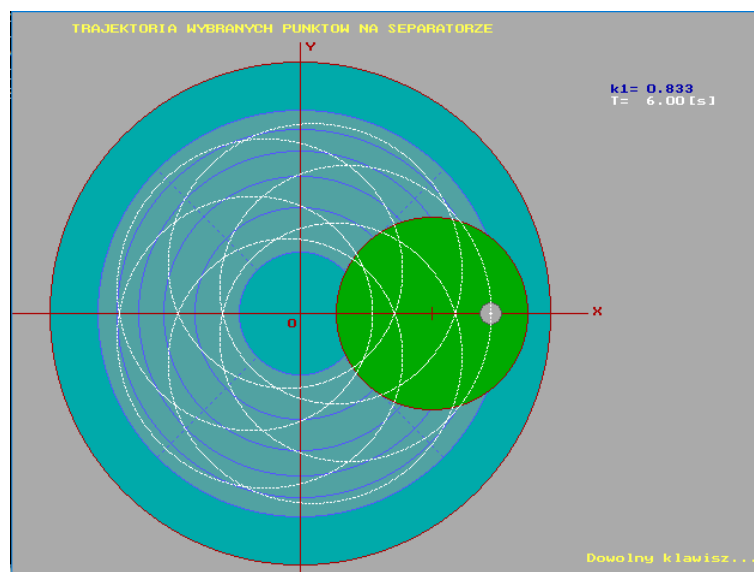
## Symulacja II.

Warunki symulacji II podano w tabeli 7.26.

Tabela 7.26. Obliczenia dotyczące czasu zamknięcia pętli (dane z tabeli 7.24, pozycja 2)

$n_t = 60$ [obr/min]				
$n_s = 50$ [obr/min]				
<b>Dzielnik liczby <math>n_s = 50</math></b>	2	5	10	25
<b>Wyniki dzielenia (liczby <math>n_t = 60</math> przez dzielniki liczby <math>n_s = 50</math>)</b>	30	12	6	2,4
<b>Wybór całkowitych wyników dzielenia (liczby <math>n_t = 60</math> przez dzielnik liczby <math>n_s = 50</math>)</b>	30	12	6	-
<b>Wybór największego dzielnika liczby <math>n_s = 50</math> (całkowity)</b>	10	-		
<b>Czas zamknięcia pętli <math>T_c = 60</math> / całkowity dzielnik liczby <math>n_s = 10</math></b>	6 s	-		

Na rys. 7.15 przedstawiono trajektorie punktu centralnego elementu (dla  $k_1 = 0,883$ ), czas zamknięcia pętli wynosi w tym przypadku 6 s.



Rys. 7.15. Trajektorie punktu centralnego symulowanej powierzchni docieranej dla  $k_1 = 0,883$  (czas po jakim nastąpiło zamknięcie pętli punktu środkowego to 6 s)

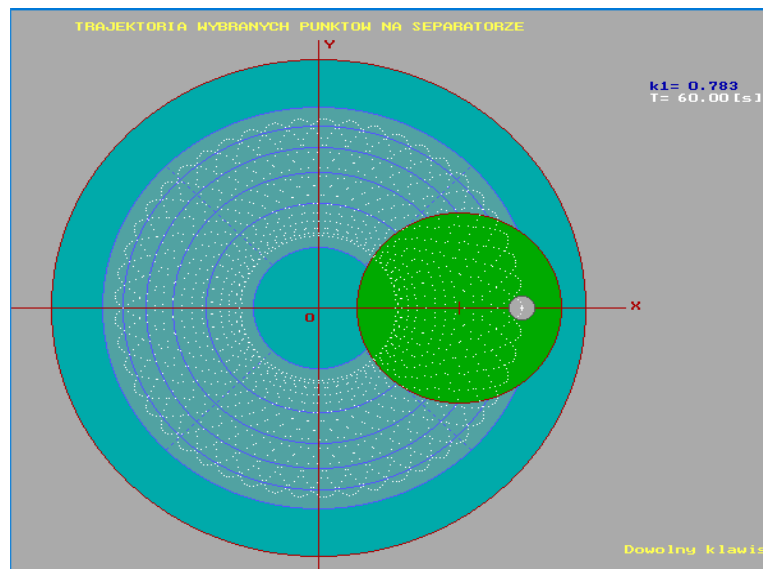
### Symulacja III.

Warunki symulacji III podano w tabeli 7.27.

**Tabela 7.27.** Obliczenia dotyczące czas zamknięcia pętli (dane z tabeli 7.24, pozycja 3)

<b><math>n_t = 60</math> [obr/min]</b>		
<b><math>n_s = 47</math> [obr/min]</b>		
<b>Dzielnik liczby <math>n_s = 47</math></b>	1	47
<b>Wyniki dzielenia (<math>n_t = 60</math> przez dzielniki liczby <math>n_s</math>)</b>	brak	
<b>Wybór całkowitych wyników dzielenia (liczby <math>n_t</math> przez dzielnik liczby <math>n_s</math>)</b>	brak	
<b>Wybór największego dzielnika liczby <math>n_s</math> (całkowity)</b>	1	
<b>Czas zamknięcia pętli <math>T_c = 60</math> / całkowity dzielnik liczby <math>n_s</math></b>	60 s	

Na rys. 7.16 przedstawiono trajektorie punktu centralnego elementu (dla  $k_1 = 783$ ), czas zamknięcia pętli wynosi w tym przypadku 60 s.



Rys. 7.16. Trajektoria punktu centralnego symulowanej powierzchni docieranej dla  $k_1 = 0,783$  (czas po jakim nastąpiło zamknięcie pętli punktu środkowego to 60 s)

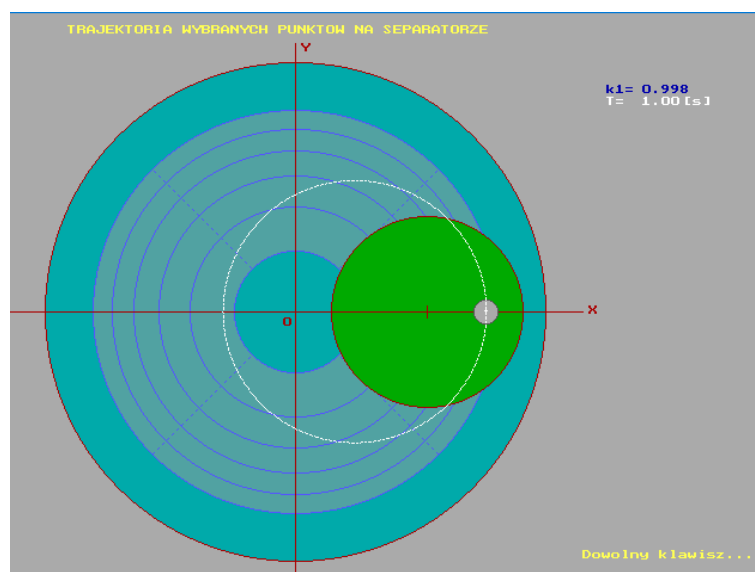
#### Symulacja IV.

Warunki symulacji IV podano w tabeli 7.28.

**Tabela 7.28.** Czas zamknięcia pętli (dane z tabeli 7.24, pozycja 4)

$n_t = 60$ [obr/min]	
$n_s = 60$ [obr/min]	
<b>Czas zamknięcia pętli <math>T_c = 60</math> / całkowity dzielnik liczby <math>n_s</math></b>	1 s

Na rys. 7.17 przedstawiono trajektorie punktu centralnego elementu (dla  $k_1 = 0,998$ ), czas zamknięcia pętli wynosi w tym przypadku 1 s.



Rys. 7.17. Trajektoria punktu centralnego symulowanej powierzchni docieranej dla  $k_1 = 1$  (czas po jakim nastąpiło zamknięcie pętli punktu środkowego to 1 s)

Analizując powyższe przypadki można stwierdzić, iż czas zamknięcia pętli jest różny i zależy od prędkości obrotowej separatora i prędkości obrotowej tarczy docierającej. Widoczna jest również różnica w przebiegu trajektorii punktów środkowych powierzchni docieranych, ponieważ przebieg zależy od wartości współczynnika  $k_1 = n_s/n_t$ .

W tabeli 7.29 przedstawiono kilka przypadków obliczeń zamknięcia pętli dla zadanych  $n_s$  i  $n_t$ . Zaletą symulacji z użyciem programu T.Exe jest to, że możemy symulować teoretyczny przebieg zamknięcia pętli. Na podstawie przeprowadzonych symulacji można tak dobrać prędkość tarczy docierającej i separatora wymagany (separator z wymuszonym ruchem obrotowym), aby uzyskać najkorzystniejsze warunki realizacji procesu docierania zarówno dla tarczy jak i elementów docieranych.

**Tabela 7.29.** Przykłady wyników obliczeń czasu zamknięcia pętli

Lp	$n_t$ [obr/min]	$n_s$ [obr/min]	Czas zamknięcia pętli [s]
1	10	10	6
2	20	20	3
3	30	30	2
4	40	40	1,5
5	50	50	1.2

Na podstawie uzyskanych wyników symulacji można stwierdzić, że:

1. W przypadku, kiedy prędkość separatora i tarczy docierającej są różne i niewielokrotne, a stosunek  $n_s/n_t$  jest liczbą wymierną, to trajektorie stają się zamkniętymi po określonym czasie ruchu.
2. Czas pełnego cyklu zależy od tego, czy prędkość separatora i prędkość docieraka mają wspólne dzielniki.
3. Jeżeli podczas docierania mamy wpływ nie tylko na prędkość  $n_t$ , ale i na  $n_s$  (system kinematyczny z wymuszonym ruchem separatora), to jest możliwe zaplanowanie ruchu tak, aby powstawały zamknięte trajektorie ruchu punktów środkowych docieranych elementów.
4. Program T.Exe może służyć jako narzędzie wspomagające planowanie operacji docierania.

#### **7.4. Wpływ rozmieszczenia losowego elementów docieranych w separatorze na kinematykę docierania**

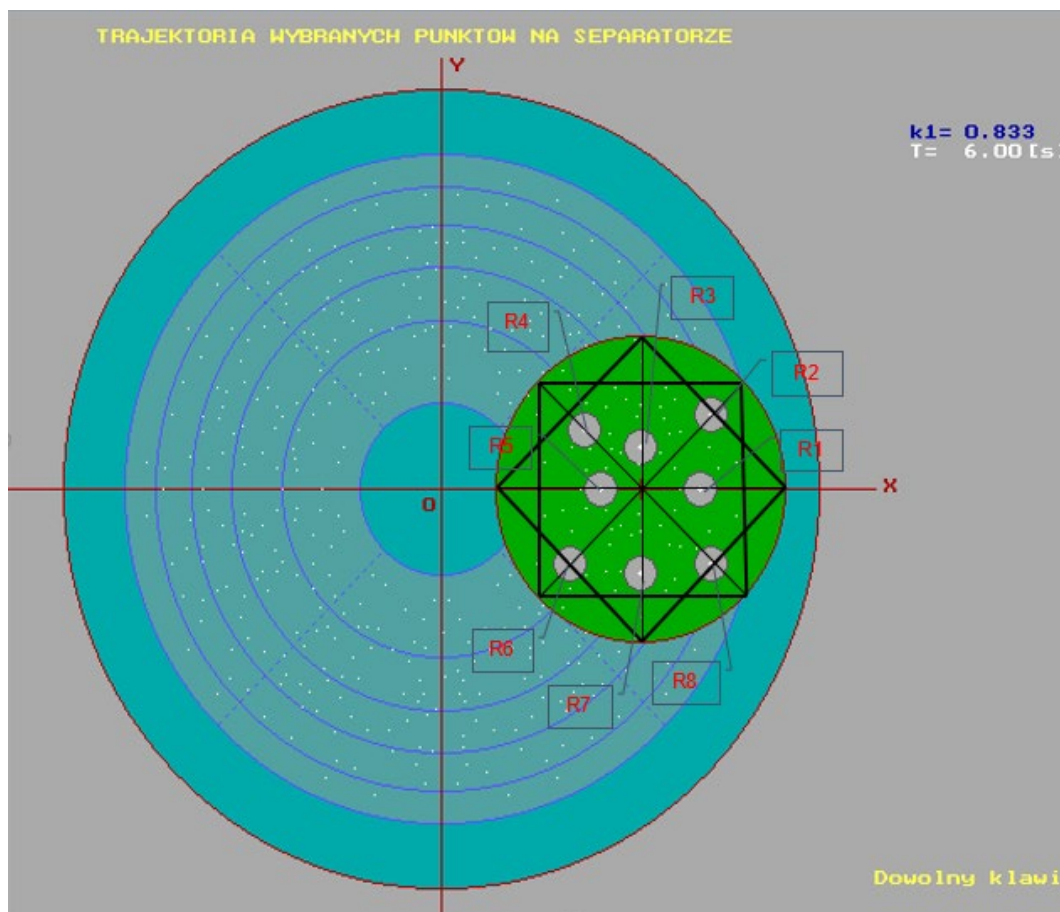
Rozmieszczenie elementów w separatorze jak również wartość prędkość obrotowej  $n_s$  i  $n_t$  oraz czas zamknięcia pętli  $T_c$  mają zasadniczy wpływ na zużycie tarczy docierającej. Na podstawie przeprowadzonych w poprzednim rozdziale symulacji zaproponowano zastosowanie alternatywnego podejścia w kwestii rozmieszczania elementów. Symulacje przeprowadzone w poprzednim rozdziale dowiodły, że rozmieszczenie ma wpływ na kinematykę docierania jak również na intensywność zużycia tarczy. Aby zminimalizować nierówne zużywanie tarczy zaproponowano, by przy pomocy programu komputerowego wyznaczyć (wylosować) takie ułożenie elementów w separatorze, żeby intensywność zużycia tarczy docierającej była, korzystna.

Dla potrzeb przeprowadzenia tych badań opracowano kolejny program o symbolu MGN4.8-N.Exe. Umożliwia on losowanie najlepszego ułożenia ośmiu elementów w separatorze spośród zaproponowanych N eksperymentów. Program wymaga wprowadzenia następujących danych wejściowych:

1. odległość separatora od środka tarczy docierającej (80 - 115 mm),
2. średnica elementu o przekroju kołowym (8 - 20 mm),
3. prędkość obrotowa tarczy docierającej  $n_t$  (1 - 60 obr/min),
4. prędkość obrotowa separatora  $n_s$  (1 - 60 obr/min),
5. krok czasowy  $\Delta t$  (0,1 – 0,002),
6. program określa czas jednego cyklu ruchu na:
  - a) jeden obrót tarczy docierającej,
  - b) jeden obrót separatora,
  - c) oraz czas zdefiniowany przez operatora,
7. propozycja liczby losowań rozmieszczania elementów.

W następnym kroku program dokonuje symulacji w celu otrzymania najlepszego układu elementów w separatorze. W tym programie rozmieszczenie elementów tworzy 8 - ramienna gwiazda z krokiem co 45 stopni. Odległości elementów obrabianych są losowane i przyjmują wartości od 10 do 60 mm (z krokiem co 10 mm), co zostało przedstawione na rysunku 7.18.





Rys. 7.18. Przykładowy schemat rozmieszczenia ośmiu elementów tworzących 8 - ramienną gwiazdę z krokiem co 45 stopni (odległości elementów obrabianych są losowane i przyjmują wartości od 10 do 60 mm, z krokiem co 10 mm)

W celu zademonstrowania nowej metody rozmieszczenia elementów w separatorze przeprowadzono eksperyment przy użyciu opracowanego programu statystycznego MGN4.9-N.Exe, dla którego dane wejściowe zostały zawarte w tabeli 7.30. Wykorzystano również program T.Exe, przy pomocy którego obliczono czas zamknięcia pętli. Umożliwi to pozyskanie informacji, po jakim czasie dla założonych prędkości  $n_s$  i  $n_t$  pętla zostanie zamknięta.

