

**Politechnika Świętokrzyska**  
**Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn**

**ROZPRAWA DOKTORSKA**

mgr inż. Mateusz Broniś

**WPLYW WYBRANYCH WARUNKÓW OBRÓBKI NA  
DOKŁADNOŚĆ WYMIAROWO KSZTAŁTOWĄ  
I CHROPOWATOŚĆ POWIERZCHNI OBROBIONYCH  
OTWORÓW**

Promotor: dr hab. inż. Edward Miko, prof. PŚk

Promotor pomocniczy: dr inż. Łukasz Nowakowski

Kielce 2023



## Spis treści

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW.....	5
WSTĘP .....	7
1. ANALIZA LITERATUROWA TEMATU.....	9
1.1. Wpływ warunków obróbki na dokładność wykonanych otworów .....	12
1.2. Wpływ warunków obróbki na odchyłki kształtu i położenia wykonanych otworów .....	14
1.3. Wpływ warunków obróbki na chropowatość powierzchni wykonanych otworów .....	23
1.4. Wpływ warunków obróbki na zadziory wokół otworów ...	26
2. BADANIA SYMULACYJNE WPŁYWU WYBRANYCH WARUNKÓW OBRÓBK NA DOKŁADNOŚĆ WYMIAROWO KSZTAŁTOWĄ I CHROPOWATOŚĆ POWIERZCHNI OTWORÓW .....	29
2.1. Badania symulacyjne wpływu warunków obróbki na dokładność wykonanych otworów .....	29
2.2. Badania symulacyjne wpływu warunków obróbki na odchyłki kształtu i położenia wykonanych otworów .....	30
2.3. Badania symulacyjne wpływu warunków obróbki na chropowatość powierzchni wykonanych otworów .....	32
2.4. Badania symulacyjne wpływu warunków obróbki na zadziory wokół wykonanych otworów .....	34
3. HIPOTEZY I ZAKRES PRACY .....	37
3.1. Hipotezy pracy .....	37
3.2. Zakres pracy .....	37
3.3. Elementy nowości w pracy.....	38
4. METODYKA BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH PROCESU WIERCENIA .....	39
4.1. Charakterystyka procesu wiercenia w różnych układach kinematycznych.....	39
4.2. Charakterystyka narzędzia użytego do badań .....	41

4.3. Charakterystyka oprawki narzędziowej .....	41
4.4. Charakterystyka maszyn stosowanych w badaniach.....	42
4.5. Charakterystyka materiałów .....	47
4.6. Mocowanie, kształt oraz sposób kodowania próbek do badań	49
<b>5. ANALIZA ORAZ OPRACOWANIE WYNIKÓW BADAŃ.....</b>	<b>50</b>
5.1. Analiza dokładności wymiarowo kształtowej wykonanych otworów.....	51
5.1.1. Analiza pomiarów geometrii wyrobów .....	51
5.1.2. Analiza statystyczna ANOVA.....	58
5.1.3. Badania symulacyjne wybranych modeli.....	94
5.2. Analiza chropowatości powierzchni wykonanych otworów..	102
5.2.1 Analiza pomiarów geometrii wyrobów .....	102
5.2.2. Analiza statystyczna ANOVA.....	106
5.2.3. Badania symulacyjne wybranych modeli.....	131
5.3. Analiza zadziorów na wyjściu otworu .....	141
5.3.1. Analiza pomiarów geometrii wyrobów .....	141
5.3.2. Analiza statystyczna ANOVA.....	143
5.3.3. Badania symulacyjne wybranych modeli.....	158
5.4. Szczegółowa analiza odchyłki walcowości.....	162
5.5. Analiza przypadków odchyłek okrągłości .....	166
5.6. Optymalizacja wielokryterialna – Grey Relational Analysis .....	171
<b>6. WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE .....</b>	<b>190</b>
6.1. Wnioski poznawcze i użyteczne .....	190
6.2. Kierunki dalszych badań .....	192
<b>LITERATURA.....</b>	<b>193</b>
<b>NORMY .....</b>	<b>198</b>

## WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

### OZNACZENIA

$b_f$	– grubość korzenia zadzioru – burr root thickness, $\mu\text{m}$
$b_g$	– grubość zadzioru – burr thickness, $\mu\text{m}$
$CE$	– błąd walcowości – cylindricity error, $\mu\text{m}$
$CYL_t$	– odchyłka walcowości – cylindricity deviation, $\mu\text{m}$
$DE$	– błąd średnicy – diameter error, $\mu\text{m}$
$EBH$	– wysokość zadzioru na wyjściu – exit burr height, $\mu\text{m}$
$F$	– długość fali – wavelength, mm
$f_n$	– posuw na obrót – feed per revolution, mm/obr
$HDA$	– przybliżenie średnicy otworu – hole diameter approxamity, $\mu\text{m}$
$HDE$	– błąd średnicy otworu – hole diameter error, $\mu\text{m}$
$h_0$	– wysokość zadzioru – burr height, $\mu\text{m}$
$n$	– prędkość obrotowa wrzeciona – spindle speed, obr/min
$r_f$	– promień korzenia zadzioru – root radius, $\mu\text{m}$
$Ra$	– średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości – arithmetic mean height, $\mu\text{m}$
$RE$	– błąd okrągłości – roundness error, $\mu\text{m}$
$RON_t$	– odchyłka okrągłości – roundness deviation, $\mu\text{m}$
$Rt$	– całkowita wysokość profilu chropowatości – total height, $\mu\text{m}$
$Rz$	– maksymalna wysokość profilu chropowatości – maximum height, $\mu\text{m}$
$Sa$	– średnia arytmetyczna wysokość powierzchni – arithmetic mean surface height, $\mu\text{m}$
$STR_t$	– odchyłka prostoliniowości – straightness deviation, $\mu\text{m}$
$Sq$	– wysokość średniokwadratowa powierzchni – height of the area mean square, $\mu\text{m}$
$UPR$	– fal na obrót – undulations per revolution
$v_c$	– prędkość skrawania – cutting speed, m/min
$v_f$	– prędkość posuwu – feed rate, mm/min

## SKRÓTY

<i>2D</i>	– analiza struktury geometrycznej w dwóch wymiarach (profilu)
<i>3D</i>	– analiza struktury geometrycznej w trzech wymiarach (topografia)
<i>CYL<sub>p</sub></i>	– odchyłka walcowości wzniesienie-odniesienie – peak to reference cylindricity deviation
<i>CYL<sub>v</sub></i>	– odchyłka walcowości odniesienie-wgłębienie – reference to valley cylindricity deviation
<i>DF</i>	– stopnie swobody – degrees of freedom
<i>DOE</i>	– plan eksperymentu – design of experiment
<i>F</i>	– test Fishera
<i>KIN</i>	– układ kinematyczny – kinematic system
<i>LSCI</i>	– okrąg odniesienia najmniejszych kwadratów – least squares reference circle
<i>LSCY</i>	– walec odniesienia najmniejszych kwadratów – least squares reference cylinder
<i>LSD</i>	– odchyłka prostoliniowości lokalna – local straightness deviation
<i>MCCI</i>	– okrąg odniesienia opisany najmniejszy – minimum circumscribed reference circle
<i>MCCY</i>	– walec odniesienia opisany najmniejszy – minimum circumscribed cylinder
<i>MICI</i>	– okrąg odniesienia wpisany największy – maximum inscribed reference circle
<i>MICY</i>	– walec odniesienia opisany największy – maximum inscribed cylinder
<i>MS</i>	– średni kwadrat odchyleń – mean square
<i>MZLI</i>	– proste odniesienia najmniejszej strefy – minimum zone lines
<i>SS</i>	– suma kwadratów odchyleń – sum of squares
<i>p</i>	– istotność – statistical significance

## WSTĘP

Obróbka skrawaniem zajmuje i będzie zajmować czołową pozycję pod względem wykonywanych operacji czy też ponoszonych kosztów podczas kształtowania wyrobów. Obecnie jesteśmy świadkami ciągłego postępu w rozwoju obrabiarek, narzędzi oraz oprzyrządowania wykorzystywanego w produkcji i budowie maszyn. Dlatego rozwój klasycznej metody kształtowania części maszyn (produktów), ciągle wymaga prowadzenia prac naukowo-badawczych w celu poprawy dokładności wymiarowo-kształtowej i chropowatości powierzchni wykonywanych elementów [1].

Przed inżynierem projektującym proces technologiczny stawiane są wymagania dotyczące zapewnienia jakości chropowatości powierzchni, dokładności, redukcji odchyłki kształtu i położenia operacji wykonanych na przedmiocie obrabianym. Inżynier bazujący na swojej wiedzy oraz doświadczeniu musi sprostać tym wymaganiom. W tym celu optymalizuje wartości parametrów skrawania, dobiera odpowiednie narzędzia wraz z układem kinematycznym zapewniającym najlepszą sztywność układu obróbkowego.

W procesie produkcyjnym jedną z podstawowych operacji jest wykonywanie otworów. Proces obróbki skrawaniem zachodzi dzięki złożeniu dwóch ruchów: głównego (ruch obrotowy) i pomocniczego (ruch prostoliniowy) [2]. Najbardziej powszechnymi otworami wykonywanymi w częściach maszyn i nie tylko są otwory o długości nie przekraczającej długości pięciu średnic wiertła ( $5D$ ) i średnicy nie większej niż 100 mm. W rzeczywistości coraz częściej wykonywane są otwory przekraczające długość  $5D$  np. w lufach, korbowodach, wałach korbowych, przewodnikach zaworowych, wrzecionach. Wykonanie otworu zależne jest od wielu zdefiniowanych parametrów takich jak: średnica, długość, przelotowość, falistość, walcowość, prostoliniowość oraz chropowatość powierzchni otworu [3]. Niestety obróbce skrawaniem towarzyszy bardzo dużo złożonych zjawisk, które oddziałują na proces skrawania.

Otwory klasyfikuje się na podstawie stosunku długości otworu do jego średnicy  $l/d$ . Do głębokich otworów zaliczamy otwory dla których stosunek  $l/d$  wynosi od trzech [4, 5] do dziesięciu [6]. Jednakże badania wokół tej tematyki definiują tą granicę  $l/d = 5$  [6, 7, 8, 9]. Podczas wiercenia głębokich otworów najczęściej stosuje się dwie metody. Metoda pierwsza jest najczęściej stosowana ze względu na jej niezawodność. Odbywa się ona za pomocą pełnego wiertła, w miejscu przyszłego otworu następuje przekształcenie materiału w wióry. Metoda druga (wiercenie trepanacyjne), zamiast usuwać cały materiał w postaci wiórów, narzędzie pozostawia lity rdzeń pośrodku otworu [10]. Zwiększenie niezawodności procesu wykonywania głębokich otworów jest bardzo istotne podczas wiercenia otworów o małej średnicy do około 6 mm. Wykonywanie takich otworów stosowane jest w przemyśle np. w obróbce otworów przewodów olejowych, w produkcji złączek, korpusów wtryskiwaczy, instalacji paliwowych, itp. [11].

Praktyka technologii maszyn pokazuje, że występuje zjawisko dziedziczenia technologicznego polegająca na kopiowaniu błędów kształtu powstałych w poprzednich operacjach. Operacja wykonywania otworów jest źródłem prawie wszystkich błędów położenia i kształtu. Dlatego tak ważny jest rozwój oraz eliminacja błędów podczas operacji zgrubnych. Szczególnie ważne podczas obróbki przedmiotów osiowosymetrycznych (cienkościenne tuleje, gilzy itp.) jest zachowanie prostoliniowości osi otworu, prostopadłości jej do powierzchni czołowej, współosiowości do innych powierzchni oraz równoległości osi wszystkich otworów [3, 11].