**Tabela 730.** Parametry wejściowe (symulacja kinematyki przy użyciu programu MGN4.8-N.Exe)

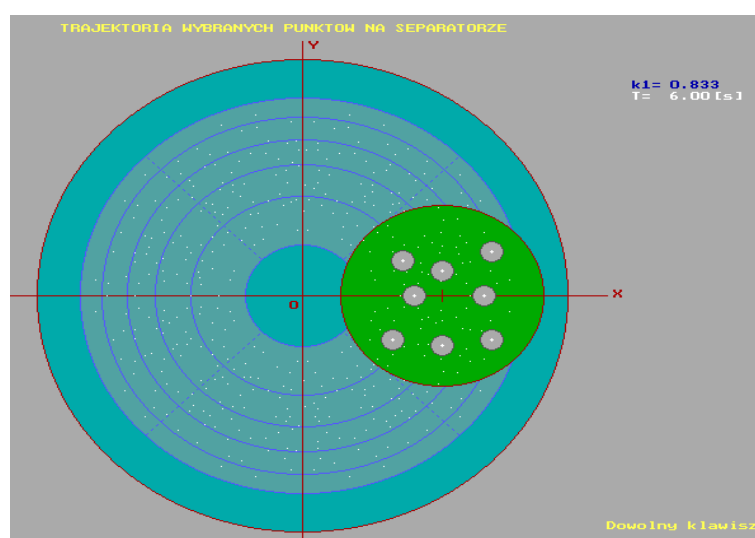
<b>Liczba losowań</b>	4
<b>Prędkość obrotowa docieraka <math>n_t</math></b>	60 obr/min
<b>Prędkość obrotowa separatora <math>n_s</math></b>	50 obr/min
<b>Parametr <math>k_1 = n_s/n_t</math></b>	0,883
<b>Odległość środka separatora od środka układu kinematycznego</b>	100 mm
<b>Liczba elementów obrabianych</b>	8
<b>Średnica elementu docieranego (średnia wartość)</b>	17,82 mm
<b>Czas zamknięcia pętli</b>	6 s
<b>Czas ruchu</b>	6 s

Po przeprowadzeniu eksperymentu program w czterech losowaniach wygenerował rozmieszczenia dla 8 elementów, co zostało przedstawione w tabeli 7.31.

**Tabela 7.31.** Wygenerowane przez program MGN4.8-N.Exe położenie elementów

Położenie elementów w separatorze (kąt $\beta_t$ – jak na rys. 2.4)	Odległość od środka separatora	$\beta_t$ kąt przesunięcia z krokiem 45°
	R1 = 30 mm	$\beta_t = 0^\circ$
	R2 = 50 mm	$\beta_t = 45^\circ$
	R3 = 20 mm	$\beta_t = 90^\circ$
	R4 = 40 mm	$\beta_t = 135^\circ$
	R5 = 20 mm	$\beta_t = 180^\circ$
	R6 = 50 mm	$\beta_t = 225^\circ$
	R7 = 40 mm	$\beta_t = 270^\circ$
	R8 = 50 mm	$\beta_t = 315^\circ$

Wylosowane rozmieszczenie elementów w separatorze przedstawiono na rys. 7.19.



Rys. 7.19. Rozmieszczenie elementów w separatorze zaproponowane przez program MGN4.8-N.Exe (dane z tabeli 7.31)

Program wygenerował również inne wyniki, które zostały zawarte w tabelach 7.32 i 7.33.

**Tabela 7.32.** Zestawienie wyników obliczeń długości trajektorii i prędkości docierania

Czas ruchu: 6 s				
Element	Długość trajektorii [mm]	$V_{min}$ [mm/s]	$V_{max}$ [mm/s]	Współczynnik nierównomierności prędkości w sektorach [%]
1	3710,60	587,76	648,42	9,4
2	3714,85	587,76	670,37	15,6
3	3709,27	587,76	638,28	6,3
4	3712,46	587,76	659,90	12,7
5	3709,27	587,76	638,28	6,3
6	3714,85	587,76	670,37	15,5
7	3712,46	587,76	658,57	12,3
8	3714,85	587,76	670,37	15,6

**Tabela 7.33.** Zestawienie wyników obliczeń intensywności zużycia tarczy docierającej

Numer pierścienia	Numer sektora								Liczba punktów środkowych elementów, które przeszły przez dany pierścień leżący na powierzchni docieraka
	1	2	3	4	5	6	7	8	
5	4	3	3	4	5	3	3	5	530
4	12	10	10	11	9	10	10	11	83
3	14	15	16	14	15	16	15	16	121
2	16	18	17	15	16	16	17	16	131
1	16	15	15	15	14	16	16	16	123
<b>P<sub>min</sub></b>				<b>P<sub>max</sub></b>				<b>P<sub>min</sub></b>	<b>P<sub>max</sub></b>
3				18				30	131
<b>Współczynnik nierównomierności zużycia docieraka wyznaczony na podstawie analizy w przyjętych sektorach</b>					<b>Współczynnik nierównomierności zużycia docieraka wyznaczony na podstawie analizy w wyznaczonych pierścieniach</b>				
83 %					77,1 %				

Przełożyło się to na otrzymane wyniki „nierównomierności zużycia tarczy docierającej” w sektorach i pierścieniach. Należy więc eksperyment zwiększyć o większą liczbę losowań, aby program mógł wygenerować lepsze rozwiązanie ułożenia elementów tak, aby zużycie tarczy docierającej było jak najbardziej równomierne na całej powierzchni roboczej. Opracowano również nową wersję programu tj. program MGN4.9-7N.Exe, który posiada nowe możliwości. Po wprowadzeniu wartości prędkości obrotowej tarczy docierającej  $n_t$  i separatora  $n_s$  automatycznie wybiera on czas eksperymentu, równy czasowi pełnego cyklu oraz krok czasowy  $\Delta t$ . W tym programie rozmieszczenie elementów tworzy również 8 - ramienna gwiazda z krokiem co 45 stopni. Odległości elementów obrabianych są losowane i przyjmują wartości od 10 do 60 mm z krokiem co 10 mm. Program umożliwia wprowadzenie określonych ustawień, co zostało przedstawione na przykładzie kolejnego eksperymentu (dane wejściowe zawarto w tabeli 7. 34).

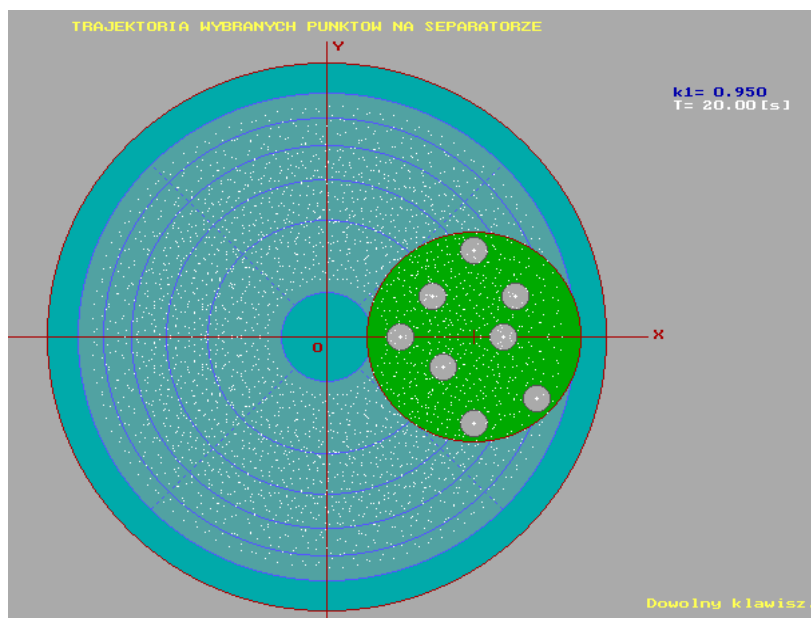
**Tabela 7.34.** Parametry wejściowe (symulacja kinematyki przy użyciu programu MGN4.9-7N.Exe)

Liczba losowań	4
Prędkość obrotowa docieraka $n_t$	60 obr/min
Prędkość obrotowa separatora $n_s$	57 obr/min
Parametr $k_1 = n_s/n_t$	0,950
Odległość środka separatora od środka układu kinematycznego	100 mm
Liczba elementów obrabianych	8
Średnica elementu docieranego (średnia wartość)	17,82 mm
Czas zamknięcia pętli	20 s

**Tabela 7.35.** Wygenerowane przez program MGN4.8-N.Exe położenie elementów

Położenie elementów w separatorze (kąt $\beta_t$ – jak na rys. 2.4)	Odległość od środka separatora	$\beta_t$ kąt przesunięcia z krokiem $45^\circ$
	R1 = 20 mm	$\beta_t = 0^\circ$
	R2 = 40 mm	$\beta_t = 45^\circ$
	R3 = 60 mm	$\beta_t = 90^\circ$
	R4 = 40 mm	$\beta_t = 135^\circ$
	R5 = 50 mm	$\beta_t = 180^\circ$
	R6 = 30 mm	$\beta_t = 225^\circ$
	R7 = 60 mm	$\beta_t = 270^\circ$
	R8 = 60 mm	$\beta_t = 315^\circ$

Wylosowane rozmieszczenie elementów w separatorze przedstawiono na rys. 7.20



Rys. 7.20. Rozmieszczenie elementów w separatorze zaproponowane przez program MGN4.9-7N.Exe (dla danych z tabeli 7. 35)

Program wygenerował również inne informacje, które zostały zwarte w tabelach 7.36 i 7.37.

**Tabela 7.36.** Zestawienie wyników obliczeń długości trajektorii i prędkości docierania

Czas ruchu: 20 s				
Element	Długość trajektorii [mm]	$V_{min}$ [mm/s]	$V_{max}$ [mm/s]	Współczynnik nierównomierności prędkości w sektorach [%]
1	12533,64	620,38	632,95	2,0
2	12534,58	614,10	639,23	3,9
3	12536,16	607,82	645,52	5,8
4	12534,58	614,10	639,23	3,9
5	12535,29	610,96	642,37	4,9
6	12534,03	617,24	636,09	3,0
7	12536,16	607,82	645,52	5,8
8	12536,16	607,82	645,52	5,8

**Tabela 7.37.** Zestawienie wyników obliczeń intensywności zużycia tarczy docierającej

Numer pierścienia	Numer sektora								Liczba punktów środkowych elementów, które przeszły przez dany pierścień leżący na powierzchni docieraka	
	1	2	3	4	5	6	7	8		
5	41	39	41	39	39	41	39	41	320	
4	82	84	87	84	84	87	84	87	676	
3	127	120	115	120	120	115	120	115	971	
2	124	126	131	126	126	131	126	131	1017	
1	128	131	125	131	131	125	131	125	1024	
$P_{min}$					$P_{max}$				$P_{min}$	$P_{max}$
39					131				320	1024
Współczynnik nierównomierności zużycia docieraka wyznaczony na podstawie analizy w przyjętych sektorach					Współczynnik nierównomierności zużycia docieraka wyznaczony na podstawie analizy w wyznaczonych pierścieniach					
70,2 %					68,8 %					

Analizując powyższe wyniki eksperymentów można stwierdzić że:

1. Program MGN4.8-N.Exe określa czas jednego cyklu ruchu na:
  - a) jeden obrót tarczy,
  - b) jeden obrót separatora,
  - c) oraz czas zdefiniowany przez operatora, a następnie losuje rozmieszczenie elementów w separatorze.
2. Program MGN4.9-7N.Exe po wprowadzeniu wartości prędkości obrotowej tarczy docierającej i separatora, automatycznie wybiera czas symulacji równy czasu pełnego cyklu  $T_c$ .
3. Program może przeprowadzać N prób w celu uzyskania możliwie korzystnego z punktu intensywności zużycia tarczy rozmieszczenia ośmiu elementów.
4. Współczynnik nierównomierności zużycia powierzchni tarczy  $WNP = (P_{max} - P_{min}) / P_{max}$  [w%] można określić jako „maksymalną względną gęstość punktów tworzących trajektorie na powierzchni tarczy” lub „maksymalną względną nierównomierność zużycia tarczy”.
5. Jeżeli w wyniku symulacji rozmieszczenia elementów docieranych uzyskany zostanie współczynnik nierównomierności na poziomie 47 %, należy uznać to za wynik zadawalający. Zwiększenie symulowanych prób powyżej 100 tysięcy nie poprawia równomierności zużycia tarczy docierającej.

### 7.5. Wpływ podstawowych warunków dawkowania wymuszonego zawiesiny ścierniej na ubytek masowy docieranych elementów ceramicznych

W celu oceny wpływu parametrów wymuszonego dawkowania na ubytek masowy docieranych elementów wykonanych z ceramiki  $Al_2O_3$  przeprowadzono badania na docierarce jednotarczowej Abralap 380. Celem badań było określenie funkcji:

$$U_m = f(K, V_s, L_e) \quad (7.1)$$

gdzie:

$K$  – procentowa (wagowa) zawartość ziaren ściernych w nośniku,

$V_s$  - dawka zawiesiny ścierniej [ml/20 min],

$L_e$  - lepkość nośnika ziaren ściernych [mPa·s].

Założono, że model matematyczny ma postać wielomianu drugiego stopnia z interakcjami:

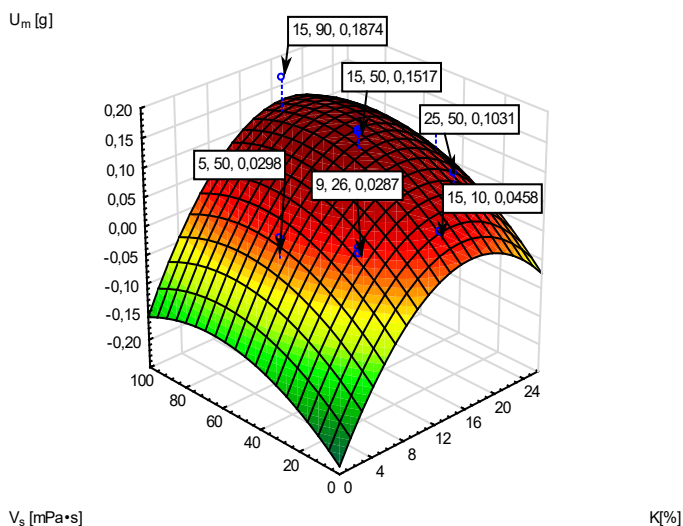
$$U_m = b_0 + b_1K + b_2K^2 + b_3V_s + b_4V_s^2 + b_5L_e + b_6L_e^2 + b_7KV_s + b_8KL_e + b_9V_sL_e \quad (7.2)$$

Warunki stałe docierania jednotarczowego zamieszczono w tabeli 6.2. Na podstawie ustalonego zakresu wartości czynników wejściowych utworzona została macierz planu, którego widok w postaci zakodowanej podano w tabeli 6.3. Badania przeprowadzono zgodnie z macierzą planu dla  $S = 3$  czynników wejściowych ( $K$ ,  $V_s$ ,  $L_e$ ). W tabeli 7.38 przedstawiono wyniki eksperymentów.

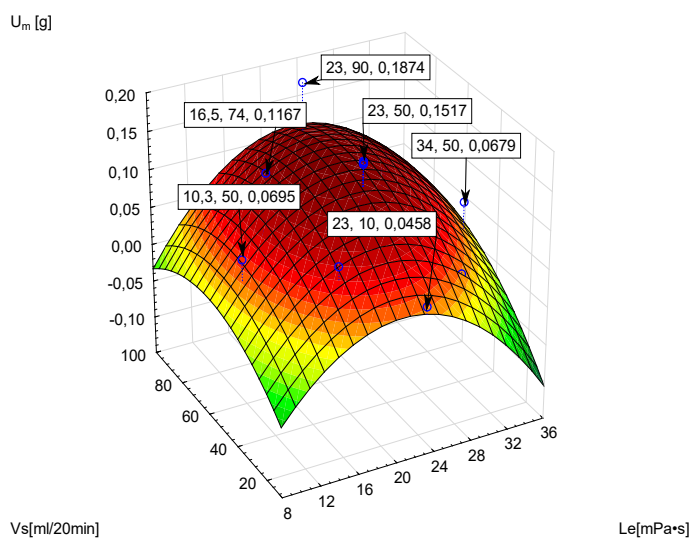
**Tabela 7.38.** Warunki wymuszonego dawkowania zawiesiny ścierniej i wyniki pomiarów ubytku masowego próbek ceramicznych (podano wartości średnie z 3 pomiarów)

Nr	K [%]	V <sub>s</sub> [ml/20 min]	L <sub>e</sub> [mPa·s]	U <sub>m</sub> [g]
1	15	10	23	0,0458
2	15	50	23	0,1537
3	15	50	23	0,1538
4	15	50	23	0,1543
5	15	50	23	0,1541
6	15	50	23	0,1555
7	15	50	23	0,1517
8	15	90	23	0,1874
9	5	50	23	0,0298
10	25	50	23	0,1031
11	21	74	29,5	0,0805
12	21	26	29,5	0,0342
13	9	74	29,5	0,0581
14	9	26	29,5	0,0171
15	15	50	34	0,0679
16	15	50	10,3	0,0695
17	21	74	16,5	0,1167
18	21	26	16,5	0,0870
19	9	74	16,5	0,0377
20	9	26	16,5	0,0287

Wykorzystując program Statistica zbudowano wykresy przestrzenne i warstwiczne przedstawiające wpływ poszczególnych składników badanych na wielkość ubytku masowego. Na ich podstawie zbudowano wykresy powierzchniowe (rys. 7.21 ÷ 7.23). Na rysunkach tych zaznaczono kilka punktów charakterystycznych

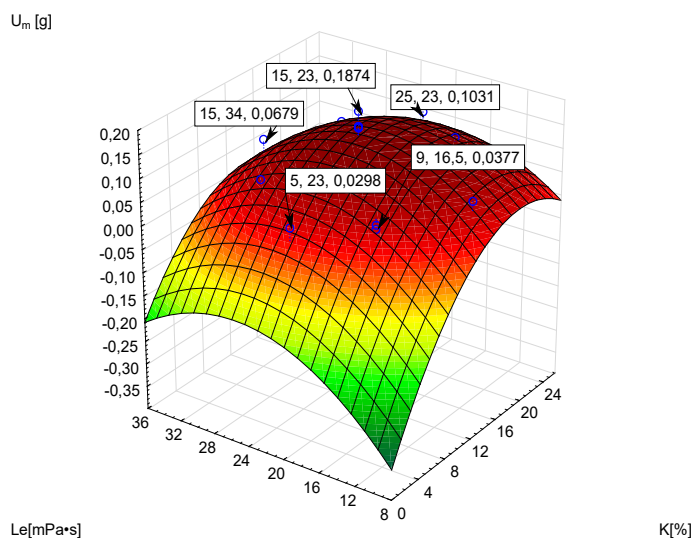


Rys. 7.21. Wykres powierzchniowy wartości ubytku masowego próbek ceramicznych w funkcji czynników wejściowych K, i Vs



Rys. 7.22. Wykres powierzchniowy wartości ubytku masowego próbek ceramicznych w funkcji czynników wejściowych Le i Vs





Rys. 7.23. Wykres powierzchniowy wartości ubytku masowego próbek ceramicznych w funkcji czynników wejściowych K i  $L_e$

Analizując wykresy (rys. 7.21 ÷ 7.23) można zauważyć, iż największy ubytek masowy w zrealizowanych badaniach doświadczalnych ( $U_m = 0,1874$  g) osiągnięto przy następujących wartościach parametrów wejściowych:  $K = 15$  [%],  $V_s = 90$  [ml/20 min] oraz  $L_e = 23$  [mPa·s].

W celu sprawdzenia istotności statystycznej otrzymanych wyników przeprowadzono odpowiednią analizę. Na podstawie danych zawartych w tabeli 7.38 przeprowadzono test SS dla pełnego modelu. Dla wyznaczonego równania regresji obliczono kolejno współczynniki korelacji wielokrotnej oraz współczynnik determinacji. Wyniki testu SS pełnego modelu przedstawiono w tabeli 7.39.

**Tabela 7.39.** Wyniki analizy modelu

Zależna Zm.	Test SS dla pełnego modelu			SS Model	df Model	MS Model	SS Reszta	df Reszta	MS Reszta	F	p
	Wielokr. R	Wielokr. R2	Skorygow R2								
$U_m$	0,958941	0,919568	0,847180	0,052405	9	0,005823	0,004584	10	0,000458	12,70323	0,000226

Następnie przeprowadzono jednowymiarowe testy istotności równania  $U_m = f(K, V_s, L_e)$ . Wyniki analizy przedstawiono w tabeli 7.40.

**Tabela 7.40.** Jednowymiarowe testy istotności równania  $U_m = f(K, V_s, L_e)$

Efekt	Jednowymiarowe testy istotności dla $U_m$ Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez; błąd standardowy oceny: 0,0214				
	SS	Stopnie swobody	MS	F	p
Wyraz wolny	0,012981	1	0,012981	28,32070	0,000337
K	0,014987	1	0,014987	32,69670	0,000193
K <sup>2</sup>	0,019182	1	0,019182	41,84720	0,000072
V <sub>s</sub>	0,001597	1	0,001597	3,48474	0,091496
V <sub>s</sub> <sup>2</sup>	0,005061	1	0,005061	11,04167	0,007710
L <sub>e</sub>	0,012388	1	0,012388	27,02673	0,000402
L <sub>e</sub> <sup>2</sup>	0,016998	1	0,016998	37,08234	0,000117
K*V <sub>s</sub>	0,000084	1	0,000084	0,18435	0,676767
K*L <sub>e</sub>	0,001196	1	0,001196	2,60837	0,137375
V <sub>s</sub> *L <sub>e</sub>	0,000295	1	0,000295	0,64412	0,440881
Błąd	0,004584	10	0,000458		

Dla analizowanego równania regresji  $F = 12,70323$ . Tej wartości odpowiada poziom istotności  $p\text{-value} = 0,000226$ . Wartość poziomu istotności świadczy o wysokiej istotności zbudowanego równania regresji. Błąd standardowy oceny testu wynosi 0,0214, co świadczy, że wszystkie parametry modelu zostały oszacowane wystarczająco dokładnie. Model oceniono za pozytywny. Analizę równania regresji rozszerzono o testowanie istotności współczynników równania (tabela 7.41).

**Tabela 7.41.** Wartości współczynników regresji i poziom ich istotności

Efekt	Oceny parametrów Parametryzacja z sigma-ograniczeniami									
	Um Param.	Um Bł. std.	Um t	Um p	-95,00% Gr.ufn.	+95,00% Gr.ufn.	Um Beta (β)	Um Bł.Std.β	-95,00% Gr.ufn.	+95,00% Gr.ufn.
Wyraz wolny	-0,658470	0,123733	-5,32172	0,000337	-0,934164	-0,382777				
K	0,040693	0,007116	5,71810	0,000193	0,024836	0,056549	3,76557	0,658535	2,29826	5,23288
K <sup>2</sup>	-0,001031	0,000159	-6,46894	0,000072	-0,001386	-0,000676	-2,92224	0,451734	-3,92877	-1,91571
V <sub>s</sub>	0,003189	0,001708	1,86675	0,091496	-0,000617	0,006996	1,18042	0,632343	-0,22852	2,58937
V <sub>s</sub> <sup>2</sup>	-0,000033	0,000010	-3,32290	0,007710	-0,000055	-0,000011	-1,26194	0,379771	-2,10812	-0,41576
L <sub>e</sub>	0,033836	0,006509	5,19872	0,000402	0,019334	0,048338	3,52968	0,678951	2,01688	5,04247
L <sub>e</sub> <sup>2</sup>	-0,000707	0,000116	-6,08953	0,000117	-0,000966	-0,000449	-3,36097	0,551926	-4,59074	-2,13120
K*V <sub>s</sub>	0,000023	0,000053	0,42936	0,676767	-0,000095	0,000140	0,16760	0,390352	-0,70216	1,03736
K*L <sub>e</sub>	-0,000313	0,000194	-1,61504	0,137375	-0,000746	0,000119	-0,84063	0,520497	-2,00036	0,31911
V <sub>s</sub> *L <sub>e</sub>	0,000039	0,000049	0,80257	0,440881	-0,000069	0,000147	0,39541	0,492681	-0,70235	1,49317

Na tej podstawie uzyskano model matematyczny, który jest wielomianem drugiego stopnia z trzema zmiennymi ( $K, V_s, L_e$ ):

$$U_m = -0,6585 + 0,0407K - 0,0010K^2 + 0,0032V_s - 0,000033V_s^2 + 0,0338L_e - 0,0070L_e^2 + 0,000023KV_s - 0,0003KL_e + 0,000039V_sL_e \quad (7.3)$$

Znając równanie regresji, obliczono wartości teoretyczne ubytku masowego  $U_{mt}$ . Porównanie wyników rzeczywistych  $U_m$  i przewidywanego  $U_{mt}$  przedstawiono w tabeli 7.42.

**Tabela 7.42.** Porównanie wyników zaobserwowanych ubytku masowego i wartości przewidywanych

	Wartości obserwowane, przewidywane i reszty Parametryzacja z sigma-ograniczeniami		
	$U_m$ Obserw.	$U_{mt}$ Przewid.	$U_{mt}$ Reszty
1	0,04580	0,05675	-0,01095
2	0,15370	0,15423	-0,00053
3	0,15380	0,15423	-0,00043
4	0,15430	0,15423	0,00007
5	0,15410	0,15423	-0,00013
6	0,15550	0,15423	0,00127
7	0,15170	0,15423	-0,00253
8	0,18740	0,14577	0,04163
9	0,02980	0,01435	0,01545
10	0,10310	0,08787	0,01523
11	0,08050	0,10456	-0,02406
12	0,03420	0,03250	0,00170
13	0,05810	0,07840	-0,02030
14	0,01710	0,01934	-0,00224
15	0,06790	0,05264	0,01526
16	0,06950	0,05862	0,01088
17	0,11670	0,13577	-0,01907
18	0,08700	0,08801	-0,00101
19	0,03770	0,06071	-0,02301
20	0,02870	0,02595	0,00275

Wprowadzono pojęcie parametru funkcji użyteczności (tabela 7.43). Wartość maksymalna parametru  $U_{mt}$ , jaką otrzymano w wyniku optymalizacji to:

$U_{mt} = 0,2038 \mu\text{m}$  dla  $U_{mu\text{ży}} = 1$ , a w przypadku, gdy:

$U_{mt} = -17,8390$  to  $U_{mu\text{ży}} = 0$

**Tabela 7.43.** Parametry funkcji użyteczności

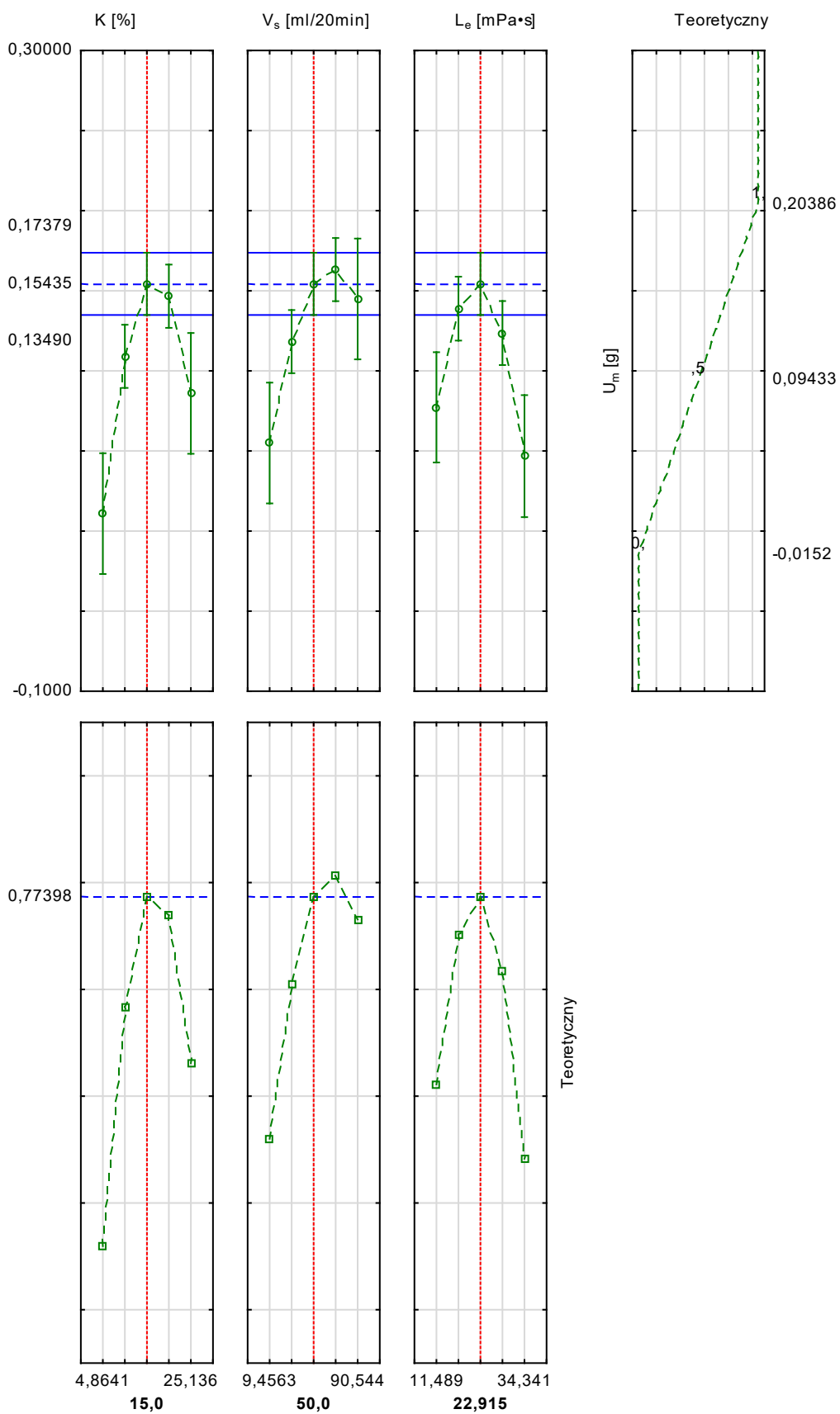
Zm.	Parametry funkcji użyteczności Ustawienia funkcji użyteczności dla każdej zmiennej zależnej							
	Niska Wartość	Użytecz. Wartość	Pośr. Wartość	Użytecz. Wartość	Wysoka Wartość	Użytecz. Wartość	s Param.	t Param.
Umużyt.	-0,015200	0,00	0,094330	0,500000	0,203860	1,000000	1,000000	1,000000

Taka parametryzacja pozwoli na lepszą interpretację wyników graficznych wygenerowanych przez program Statistica. Po przeprowadzeniu optymalizacji zestawienie wartości wejściowych ( $K_t$ ,  $V_{st}$ ,  $L_{et}$ ) i odpowiadający im teoretyczny ubytek masowy  $U_{mt}$  elementów docieranych zamieszczono w tabeli 7.44.

**Tabela 7.44.** Zestawienie odpowiedzi dotyczące przewidywanego ubytku masowego

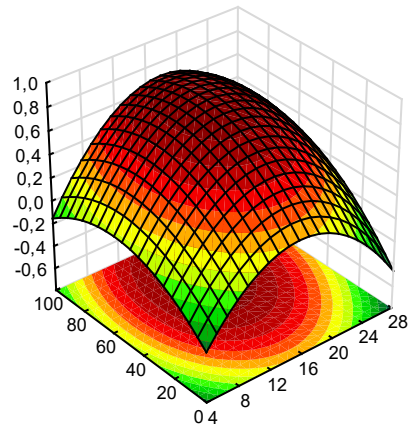
Czynnik	Poziomy czynnika i przewidywane odpowiedzi				
	Czynnika Poziom	Przewid. Um	Użytecz. Wartość	-95%CI Um	+95%CI Um
K	4,864082	0,010878	0,119045	-0,026814	0,048570
K	9,932041	0,109098	0,567415	0,089372	0,128824
K	15,00000	0,154347	0,773977	0,134901	0,173793
K	20,06796	0,146626	0,738729	0,126900	0,166352
K	25,13592	0,085934	0,461671	0,048242	0,123625
Vs	9,456326	0,054949	0,320229	0,017258	0,092641
Vs	29,72816	0,118253	0,609208	0,098527	0,137979
Vs	50,00000	0,154347	0,773977	0,134901	0,173793
Vs	70,27184	0,163232	0,814535	0,143506	0,182958
Vs	90,54367	0,144907	0,730883	0,107216	0,182599
Le	11,48885	0,077250	0,422030	0,042848	0,111651
Le	17,20192	0,138885	0,703390	0,118932	0,158837
Le	22,91500	0,154347	0,773977	0,134901	0,173793
Le	28,62808	0,123638	0,633790	0,103663	0,143613
Le	34,34115	0,046757	0,282830	0,008696	0,084818

Profile wartości aproksymowanych i teoretycznego ubytku masowego w funkcji czynników wejściowych przedstawiono na rys.7.24. W tym przypadku zmienną zależną jest  $U_{mt} = U_{mu\dot{z}yt.}$ , a predyktory to  $K_t$ ,  $V_{st}$  i  $L_{et}$ . Na rys. 7.25, 7.26 i 7.27 zamieszczono wykresy przestrzenne  $U_{mu\dot{z}yt.}$   $F = (K_t, V_{st}, L_{et})$ .