W niniejszej rozprawie postanowiono wykonać badania eksperymentalne procesu wiercenia głębokich otworów wykorzystując różne układy kinematyki procesu wiercenia. Dodatkowo w pracy badawczej opracowano dla różnych materiałów teoretyczno-doświadczalne modele do prognozowania chropowatości powierzchni, odchyłki walcowości, prostoliniowości, okrągłości, błędu średnicy, wysokości oraz szerokości zadzioru powstającego na wyjściu z otworu.

Sformułowaną hipotezę i cel pracy przedstawiono w rozdziale trzecim. W rozdziale czwartym przedstawiono charakterystykę: trzech układów kinematycznych procesu wiercenia, narzędzi, oprawki, maszyn, materiałów, mocowań, kształtu oraz sposobu kodowania próbek wykorzystanych w badaniach.

W rozdziale piątym przedstawiono opracowanie wyników badań. Rozdział ten podzielono na trzy podrozdziały. Pierwszy podrozdział zawiera analizę dokładności wymiarowo-kształtowej otworów ( $CYL_t$ ,  $STR_t$ ,  $RON_t$  oraz  $DE$ ). Zawiera również analizę statystyczną ANOVA oraz symulację wybranych stworzonych modeli matematycznych prognozujących parametry wyjściowe. Kolejny podrozdział zawiera analizę chropowatości powierzchni wykonanych otworów względem trzech wybranych parametrów ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_t$ ). W trzecim podrozdziale przedstawiono analizę zadziorów na wyjściu otworu opisanych dwoma parametrami: szerokością oraz jego wysokością. Każdy podrozdział zawiera analizę statystyczną, budowę oraz symulację modeli matematycznych. W czwartym podrozdziale zaprezentowano szczegółową analizę odchyłki walcowości. W ostatnim podrozdziale wykonano analizę przypadków odchyłek okrągłości za pomocą analizy Fouriera.

Ostatni rozdział jest podsumowaniem pracy. Zawarte w nim wnioski dotyczą wpływu układu kinematycznego na wskazane parametry wyjściowe.



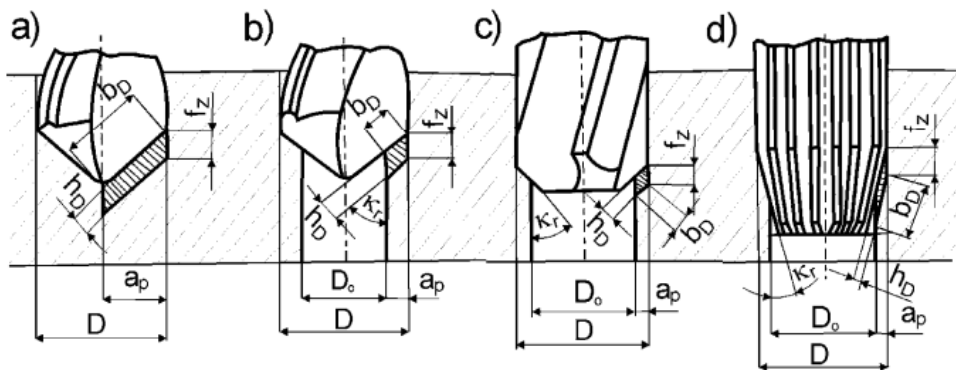
## 1. ANALIZA LITERATUROWA TEMATU

W obróbce skrawaniem wierceniem nazywamy operację polegającą na utworzeniu otworu w materiale. Proces wiercenia można prowadzić na różnych obrabiarkach:

- wiertarkach do głębokiego wiercenia,
- wiertarko-frezarkach,
- obrabiarkach zespołowych,
- automatach tokarskich,
- tokarkach uniwersalnych,
- tokarkach rewolwerowych,
- frezarkach,
- wiertarkach uniwersalnych kadłubowych i promieniowych
- obrabiarkach sterowanych numerycznie (np. tokarkach i frezarkach itp.) [3].

Wykonywanie otworów jest również podzielone ze względu na stopień zaangażowania krawędzi skrawających [12]:

- wiercenie – wykonywane w pełnym materiale, najczęściej stosowany sposób wykonywania otworów (rys. 1. a),
- powiercanie – wiercenie wtórne, w celu powiększenia średnicy (rys. 1. b),
- rozwiercanie zgrubne – zwiększa dokładność w stosunku do powiercania (rys. 1. c),
- rozwiercanie wykończeniowe – wykonywany po rozwiercaniu zgrubnym i wierceniu (rys. 1. d).



Rys. 1. Obróbka otworów: a) wiercenie, b) powiercanie, c) rozwiercanie zgrubne, d) rozwiercanie wykończeniowe, gdzie:  $k_r$  – kąt przystawienia krawędzi skrawającej,  $a_p$  – głębokość skrawania,  $D_0$  – średnica otworu wstępnego,  $D$  – całkowita średnica otworu,  $f_z$  – posuw na ostrze,  $b_D$  – część robocza [12]

Wykonywanie otworu można również podzielić ze względu na położenie osi wykonywanego otworu [13]:

- pionowe – realizowane na większości odmian wiertarek, przy nieruchomym przedmiocie obrabianym narzędzie wykonuje ruch główny oraz posuwowy,
- poziome – realizowane na wytaczarko-frezarkach, wiertarkach do głębokich otworów, tokarkach. Najczęściej narzędzie wykonuje ruch posuwowo-prostoliniowy, natomiast przedmiot obrabiany wykonuje ruch główny, obrotowy.

Inne kryterium podziałowe wykonywania otworów ze względu na kształt:

- otwór przelotowy,
- otwór nieprzelotowy.

Rozróżniamy cztery układy kinematyczne wiercenia otworów [2, 3, 13, 14]:

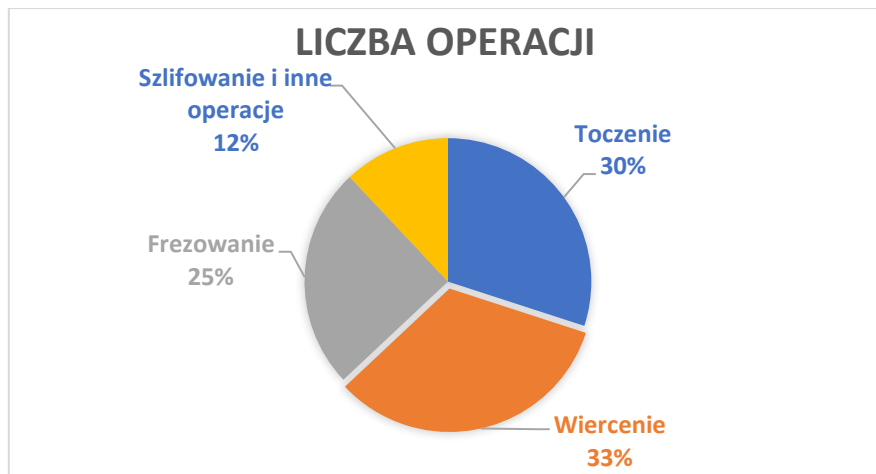
- przedmiot obrabiany jest nieruchomy, natomiast narzędzie wykonuje jednocześnie ruch główny (obrotowy) i posuwowo-prostoliniowy,
- przedmiot obrabiany wykonuje ruch główny (obrotowy), natomiast narzędzie wykonuje tylko ruch posuwowo-prostoliniowy, równoległy do osi obrotu przedmiotu obrabianego,
- przedmiot obrabiany wykonuje ruch obrotowy, natomiast narzędzie wykonuje ruch obrotowy w przeciwnym kierunku do ruchu przedmiotu oraz ruch posuwowo-prostoliniowy,
- przedmiot obrabiany wykonuje ruch prostoliniowy, równoległy do osi obrotu narzędzia, natomiast narzędzie wykonuje tylko ruch obrotowy.

Efektami technologicznymi w procesie wiercenia są: twardość powierzchni, dokładność wymiarowo-kształtowa (średnica, równoległość, cylindryczność, prostopadłość, nachylenia, współosiowość, symetryczność, przecięcia osi otworu), chropowatość i falistość powierzchni otworu oraz wydajność procesu [14]. Osiągnięcie wskazanych wskaźników dokładności otworu, nie stanowi problemu w kolejnych etapach produkcji z wykorzystaniem narzędzi: półwykończeniowych, wykończeniowych oraz docieraków otworów itp. Jednakże tymi oto narzędziami dodając kolejne etapy procesu technologicznego podnosimy koszty wytworzenia otworu o danej jakości. Jednakże pomimo dodania kolejnych operacji nie zawsze uzyskuje się odpowiednie zwiększenie jakości otworów. Naukowcy w swoich pracach przedstawiają, że błąd osi wykonanego otworu może zostać skorygowany maksymalnie o 15% [15, 16, 17]. Jak widać w procesie wiercenia bardzo dużą rolę odgrywa tzw. dziedziczenie technologiczne polegające na kopiowaniu błędów z poprzedzającej operacji [11]. Ogólny podział problemów związanych z jakością otworu przedstawił Aamir wraz ze współautorami. Jakość wykonanego otworu definiuje: chropowatość powierzchni, odchyłka walcowości, prostoliniowości, okrągłości, wymiar otworu oraz zadziory, które powstały na wejściu i wyjściu otworu [18]. Na podstawie własnych doświadczeń, książek oraz publikacji naukowych przedstawiono własną charakterystykę jakości otworu jako rys. 2.



Rys. 2. Charakterystyka jakości otworu

Otwory cylindryczne są wykonywane w bardzo wielu częściach maszyn i przedmiotów np. w lufach, korbowodach, wałach korbowych, przewodach olejowych, złączkach, korpusach wtryskiwaczy, instalacji paliwowych, gilzach, cienkościennych tulejach, kadłubach, tłokach, łożyskach ślizgowych itp. [3, 11]. Statystycznie przyjmuje się, że udział wiercenia w stosunku do innych operacji technologicznych takich jak: toczenie, frezowanie, szlifowanie występuje w co trzeciej operacji pod względem ich wykonywań (rys. 3).



Rys. 3. Procentowy udział poszczególnych operacji w procesach technologicznych [19]

### 1.1. Wpływ warunków obróbki na dokładność wykonanych otworów

W czasopiśmie naukowych międzynarodowi badacze starają się opracowywać coraz to dokładniejsze modele prognozowania błędów średnicy wierconych otworów. Po obszernej analizie z tej problematyki stwierdzono, że tylko nieliczni na podstawie swoich badań opracowali modele matematyczne. Aized i Amjad [20] zbudowali model w postaci równania logarytmu dziesiętnego uwzględniającego: prędkość obrotową wrzeciona, prędkość posuwu i metody wiercenia (w kilku przejściach).

$$\log_{10}(DE) = 2,089 - 0,0015 \cdot s - 0,21 \cdot f + 0,32 \cdot Q + 0,008 \cdot s \cdot f - 0,0015s \cdot Q - 0,007 \cdot f \cdot Q + 0,0011 \cdot s^2 + 0,007 \cdot f^2 - 0,0112 \cdot Q^2 \quad (1)$$

gdzie:  $s$  – prędkość obrotowa wrzeciona,  $f$  – prędkość posuwu,  $Q$  – głębokość przejść,  $s \cdot f$  – interakcja prędkości obrotowej wrzeciona z prędkością posuwu,  $s \cdot Q$  – interakcja prędkości obrotowej wrzeciona z głębokością przejść,  $f \cdot Q$  – interakcja prędkości posuwu z głębokością przejść.

Polscy badacze [21] przedstawili tylko średnice otworów w funkcji prędkości posuwu dla trzech różnych prędkości skrawania.

Dla  $v_c = 28$  m/min

$$y = -0,00009 \cdot x + 6,194 \quad (2)$$

Dla  $v_c = 24$  m/min

$$y = -0,0002 \cdot x + 6,184 \quad (3)$$

Dla  $v_c = 7$  m/min

$$y = -0,0001 \cdot x + 6,156 \quad (4)$$

gdzie:  $x$  – prędkość posuwu.

Vipin i współautorzy [22] zaproponowali model do prognozowania błędów średnicy otworu (HDE) uwzględniając następujące parametry wejściowe: narzędzie, prędkość obrotową wrzeciona, posuw na obrót, średnice wiertła, oraz materiał przedmiotu obrabianego. Model ten w stosunku do wyników doświadczalnych wykazał się dokładnością wynoszącą 91%.

$$\begin{aligned} HDE = & 0,2765 - 0,0119 \cdot A + 0,0004 \cdot B - 3,7567 \cdot C + \\ & + 0,0083 \cdot D - 0,0476 \cdot E - 0,0000 \cdot B^2 + 15,8667 \cdot C^2 + \\ & - 0,0005 \cdot D^2 + 0,0124 \cdot E^2 \end{aligned} \quad (5)$$

gdzie:  $A$  – narzędzie,  $B$  – prędkość obrotowa wrzeciona,  $C$  – posuw na obrót,  $D$  – średnica wiertła,  $E$  – materiał przedmiotu obrabianego.

Ciekawym modelem do prognozowania średnicy otworu jest model badaczy [23], który zawierał trzy parametry wejściowe takie jak: prędkość posuwu, prędkość obrotową wrzeciona oraz ciśnienie cieczy chodząco-smarującej. Wykazali oni wpływ prędkości obrotowej wrzeciona jako jeden z najbardziej oddziaływujący czynnik na średnicę otworu (około 50,5%).

$$\begin{aligned} DE = & 44,9 - 0,383 \cdot f + 0,00615 \cdot N - 3,84 \cdot P + \\ & + 0,0119 \cdot f^2 - 0,000000 \cdot N^2 + 0,285 \cdot P^2 + \\ & - 0,000179 \cdot f \cdot N + 0,000181 \cdot N \cdot P - 0,0567 \cdot P \cdot f \end{aligned} \quad (6)$$

gdzie:  $f$  – prędkość posuwu,  $n$  – prędkość obrotowa wrzeciona,  $P$  – ciśnienie,  $fN$  – interakcja prędkości posuwu z prędkością obrotową wrzeciona,  $N \cdot P$  – interakcja prędkości obrotowej wrzeciona z ciśnieniem,  $P \cdot f$  – interakcja ciśnienia z prędkością posuwu.

Tureccy badacze pod przewodnictwem Kurt [24] zaproponowali model prognozowania dokładności wykonania średnicy otworu dla czterech parametrów wejściowych tj.: głębokość wiercenia, rodzaj powłoki wiertła, prędkość skrawania i posuw na obrót. Model został oceniony pod względem dokładności przewidywanych wyników na 88%.

$$\begin{aligned} HDA = & 33,0 - 9,66 \cdot (\text{głębokość wiercenia}) + 17,8 \cdot f + \\ & + 5,07 \cdot v_c - 0,04 \cdot (\text{rodzaj powłoki wiertła}) \end{aligned} \quad (7)$$

gdzie: rodzaj powłoki wiertła (1 – HSS, 2 – HSS+TiAlN, 3 – HSS+TiN).

Badacze z Indii [25] przedstawili tylko wpływ prędkości obrotowej wrzeciona na dokładność wykonania otworu w procentach. Natomiast Singh, Kumar i Saini [26] przedstawili wpływ: prędkości obrotowej wrzeciona, posuwu na obrót i kąta

wierzchołka narzędzia na błąd średnicy otworu. Niestety praca ta nie zawiera żadnego modelu dotyczącego tych badań. Autorzy z Włoch [27] zawężili swoje badania do zmierzenia średnicy wykonanych otworów dla stałego posuwu i dwóch parametrach prędkości obrotowej wrzeciona ( $n = 3000; 4500$  obr/min). Nie starając się wykonać modelu dla średnicy otworu. Inni badacze [28] dla dwóch parametrów wejściowych: prędkość obrotowa wrzeciona ( $n = 600; 1800; 3000$  obr/min) i posuw na obrót ( $f_n = 0,04; 0,12; 0,2$ ) zmierzili dokładność średnicy dla każdej z kombinacji powyższych parametrów dla dwóch wiertel. Badacze [29] badali tylko jak parametry technologiczne ( $v_c = 22,5; 30; 37,5$  m/min oraz  $f_n = 0,015; 0,025; 0,035$  mm/obr) wpływają na dokładność wykonania otworu. Ucak i Cicek [30] zmierzili średnice otworów dla dwóch wiertel (zwykłego i pokrytego TiAlN) przy różnych rodzajach chłodzenia (brak, LN<sub>2</sub>, wodne). Jak widać nie szukali oni optymalnego doboru parametrów procesu. Badacze [31, 32] dokonali pomiaru średnicy na wejściu i wyjściu otworu dla czterech parametrów: prędkości obrotowej wrzeciona ( $n = 1000; 3000; 6000; 9000$  obr/min) i prędkości posuwu ( $v_f = 100; 300; 600; 900$  mm/min). Takie samo podejście zastosowali Kurt z współautorami. Z badań wynika, że większa prędkość obrotowa wrzeciona zwiększa średnice otworu na wejściu i wyjściu. Innym podejściem wykazali się autorzy prac [33, 34] przedstawiając podejście sprawdzenia wpływu powłoki narzędzia na średnicę otworu w funkcji ilości wierconych otworów. Dedeakayogullari wraz z współautorami [35, 36] sprawdzali jaki jest wpływ wiertła (bez powłoki oraz z powłoką), posuwu na obrót ( $f_n = 0,06; 0,09; 0,12; 0,15$ ) oraz prędkości skrawania ( $v_c = 25; 50; 75; 100$  m/min) na błąd średnicy otworu. Zeng wraz ze współautorami [37] wykonali badania dokładności wykonania otworu tylko względem parametrów technologicznych ( $n = 16000; 18000; 20000$  obr/min,  $f_n = 0,25; 0,5; 1; 1,5$  mm/obr). Autorzy Yagishita oraz Fujio [38] badali dokładność wykonania otworu względem zastosowanego chłodzenia (bez chłodzenia, z chłodzeniem), stałej wartości posuwu na obrót wynoszącego 0,05 mm/obr oraz dwunastu różnych wartości prędkości obrotowej wrzeciona ( $n$  od 500 do 2500 ze zmianą o 100 obr/min). Badacze [39] sprawdzali jak zmienia się średnica otworu względem zastosowanego wiertła (wiertło kręte, wiertło z węgla spiekanego z powłoką oraz bez powłoki), prędkości skrawania ( $v_c = 100; 150$  m/min), posuwu na obrót ( $f_n = 0,5; 1; 2$  mm/obr) oraz zastosowanego chłodzenia (bez i z chłodzeniem wodnym).

## **1.2. Wpływ warunków obróbki na odchyłki kształtu i położenia wykonanych otworów**

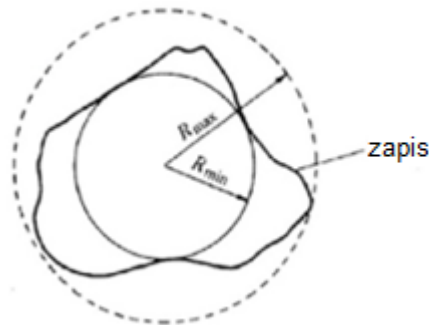
Odchyłka kształtu elementów cylindrycznych to największa odległość pomiędzy zarysem przylegającym a rzeczywistym. Natomiast zarys przylegający jest to element geometryczny najczęściej płaszczyzna, linia, okrąg itd. usytuowany względem zarysu rzeczywistego tak aby odległość między nim, a najdalszym punktem zarysu była jak najmniejsza [40].

Głównymi odchyłkami kształtu i położenia w otworach jest: odchyłka okrągłości, odchyłka prostoliniowości oraz odchyłka walcowości otworu. Odchyłka okrągłości jest najczęściej wyznaczana za pomocą dwóch metod: metody okręgu odniesienia wpisanego największego (MICI) i okręgu odniesienia opisanego najmniejszego (MCCI) lub okręgu odniesienia najmniejszych kwadratów (LSCI) [N2].

Metoda MICI/MCCI polega na pomiarze jak największej liczby punktów największego wewnętrznego oraz najmniejszego zewnętrznego obwodu otworu. Następnie wyliczenie odchyłki okrągłości następuje za pomocą poniższego równania.

$$\text{Odchyłka okrągłości} = R_{max} - R_{min} \quad (8)$$

gdzie:  $R_{max}$  – największy promień okręgu, który został wyznaczony poza okrągłym profilem otworu,  $R_{min}$  – największy promień okręgu, który może zostać wpisany do profilu otworu bez jego przecinania oraz jest on współśrodkowy z maksymalnym promieniem okręgu wpisanego.



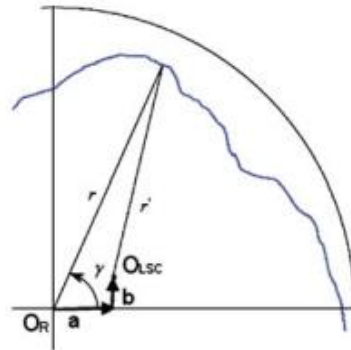
Rys. 4. Największy promień okręgu wpisanego w otwór oraz najmniejszy promień okręgu opisanego na otworze [34]

Metoda LSCI, różni się od poprzedniej tylko zdefiniowaniem środka obrotu.

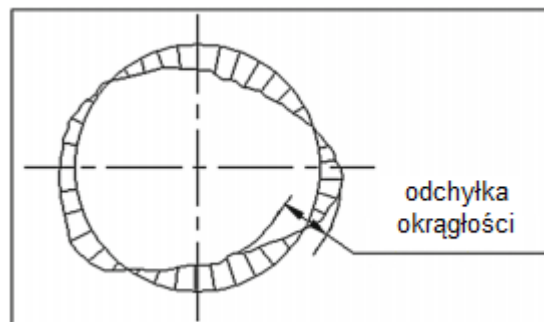
$$a = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N r_i \cos \gamma_i \quad (9)$$

$$b = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N r_i \sin \gamma_i \quad (10)$$

$$r' = \sqrt{(r_i \cos \gamma_i - a)^2 + (r_i \sin \gamma_i - b)^2} \quad (11)$$



Rys. 5. Przedstawienie graficzne zdefiniowania środka obrotu w metodzie LSCI [34]



Rys. 6. Ogólny błąd okrągłości w metodzie LSCI [41]

Na rys. 7 przedstawiono najbardziej charakterystyczne przypadki odchyłki okrągłości:

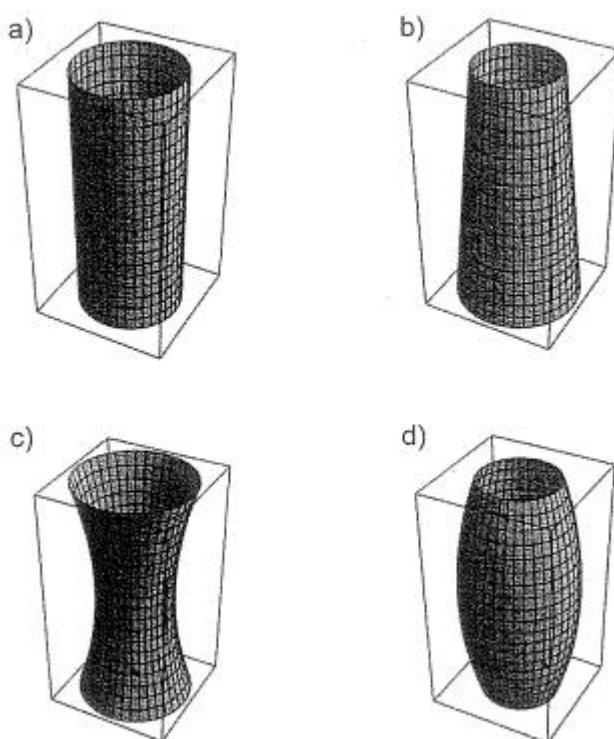


Rys. 7. Charakterystyczne przypadki odchyłki okrągłości [42]



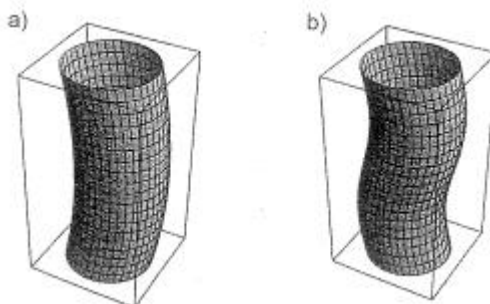
Zgodnie z normą [N1] odchyłka walcowości jest to największa odległość punktów powierzchni rzeczywistej od powierzchni walca przylegającego w granicach obszaru cząstkowego [43]. Rozróżniamy cztery główne grupy zarysów walcowości względem odchyłki promieniowej [N3]:

- walec integralny nominalny,
- stożek (stożkowość),
- baryłka (baryłkowość),
- siódła (siódłowość).