Rys. 7.24. Profile wartości aproksymowanych i teoretyczny ubytek masowy w funkcji czynników wejściowych  $K_t$ ,  $V_{st}$ ,  $L_{et}$

$U_{\text{muzyt}}$

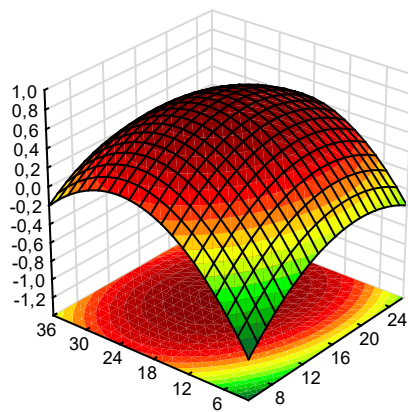


$V_{\text{st}}$ [ml/20min]

$K_t$ [%]

Rys. 7.25. Wykres powierzchniowy i warstwicowy teoretycznej wartości ubytku masowego użytecznego w funkcji czynników  $K_t$  i  $V_{\text{st}}$

$U_{\text{muzyt}}$

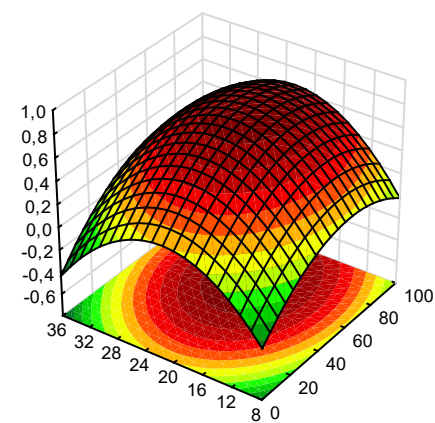


$L_{\text{et}}$ [mPa\*s]

$K_t$ [%]

Rys. 7.26. Wykres powierzchniowy i warstwicowy teoretycznej wartości ubytku masowego użytecznego w funkcji czynników  $K_t$  i  $L_{\text{et}}$

$U_{\text{muzyt}}$



$L_{\text{et}}$ [mPa\*s]

$V_{\text{st}}$ [ml/20min]

Rys. 7.27. Wykres powierzchniowy i warstwicowy teoretycznej wartości ubytku masowego użytecznego w funkcji czynników  $V_{\text{st}}$  i  $L_{\text{et}}$

Analizując powyższe wykresy, można stwierdzić, jaki wpływ wywierają predyktory na zmienną objaśnianą. Dzięki tej metodzie można prognozować odpowiedzi dotyczące ubytku masowego w funkcji czynników wejściowych.

W badaniach doświadczalnych ubytek liniowy  $U_m$  przyjmował wartości:

$U_{mmin} = 0,0171$  g - dla parametrów wejściowych:  $K = 9$  %,  $V_s = 26$  ml/20 min,  $L_e = 29,5$  mPa·s

$U_{mmax} = 0,1874$  g - dla parametrów wejściowych:  $K = 15$  %,  $V_s = 90$  ml/20 min,  $L_e = 23$  mPa·s.

Dokonując optymalizacji przewidywanych odpowiedzi ustalono, że ubytek masowy  $U_{mtmax}$  wyniesie:

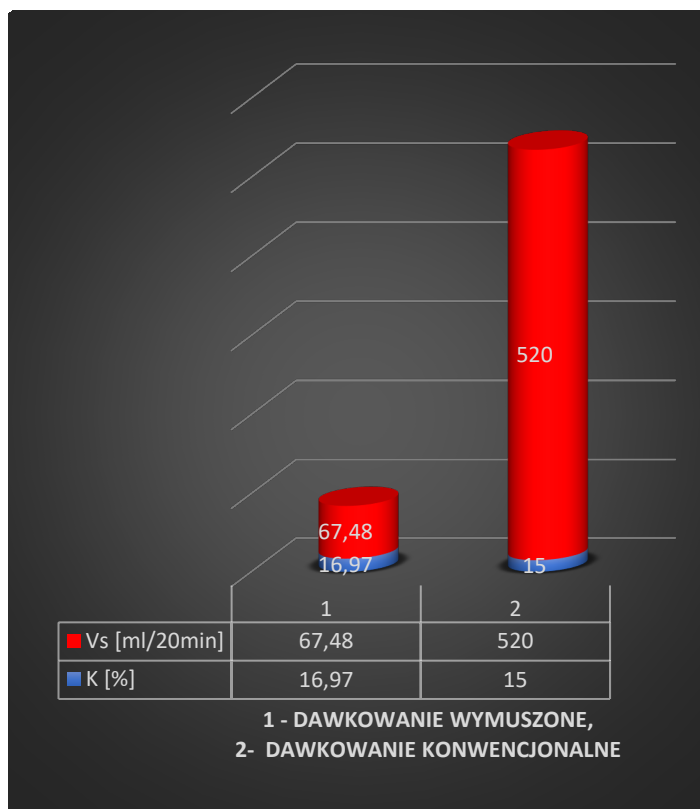
$U_{mtmax} = 0,154$  g - dla czynników wejściowych:  $K=15\%$ ,  $V_s = 70$  ml/20 min],  $L_e= 22,9$  mPa·s.

Na tej podstawie można stwierdzić, że:

1.  $U_{mtmax} = 0,154$  g, czyli spadek o 17,8 %,
2. Oszczędność dawki  $V_s$  o 22,2%,
3. Należy zmienić lepkość zawiesiny (z 29,5mPa·s na 22,9mPa·s).

### 7.6. Wpływ sposobu dawkowania na zużycie zawiesiny ścierniej

Przeprowadzając badania wpływu wymuszonego systemu dozowania i nanoszenia zawiesiny ścierniej na efekty docierania, to jest ubytek liniowy i masowy, dokonano również pomiarów zużycia substancji ścierniej. Wykonując badania wstępne stwierdzono, że zużycie zawiesiny w konwencjonalnym systemie dawkowania jest na poziomie 520 ml/20 min. Porównując wyniki konwencjonalnego systemu dozowania z wymuszonym układem nanoszenia (rys. 7.28) stwierdzono, że układ wymuszony pozwolił ograniczyć zużycie do poziomu 67,48 ml/20 min.



Rys. 7.28. Zużycie zawiesiny ścierniej  $V_s$  podczas konwencjonalnego i wymuszonego dawkowania w docieraniu jednotarczowym (K – udział wagowy ścierniwa w zawieszynie)

Jest ono około siedem razy mniejsze, niż przy zastosowaniu systemu konwencjonalnego. Zastosowanie takiego oszczędnego systemu dawkowania wpływa korzystnie, co oczywiste, na ochronę środowiska, gdyż generuje mniej szkodliwych odpadów (szlamu), na które składają się, oprócz produktów zużycia tarczy docierającej i obrabianego materiału, składniki wykorzystywanej w obróbce zawiesiny ścierniej (składniki płynne i mikroziarna ścierna).



## 8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

W wyniku badań eksperymentalnych zweryfikowane zostały postawione hipotezy dotyczące wpływu parametrów dawkowania zawiesiny ścierniej na efekty docierania jednotarczowego powierzchni płaskich. Uzyskane wyniki badań potwierdziły, że zaprojektowany system wymuszonego mieszania, dozowania i nanoszenia zawiesiny ścierniej w strefę obróbki pozwala na uzyskanie wymaganych efektów docierania elementów ceramicznych  $Al_2O_3$ , przy znacząco mniejszym wydatku zawiesiny ścierniej (w porównaniu z konwencjonalnym systemem dozowania).

W sekwencji badań zasadniczych opracowano model matematyczny wpływu podstawowych (badanych) parametrów dawkowania wymuszonego na ubytek liniowy docieranych elementów  $U_l = f(K, V_s, L_e)$ . Zbudowano wykresy powierzchniowe i warstwicowe ilustrujące wpływ badanych czynników na wyniki analizowanego procesu, ułatwiające optymalizację parametrów dawkowania.

Przeprowadzono także badania, które pozwoliły na określenie funkcji wpływu badanych parametrów dawkowania na wybrane parametry chropowatości powierzchni:

- $R_v = f(K, V_s, L_e)$ ,
- $R_p = f(K, V_s, L_e)$ ,
- $R_z = f(K, V_s, L_e)$ .

Dokonano również analizy wpływu warunków wymuszonego dawkowania zawiesiny ścierniej na korelacje podstawowych parametrów chropowatości powierzchni po docieraniu ceramiki  $Al_2O_3$ :

- $R_a, R_q, R_t, R_v, R_z, R_p, R_{ku}, R_{sm}, R_{sk}$ ,
- $S_a, S_q, S_p, S_v, S_{sk}, S_{ku}, S_z$ ,
- $S_k, S_{pk}, S_{vk}, S_{mr1}, S_{mr2}$ ,
- $V_{vv}, V_{vc}, V_{mp}, V_{mc}$ .

W przeprowadzonych badaniach uzupełniających określono wpływ czynników kinematycznych i technologicznych, które mają istotny wpływ na przebieg i wyniki docierania jednotarczowego powierzchni płaskich, a w szczególności przeanalizowano:

- wpływ rozmieszczenia elementów docieranych w separatorze na kinematykę docierania,
- wpływ prędkości obrotowej docieraka i separatora na prognozowane zużycie powierzchni roboczej tarczy docierającej,
- wpływ lepkości mieszaniny składników płynnych w zawieszynie ścierniej na kinematykę docierania jednotarczowego,
- losowe rozmieszczenie elementów docieranych w separatorze i jego wpływ na kinematykę docierania,
- wpływ badanych (podstawowych) warunków dawkowania wymuszonego zawiesiny ścierniej na ubytek masowy obrabianych elementów ceramicznych.

Wyniki przeprowadzonych badań upoważniają do wysunięcia wniosków o charakterze teoretyczno-poznawczym, użytecznym, jak również na wskazanie kierunków dalszych prac nad tematyką rozprawy.

## 8.1. Wnioski poznawcze

Wyniki badań eksperymentalnych i analiz umożliwiają także na sformułowanie wniosków szczegółowych o charakterze teoretyczno-poznawczym, a w szczególności że:

- 1 W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, iż lepkość mieszaniny nośników płynnych w zawiesinie ścierniej ma statystycznie istotny wpływ na efektywność docierania badanych elementów ceramicznych.
- 2 Lepkość nośnika ziaren ściernych w zawiesinie ma znaczący wpływ na stosunek prędkości obrotowej separatora przedmiotowego (pierścienia prowadzącego) i tarczy docierającej, czyli na współczynnik  $k_1 = n_s/n_t$ , co z kolei ma wpływ na nierównomierność kształtowego zużycia tarczy.
- 3 Badane parametry dawkowania zawiesiny ( $K$ ,  $V_s$ ,  $L_e$ ) mają istotny wpływ na ubytek liniowy docieranych próbek ceramicznych.
- 4 Opracowany innowacyjny system wymuszonego dawkowania i nanoszenia zawiesiny ścierniej umożliwia całkowite pokrycie powierzchni roboczej tarczy docierającej w czasie jednego jej obrotu.
- 5 Analizując wpływ podstawowych warunków wymuszonego dawkowania zawiesiny ścierniej ( $K$ ,  $V_s$ ,  $L_e$ ) na wybrane parametry chropowatości powierzchni ceramiki  $Al_2O_3$  to jest  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_t$ ,  $R_v$ ,  $R_z$ ,  $R_p$ ,  $R_{ku}$ ,  $R_{sm}$  oraz  $R_{sk}$  podczas docierania stwierdzono że:
  - istotne statystycznie korelacje czynników badanych zachodzą dla następujących par: ( $K$ ,  $R_{sk}$ ) - korelacja  $r = 0,49$ ; ( $V_s$ ,  $R_t$ ), - korelacja  $r = 0,51$ ; ( $V_s$ ,  $R_p$ ) - korelacja  $r = 0,57$ ; ( $L_e$ ,  $R_{sm}$ ) - korelacja  $r = -0,61$ .
- 6 Oceniając wpływu badanych warunków wymuszonego dawkowania zawiesiny na wybrane parametry struktury geometrycznej chropowatości w układzie 3D ( $S_a$ ,  $S_q$ ,  $S_p$ ,  $S_v$ ,  $S_{sk}$ ,  $S_{ku}$ ,  $S_z$ ) stwierdzono, że:
  - nie mają istotnego statystycznie wpływu,
  - statystycznie istotne zaś zachodzą korelacje pomiędzy następującymi parami parametrów chropowatości powierzchni: ( $S_a$ ,  $S_q$ ), - korelacja  $r = 0,99$ ; ( $S_p$ ,  $S_z$ ) - korelacja  $r = 0,82$ ; ( $S_{sk}$ ,  $S_{ku}$ ) - korelacja  $r = 0,75$ ; ( $S_{ku}$ ,  $S_p$ ) - korelacja  $r = 0,76$ .
- 7 Analizując wpływ warunków wymuszonego dawkowania zawiesiny ścierniej ( $K$ ,  $V_s$ ,  $L_e$ ) na parametry powierzchniowe amplitudowe struktury geometrycznej powierzchni wyznaczone dla układu 3D ( $S_k$ ,  $S_{pk}$ ,  $S_{vk}$ ,  $S_{mr1}$ ,  $S_{mr2}$ ) stwierdzono, że:
  - statystycznie istotny wpływ parametrów wejściowych zachodzi jedynie dla ( $K$ ,  $S_{mr1}$ ) - korelacja  $r = 0,48$  oraz ( $K$ ,  $S_{mr2}$ ) - korelacja  $r = 0,46$ .

- Istotne statystycznie korelacje parametrów chropowatości zachodzą dla par:(Smr1, Smr2 ), korelacja  $r = 0,90$ , (Sk, Spk), korelacja  $r = 0,76$ , (Sk, Svk) korelacja  $r = 0,71$ .
- 8 Przeprowadzając ocenę wpływu warunków wymuszonego dawkowania zawiesiny na wybrane parametry objętościowe struktury geometrycznej powierzchni wyznaczone dla powierzchni 3D (Vvv, Vvc, Vmp, Vmc) stwierdzono, że:
- nie mają one istotnego statystycznie wpływu,
  - statystycznie istotne korelacje zachodzą pomiędzy następującymi parami parametrów: (Vmc, Vvv) - korelacja  $r = 0,85$ ; (Vmc, Vvc) - korelacja  $r = 0,96$ ; (Vmc, Vmp) - korelacja  $r = 0,75$ ; (Vmp, Vvc) - korelacja  $r = 0,85$ ; (Vmp, Vvv) - korelacja  $r = 0,44$ .

## 8.2. Wnioski o charakterze użytkowym

1. Sposób przygotowania zawiesiny ścierniej oraz zapewnienie ciągłego mieszania podczas docierania elementów płaskich ma istotny wpływ na przebieg i efektywność procesu obróbki. Brak ciągłego mieszania w zasobniku zawiesiny ścierniej skutkuje nadmierną sedymentacją ziaren ściernych i zakłóca skład dawkowanej zawiesiny w strefę obróbki.
2. Opracowany innowacyjny system dawkowania umożliwia nanoszenie zawiesin o różnej lepkości nośnika i ziarnistości ścierniwa w nośniku i pozwoli na znaczące zmniejszenie zużycia zawiesiny ścierniej w porównaniu z konwencjonalnym (ciągłym) systemem dawkowania przyczyni się do zmniejszenia kosztów docierania powierzchni płaskich oraz zmniejsza ilości szkodliwych odpadów.
3. Wykonane badania symulacyjne wykazały, przy założeniu równości wartości prędkości obrotowej separatora i tarczy docierającej  $n_s = n_t$ , że elementy o przekroju kołowym (umieszczone w separatorze w sposób losowy), przebywają tę samą drogę ze stałą prędkością. Jest to sytuacja bardzo niekorzystna ze względu na nierównomierność zużycia tarczy, a dopuszczalna ze względu na przebieg procesu docierania elementów. Im różnica pomiędzy prędkościami  $n_s$  i  $n_t$  będzie większa, tym większa będzie różnica długości trajektorii poszczególnych docieranych elementów (zwiększenie nierównomierności prędkości docierania).
4. Opracowany program do analizy kinematyki docierania jednotarczowego umożliwił wykazanie, że jeśli prędkości obrotowe separatora i tarczy docierającej są różne a stosunek  $n_s/n_t$  jest liczbą wymierną, to trajektorie przedmiotów zamykają się po określonym czasie ruchu. Czas cyklu ruchu zależy od tego, czy prędkość obrotowa separatora i docieraka mają wspólne dzielniki.
5. Z przeprowadzonych analiz wynika, iż planując proces docierania należy również brać pod uwagę korelacje występujące pomiędzy parametrami chropowatości poszczególnych docieranych elementów ceramicznych.