Rys. 8. Grupy zarysów walcowości a) walec integralny, b) odchyłka stożkowości, c) siódłowość, d) baryłkowość [42]

Inna grupa zależna jest od zniekształcenia linii środkowej otworu przynależą tutaj: pojedyncze lub kilkakrotne wygięcie owej linii [42, N3].



Rys. 9. Zarys walcowości w stosunku do zniekształcenia środkowej linii a) pojedyncze b) podwójne [42]

Odchyłka walcowości wyznaczana jest najczęściej za pomocą metody walca odniesienia najmniejszych kwadratów (LSCY) lub metody walca odniesienia opisanego najmniejszego (MCCY) i walca odniesienia wpisanego największego (MICY). Metoda LSCY jest to walec, dla którego suma kwadratów odchyłek walcowości lokalnych jest najmniejsza. Polega ona na sumowaniu największej dodatniej i bezwzględnej wartości największej ujemnej lokalnej odchyłki walcowości mierzonych względem skojarzonego walca [42, N3].

$$CYL_t = CYL_p + CYL_v \quad (12)$$

gdzie:  $CYL_p$  – największa wartość odchyłki walcowości lokalnej dodatniej od walca odniesienia najmniejszych kwadratów,  $CYL_v$  – największa wartość bezwzględna odchyłki walcowości lokalnej ujemnej od walca odniesienia najmniejszych kwadratów.

Metoda MCCY i MICY polega na pomiarze najmniejszego możliwego walca, jaki może być dopasowany od zewnątrz powierzchni walcowości oraz pomiarze największego walca, jaki może być dopasowany od wewnątrz powierzchni walcowości [N3].

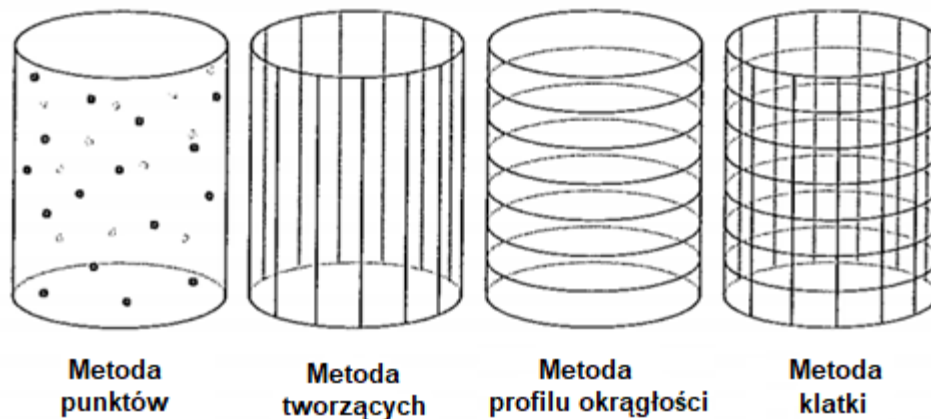
$$CYL_t = MCCY + MICY \quad (13)$$

Inną metodą pomiaru walcowości jest obserwacja linii środkowej otworu, polega ona na analizie równo oddalonych zarysów okrągłości otworu ustalonej na podstawie nominalnej średnicy otworu [42].

Rozróżniamy cztery strategie pomiarowe stosowane w ocenie odchyłki walcowości [42, 43, N3]:

- strategia punktowa pomiar wykonuje się w szeregu punktów w obszarze pomiarowym, przyjętym losowo na powierzchni lub rozmieszczonych według ściśle określonego schematu,
- strategia tworzącej polega na zebraniu pomiarów wzdłuż płaszczyznach otworu przechodzących przez jego oś; jest to zarówno metoda pomiaru i oceny prostoliniowości otworu,

- strategia profilu okrągłości, pomiar wykonuje się w szeregu równoległych płaszczyzn okrągłości, po przypisaniu płaszczyzny okrągłości do końca i początku obszaru pomiarowego,
- strategia siatki (klatki) polega na wykonaniu pomiaru w płaszczyznach przekroju osiowego wzdłuż tworzących w obszarze pomiarowym oraz w szeregu równoległych płaszczyzn okrągłości, po przypisaniu płaszczyzny okrągłości do końca i początku obszaru pomiarowego.



Rys. 10. Strategie pomiarowe przy ocenie otworu z punktu widzenia odchyłki walcowości [43]

Odchyłka prostoliniowości otworu najczęściej wyliczana jest jako suma największej wartości odchyłki prostoliniowości lokalnej dodatniej i największej wartości bezwzględnej odchyłki prostoliniowości lokalnej ujemnej. Natomiast odchyłka prostoliniowości lokalnej (LSD) jest to odchyłka punktu na profilu prostoliniowości od prostej odniesienia. Wyznaczana jest ona w kierunku prostopadłym do prostej odniesienia. W tym przypadku mamy prostą odniesienia najmniejszej strefy (MZLI).



Rys. 11. Odchylenie osi wywierconego otworu [44]

Cicek, Kivak i Ekici [45] opracowali model dla odchyłki okrągłości względem trzech parametrów: rodzaju narzędzia, prędkości skrawania i posuwu na obrót. Stwierdzili, że łączny wpływ prędkości skrawania i posuwu na obrót stanowi około 64% wpływu wszystkich czynników na odchyłkę okrągłości otworu.

$$Re = 7,279 - 1,36 \cdot Ct + 4,13 \cdot Vc + 2,69 \cdot f + \\ + 1,625 \cdot Vc \cdot f + 0,431 \cdot Ct^2 + 2,881 \cdot Vc^2 \quad (14)$$

gdzie: Ct – rodzaj wiertła, Vc – prędkość skrawania, f – posuw na obrót, Vc·f – interakcja prędkości skrawania z posuwem na obrót.

Aized i Amjad [46] wykonali modele błędu okrągłości (RE) i błędu walcowości (CE) jako równania logarytmiczne uwzględniające prędkość obrotową wrzeciona, prędkość posuwu i metody wiercenia (w kilku przejściach).

$$\ln(RE) = 0,46630 + 0,005 \cdot n + 0,48279 \cdot f + \\ - 0,48945 \cdot Q - 0,00075 \cdot n \cdot f - 0,00008 \cdot n \cdot Q + \\ + 0,22700 \cdot f \cdot Q + 0,000005 \cdot n^2 - 0,010936 \cdot f^2 + 0,009 \cdot Q^2 \quad (15)$$

gdzie: n – prędkość obrotowa wrzeciona, f – prędkość posuwu, Q – głębokość przejść, n·f – interakcja prędkości obrotowej wrzeciona z prędkością posuwu, n·Q – interakcja prędkości obrotowej wrzeciona z głębokością przejść, f·Q – interakcja prędkości posuwu z głębokością przejść.

$$\ln(CE) = 10,76 - 0,0008 \cdot s - 0,71392 \cdot f + \\ - 0,50077 \cdot Q - 0,00008 \cdot s \cdot f - 0,0002 \cdot s \cdot Q + \\ + 0,026 \cdot f \cdot Q + 0,002 \cdot s^2 + 0,018 \cdot f^2 + 0,019 \cdot Q^2 \quad (16)$$

gdzie: s – prędkość obrotowa wrzeciona, f – prędkość posuwu, Q – głębokość przejść, s·f – interakcja prędkości obrotowej wrzeciona z prędkością posuwu, s·Q – interakcja prędkości obrotowej wrzeciona z głębokością przejść, f·Q – interakcja prędkości posuwu z głębokością przejść.

Ciekawym podejściem wykazali się badacze [23], którzy opracowali modele do prognozowania odchyłki okrągłości otworu. Zawierał on trzy parametry wejściowe takie jak: prędkość posuwu, prędkość obrotową wrzeciona oraz ciśnienie cieczy chłodząco-smarującej. Wykazali oni wpływ prędkości obrotowej wrzeciona jako jeden z najbardziej oddziaływujących czynników na średnicę otworu (około 42%).

$$\text{Odchyłka okrągłości} \\ = 71,4 - 1,05 \cdot f - 0,00640 \cdot S - 4,53 \cdot P + \\ + 0,164 \cdot f^2 - 0,000000 \cdot S^2 + 0,198 \cdot P^2 + \\ + 0,000055 \cdot f \cdot S + 0,000468S \cdot P - 0,221 \cdot P \cdot f \quad (17)$$

gdzie: f – prędkość posuwu, S – prędkość obrotowa wrzeciona, P – ciśnienie, f·S – interakcja prędkości posuwu z prędkością obrotową wrzeciona, S·P – interakcja

prędkości obrotowej wrzeciona z ciśnieniem,  $P \cdot f$  – interakcja ciśnienia z prędkością posuwu.

Badacze [21] przedstawili tylko odchyłkę okrągłości otworów w funkcji prędkości posuwu dla trzech różnych prędkości skrawania.

Dla  $v_c = 28$  m/min

$$y = 0,0178 \cdot x + 1,133 \quad (18)$$

Dla  $v_c = 24$  m/min

$$y = 0,0273 \cdot x + 2,284 \quad (19)$$

Dla  $v_c = 7$  m/min

$$y = 0,0498 \cdot x + 1,993 \quad (20)$$

gdzie:  $x$  – prędkość posuwu

Autorzy prac [31, 32] dokonali pomiaru odchyłki okrągłości na wejściu i wyjściu otworu dla czterech parametrów: prędkości obrotowej wrzeciona ( $n = 1000; 3000; 6000; 9000$  obr/min) i prędkości posuwu ( $v_f = 100; 300; 600; 900$  mm/min). Dwie grupy badaczy z Indii [47, 48] zoptymalizowali dobór: prędkości obrotowej wrzeciona, posuwu na obrót i średnicy wiertła dla odchyłki okrągłości i odchyłki cylindryczności otworu. Jednakże również nie przedstawili ogólnego modelu tych dwóch parametrów w stosunku do wartości wejściowych badanego procesu. Innym podejściem wykazali się badacze [33, 34] przedstawiając podejście sprawdzenia powłoki narzędzia na odchyłkę okrągłości i odchyłkę prostoliniowości otworu w funkcji ilości wierconych otworów. Badacze Sandeep Ajay i Jagadesh [49] przedstawili w funkcji zmieniającej się prędkości obrotowej wrzeciona wpływ warunków chłodzenia na odchyłkę okrągłości otworu. Dheeraj i współautorzy [25] przedstawili tylko wpływ prędkości obrotowej wrzeciona na odchyłkę walcowości. Grupa badaczy z Singapuru [50] przedstawiła odchylenie prostoliniowości otworu dla dwunastu prób eksperymentalnych. Równocześnie dzieląc je na cztery grupy zawierające dopuszczalne odchylenie prostoliniowości otworu. W pracy [44] autorzy zmierzili tylko odchyłkę prostoliniowości otworu. Badacze z Wielkiej Brytanii pod przewodnictwem Abdelhafeez [51] zmierzili odchyłkę prostoliniowości oraz odchyłkę okrągłości otworu na wejściu i wyjściu dla zmiennych parametrów technologicznych: posuwu na obrót ( $f_n = 0,24; 0,08$  mm/obr) oraz prędkości skrawania ( $v_c = 150; 50$  m/min). Niestety nie przedstawili oni żadnego modelu odnoszącego się do przedstawionych badań. Khanna wraz ze współautorami [52] sprawdzili tylko jak wpływa rodzaj chłodzenia (brak i chłodzenie zalewowe) na jakość wywierconego otworu oceniając odchyłki walcowości i okrągłości). Jednakże nie zmieniali oni żadnego z parametru wejściowego. Autorzy z Włoch [27] zawężili swoje badania do zmierzenia jednego parametru jakości otworu (odchyłki okrągłości) dla stałego posuwu i dwóch

parametrach prędkości obrotowej wrzeciona ( $n = 3000; 4500$  obr/min). Badacze w pracy [28] dla dwóch parametrów wejściowych: prędkość obrotowa wrzeciona ( $n = 600; 1800; 3000$  obr/min) i posuw na obrót ( $f_n = 0,04; 0,12; 0,2$  mm/obr) zmierzili odchyłkę okrągłości otworu dla każdej z kombinacji powyższych parametrów. Użyli oni dwóch wiertel HSS oraz wiertła z węglika spiekane. W pracy [53] badacze sprawdzili zmianę wartości odchyłki prostoliniowości w zależności od ciśnienia cieczy chłodzącej oraz prędkości obrotowej wrzeciona. Oezkaya wraz z współautorami [54] wykonywali wiercenie w warunkach wewnętrznego oraz zewnętrznego chłodzenia. Ocenianym parametrem była odchyłka prostoliniowości otworu. Badacze [55] badali jakość otworu (odchyłkę okrągłości co 50 mm oraz prostoliniowości) w odniesieniu do czterech różnych parametrów prędkości obrotowej wrzeciona ( $n = 1500, 2000, 2500, 4500$  obr/min). Muller i współautorzy [56] wykazali się bardzo ciekawym podejściem m.in. badali okrągłość otworu względem wielkości (1; 1.4 mm), ilości (2; 4), kształtu (okrągły; trójkątny) oraz kąta (25; 15) kanałów chłodzących. Al.-Tameemi wraz ze współautorami [57] badali wpływ powłoki wiertła (TiN/TiAlN, TiAlN oraz TiN), prędkości obrotowej wrzeciona ( $n = 1000, 2000, 3000$  obr/min) oraz prędkości posuwu ( $f = 50; 100; 150$  mm/min) na odchyłkę walcowości oraz okrągłości otworu. Badacze [29] badali tylko jak parametry technologiczne ( $v_c = 22,5; 30; 37,5$  m/min oraz  $f_n = 0,015; 0,025; 0,035$  mm/obr) wpływają na odchyłkę okrągłości. Shah wraz ze współautorami [58] badali jak chłodzenie LN<sub>2</sub> i LCO<sub>2</sub>, stałe parametry technologiczne ( $f = 100$  mm/min i  $v_c = 80$  m/min) wpływają na odchyłkę walcowości oraz okrągłości otworu. Dedeakayogullari wraz ze współautorami [35, 36] sprawdzali jaki jest wpływ wiertła (bez powłoki oraz z powłoką), posuwu na obrót ( $f_n = 0,06; 0,09; 0,12; 0,15$ ) oraz prędkości skrawania ( $v_c = 25; 50; 75; 100$  m/min) na odchyłkę okrągłości oraz walcowości. Autorzy [59] wykonali obszerne badania względem dziewięciu różnych wartości posuwu na obrót ( $f_n = 0,02; 0,04; 0,08; 0,1; 0,12; 0,15; 0,18; 0,25; 0,3$  mm/obr), dziewięciu różnych prędkości obrotowych wrzeciona ( $n = 2000, 3000, 4000, 6000, 8000, 10000, 12000, 14000, 16000, 18000$  obr/min) oraz rodzaju zastosowanej powłoki na wiertle (bez powłoki, powłoka diamentowa i DLC). Sprawdzili oni jak powyższe parametry wejściowe wpływają na odchyłkę walcowości oraz okrągłości otworu. Yagishita oraz Fujio [38] badali odchyłkę okrągłości otworu względem zastosowanego chłodzenia (bez chłodzenia, z chłodzeniem), stałej wartości posuwu na obrót wynoszącego 0,05 mm/obr oraz dwunastu różnych wartości prędkości obrotowej wrzeciona ( $n$  od 500 do 2500 ze zmianą o 100 obr/min). Senthil oraz Dhanasekaran [60] badali wpływ kąta wierzchołka wiertła (108, 118, 128) oraz parametrów technologicznych ( $n = 1000; 2000; 3000, f_n = 0,05; 0,1; 0,15$ ) na odchyłkę walcowości.

### 1.3. Wpływ warunków obróbki na chropowatość powierzchni wykonanych otworów

W literaturze oraz czasopismach naukowych występuje bardzo mało równań doświadczalnych opisujących chropowatość powierzchni wywierconych otworów. Poniższa grupa modeli do prognozowania parametru Ra chropowatości uwzględnia tylko wybrane parametry wejściowe obróbki. W pracy Balaji, Rao i Murthy [46] opracowali oni model do prognozowania chropowatości uwzględniając czynniki takie jak: kąt wierzchołkowy (A), prędkość posuwu (B) i prędkość obrotowa wrzeciona (C).

$$Ra = 3,03 + 0,18 \cdot A + 0,25 \cdot B + 0,22 \cdot C + 0,23 \cdot A \cdot B + 0,23 \cdot A \cdot C + 0,10 \cdot B \cdot C \quad (21)$$

gdzie: A – kąt wierzchołkowy, B – prędkość posuwu, C – prędkość obrotowa wrzeciona, A·B – interakcja kąta wierzchołkowego z prędkością posuwu, A·C – interakcja kąta wierzchołka z prędkością obrotową wrzeciona, B·C – interakcja prędkości posuwu z prędkością obrotową wrzeciona.

Podobne podejście zastosowali badacze Kumar i Singh [61] w swojej pracy badawczej opracowali model do prognozowania chropowatości uwzględniając prędkość obrotową wrzeciona, posuw na obrót i rodzaj wiertła.

$$Ra = 4,04 + 0,31 \cdot A + 0,28 \cdot B - 2,29 \cdot C + 0,19 \cdot A^2 + 0,042 \cdot B^2 - 0,71 \cdot C^2 - 0,11 \cdot A \cdot B - 0,10 \cdot A \cdot C - 0,068 \cdot B \cdot C \quad (22)$$

gdzie: A – prędkość obrotowa wrzeciona, B – posuw na obrót, C – rodzaj wiertła, A·B – interakcja prędkości obrotowej wrzeciona z posuwem na obrót, A·C – interakcja prędkości obrotowej wrzeciona z rodzajem wiertła, B·C – interakcja posuwu na obrót z rodzajem wiertła.

Kilickap i współautorzy [62] bazując tylko na prędkości skrawania, posuwie na obrót oraz środowisku wiercenia (MQL, suche, sprężone powietrze) przedstawili parametr Ra chropowatości następująco.

$$Ra = 4,115 - 0,82767 \cdot A + 8,225 \cdot B + 0,135 \cdot C + 0,0538 \cdot A^2 \quad (23)$$

gdzie: A – prędkość skrawania, B – posuw na obrót, C – środowisko wiercenia.

Badacze z Pakistanu [20] zbudowali model chropowatości powierzchni (Ra) jako równanie logarytmiczne względem prędkości obrotowej wrzeciona, prędkości posuwu i metody wiercenia (w kilku przejściach).

$$\begin{aligned} \ln(Ra) = & 1,167 + 0,009 \cdot s + 0,717 \cdot f - 0,38 \cdot Q + \\ & -0,0018 \cdot s \cdot f + 0,002 \cdot s \cdot Q + 0,0033 \cdot f \cdot Q + \\ & +0,00012 \cdot s^2 - 0,0043 \cdot f^2 + 0,021 \cdot Q^2 \end{aligned} \quad (24)$$

gdzie:  $s$  – prędkość obrotowa wrzeciona,  $f$  – prędkość posuwu,  $Q$  – głębokość przejść,  $s \cdot f$  – interakcja prędkości obrotowej wrzeciona z prędkością posuwu,  $s \cdot Q$  – interakcja prędkości obrotowej wrzeciona z głębokością przejść,  $f \cdot Q$  – interakcja prędkości posuwu z głębokością przejść.

W badaniach [63] pod przewodnictwem Ravindranath przedstawiono ogólny model chropowatości względem parametru  $Ra$  dla czterech parametrów: materiał obrabiany, prędkość obrotową wrzeciona, posuw na obrót i powłoka wiertła. Dokładność tego równania w stosunku do rezultatów wynosiła około 83%.

$$Ra = 9,49 - 0,00208 \cdot Speed + 5,45 \cdot Feed + -0,928 \cdot Comp - 0,482 \cdot Tool \quad (25)$$

gdzie:  $Speed$  – prędkość obrotowa wrzeciona,  $Feed$  – posuw na obrót,  $Comp$  – materiał obrabiany,  $Tool$  – powłoka wiertła.

Grupa trzech naukowców pod przewodnictwem Cicek [45] opracowała model względem trzech parametrów: rodzaju narzędzia, prędkości skrawania i posuwu na obrót. Stwierdzili, że łączny wpływ prędkości skrawania i posuwu na obrót wynosi aż 83,07% wpływu na chropowatość powierzchni  $Ra$ .

$$Ra = 2,2393 - 0,235 \cdot Ct + 0,258 \cdot Vc + 0,747 \cdot f + +0,145 \cdot Vc \cdot f + 0,036 \cdot Ct^2 + 0,001 \cdot Vc^2 + 0,56 \cdot f^2 \quad (26)$$

gdzie:  $Ct$  – rodzaj wiertła,  $Vc$  – prędkość skrawania,  $f$  – posuw na obrót,  $Vc \cdot f$  – interakcja prędkości skrawania z posuwem na obrót.

W pracy [22] badacze z Indii zaproponowali model do prognozowania chropowatości ( $Ra$ ) uwzględniając następujące parametry wejściowe: narzędzie, prędkość obrotową wrzeciona, posuw na obrót, średnice wiertła, oraz materiał przedmiotu obrabianego. Jest to jeden z szerszych poglądów na model chropowatości powierzchni uwzględniający aż pięć parametrów. Model ten w stosunku do wyników doświadczalnych zachowuje dokładność wynoszącą 98%.

$$Ra = 0,39842 - 0,07817 \cdot A + 0,00044 \cdot B + +8,22000 \cdot C - 0,13859 \cdot D + 0,13671 \cdot E + +0,00001 \cdot B^2 + 0,00794 \cdot D^2 + 0,09692 \cdot E^2 + -0,00921 \cdot B \cdot C - 0,00009 \cdot B \cdot E + 0,19167 \cdot C \cdot D + -3,39000 \cdot C \cdot E \quad (27)$$

gdzie:  $A$  – narzędzie,  $B$  – prędkość obrotowa wrzeciona,  $C$  – posuw na obrót,  $D$  – średnica wiertła,  $E$  – materiał przedmiotu obrabianego,  $B \cdot C$  – interakcja prędkości obrotowej wrzeciona z posuwem na obrót,  $B \cdot E$  – interakcja prędkości obrotowej wrzeciona z materiałem przedmiotu obrabianego,  $C \cdot D$  – interakcja posuwu na obrót z średnicą wiertła,  $C \cdot E$  – interakcja posuwu na obrót z materiałem przedmiotu obrabianego.