### **8.3. Proponowane kierunki dalszych badań**

Po wykonaniu badań i analiz własnych, ze względu na złożoność procesu dawkowania ścierniwa w docieraniu powierzchni płaskich, można również zaproponować kierunki dalszych prac, a w szczególności:

1. Przeprowadzenie badań skuteczności dozowania w sposób wymuszony zawiesin ściernych, które zawierają nanocząsteczki i nie mają skłonności do sedymentacji.
2. Rozbudowanie układu o większą liczbę punktów nanoszenia zawiesiny ścierniej na docierak, co ma znaczenie w przypadku docierarek jednotarczowych o dużej średnicy narzędzia.
3. Opracowanie systemu, który monitorowałby wysokość naniesionej warstwy czynnika docierającego na powierzchni roboczej tarczy docierającej.
4. Opracowanie systemu, który zapewni stałą temperaturę dozowanej zawiesiny ścierniej i docieraka.
5. Wykonanie badań wpływu pozostałych warunków technologicznych docierania na efektywność i jakość obróbki oraz weryfikację eksperymentalną nierównomierności zużycia tarczy docierającej w wyniku zmian prędkości obrotowej separatorów i rozmieszczenia w nich elementów docieranych.

## Literatura

- [1] Ackoff R. 1960. Decyzje optymalne w badaniach stosowanych. PWN,
- [2] Ahrans, H. 1970. Analiza wariancji. PWN,
- [3] Barylski, A. 1990. Docierarki do płaszczyzn. Cz. III. Docierarki dwutarczowe. *Mechanik* (3), 75–80.
- [4] Barylski, A. 1992. Podstawy docierania jednotarczowego powierzchni płaskich. *Zesz. Nauk. Politech. Gdań. Mech.* (67)
- [5] Barylski, A. Deja, M. Stolarski, T. A. 1997. Computer simulation of kinematic systems of lapping machines. *Trans. Eng. Sci.* (17), 409–417.
- [6] Barylski, A. Deja, M. 1998. Computer Aided Quality Control of Plane Lapping. *J. Balcan Tribol. Assoc.* 4(1), 1–7.
- [7] Barylski, A. 1998. Teoretyczna analiza zużycia docieraka docierarki jednotarczowej. *Technologii Budowy Maszyn*,
- [8] Barylski, A. 2013. *Obróbka powierzchni płaskich na docierarkach*. Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej,
- [9] Barylski, A. Piotrowski, N. 2017. Optimization of kinematic parameters in single-sided lapping. *Mechanik* 90, 879–881.
- [10] Barylski, A. Gniot, M. 2018. Effect of the abrasive slurry dispensed in a manner forced for the performance of single-disk lapping of ceramic elements. *Mechanik* 91(8–9), 734–736.
- [11] Barylski, A. 2020. Analysis of flat compensatpr lapping in an assembly process. *Technol. Autom. Montażu* (2), 41–45.
- [12] Barylski, A. Deja, M. Wear of a Tool in Double-Disk Lapping of Silicon Wafers, URL: [https://www.researchgate.net/publication/267601927\\_Wear\\_of\\_a\\_Tool\\_in\\_Double-Disk\\_Lapping\\_of\\_Silicon\\_Wafers](https://www.researchgate.net/publication/267601927_Wear_of_a_Tool_in_Double-Disk_Lapping_of_Silicon_Wafers), [Dostęp: 27-02-2021]
- [13] Barylski, A. Analiza kinematyki jednotarczowych docierarek laboratoryjnych - Publikacja - MOST Wiedzy, URL: <https://mostwiedzy.pl/pl/publication/analiza-kinematyki-jednotarczowych-docierarek-laboratoryjnych,147653-1>, [Dostęp: 28-02-2021]
- [14] Barylski, A. Bakoń, A. Preparaty na bazie nano- i mikrodiamentów do operacji docierania i polerowania. - Publikacja - MOST Wiedzy, URL: <https://mostwiedzy.pl/pl/publication/preparaty-na-bazie-nano-i-mikrodiamentow-do-operacji-docierania-i-polerowania,128942-1>, [Dostęp: 28-02-2021]
- [15] Barylski, A. Technological Problems in Lapping on Flat Surfaces of Ceramic Parts, URL: [https://www.researchgate.net/publication/271961619\\_Technological\\_Problems\\_in\\_Lapping\\_on\\_Flat\\_Surfaces\\_of\\_Ceramic\\_Parts](https://www.researchgate.net/publication/271961619_Technological_Problems_in_Lapping_on_Flat_Surfaces_of_Ceramic_Parts), [Dostęp: 28-02-2021]
- [16] Barylski, A. Deja, M. Shaping of the workpiece surface in single-disc lapping - Publikacja - MOST Wiedzy, URL: <https://mostwiedzy.pl/pl/publication/shaping-of-the-workpiece-surface-in-single-disc-lapping,126472-1>, [Dostęp: 01-03-2021]
- [17] Barylski, A. Badania wpływu koncentracji ścierniwa i intensywności dawkowania zawiesiny na efekty docierania jednotarczowego - Publikacja - MOST Wiedzy, URL: <https://mostwiedzy.pl/pl/publication/badania-wplywu-koncentracji-scierniwa-i-intensywnosci-dawkowania-zawiesiny-na-efekty-docierania-jedn,133029-1>, [Dostęp: 02-03-2021]
- [18] Barylski, A. Analiza temperatury docierarki jednotarczowej - Autobusy : technika, eksploatacja, systemy transportowe - Tom R. 19, nr 12 (2018) - BazTech - Yadda, URL: <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-11724b23-4de4-42fa-9f21-3e99e248390e>, [Dostęp: 02-03-2021]

- [19] Belkhir, N. Bouzid, D. Herold, V. 2009. Surface behavior during abrasive grain action in the glass lapping proces. *Appl. Surf.* (255(18))
- [20] Box, G. E. P. Wilson, K. B. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions on JSTOR, URL: <https://www.jstor.org/stable/2983966?seq=1>, [Dostęp: 01-03-2021]
- [21] Chang, Y. P. Hashimura, M. Dornfeld, D. A. 2000. An Investigation of Material Removal Mechanisms in Lapping with Grain Size Transition. *J. Manuf. Sci. Eng.* 122(3), 413–419.
- [22] Cong, W. Zhang, P. Pei, Z. J. 2009. Experimental Investigations on Material Removal Rate and Surface Roughness in Lapping of Substrate Wafers: A Literature Review. *Key Eng. Mater. - KEY ENG MAT* 404, 23–31.
- [23] Degner, W. Böttger, H. C. 1979. *Handbuch Feinbearbeitung*. Hanser Verlag,
- [24] Deja, M. List, M. Lichtschlag, L. Uhlmann, E. 2019. Thermal and technological aspects of double face grinding of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic materials. *Ceram. Int.* 45(15), 19489–19495.
- [25] Deshpanded, L. S. Raman, S. Sunanta, O. Agbaraji, C. 2008. Observations in the flat lapping of stainless steel and bronze. *Univ. Okla. USA* (265), (1-2).
- [26] Dobrzański, L. A. Pakuła, D. Staszuk, M. Dobrzańska-Danikiewicz, A. D. 2015. 2. Ogólna charakterystyka materiałów na narzędzia skrawające. (1), 61.
- [27] Evans, C. J. Paul, E. Dornfeld, D. Lucca, D. A. Byrne, G. Tricard, M. Klocke, F. Dambon, O. Mullany, B. A. 2003. Material Removal Mechanisms in Lapping and Polishing. *CIRP Ann.* 52(2), 611–633.
- [28] Federov, V. V. 1971. *Teoria optymalnego eksperymentu*. Nauka,
- [29] Feld, M. Barylski, A. 1980. Założenia do modelu pracy mikroziaren ściernych w procesie docierania. *Prace Inst. Bud. Masz. WSI, Koszalin*,
- [30] Feld, M. Barylski, A. 1982. Analiza aktualnego stanu docierania w przemyśle krajowym. *Mechanik* (1), 41–42.
- [31] Feld, M. Barylski, A. 1982. *Obróbka wykańczająca docieraniem powierzchni czołowych elementów miedzianych dla uzyskania wymaganych warunków płaskości i chropowatości powierzchni maszyn*. Instytut Technologii i Budowy Maszyn,
- [32] Feld, M. Barylski, A. 1990. Läppen ebener Flächen mit ZweimetallScheiben. *Werkstatt Betr.* 123(12), 933–936.
- [33] Finkelburg, H. 1951. *Läppen*. Berl. Springer-Verl.
- [34] Fletcher, T. Gobena, F. Romero, V. 2004. Diamond Fixed Abrasive Lapping of Brittle Substrates. [W:] *Frontiers in Optics 2004/Laser Science XXII/Diffractive Optics and Micro-Optics/Optical Fabrication and Testing (2004)*, Paper OMC1, Optical Society of America, OMC1.
- [35] Gniot, M. Barylski, A. 2016. Hydrodynamic dosage abrasive slurry in reaching single disk lapping of flat surfaces. *Mechanik* (8–9), 1110–1111.
- [36] Gniot, M. Barylski, A. Migawa, K. 2017. Parameters of forced abrasive slurry in lapping flat surfaces. *Mechanik* 90(10), 894–896.
- [37] Gniot, M. Barylski, A. 2019. Lapping flat surfaces with forced dosing of abrasive suspension. *MATEC Web Conf.* 302, 01005.
- [38] Grabski, T. Wielowymiarowa analiza porównawcza w badaniach dynamiki zjawisk ekonomicznych - *Zeszyty Naukowe / Akademia Ekonomiczna w Krakowie. Seria Specjalna, Monografie - Numer nr 61 (1984) - BazEkon - Yadda*, URL: <http://bazekon.icm.edu.pl/bazekon/element/bwmeta1.element.ekon-element-000171211101>, [Dostęp: 01-03-2021]
- [39] Grösel, H. 1954. *Läppen*. Stuttgart: Das Industrieblatt. Stuttg. Industrieblatt

- [40] Grünwald, F. Schilling, G. 1979. Werkstoffabtrag und Rauheit beim Planlappen metallischer Werkstoffe. Feingerätetechnik,
- [41] Helwig, Z. 1972. Elementy rachunku ekonomicznego. PWN,
- [42] Hu, Z. Fang, C. Deng, W. Zhao, Z. Lin, Y. Xu, X. 2017. Speed ratio optimization for ceramic lapping with fixed diamond pellets. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 90(9), 3159–3169.
- [43] Huang, S. Li, X. Yu, B. Jiang, Z. Huang, H. 2020. Machining characteristics and mechanism of GO/SiO<sub>2</sub> nanoslurries in fixed abrasive lapping. *J. Mater. Process. Technol.* 277, 116444.
- [44] Jianfeng Luo Dornfeld, D. A. 2003. Effects of abrasive size distribution in chemical mechanical planarization: modeling and verification. *IEEE Trans. Semicond. Manuf.* 16(3), 469–476.
- [45] Kacalak, W. Królikowski, T. Szafraniec, F. Kunc, R. Remelska, H. 2010. Metodyka doboru parametrów mikro- i nonoszlifowania dla określonych wymagań dotyczących chropowatości powierzchni. 413–427.
- [46] Kacprzyński, B. 1974. Planowanie eksperymentów. PWN,
- [47] Khanov, A. Muratov, K. Gashev, E. 2016. Investigation of the Abrasive Lapping Process of Oxide Ceramics. *Orient. J. Chem.* 32, 391–398.
- [48] Kiefer, J. Match, A. 1961. Statistics.
- [49] Kim, H.-M. Park, G.-H. Seo, Y.-G. Moon, D.-J. Cho, B.-J. Park, J.-G. 2015. Comparison between sapphire lapping processes using 2-body and 3-body modes as a function of diamond abrasive size. *Wear* 332–333, 794–799.
- [50] Klocke, F. 2009. Manufacturing Processes 2: Grinding, Honing, Lapping. Springer – Verl. Berl. Heidelb.
- [51] Kumar, M. R. P. Arun, B. S. Babu, R. A. 2013. Optimization of Process Parameters In Lapping of Stainless Steel. *Int. J. Eng. Res.* 2(9), 8.
- [52] Lai, Z. Hu, Z. Fang, C. Xiao, Z. Hsieh, P. Chen, M. 2019. Study on the Wear Characteristics of a Lapping Wheel in Double-Sided Lapping Based on the Trajectory Distribution. *IEEE Trans. Semicond. Manuf.* PP, 1–1.
- [53] Lai, Z. Hu, Z. Fang, C. Yu, Y. xiao, Z. Hsieh, P. Chen, M. 2020. Research on factors affecting wear uniformity of the wheels in the double-sided lapping. *J. Manuf. Process.* 50, 653–662.
- [54] Lee, T. Jeong, H. Lee, S. Kim, D. Kim, H. 2020. Effect of the Lapping Platen Groove Density on the Characteristics of Microabrasive-Based Lapping. *Micromachines* 11, 775.
- [55] Li, H. N. Axinte, D. 2016. Textured grinding wheels: A review. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 109, 8–35.
- [56] Lin, B. Jiang, X.-M. Cao, Z.-C. Huang, T. Li, K. 2020. Theoretical and experimental analysis of material removal and surface generation in novel fixed abrasive lapping of optical surface. *J. Mater. Process. Technol.* 279, 116570.
- [57] Lin, Y. X. Song, C. Shi, F. Li, S. Y. 2017. Modeling and simulation for effective removal rate of damage. [W:] *Pacific Rim Laser Damage 2017: Optical Materials for High-Power Lasers*, International Society for Optics and Photonics, 103392B.
- [58] Marciniak, M. Stefko, A. 1980. Racjonalny dobór koncentracji ziaren w zawieszinie ścierniej przy docieraniu płaszczyzn. *Mechanik* (8)
- [59] Marinescu, I. D. Rowe, W. B. 2004. *Tribology of Abrasive Machining Processes*. Processes, William Andrew Publishing Ltd,
- [60] Marinescu, I. D. Ulmann, E. Doi, T. 2007. *Handbook of Lapping and Polishing*. Taylor & Francis Publishing House,
- [61] Misra, A. Finnie, I. 1987. A classification of three-body abrasive wear and design of new teste. (60), 111–121.



- [62] Molenda, J. Barylski, A. 2012. Al203 sealing elements lapping. *J. KONES* 19, 311–318.
- [63] Molenda, J. Charchalis, A. Wpływ twardości materiału obrabianego na jakość powierzchni po docieraniu - *Logistyka - Numer nr 3, CD 1 (2015) - Biblioteka Nauki - Yadda*, URL: <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.ekon-element-000171420490>, [Dostęp: 28-02-2021]
- [64] Nalimov, V. V. Czernowa, N. A. 1967. *Statystyczne metody planowania doświadczeń eksperymentalnych*. WNT,
- [65] Nalimov, V. V. 1971. *Teoria eksperymentu*. Nauka,
- [66] Nan-nan, Z. Sheng-bin, Z. Hong-jun, W. Xiu-juan, W. Jun, X. Yong-wei, Z. 2019. Research on the factors of diamond fixed-abrasive lapping pad self-condition. *Ferroelectrics* 549, 137–144.
- [67] Ozturk, S. Aydin, L. Kucukdogan, N. Celik, E. 2018. Optimization of lapping processes of silicon wafer for photovoltaic applications. *Sol. Energy* 164, 1–11.
- [68] Pawlus, P. Reizer, R. Wieczorowski, M. Krolczyk, G. 2020. Material ratio curve as information on the state of surface topography—A review. *Precis. Eng.* 65, 240–258.
- [69] Piłatowska, M. 2006. *Repetitorium ze statystyki*. PWN, ISBN: 978-83-01-150440-2.
- [70] Polański, Z. 1977. *Metody optymalizacji w technologii maszyn*. PWN,
- [71] Ramadass, R. Sambasivam, S. 2018. Process Variables Optimization in Lapping of EN8 Material Using Taguchi Method. *Eng. Math.* 2, 50–55.
- [72] Rosczyk, B. Burkam, E. Titov, A. Onyenemezu, C. Benea, I. 2015. The effect of diamond powder characteristics on lapping of sintered silicon carbide. 963306.
- [73] Segal, S. Gurfil, P. 2009. Effect of Kinematic RotationTranslation Coupling on Relative Spacecraft Translational Dynamics. *J. Guid. Control Dyn. - J GUID CONTROL DYNAM* 32, 1045–1050.
- [74] Song, C. Shi, F. Zhang, W. Lin, Z. Lin, Y. 2020. High-Efficiency and Low-Damage Lapping Process Optimization. *Materials* 13(3)
- [75] Stachowiak, G. W. Batchelor, A. W. *Engineering Tribology - 3rd Edition*, URL: <https://www.elsevier.com/books/engineering-tribology/stachowiak/978-0-7506-7836-0>, [Dostęp: 28-02-2021]
- [76] Szulc, S. Stefko, A. 1976. *Obróbka powierzchniowa części maszyn*. WNT,
- [77] Uhlmann, E. Ardelt, T. G. 1999. Influence of kinematics on the face grinding process on lapping machines. *Ann CIRP* (49(1)), 281–284.
- [78] Wan, L. Dai, P. Li, L. Deng, Z. Hu, Y. 2019. Investigation on ultra-precision lapping of A-plane and C-plane sapphires. *Ceram. Int.* 45(9), 12106–12112.
- [79] Wang, J. Li, Z. Gao, H. Shu, D. Xiao, P. 2016. Process Optimization of Lapping Sapphire Substrate with Fixed Diamond Abrasive Pad. *Key Eng. Mater.* 693, 1090–1097.
- [80] Wang, J. B. Li, Z. Zhu, Y. W. Jiang, B. C. Shi, P. C. 2018. 2018, *Key Engineering Materials*. Effect of Abrasive Particle Size on Lapping of Sapphire Wafer by Fixed Abrasive Pad, URL: <https://www.scientific.net/KEM.764.106>, [Dostęp: 08-11-2020]
- [81] Wang, W. Yao, P. Wang, J. Huang, C. Zhu, H. Zou, B. Liu, H. Yan, J. 2016. Crack-free ductile mode grinding of fused silica under controllable dry grinding conditions. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 109, 126–136.
- [82] Wen, D. Qi, H. Ma, L. Lu, C. Li, G. 2015. Kinematic and trajectory analysis of the fixed abrasive lapping process in machining of interdigitated micro-channels on bipolar plates. *Precis. Eng.* 44

- [83] Xu, C.-Q. Fang, C.-F. Zhao, Z.-X. 2020. Influence of pellet shape and size on the pattern performance of textured fixed-abrasive pads in single-sided lapping. *J. Ind. Prod. Eng.* 37, 1–10.
- [84] Yang, L. Wu, K. Lai, Y. 2018. Study on Precision Polishing of Alumina Ceramics. *Mater. Sci. Forum* 926, 64–69.
- [85] Yao, Z. Gu, W. Li, K. 2012. Relationship between surface roughness and subsurface crack depth during grinding of optical glass BK7. *J. Mater. Process. Technol.* 212(4), 969–976.
- [86] Zaleski, K. Matuszak, J. Politechnika Lubelska 2016. Podstawy obróbki ubytkowej. Politechnika Lubelska, ISBN: 978-83-7947-224-6.
- [87] Zhou, Z. Wen, D. Zhang, K. Lu, C. Yuan, J. 2008. Experimental investigation on the effect of abrasive grain size on the lapping uniformity of sapphire wafer. 19, 2549–2552.
- [88] Zhu, N. Zhang, S. Zhu, Y. Ling, S. Wang, Z. Li, J. 2017. Effects of nano mechanical properties on LiNbO<sub>3</sub> fixed abrasive lapping. *Integr. Ferroelectr.* 182(1), 119–126.
- [89] Liu J.H., Pei Z.J., Fisher G.R.: Grinding wheels for manufacturing of silicon wafers: A literature review, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47 (1), 2007, s. 1-13.
- [90] Liu H-K., Chen C-C. A, Chen W-C.: Diamond lapping of sapphire wafer with addition of graphene in slurry, *Procedia Engineering*, 184, 2017, s.156-162.
- [91] Zong W.J., Li D., Cheng K., Sun T., Wang H.X., Liang Y.C.: The material removal mechanism in mechanical lapping of diamond cutting tools, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(7-8), 2005, s. 783-788.
- [92] Materials | Special Issue : “3D” Parametric and Nonparametric Description of Surface Topography in Manufacturing Processes, URL: [https://www.mdpi.com/journal/materials/special\\_issues/surf\\_topog\\_manuf](https://www.mdpi.com/journal/materials/special_issues/surf_topog_manuf), [Dostęp: 28-02-2021]
- [93] Lapping Machines | Diamond Compound & Ultrasonic Cleaning Machines - Kemet, URL: <https://www.kemet.co.uk/>, [Dostęp: 28-02-2021]
- [94] Leader in Precision Machine Manufacturing - Satisfying Most Industries, URL: <https://www.stahlusa.com/>, [Dostęp: 28-02-2021]
- [95] Węglik Krzemu | FRAM, URL: <http://fram.net.pl/index.php/proszki-scierne/877-2/>, [Dostęp: 28-02-2021]
- [96] Consumables Lapping, Grinding and Polishing, URL: <https://www.peter-wolters.com/consumables/>, [Dostęp: 28-02-2021]
- [97] Narzędzia ścierne i szlifowanie - PDF Darmowe pobieranie, URL: <https://docplayer.pl/19181175-Cwiczenie-4-narzedzia-scierne-i-szlifowanie.html>, [Dostęp: 02-03-2021]
- [99] Internetowy Sklep Elektroniczny - AVT - Sklep z Elektroniką, URL: [https://sklep.avt.pl/?gclid=Cj0KCQiAvvKBBhCXARIsACTePW9CAIIPWhTJA4i\\_fbEwI3AtBWtYiNYzExlyCPdtj\\_EqxEMvo3bS8YaAmG4EALw\\_wcB](https://sklep.avt.pl/?gclid=Cj0KCQiAvvKBBhCXARIsACTePW9CAIIPWhTJA4i_fbEwI3AtBWtYiNYzExlyCPdtj_EqxEMvo3bS8YaAmG4EALw_wcB), [Dostęp: 02-03-2021]
- [100] Urządzenia i części dla myjni i przemysłu WASHSERVICE, URL: <https://sklep.washservice.pl/>, [Dostęp: 02-03-2021]
- [101] ORLEN OIL - Oleje samochodowe, PLATINUM, dobrać olej, URL: [https://www.orlenoil.pl/PL/NaszaOferta/Produkty/Strony/OLEJ\\_MASZYNOWY\\_L-AN\\_68.aspx](https://www.orlenoil.pl/PL/NaszaOferta/Produkty/Strony/OLEJ_MASZYNOWY_L-AN_68.aspx), [Dostęp: 02-03-2021]
- [102] Ceramika techniczna, specjalna i konstrukcyjna - producent - Ceramit, URL: <https://www.ceramit.pl/>, [Dostęp: 02-03-2021]

- [103] Aparatura - Zakład Biomateriałów, URL: <https://mech.pg.edu.pl/zaklad-biomaterialow/aparatura>, [Dostęp: 02-03-2021]
- [104] Lepkościomierze, wiskozymetry, URL: <http://www.labindex.pl/lepkosciomierze/>, [Dostęp: 02-03-2021]
- [105] Radwag Wagi Elektroniczne, URL: <https://radwag.com/pl/Wsparcie,1,101-101,MQ1HC>, [Dostęp: 02-03-2021]
- [106] Mitutoyo, Produkt: Mikrometr cyfrowy QuantuMike IP65, URL: [https://shop.mitutoyo.pl/web/mitutoyo/pl\\_PL/mitutoyo/01.02.01.001/Mikrometr%20cyfrowy%20QuantuMike%20IP65/\\$catalogue/mitutoyoData/PR/293-140-30/index.xhtml](https://shop.mitutoyo.pl/web/mitutoyo/pl_PL/mitutoyo/01.02.01.001/Mikrometr%20cyfrowy%20QuantuMike%20IP65/$catalogue/mitutoyoData/PR/293-140-30/index.xhtml), [Dostęp: 22-02-2021]
- [107] MarSurf CD series - Mahr Metroloji, URL: <https://www.mahr.de/tr/%C3%9Cr%C3%BCnler-ve-Hizmetler/%C3%9Cretim-Metrolojisi/%C3%9Cr%C3%BCnler/MarSurf---Kontur-%C3%96l%C3%A7me-%C3%9Cniteleri/MarSurf-CD-series/>, [Dostęp: 22-02-2021]
- [108] Industrial 3D Laser Scanning Confocal Microscope - VK-X Series | KEYENCE International Belgium, URL: <https://www.keyence.eu/ss/products/measure-sys/vk-x/>, [Dostęp: 02-03-2021]
- [109] StatSoft Polska – Lider w analityce danych, URL: <https://www.statsoft.pl/>, [Dostęp: 02-03-2021]

## Wykaz rysunków

Rys. 1.1. Czynniki wpływające na proces docierania .....	15
Rys. 1.2. Ogólny podział odmian docierania .....	16
Rys. 1.3. Ważniejsze czynniki dotyczące metalowego docieraka tarczowego .....	17
Rys. 1.4. Ważniejsze czynniki dotyczące przedmiotu obrabianego .....	18
Rys. 1.5. Ważniejsze czynniki dotyczące zawiesiny ścierniej .....	19
Rys. 1.6. Ważniejsze czynniki dotyczące warunków docierania i układu wymuszonego dawkowania.....	20
Rys. 2.1. Docieranie: a) dwuelementowe, b) trzejelementowe .....	21
Rys. 2.2. Położenie mikroziaren ściernych w strefie obróbki(1-mikroziarna wgniezione w powierzchnię docieraka, 2-mikroziarna toczące się, 3- mikroziarna wgniezione w docierak, nie oddziałujące na przedmiot obrabiany, 4-mikroziarna wgniezione w powierzchnię docieraną, 5-mikroziarna bierne, 6-mikroziarna wgniezione w powierzchnię docieraną).....	21
Rys. 2.3. Układ wykonawczy docierarki jednotarczowej [13].....	22
Rys. 2.4. Układ kinematyczny docierarki jednotarczowej: 1-docierak, 2-separator, 3-przedmiot obrabiany n – pierścieni prowadzących [13] .....	23
Rys. 2.5. Rowkowana tarcza docierająca o średnicy 3800 mm [93].....	27
Rys. 2.6. Pierścienie prowadzące o średnicy wewnętrznej 140 mm i 578 mm [93].....	27
Rys. 2.7. Docierarka jednotarczowa Kemet - model 300 L [93].....	29
Rys. 2.8. Docierarka firmy Kemet - model 72 [93].....	29
Rys. 2.9. Docierarka jednotarczowa typu FLM firmy STAHLI [94].....	30
Rys. 2.10. Docierarka dwutarczowa DLM 705 firmy STAHLI [94] .....	30
Rys. 2.11. Dawkowanie zawiesiny ścierniej dozowanej w sposób ręczny bezpośrednio z pojemnika .....	31
Rys. 2.12. Dozowanie past ściernych przy pomocy zintegrowanego z pojemnikiem aplikatora .....	32
Rys. 2.13. Dozowanie zawiesiny ścierniej przy pomocy aplikatora ręcznego .....	32
Rys. 2.14. Dawkowanie grawitacyjne zawiesiny ścierniej na powierzchnię roboczą docieraka .....	32
Rys. 2.15. Dozowanie zawiesiny ścierniej przy pomocy pompy podającej .....	33
Rys. 2.16. Wymuszony sposób zbrojenia docieraka .....	33
Rys. 2.17. Układ problematyki teorii eksperymentu (teoria badań doświadczalnych) z określeniem możliwych sprzężeń informacyjnych [70].....	35
Rys. 2.18. Podstawowe programy badań doświadczalnych [70].....	37
Rys. 2.19. Schemat kompozycji kodowych wartości czynników badanych: a) dla dowolnego czynnika $x_k$ , b) dla trzech czynników $x_1, x_2, x_3$ [70].....	44
Rys. 2.20. Wielkości charakteryzujące geometrię naroża ziarna ściernego: kąt naroża $\beta$ i promień zaokrąglenia $\delta$ na rysunku $\alpha$ i $\gamma$ oznaczają kąty przyłożenia i kąt natarcia [97].....	46
Rys. 2.21. Wymiary charakterystyczne ziarna ściernego [97] .....	46
Rys. 4.1 Ogólny schemat realizacji badań własnych.....	49
Rys. 5.1. Docierarka jednotarczowa z konwencjonalnym systemem dozowania zawiesiny ścierniej (1- obrabiarka Abralap 380, 2- element spustowy, 3- pompa).....	50
Rys. 5.2. Obrabiarka Abralap 380 z fabrycznie zamontowanym systemem dozowania (1-element spustu zawiesiny bez możliwości dokładnej regulacji strumienia, 2- ciągła struga zawiesiny podawana na docierak).....	50

Rys. 5.3. Pompa wraz ze zbiornikiem na zawieszinę ścierną (1-pompa, 2-zbiornik, 3-przewód zasilający, 4-przewód powrotny).....	51
Rys. 5.4. Osadzanie szlamu na wewnętrznej części obrabiarki Abralap 380 (1-odpływ substancji, 2-gęsty, osad przywarty do ścian rynny spustowej, 3- narzędzie do usuwania osadu).....	51
Rys. 5.5. Schemat wymuszonego systemu dozowania i nanoszenia zawiesziny ścierniej – koncepcja I.....	52
Rys. 5.6. Układ pierwszy wymuszonego systemu dawkowania i nanoszenia zawiesziny ścierniej (1 - zespół nanoszenia, 2 - rozpylacz, 3 - elektrozawór wraz potencjometrami, 4 - licznik zużycia substancji ścierniej, 5 - zawór odcinający).....	53
Rys. 5.7. Układ drugi wymuszonego systemu dawkowania i nanoszenia zawiesziny ścierniej (1 - zbiornik z zawiesziną ścierną, do którego dostarczane jest sprężone powietrze, 2 - hydrauliczny układ napędowy systemu mieszania, 3 - silnik napędu mieszadła wewnętrznego, 4 - zbiornik oleju hydraulicznego, 5 - rozdzielacz hydrauliczny).....	54
Rys. 5.8. Widok ogólny zmodyfikowanego układu wymuszonego dawkowania zawiesziny na tarczę docierającą.....	56
Rys. 5.9. Elementy wymuszonego układu dozowania (1-kompresor, 2-napęd wirnika mieszadła, 3-regulator ciśnienia wewnątrz zbiornika, 4-pokrywa zbiornika wraz z elementami mocującymi) .....	57
Rys. 5.10. Elektroniczny układ sterowania (1 - aluminiowa obudowa, 2 - wyświetlacz sterownika elektrozaworu 3 - wyświetlacz sterownika, 4 - wyłącznik główny zasilania układu sterowania, 5 - włącznik sterownika, 6 - włącznik sterownika, 7 - włącznik oświetlenia, 8 - włącznik elektrozaworu, 9 - włącznik elektrozaworu).....	57
Rys. 5.11. Programowany przeekaźnik czasowy (1 - zasilanie układu, 2 - układ wyjściowy NC, 3 - układ wyjściowy NO, 4 - cyfrowy, 5 - przycisk ustawienia czasu wyłączenia przeekaźnika, 6 - przycisk ustawienia czasu załączenia przeekaźnika) [99].....	58
Rys. 5.12. Zawór elektromagnetyczny 2/2 drożny bezpośredniego działania - MODEL:2V08-1/4, (1 - cewka elektrozaworu, 2 - aluminiowy korpus, 3 - podejście gwintowe 1/4", 4 - podejście elektryczne 230V) [100] .....	58
Rys. 5.13. Elektrozawór siłownika 5/2 MODEL: 4V210-1/4, (1 - cewka elektrozaworu 2 - aluminiowy korpus, 3 - złączka wtykowa prosta 1/4", 4 - podejście elektryczne 230V) [100].....	58
Rys. 5.14. Mini siłownik pneumatyczny CJPB 15x15 (1 – podejście sprężonego powietrza, 2 – mocowanie, 3 – tłoczysko siłownika [100].....	59
Rys. 5.15. Zasilacz 12V 5A [99].....	59
Rys. 5.16. Zintegrowany system dawkowania i nanoszenia zawiesziny (1 - Iglica dyszy natryskowej, 2 - regulator wielkości płamy nanoszonej na docierak, 3 - dysza rozpylająca z gniazdem, 4 - siłownik pneumatyczny sterujący iglicą, 5 - przyłącze doprowadzające sprężoną zawieszinę ścierną do systemu, 6 - zawór odcinający dopływ powietrza do rozpylacza, 7 - regulator powietrza dostarczanego do układu) .....	59
Rys. 5.17. Układ nanoszący substancję ścierną na docierak (1 - kształt płamy, którą tworzy nanoszona zawieszina ścierna, 2 - kierunek obrotu tarczy docierającej, 3 - nałożona warstwa zawiesziny) .....	60
Rys. 5.18. Eliptyczny kształt jaki przyjmuje strumień nakładanej warstwy, z możliwością umiejscowienia go w różnych miejscach docieraka (1 - położenie rozpylacza, 2, 3, 4 - różne położenia płamy i jej wielkość).....	60
Rys. 5.19. Kształt zbliżony do okręgu jaki przyjmuje strumień nakładanej warstwy (1-regulator kształtu płamy nanoszonej na tarczę docierającą, 2, 3, 4 - różne położenia płamy zawiesziny ścierniej).....	61
Rys. 5.20. Pokrycie powierzchni docieraka po zastosowaniu wymuszonego systemu przygotowania dozowania substancji ścierniej (1 - połyskująca powierzchnia po naniesieniu zawiesziny ścierniej).....	61