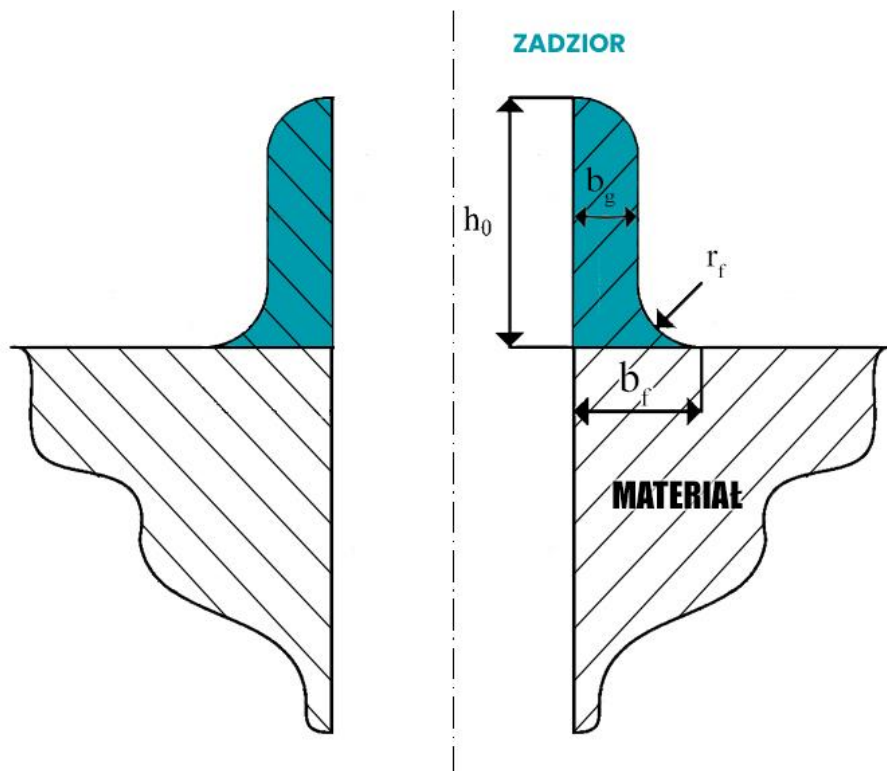


Większość badaczy ograniczyła się tylko do krótkich wniosków. Aamir wraz współautorami [64] nie przedstawili żadnego modelu matematycznego na podstawie osiągniętych wyników. Być może dlatego, że za parametry wejściowe przyjęli tylko posuw na obrót i prędkość obrotową wrzeciona. Tak samo jak badacze z Włoch [65]. Jednakże przedstawili parametry wejściowe w stosunku do typowych parametrów 3D chropowatości powierzchni: wysokościowych  $S_a$  i  $S_q$  oraz amplitudowych i kształtu nierówności  $S_{sk}$  i  $S_{ku}$ . Innym podejściem wykazał się Khanna wraz ze współautorami [52], którzy sprawdzili tylko jak wpływa rodzaj chłodzenia (brak i chłodzenie zalewowe) na jakość wywierconego otworu. Jednakże nie zmieniali oni żadnego z parametru wejściowego. Natomiast badacze z Niemiec [66] przedstawili tylko chropowatość powierzchni typując tylko parametr  $R_z$  dla, których parametrem wejściowym było tylko narzędzie. Wegert wraz ze współautorami [67] porównali jakość powierzchni (parametry  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_t$ ) w stosunku do głębokości wiercenia jednakże nie regulując parametrów wejściowych (przy stałej prędkości skrawania i posuwu). Autorzy z Indii [68] analizowali aż cztery parametry wejściowe: występowanie chłodzenia, prędkość posuwu, prędkość obrotową wrzeciona oraz głębokość wiercenia. Przeanalizowali oni za pomocą osiemnastej tablicy ortogonalnej wpływ każdego parametru wejściowego na chropowatość powierzchni a dokładniej parametr  $R_a$ . Niestety nie przedstawili żadnego modelu z powstałej pracy badawczej. Dwie grupy badaczy z Indii [47, 48] zoptymalizowali dobór prędkości obrotowej wrzeciona, posuwu na obrót i średnicy wiertła dla trzech parametrów chropowatości ( $R_a$ ,  $R_t$ ,  $R_z$ ). Jednakże również nie przedstawili ogólnego modelu tych trzech parametrów w stosunku do wartości wejściowych badanego procesu. Oezkaya wraz z współautorami [54] wykonywali wiercenie w warunkach wewnętrznego oraz zewnętrznego chłodzenia. Ocenili oni otwór względem jednego parametru chropowatości powierzchni  $R_z$ . Autorzy [69] badali wpływ pięciu różnych geometrii wiertła podczas wiercenia na parametr  $R_a$ . Badacze [55] badali parametr  $R_a$  w odniesieniu do czterech różnych parametrów prędkości obrotowej wrzeciona ( $n = 1500, 2000, 2500, 4500$  obr/min). Karabulut oraz Kaynak [70] badali wpływ posuwu na obrót ( $f_n = 0,025; 0,05; 0,075$  mm/obr) oraz dwóch różnych prędkości skrawania ( $v_c = 15$  i  $30$  m/min) na chropowatość powierzchni opisanej parametrem  $R_a$ . Autorzy [56] wykazali się bardzo ciekawym podejściem zbadali oni parametr  $R_a$  względem wielkości (1; 1,4 mm), ilości (2; 4 szt.), kształtu (okrągły; trójkątny) oraz kąta ( $25; 15^\circ$ ) kanałów chłodzących. W badaniach [71] zoptymalizowano proces wiercenia względem zużycia narzędzia, prędkości obrotowej wrzeciona ( $n = 215, 315, 455$  obr/min) oraz posuw na obrót ( $f_n = 0,106; 0,213; 0,316$  mm/obr) względem uzyskania najmniejszej wartości parametru  $R_a$ . Shah i współautorzy [72] wykonali ocenę wiercenia Inconelu 718 z zastosowaniem kriogenicznych cieczy chłodząco smarujących ( $LN_2$ ,  $LCO_2$ ), stałym posuwie  $f_n = 0.045$  mm/obr oraz trzech różnych parametrach prędkości skrawania ( $v_c = 10; 15; 20$  m/min). Dedeakayogullari wraz ze współautorami [35, 36] sprawdzali jaki jest wpływ wiertła (bez powłoki oraz z powłoką), posuwu na obrót ( $f_n = 0,06; 0,09; 0,12; 0,15$ ) oraz prędkości skrawania ( $v_c = 25; 50; 75; 100$  m/min) na parametr  $R_a$ .

Autorzy [59] wykonali obszerne badania względem dziewięciu różnych wartości posuwu na obrót ( $f_n = 0,02; 0,04; 0,08; 0,1; 0,12; 0,15; 0,18; 0,25; 0,3$  mm/obr), dziewięciu różnych prędkości obrotowych wrzeciona ( $n = 2000, 3000, 4000, 6000, 8000, 10000, 12000, 14000, 16000, 18000$  obr/min) oraz rodzaju zastosowanej powłoki na wiertle (bez powłoki, powłoka diamentowa oraz powłoka DLC). Sprawdzili jak powyższe parametry wejściowe wpływają na parametr Ra, Rt oraz Rz otworu. Ciekawym podejściem wykazali się badacze [73]. Zbadali oni wpływ wspomaganie wibracjami podczas wiercenia otworu na parametr Rz. Senthil oraz Dhanasekaran [60] badali wpływ kąta wierzchołka wiertła (108, 118, 128) oraz parametrów technologicznych ( $n = 1000; 2000; 3000, f_n = 0,05; 0,1; 0,15$ ) na parametr Ra. Al.-Tameemi wraz ze współautorami [57] badali wpływ powłoki wiertła (TiN/TiAlN, TiAlN oraz TiN), prędkości obrotowej wrzeciona ( $n = 1000, 2000, 3000$  obr/min) oraz prędkości posuwu ( $f = 50; 100; 150$  mm/min) na parametr Ra oraz Rz. Badacze [74] badali zmianę parametru Ra względem kąta wierzchołka wiertła (90, 118, 135) oraz parametrów technologicznych ( $n = 1000; 1500; 2000$  obr/min,  $f = 100; 150; 200$  mm/min). Hassan, Abdullah oraz Franz [75] badali jak zmienia się wartość parametru Ra otworu względem zastosowanego wiertła (kąta nachylenia, prześwitu oraz wierzchołka wiertła). Autorzy [76] badali jak wzmocnienie materiału oraz parametry technologiczne procesu wiercenia ( $v_c = 30; 45; 60$  m/min,  $f_n = 0,05; 0,1; 0,15$ ) wpływają na parametr Ra otworu. Ni wraz ze współautorami [77] badali zmianę parametru Ra względem pięciu różnych parametrów technologicznych ( $n = 1000; 2000; 3000; 4000; 5000, f = 50; 100; 150; 200; 250$  mm/min).

#### **1.4. Wpływ warunków obróbki na zadziory wokół otworów**

Podczas wiercenia otworów zawsze wokół nich powstają zadziory. Rozróżniamy cztery wskaźniki opisujące zadziór: wysokość zadzioru  $h_0$ , grubość korzenia zadzioru  $b_f$ , grubość zadzioru  $b_g$  i promień korzenia zadzioru  $r_f$ , co zostało przedstawione na rys. 12.



Rys. 12. Wskaźniki zadzioru

Abdelhafeez i współautorzy [51] przedstawili opracowane modele wysokości zadziorów dla (AA7010 i Ti) w stosunku do dwóch parametrów wejściowych: prędkości skrawania i posuw na obrót.

$$\begin{aligned}
 & \text{Wysokość zadziora (AA7010)} \\
 & = 282,6 - 1,110 \cdot Vc - 2186 \cdot f + \\
 & + 0,00111 \cdot f^2 + 4507 \cdot f^2 + 4,10 \cdot Vc \cdot f
 \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned}
 & \text{Wysokość zadziora (Ti)} = 53,0 + 8,24 \cdot Vc - 1203 \cdot f + \\
 & - 0,2254 \cdot Vc^2 + 3411 \cdot f^2 + 4,64 \cdot Vc \cdot f
 \end{aligned} \quad (29)$$

gdzie:  $Vc$  – prędkość skrawania,  $f$  – posuw na obrót,  $Vc \cdot f$  – interakcja prędkości skrawanej z posuwem na obrót.

Badacze z Indii [63] przedstawili ogólny model wysokości zadziorów dla czterech parametrów wejściowych: materiał obrabiany, prędkość obrotowa wrzeciona, posuw na obrót i powłoka wiertła.

$$\text{Wysokość zadzióra} = 1,14 - 0,000173 \cdot n + 0,450 \cdot f + \\ -0,0467 \cdot \text{mat} - 0,108 \cdot p \quad (30)$$

gdzie:  $n$  – prędkość obrotowa wrzeciona,  $f$  – posuw na obrót, mat – materiał obrabiany,  $p$  – powłoka wiertła.

Badacze [21] przedstawili wysokość powstałych zadziorów w funkcji prędkości posuwu dla trzech różnych prędkości skrawania.