Rys. 5.21. Układ przygotowania zawiesiny ścierniej (1 - śruba mieszadła, 2 - smok, 3 - zasilanie substancją ścierną aparatu nanoszącego, 4 - pokrywa zbiornika, 5 - zawór bezpieczeństwa, 6 - regulator ciśnienia powietrza dostającego się do zbiornika mieszającego, 7 - manometr ciśnienia powietrza, 8 - regulator prędkości obrotowej mieszadła, 9 - przyłączy sprężonego powietrza).....	62
Rys. 5.22. Elementy docierane z ceramiki $Al_2O_3$ [102].....	68
Rys. 5.23. Użyty w badaniach węgiel krzemu 98C F400/17 w 200 krotnym powiększeniu roboczym, (mikroskop skaningowy JOEL JSM-7800F) [103].....	70
Rys. 5.24. Mikroskop skaningowy JOEL JSM-7800F [103].....	71
Rys. 5. 25. Wiskozymetr rotacyjny [104] .....	72
Rys. 5.26. Widok wagi laboratoryjnej Radwag Was 220/X [105].....	72
Rys. 5.27. Mikromierz cyfrowy [106].....	73
Rys. 5.28. Referencyjne stanowisko do pomiaru chropowatości i falistości MarSurf XR 20 z GD 120 firmy Mahr [107] .....	74
Rys. 5.29. Mikroskop laserowy (Keyence 3D Laser Scanning Confocal Microscope VK-X Series) [108].....	74
Rys. 5.30. Schemat porównawczy analizowanych programów badawczych [37] .....	77
Rys. 6.1. Schemat doświadczalnych badań laboratoryjnych [70].....	81
Rys. 6. 2. Położenie elementów docieranych w separatorze (R - odległość od środka docieraka do środka separatora, r - odległość środka separatora do środka przedmiotu obrabianego) .....	85
Rys. 6.3. Wykres powierzchniowy wartości ubytku liniowego próbek ceramicznych w funkcji czynników wejściowych K i $V_s$ .....	88
Rys. 6.4. Wykres powierzchniowy wartości ubytku liniowego próbek ceramicznych w funkcji czynników wejściowych $L_e$ i $V_s$ .....	88
Rys. 6.5. Wykres powierzchniowy wartości ubytku liniowego próbek ceramicznych w funkcji czynników wejściowych K i $L_e$ .....	88
Rys. 6.6. Profile wartości aproksymowanych i teoretyczny ubytek liniowy w funkcji czynników wejściowych $K_t$ , $V_{st}$ , i $L_{et}$ .....	92
Rys. 6.7. Wykres powierzchniowy i warstwiczny teoretycznej wartości ubytku liniowego użytecznego w funkcji czynników $K_t$ i $V_{st}$ .....	93
Rys. 6.8. Wykres powierzchniowy i warstwiczny teoretycznej wartości ubytku liniowego użytecznego w funkcji czynników $K_t$ i $L_{et}$ .....	93
Rys. 6.9 Wykres powierzchniowy i warstwiczny teoretycznej wartości ubytku liniowego użytecznego w funkcji czynników $V_{st}$ i $L_{et}$ .....	93
Rys. 6.10. Wykres powierzchniowy parametru chropowatości powierzchni $R_v$ w funkcji czynników wejściowych K i $V_s$ .....	96
Rys. 6.11. Wykres powierzchniowy parametru chropowatości powierzchni $R_v$ w funkcji czynników wejściowych $L_e$ i $V_s$ .....	97
Rys. 6.12. Wykres powierzchniowy parametru chropowatości powierzchni $R_v$ w funkcji czynników wejściowych K i $L_e$ .....	97
Rys. 6.13. Profile wartości aproksymowanych i użytecznych badanych czynników $K_t$ , $V_{st}$ i $L_{et}$ , mających wpływ na wartość parametru chropowatości powierzchni $R_v$ .....	101
Rys. 6.14. Wykres powierzchniowy przewidywanej wartości parametru chropowatości $R_v$ względem czynników K i $V_s$ .....	102
Rys. 6.15. Wykres powierzchniowy przewidywanej wartości parametru chropowatości $R_v$ względem czynników K i $L_e$ .....	102

Rys. 6.16. Wykres powierzchniowy przewidywanej wartości parametru chropowatości $R_v$ względem czynników $V_s$ i $L_e$ .....	102
Rys. 6.17. Wykres powierzchniowy wysokości parametru chropowatości powierzchni $R_p$ względem czynników wejściowych $K$ i $V_s$ .....	105
Rys. 6.18. Wykres powierzchniowy wysokości parametru chropowatości powierzchni $R_p$ względem czynników wejściowych $V_s$ i $K$ .....	106
Rys. 6.19. Wykres powierzchniowy wysokości parametru chropowatości powierzchni $R_p$ względem czynników wejściowych $K$ i $L_e$ .....	106
Rys. 6.20. Wykres powierzchniowy wysokości parametru chropowatości powierzchni $R_z$ względem czynników wejściowych $K$ i $V_s$ .....	109
Rys. 6.21. Wykres powierzchniowy wysokości parametru chropowatości powierzchni $R_z$ względem czynników wejściowych $K$ i $L_e$ .....	110
Rys. 6.22. Wykres powierzchniowy wysokości parametru chropowatości powierzchni $R_z$ względem czynników wejściowych $V_s$ i $L_e$ .....	110
Rys. 6.23. Profile wartości aproksymowanych i użytecznych badanych czynników $K$ , $V_s$ , $L_e$ , mających wpływ na wysokość parametru chropowatości powierzchni $R_z$ .....	114
Rys. 6.24. Wykres powierzchniowy przewidywanej wartości parametru chropowatości $R_z$ względem czynników $K$ i $V_s$ .....	115
Rys. 6.25. Wykres powierzchniowy przewidywanej wartości parametru chropowatości $R_z$ względem czynników $K$ i $L_e$ .....	115
Rys. 6.26. Wykres powierzchniowy przewidywanej wartości parametru chropowatości $R_z$ względem czynników $V_s$ i $L_e$ .....	115
Rys. 6.27. Widok powierzchni docieranej ceramiki $Al_2O_3$ : a) obraz z mikroskopu skaningowego, b) zdjęcie optyczne (warunki dawkowania zawiesiny ścierniej: $K = 15\%$ , $V_s = 10$ ml/20min, $L_e = 10,3$ mPa·s).....	117
Rys. 6.28. Profil 3D powierzchni próbki ceramicznej $Al_2O_3$ po docieraniu (warunki dawkowania zawiesiny ścierniej: $K = 15\%$ , $V_s = 10$ ml/20 min, $L_e = 10,3$ mPa·s).....	117
Rys. 6.29. Profile chropowatości powierzchni docieranej i krzywa rotacji materiału (warunki dawkowania zawiesiny ścierniej: $K = 15\%$ , $V_s = 10$ ml/20 min, $L_e = 10,3$ mPa·s).....	118
Rys. 6.30. Krzywa udziału materiałowego po docieraniu (warunki dawkowania: $K = 15\%$ , $V_s = 10$ ml/20 min, $L_e = 10,3$ mPa·s).....	118
Rys. 6.31. Widok powierzchni docieranej ceramiki $Al_2O_3$ : a) obraz z mikroskopu skaningowego, b) zdjęcie optyczne (warunki dawkowania zawiesiny ścierniej: $K = 15\%$ , $V_s = 90$ ml/20 min, $L_e = 23$ mPa·s).....	119
Rys. 6.32. Profil falistości 3D powierzchni ceramicznej $Al_2O_3$ po docieraniu (warunki dawkowania zawiesiny ścierniej: $K = 15\%$ , $V_s = 90$ ml/20 min, $L_e = 23$ mPa·s).....	119
Rys. 6.33. Profile chropowatości powierzchni i krzywa rotacji materiału (warunki dawkowania zawiesiny ścierniej: $K = 15\%$ , $V_s = 90$ ml/20 min, $L_e = 23$ mPa·s).....	119
Rys. 6.34. Krzywa udziału materiałowego po docieraniu (warunki dawkowania: $K = 15\%$ , $V_s = 90$ ml/20 min, $L_e = 23$ mPa·s).....	120
Rys. 6.35. Widok powierzchni docieranej ceramiki $Al_2O_3$ : a) obraz z mikroskopu skaningowego, b) zdjęcie optyczne (warunki dawkowania zawiesiny ścierniej: $K = 5\%$ , $V_s = 50$ ml/20 min, $L_e = 23$ mPa·s).....	120
Rys. 6.36. Profil falistości 3D powierzchni próbki ceramicznej $Al_2O_3$ (warunki dawkowania zawiesiny ścierniej: $K = 5\%$ , $V_s = 50$ ml/20 min, $L_e = 23$ mPa·s).....	121

Rys. 6.37. Profile chropowatości powierzchni i krzywa rotacji materiału (warunki dawkowania zawiesiny ścierniej: $K = 5 \%$ , $V_s = 50 \text{ ml}/20 \text{ min}$ , $L_e = 23 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ).....	121
Rys. 6.38. Krzywa udziału materiałowego po docieraniu (warunki dawkowania: $K = 5 \%$ , $V_s = 50 \text{ ml}/20 \text{ min}$ , $L_e = 23 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ) .....	121
Rys. 6.39. Widok powierzchni docieranej ceramiki $\text{Al}_2\text{O}_3$ : a) obraz z mikroskopu skaningowego, b) zdjęcie optyczne (warunki dawkowania: $K = 9\%$ , $V_s = 26 \text{ ml}/20 \text{ min}$ , $L_e = 16,5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ) .....	122
Rys. 6.40. Profil 3D powierzchni próbki ceramicznej $\text{Al}_2\text{O}_3$ docieraniu (warunki dawkowania zawiesiny ścierniej: $K = 9 \%$ , $V_s = 26 \text{ ml}/20 \text{ min}$ , $L_e = 16,5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ).....	122
Rys. 6.41. Profile chropowatości powierzchni i krzywa rotacji materiału (warunki dawkowania zawiesiny ścierniej: $K = 9 \%$ , $V_s = 26 \text{ ml}/20 \text{ min}$ , $L_e = 16,5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ).....	123
Rys. 6.42. Krzywa udziału materiałowego po docieraniu (warunki dawkowania: $K = 9 \%$ , $V_s = 26 \text{ ml}/20 \text{ min}$ , $L_e = 16,5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ).....	123
Rys. 6.43. Korelacja czynnika wejściowego $K$ i parametru chropowatości powierzchni $R_{sk}$ .....	126
Rys. 6.44. Korelacja czynnika wejściowego $K$ i parametru chropowatości powierzchni $R_t$ .....	126
Rys. 6.45. Korelacja czynnika wejściowego $K$ i parametru chropowatości powierzchni $R_p$ .....	126
Rys. 6.46. Korelacja czynnika wejściowego $K$ i parametru chropowatości powierzchni $R_{sm}$ .....	127
Rys. 6.47. Korelacja parametrów chropowatości powierzchni $S_a$ i $S_q$ .....	129
Rys. 6.48. Korelacja parametrów chropowatości powierzchni $S_p$ i $S_z$ .....	129
Rys. 6.49. Korelacja parametrów chropowatości powierzchni $S_{sk}$ i $S_{ku}$ .....	129
Rys. 6.50. Korelacja parametrów chropowatości powierzchni $S_{ku}$ i $S_p$ .....	130
Rys. 6.51. Korelacja czynnika wejściowego $K$ i parametru chropowatości powierzchni $S_{mr1}$ .....	132
Rys. 6.52. Korelacja czynnika wejściowego $K$ i parametru chropowatości powierzchni $S_{mr2}$ .....	132
Rys. 6.53. Korelacja parametrów chropowatości powierzchni $S_{mr1}$ i $S_{mr2}$ .....	132
Rys. 6.54. Korelacja parametrów chropowatości powierzchni $S_k$ i $S_{pk}$ .....	133
Rys. 6.55. Korelacja parametrów chropowatości powierzchni $S_k$ i $S_{vk}$ .....	133
Rys. 6.56. Korelacja parametrów chropowatości powierzchni $V_{mc}$ i $V_{vv}$ .....	135
Rys. 6.57. Korelacja parametrów chropowatości powierzchni $V_{mc}$ i $V_{vc}$ .....	136
Rys. 6.58. Korelacja parametrów chropowatości powierzchni $V_{mc}$ i $V_{mp}$ .....	136
Rys. 6.59. Korelacja parametrów chropowatości powierzchni $V_{mp}$ i $V_{vc}$ .....	136
Rys. 6.60. Korelacja parametrów chropowatości powierzchni $V_{mp}$ i $V_{vv}$ .....	137
Rys. 7.1. Sposób podziału powierzchni roboczej tarczy docierającej na pierścienie.....	139
Rys. 7.2. Sposób podziału powierzchni roboczej tarczy docierającej na osiem sektorów .....	139
Rys. 7.3. Trajektorie punktów centralnych powierzchni docieranej dla $k_1 = 0,783$ (czas symulacji 5 s) ...	141
Rys. 7.4. Liczba punktów środkowych w pięciu pierścieniach dla $k_1 = 0,783$ .....	143
Rys. 7.5. Trajektorie punktów centralnych powierzchni docieranej dla $k_1 = 0,712$ (czas symulacji 5 s) ...	144
Rys. 7.6. Liczba punktów środkowych w pięciu pierścieniach dla $k_1 = 0,712$ .....	145
Rys. 7.7. Trajektorie punktów centralnych powierzchni docieranej dla $k_1 = 0,800$ (czas symulacji 5 s) ...	146
Rys. 7.8. Liczba punktów środkowych w pięciu pierścieniach dla $k_1 = 0,800$ .....	148
Rys. 7.9. Trajektorie ośmiu punktów centralnych docieranych elementów rozmieszczonych w separatorze w sposób zaplanowany (dla $k_1 = 1$ ) .....	150
Rys. 7.10. Trajektorie ośmiu punktów centralnych docieranych elementów rozmieszczonych w separatorze w sposób przypadkowy i niezaplanowany (dla $k_1 = 1$ ).....	153
Rys. 7.11. Trajektorie ośmiu punktów centralnych docieranych elementów rozmieszczonych w separatorze w sposób zaplanowany (dla $k_1 = 0,800$ ) .....	155



Rys. 7.12. Trajektorie ośmiu punktów centralnych docieranych elementów rozmieszczonych w separatorze w sposób przypadkowy (niezaplanowany), dla $k_1 = 0,833$ .....	158
Rys. 7.13. Schemat blokowy programu T.Exe .....	162
Rys. 7.14. Trajektoria punktu centralnego symulowanej powierzchni docieranej dla $k_1 = 0,917$ (czas po jakim nastąpiło zamknięcie pętli punktu środkowego to 12 s).....	164
Rys. 7.15. Trajektoria punktu centralnego symulowanej powierzchni docieranej dla $k_1 = 0,883$ (czas po jakim nastąpiło zamknięcie pętli punktu środkowego to 6 s).....	165
Rys. 7.16. Trajektoria punktu centralnego symulowanej powierzchni docieranej dla $k_1 = 0,783$ (czas po jakim nastąpiło zamknięcie pętli punktu środkowego to 60 s).....	166
Rys. 7.17. Trajektoria punktu centralnego symulowanej powierzchni docieranej dla $k_1 = 1$ (czas po jakim nastąpiło zamknięcie pętli punktu środkowego to 1 s).....	166
Rys. 7.18. Przykładowy schemat rozmieszczenia ośmiu elementów tworzących 8 - ramienną gwiazdę z krokiem co 45 stopni (odległości elementów obrabianych są losowane i przyjmują wartości od 10 do 60 mm, z krokiem co 10 mm).....	169
Rys. 7.19. Rozmieszczenie elementów w separatorze zaproponowane przez program MGN4.8-N.Exe (dane z tabeli 7.31).....	170
Rys. 7.20. Rozmieszczenie elementów w separatorze zaproponowane przez program MGN4.9-7N.Exe (dla danych z tabeli 7.35) .....	172
Rys. 7.21. Wykres powierzchniowy wartości ubytku masowego próbek ceramicznych w funkcji czynników wejściowych $K$ , i $V_s$ .....	176
Rys. 7.22. Wykres powierzchniowy wartości ubytku masowego próbek ceramicznych w funkcji czynników wejściowych $L_e$ i $V_s$ .....	176
Rys. 7.23. Wykres powierzchniowy wartości ubytku masowego próbek ceramicznych w funkcji czynników wejściowych $K$ i $L_e$ .....	177
Rys. 7.24. Profile wartości aproksymowanych i teoretyczny ubytek masowy w funkcji czynników wejściowych $K_t$ , $V_{st}$ , $L_{et}$ .....	181
Rys. 7.25. Wykres powierzchniowy i warstwiczny teoretycznej wartości ubytku masowego użytecznego w funkcji czynników $K_t$ i $V_{st}$ .....	182
Rys. 7.26. Wykres powierzchniowy i warstwiczny teoretycznej wartości ubytku masowego użytecznego w funkcji czynników $K_t$ i $L_{et}$ .....	182
Rys. 7.27. Wykres powierzchniowy i warstwiczny teoretycznej wartości ubytku masowego użytecznego w funkcji czynników $V_{st}$ i $L_{et}$ .....	182
Rys. 7.28. Zużycie zawiesziny ścierniej $V_s$ podczas konwencjonalnego i wymuszonego dawkowania w docieraniu jednotarczowym ( $K$ – udział wagowy ścierniwa w zawieszynie) .....	184

## Wykaz tabel

<b>Tabela 2.1.</b> Równanie ruchu dowolnego punktu P [13].....	23
<b>Tabela 2.2.</b> Liczba elementów, które mogą być umieszczone w pierścieniach prowadzących w docierarkach firmy Kemet [93] .....	28
<b>Tabela 2.3.</b> Wymiary pierścieni prowadzących w docierarkach jednotarczowych firmy Kemet [93].....	28
<b>Tabela 2.4.</b> Układ wartości czynnika badanego $x_1$ dla elementarnego programu PS/Dk-21 [70].....	40
<b>Tabela 2.5.</b> Układ wartości czynników badanych $x_1, x_2, x_3$ , dla programu PS/DK-2 <sup>3</sup> przy założeniu: $r = 1, n_1 = n_2 = n_3 = 2, i = 3$ [70] .....	41
<b>Tabela 2.6.</b> Wartości charakteryzujące program PS/DS.-P: $\alpha$ [70] .....	44
<b>Tabela 2.7.</b> Wartości charakteryzujące program PS/DS.-P: $\lambda$ [70].....	45
<b>Tabela 5.1.</b> Zestawienie stałych warunków docierania .....	62
<b>Tabela 5.2.</b> Lepkość nośnika zawiesiny ścierniej.....	63
<b>Tabela 5.3.</b> Zestawienie analizy wyników ubytku masowego (czas docierania $t = 10$ min).....	64
<b>Tabela 5.4.</b> Zestawienie analizy wyników ubytku liniowego (czas docierania $t = 10$ min).....	65
<b>Tabela 5.5.</b> Zestawienie analizy wyników ubytku masowego (czas docierania $t = 20$ min).....	66
<b>Tabela 5.6.</b> Zestawienie analizy wyników ubytku liniowego (czas docierania $t = 20$ min).....	67
<b>Tabela 5.7.</b> Właściwości ceramiki $Al_2O_3$ .....	68
<b>Tabela 5.8.</b> Średnie wymiary próbek przed docieraniem .....	69
<b>Tabela 5.9.</b> Stosowane udział procentowe ziaren ściernych i wartości lepkości nośnika (w różnych konfiguracjach).....	70
<b>Tabela 5.10.</b> Dane techniczne urządzenia Radwag Was 220/X [105] .....	73
<b>Tabela 5.11.</b> Dane techniczne mikrometru cyfrowego Mitutoyo-Quantunike [106] .....	73
<b>Tabela 5.12.</b> Dane techniczne urządzenia MarSurf XR 20 z GD 120 .....	74
<b>Tabela 6.1.</b> Plan eksperymentu <b>PS/DS-P: <math>\lambda</math></b> i wartości czynników badanych .....	82
<b>Tabela 6.2.</b> Stałe warunki docierania .....	84
<b>Tabela 6.3.</b> Zastosowany program badań ( <b>PS/DS-P: <math>\lambda</math></b> ).....	86
<b>Tabela 6.4.</b> Warunki wymuszonego dawkowania zawiesiny ścierniej i wielkości ubytku liniowego próbek ceramicznych (podano wartości średnie z 3 pomiarów) .....	87
<b>Tabela 6.5.</b> Wyniki analizy modelu.....	89
<b>Tabela 6.6.</b> Jednowymiarowe testy istotności równania $U_l = f(K, V_s, L_e)$ .....	89
<b>Tabela 6.7.</b> Wartości współczynników regresji i poziom ich istotności .....	90
<b>Tabela 6.8.</b> Porównanie ubytków liniowych zaobserwowanych i przewidywanych .....	90
<b>Tabela 6.9.</b> Parametry funkcji użyteczności .....	91
<b>Tabela 6.10.</b> Zestawienie odpowiedzi dotyczące przewidywanego ubytku liniowego próbek .....	91
<b>Tabela 6.11.</b> Warunki wymuszonego dawkowania zawiesiny ścierniej i wyniki pomiarów parametru chropowatości powierzchni $R_v$ (podano wartości średnie z 3 pomiarów).....	96
<b>Tabela 6.12.</b> Wyniki analizy modelu.....	98
<b>Tabela 6.13.</b> Jednowymiarowy test istotności równania parametru chropowatości $R_v$ .....	98
<b>Tabela 6.14.</b> Wartości współczynników regresji i poziom ich istotności .....	98
<b>Tabela 6.15.</b> Porównanie wyników zaobserwowanych parametru $R_v$ i przewidywanych $R_v$ .....	99
<b>Tabela 6.16.</b> Parametry funkcji użyteczności parametru chropowatości powierzchni $R_v$ .....	99
<b>Tabela 6.17.</b> Zestawienie odpowiedzi dotyczące przewidywanej wysokości parametru chropowatości $R_v$ .....	100

<b>Tabela 6.18.</b> Warunki wymuszonego dawkowania zawiesiny ścierniej i wyniki pomiarów parametru chropowatości Rp (podano wartości średnie z 3 pomiarów) .....	105
<b>Tabela 6.19.</b> Wyniki regresji pełnego modelu .....	107
<b>Tabela 6.20.</b> Jednowymiarowy test istotności równania parametru Rp.....	107
<b>Tabela 6.21.</b> Jednowymiarowy test istotności równania .....	107
<b>Tabela 6.22.</b> Warunki wymuszonego dawkowania zawiesiny ścierniej i wyniki pomiarów parametru chropowatości Rz (podano wartości średnie z 3 pomiarów).....	109
<b>Tabela 6.23.</b> Wyniki regresji pełnego modelu .....	111
<b>Tabela 6.24.</b> Jednowymiarowy test istotności równania parametru Rz.....	111
<b>Tabela 6.25.</b> Wartości współczynników regresji i poziom ich istotności .....	111
<b>Tabela 6.26.</b> Porównanie wyników zaobserwowanych chropowatości Rz i przewidywanej.....	112
<b>Tabela 6.27.</b> Parametry funkcji użyteczności parametru chropowatości Rz .....	112
<b>Tabela 6.28.</b> Zestawienie odpowiedzi dotyczące przewidywanej wysokości parametru chropowatości Rz.....	113
<b>Tabela 6.29.</b> Zestawienie parametrów wyznaczonych dla układu 2D (wartości średnie).....	124
<b>Tabela 6.30.</b> Wykonane testy istotności współczynników korelacji między zmiennymi: K, Vs, Le, Ra, Rq, Rt, Rv, Rz, Rp, Rku, Rsm, Rsk .....	125
<b>Tabela 6.31.</b> Mapa istotności p dla współczynnika korelacji pomiędzy zmiennymi: K, Vs, Le, Ra, Rq, Rt, Rv, Rz, Rp, Rku, Rsm, Rsk .....	125
<b>Tabela 6.32.</b> Parametry struktury geometrycznej powierzchni ceramiki po docieraniu w układzie 3D (parametry amplitudowe).....	127
<b>Tabela 6.33.</b> Poziomy istotności dla testów istotności współczynników korelacji między zmiennymi: K, Vs, Le, Sa, Sq, Sp, Sv, Ssk, Sku, Sz.....	128
<b>Tabela 6.34.</b> Mapa istotności p dla współczynników korelacji pomiędzy zmiennymi: K, Vs, Le, Sa, Sq, Sp, Sv, Ssk, Sku, Sz.....	128
<b>Tabela 6.35.</b> Parametry struktury geometrycznej powierzchni (parametry powierzchniowe amplitudowe) wyznaczone dla układu 3D.....	130
<b>Tabela 6.36.</b> Poziomy istotności dla testów istotności współczynników korelacji między zmiennymi: K, Vs, Le, Sk, Spk, Svk, Smr1, Smr2.....	131
<b>Tabela 6.37.</b> Mapa istotności p dla współczynników korelacji pomiędzy zmiennymi: K, Vs, Le, Sk, Spk, Svk, Smr1, Smr2 .....	131
<b>Tabela 6.38.</b> Parametry struktury geometrycznej powierzchni (parametry objętościowe) - wyznaczone dla powierzchni 3D.....	134
<b>Tabela 6.39.</b> Poziomy istotności dla testów istotności współczynników korelacji między zmiennymi: K, Vs, Le, Vvv, Vvc, Vm, Vmc .....	134
<b>Tabela 6.40.</b> Mapa istotności p dla współczynników korelacji pomiędzy zmiennymi: K, Vs, Le, Vvv, Vvc, Vm, Vmc.....	135
<b>Tabela 7.1.</b> Zestawienie wyników pomiaru prędkości obrotowej docieraka i separatora dla różnych wartości lepkości nośnika ziaren ściernych .....	140
<b>Tabela 7.2.</b> Dane według planu (tabela 7.1 pozycja 2).....	141
<b>Tabela 7.3.</b> Zestawienie wyników obliczeń długości trajektorii i prędkości docierania analizowanych elementów (dane z tabeli 7.2) .....	142
<b>Tabela 7.4.</b> Zestawienie wyników obliczeń intensywności zużycia tarczy docierającej na podstawie danych z tabeli 7.1.....	142
<b>Tabela 7.5.</b> Dane wg. planu z tabeli 7.19 - pozycja 15.....	143

<b>Tabela 7.6.</b> Zestawienie wyników obliczeń długości trajektorii i prędkości docierania (dla danych z tabeli 7.5).....	144
<b>Tabela 7.7.</b> Zestawienie wybranych wyników obliczeń intensywności zużycia tarczy docierającej na podstawie danych z tabeli 7.1 .....	145
<b>Tabela 7.8.</b> Dane wg planu z tabeli 7.19 - pozycja 16.....	146
<b>Tabela 7.9.</b> Zestawienie wyników obliczeń długości trajektorii i prędkości docierania (dane z tabeli 7.8).....	147
<b>Tabela 7.10.</b> Zestawienie wybranych wyników obliczeń intensywności zużycia tarczy docierającej na podstawie danych z tabeli 7.1 .....	147
<b>Tabela 7.11.</b> Zestawienie wyników symulacji.....	148
<b>Tabela 7.12.</b> Parametry wejściowe symulacji I (rozmieszczenie ośmiu elementów w separatorze w sposób zaplanowany dla $n_s = n_t$ ) .....	150
<b>Tabela 7.13.</b> Zestawienie wyników obliczeń długości trajektorii i prędkości w docieraniu analizowanych elementów (dla danych z tabeli 7.12).....	151
<b>Tabela 7.14.</b> Zestawienie wyników obliczeń intensywności zużycia tarczy docierającej na podstawie danych z tabeli 7.12.....	151
<b>Tabela 7.15.</b> Parametry wejściowe symulacji II (rozmieszczenie ośmiu elementów w separatorze w sposób przypadkowy i niezaplanowany, dla $n_s = n_t$ ).....	152
<b>Tabela 7.16.</b> Zestawienie wyników obliczeń długości trajektorii i prędkości w docieraniu analizowanych elementów (dane z tabeli 7.15) .....	153
<b>Tabela 7.17.</b> Zestawienie wyników obliczeń intensywności zużycia tarczy docierającej na podstawie danych z tabeli 7.15.....	154
<b>Tabela 7.18.</b> Parametry wejściowe symulacji III (rozmieszczenie ośmiu elementów w separatorze w sposób zaplanowany, dla $n_s \neq n_t$ ).....	155
<b>Tabela 7.19.</b> Zestawienie wyników obliczeń długości trajektorii i prędkości w docieraniu analizowanych elementów (dla danych z tabeli 7.18).....	156
<b>Tabela 7.20.</b> Zestawienie wyników obliczeń intensywności zużycia tarczy docierającej na podstawie danych z tabeli 7.18.....	157
<b>Tabela 7.21.</b> Parametry wejściowe symulacji IV (rozmieszczenie ośmiu elementów w separatorze w sposób przypadkowy dla $n_s \neq n_t$ ).....	158
<b>Tabela 7.22.</b> Zestawienie wyników obliczeń długości trajektorii i prędkości w docieraniu analizowanych elementów (dla danych z tabeli 7.21).....	159
<b>Tabela 7.23.</b> Zestawienie wyników obliczeń intensywności zużycia tarczy docierającej (na podstawie danych z tabeli 7.21).....	160
<b>Tabela 7.24.</b> Analiza symulacji zamknięcia pętli dla czterech ustawień $n_s/n_t$ .....	163
<b>Tabela 7.25.</b> Obliczenia dotyczące czasu zamknięcia pętli (dane z tabeli 7.24, pozycja 1).....	163
<b>Tabela 7.26.</b> Obliczenia dotyczące czasu zamknięcia pętli (dane z tabeli 7.24, pozycja 2).....	164
<b>Tabela 7.27.</b> Obliczenia dotyczące czasu zamknięcia pętli (dane z tabeli 7.24, pozycja 3).....	165
<b>Tabela 7.28.</b> Czas zamknięcia pętli (dane z tabeli 7.24, pozycja 4).....	166
<b>Tabela 7.29.</b> Przykłady wyników obliczeń czasu zamknięcia pętli .....	167
<b>Tabela 7.30.</b> Parametry wejściowe (symulacja kinematyki przy użyciu programu MGN4.8-N.Exe).....	169
<b>Tabela 7.31.</b> Wygenerowane przez program MGN4.8-N.Exe położenie elementów .....	170
<b>Tabela 7.32.</b> Zestawienie wyników obliczeń długości trajektorii i prędkości docierania .....	170
<b>Tabela 7.33.</b> Zestawienie wyników obliczeń intensywności zużycia tarczy docierającej.....	171
<b>Tabela 7.34.</b> Parametry wejściowe (symulacja kinematyki przy użyciu programu MGN4.9-7N.Exe).....	172
<b>Tabela 7.35.</b> Wygenerowane przez program MGN4.8-N.Exe położenie elementów .....	172

<b>Tabela 7.36.</b> Zestawienie wyników obliczeń długości trajektorii i prędkości docierania .....	173
<b>Tabela 7.37.</b> Zestawienie wyników obliczeń intensywności zużycia tarczy docierającej.....	173
<b>Tabela 7.38.</b> Warunki wymuszonego dawkowania zawiesiny ścierniej i wyniki pomiarów ubytku masowego próbek ceramicznych (podano wartości średnie z 3 pomiarów) .....	175
<b>Tabela 7.39.</b> Wyniki analizy modelu.....	177
<b>Tabela 7.40.</b> Jednowymiarowe testy istotności równania $U_m = f(K, V_s, L_e)$ .....	178
<b>Tabela 7.41.</b> Wartości współczynników regresji i poziom ich istotności .....	178
<b>Tabela 7.42.</b> Porównanie wyników zaobserwowanych ubytku masowego i wartości przewidywanych ...	179
<b>Tabela 7.43.</b> Parametry funkcji użyteczności.....	179
<b>Tabela 7.44.</b> Zestawienie odpowiedzi dotyczące przewidywanego ubytku masowego.....	180