Dla  $v_c = 28$  m/min

$$y = 1,9883 \cdot x - 66,115 \quad (31)$$

Dla  $v_c = 24$  m/min

$$y = 1,7678 \cdot x - 67,354 \quad (32)$$

Dla  $v_c = 7$  m/min

$$y = 1,2223 \cdot x - 53,045 \quad (33)$$

gdzie:  $x$  – prędkość posuwu

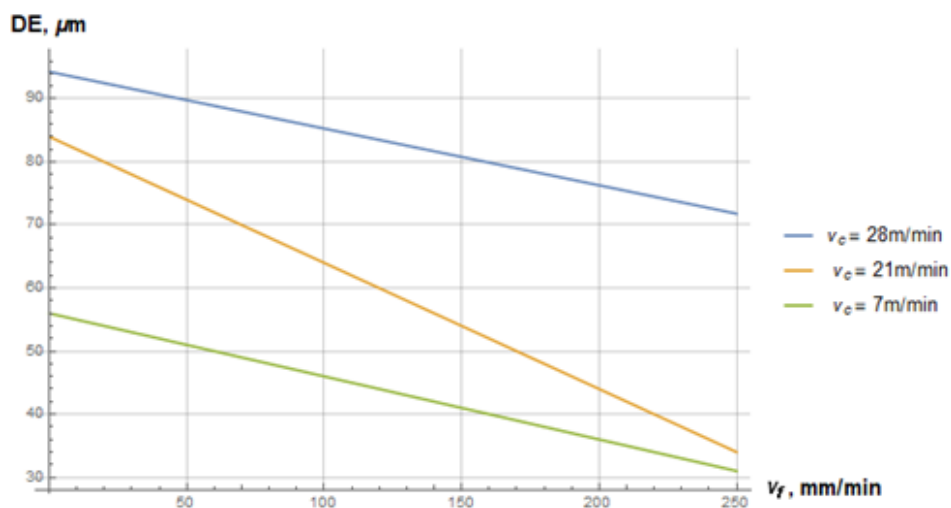
Bi i Liang [78] zmierzili wysokość i grubość zadziorów na wejściu i wyjściu przy zmianie trzech parametrów: ciśnienia podawania cieczy chłodząco-smarującej, prędkości obrotowej wrzeciona i posuwu na obrót. Ucak i Cicek [30] zmierzili wysokość zadziorów na wejściu i wyjściu dla otworów wywierconych za pomocą dwóch wiertel (zwykłego i pokrytego TiAlN). Stosując różne metody chłodzenia (brak, LN<sub>2</sub>, wodne). Badacze Sandeep i współautorzy [49] przedstawili zmianę wysokości powstających zadziorów względem zmieniającej się prędkości obrotowej wrzeciona oraz wpływu warunków. Badacze z Indii [25] przedstawili tylko wpływ prędkości obrotowej wrzeciona na wysokość zadziorów względem różnych cieczy chłodząco-smarujących. Grupa naukowców [79] ustaliła, że prędkość skrawania wpływa w znaczącym stopniu (66%) na powstawanie zadziorów względem dwóch pozostałych parametrów: posuwu na obrót i kąta wierzchołkowego wiertła. Giasin i Ayvar-Soberanis [31, 32] dokonali pomiaru wysokości oraz grubości zadziorów na wejściu i wyjściu otworów dla czterech parametrów: prędkości obrotowej wrzeciona ( $n = 1000, 3000, 6000, 9000$  obr/min) i prędkości posuwu ( $v_f = 100, 300, 600, 900$  mm/min). Badacze [29] badali tylko jak parametry technologiczne ( $v_c = 22,5; 30; 37,5$  m/min oraz  $f_n = 0,015; 0,025; 0,035$  mm/obr) wpływają na wysokość zadzioru na wyjściu otworu.

## 2. BADANIA SYMULACYJNE WPLYWU WYBRANYCH WARUNKÓW OBRÓBKI NA DOKŁADNOŚĆ WYMIAROWO KSZTAŁTOWĄ I CHROPOWATOŚĆ POWIERZCHNI OTWORÓW

W analizie literaturowej podjętego tematu przedstawiono modele matematyczne, które zostały wykorzystane do przeprowadzenia własnych badań symulacyjnych dokładności wymiarowo kształtowej i chropowatości powierzchni wykonanych otworów.

### 2.1. Badania symulacyjne wpływu warunków obróbki na dokładność wykonanych otworów

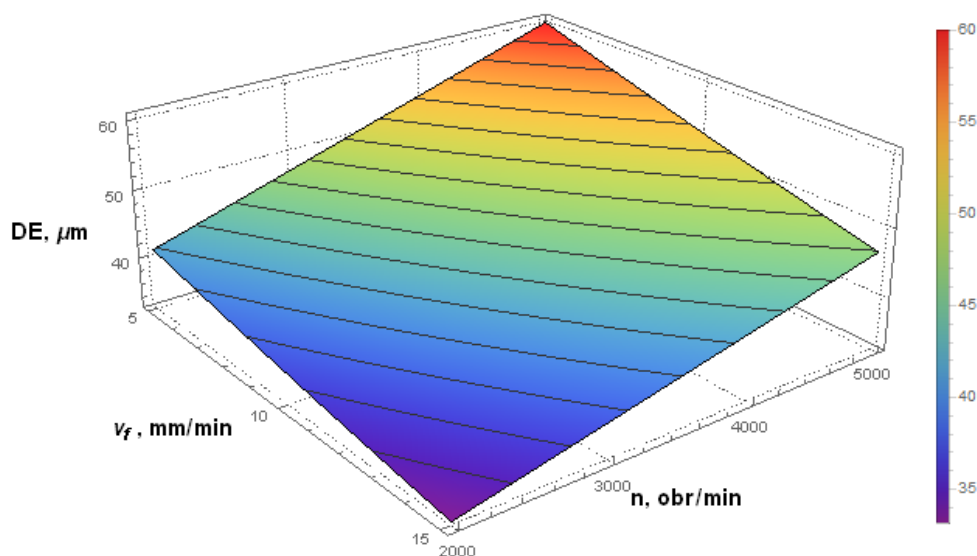
Większość równań przedstawionych w rozdziale 1 przedstawia tylko zmianę wartości wyjściowych za pomocą parametrów technologicznych. Jednakże niektóre równania są mało rozwinięte w stosunku do innych. W tym podrozdziale zostaną wykonane badania symulacyjne wybranych równań dotyczących wpływu parametrów wejściowych na dokładność wykonanych otworów.



Rys. 13. Wpływ prędkości posuwu  $v_f$  i prędkości skrawania  $v_c$  na błąd średnicy otworu na podstawie równań (2), (3) i (4)

Analizując wyniki symulacji przedstawione na rys. 13, w którym to badany jest wpływ prędkości posuwu i skrawania na dokładność wykonania otworu w stopie Ti6Al4V. Stwierdzono, że zwiększenie prędkości posuwu pozytywnie wpływa na dokładność wymiarową otworu. Natomiast zwiększenie prędkości skrawania pogarsza dokładność wymiarową otworu. Jednakże równania (2), (3), (4) określają średnice wykonania otworów dlatego też zostały one przekształcone w taki sposób,

aby przedstawiały błąd średnicy otworu. Jednocześnie równania nie są tak elastyczne na zmianę parametru prędkości skrawania. Wynika z tego, że równania powyższe można zastosować tylko przy ściśle określonych prędkościach skrawania ( $v_c = 7; 21; 28$  m/min).

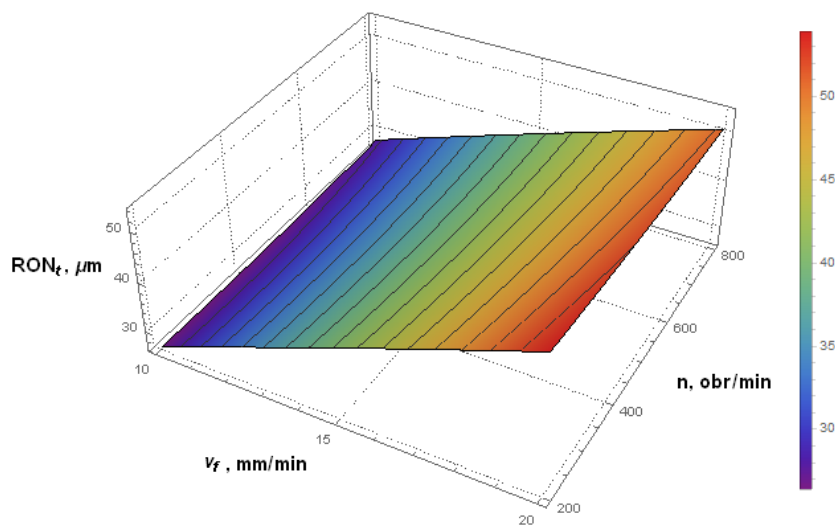


Rys. 14. Wpływ posuwu na obrót i prędkości obrotowej wrzeciona na błąd średnicy otworu na podstawie równania (6)

Rys. 14 ukazuje wyniki badań symulacyjnych trzech parametrów wejściowych prędkości obrotowej wrzeciona, prędkości posuwu i ciśnienia podawania cieczy chłodząco-smarującej wynoszącego 6 bar na błąd średnicy wywierconych otworów w Ti6Al4V. Zauważono, że przy małych zakresach prędkości obrotowej uzyskuje się bardzo dużą dokładność wywierconych otworów. Jednakże dla prędkości posuwu tendencja ta jest odwrotna czym większy posuw tym mniejszy błąd średnicy otworu.

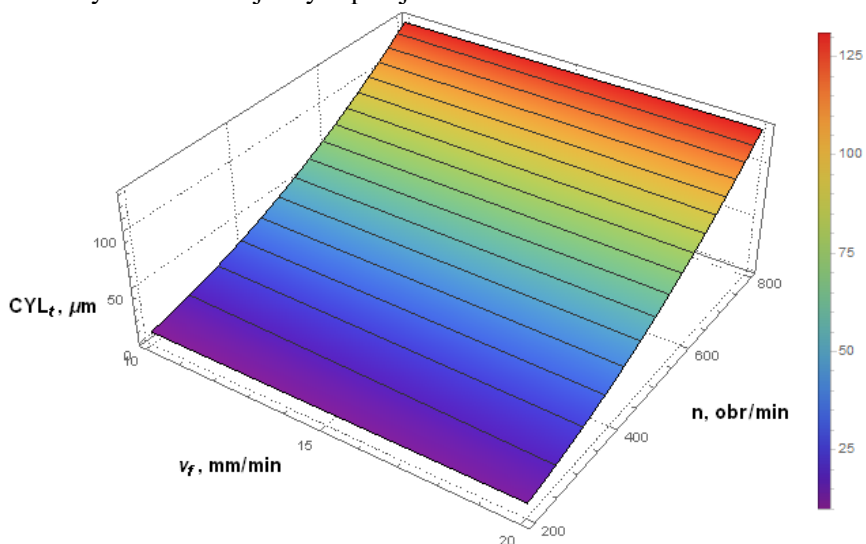
## 2.2. Badania symulacyjne wpływu warunków obróbki na odchyłki kształtu i położenia wykonanych otworów

W tym podrozdziale zostaną wykonane własne badania symulacyjne wybranych równań z rozdziału 1.2. dotyczące wpływu parametrów wejściowych na odchyłkę okrągłości i odchyłkę walcowości wykonanych otworów.



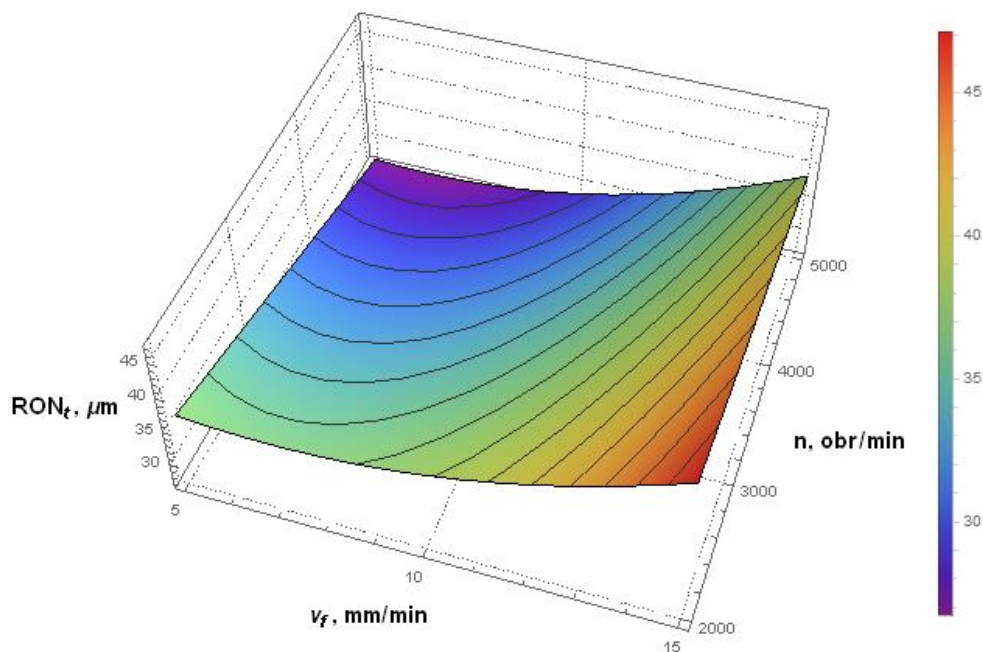
Rys. 15. Wpływ głębokości wiercenia, prędkości posuwu i prędkości obrotowej wrzeciona na odchyłkę okrągłości otworu na podstawie równania (15)

Z badań symulacyjnych równania (15) przedstawionych na rys. 15 wynika, że prędkość obrotowa wrzeciona nie ma żadnego wpływu na odchyłkę okrągłości wywierconego otworu w AISI D2. Natomiast prędkość posuwu ma tutaj największe znaczenie, przy wzroście prędkości posuwu rośnie odchyłka okrągłości otworu. Przy założeniu wywiercenia w jednym przejściu.



Rys. 16. Wpływ głębokości wiercenia, prędkości posuwu i prędkości obrotowej wrzeciona na błąd okrągłości otworu na podstawie równania (16) przy założeniu wiercenia w jednym przejściu

Równanie (16) zostało zasymulowane przy założeniu wiercenia w jednym przejściu. Stwierdzono, że zmniejszenie prędkości obrotowej wrzeciona w znaczącym stopniu zmniejsza odchyłkę błędu walcowości otworu w materiale AISI D2. Jednakże posuw nie ma prawie żadnego wpływu na zmianę odchyłki walcowości.



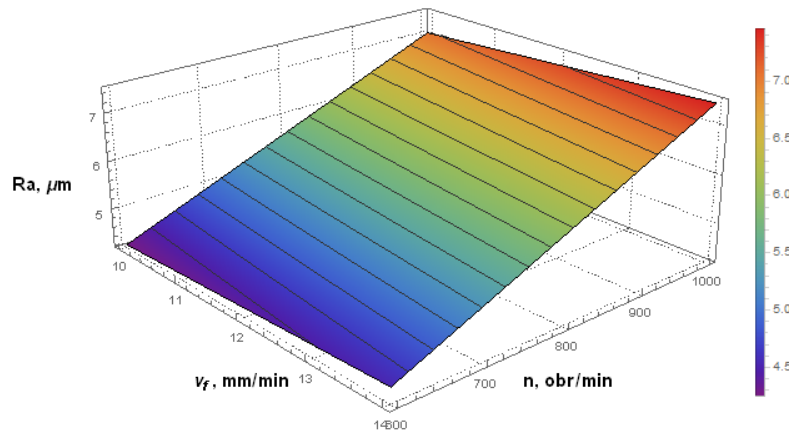
Rys. 17. Wpływ prędkości posuwu i prędkości obrotowej wrzeciona przy założeniu wiercenia w jednym przejściu na błąd okrągłości otworu na podstawie równania (17)

Na rys. 17 przedstawiającym wyniki symulacji widać najlepsze parametry wejściowe wynoszące:  $n = 5000$  obr/min i  $v_f = 5$  mm/min. Stwierdzono, że wzrost prędkości posuwu zwiększa odchyłkę okrągłości. Natomiast wzrost prędkości obrotowej wrzeciona powoduje spadek odchyłki okrągłości otworu.

### 2.3. Badania symulacyjne wpływu warunków obróbki na chropowatość powierzchni wykonanych otworów

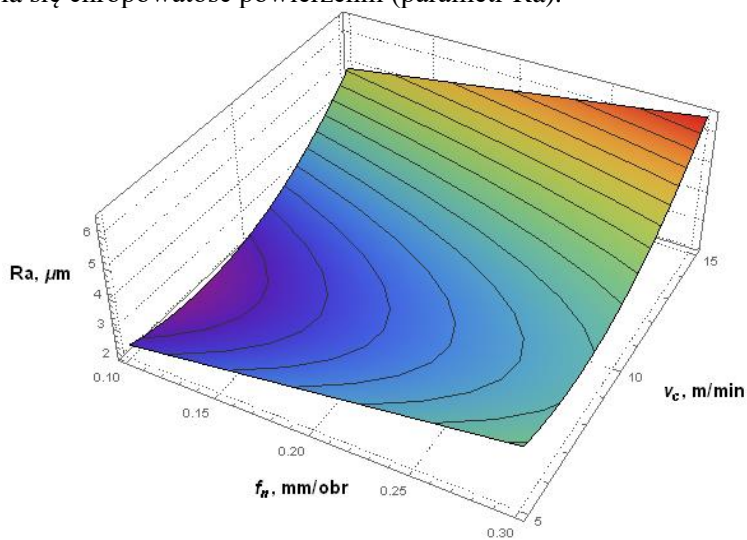
Ważnym parametrem wyjściowym podczas oceny jakości wywierconego otworu jest chropowatość powierzchni. Najczęściej opisywana jest ona za pomocą parametru  $R_a$ . W tym rozdziale zostaną przedstawione niektóre równania z rozdziału 1, które pozwolą przedstawić dotychczasowe osiągnięcia z danej tematyki.





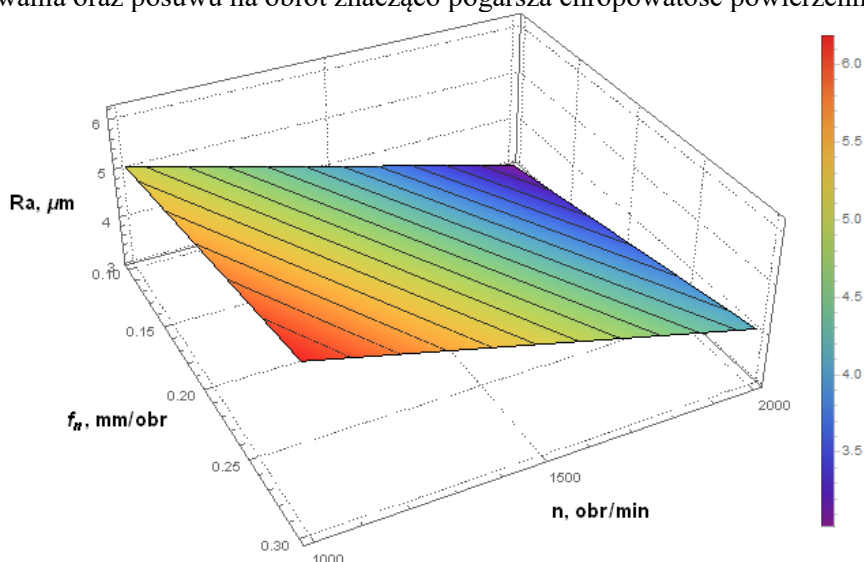
Rys. 18. Wpływ prędkości posuwu i prędkości obrotowej wrzeciona przy założeniu kąta wierzchołka wiertła na poziomie  $125^\circ$  na prognozowanie parametru  $R_a$  chropowatości otworu na podstawie równania (21)

Analizując wyniki przedstawione na rys. 18 zauważono, że dla Ti-6Al-4V największą rolę odgrywa prędkość obrotowa wrzeciona im większa tym lepszy wynik parametru  $R_a$ . Natomiast czym mniejsza prędkość posuwu tym nieznacznie poprawia się chropowatość powierzchni (parametr  $R_a$ ).



Rys. 19. Wpływ posuwu na obrót i prędkości skrawania przy suchym wierceniu na prognozowanie parametru  $R_a$  chropowatości otworu w AISI 1045 na podstawie równania (23)

Z badania symulacyjnego równania (23) podczas nie stosowania żadnego środka smarnego-chłodzącego stwierdzono, że najbardziej korzystniejszymi parametrami dla parametru Ra są: prędkość skrawania z zakresu około 6 do 10 m/min oraz posuw na obrót wynoszący od 0,1 do 0,13 mm/obr. Jednakże zwiększenie prędkości skrawania oraz posuwu na obrót znacząco pogarsza chropowatość powierzchni.

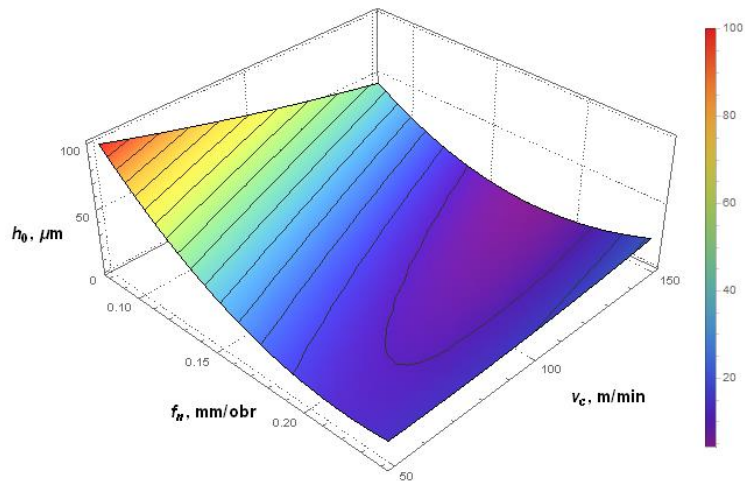


Rys. 20. Wpływ posuwu na obrót i prędkości skrawania przy użyciu wiertła z powłoką z azotku tytanu (TiN) na parametr Ra chropowatości otworu w kompozycie na osnowie metalowej z aluminium na podstawie równania (25)

Dla tego specyficznego przypadku przedstawionego na rys. 20 stwierdzono, że duża prędkość obrotowa wrzeciona wraz z małym posuwem wpływają korzystnie na chropowatość powierzchni otworów wierconych w kompozycie na osnowie metalowej z aluminium.

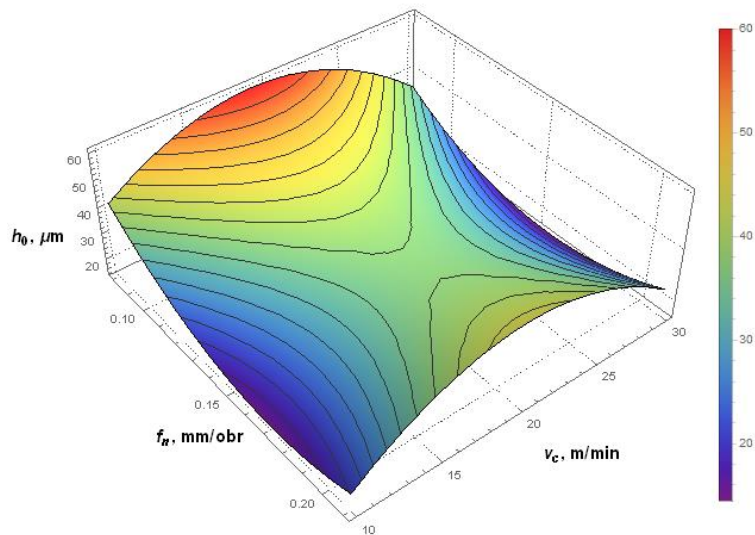
#### 2.4. Badania symulacyjne wpływu warunków obróbki na zadziory wokół wykonanych otworów

W większości przypadków zadziory z otworów, usuwane są w kolejnych procesach technologicznych. Jednakże można skrócić operację wytworzenia danego elementu dostosowując tak parametry wejściowe, aby uzyskać, jak najmniejszy zadziór na wyjściu. W niniejszym rozdziale zostaną przedstawione własne badania symulacyjne już istniejących wzorów dla zadziorów powstających wokół wykonanych otworów.



Rys. 21. Wpływ posuwu na obrót i prędkości skrawania na wysokość zadziorów wokół otworu w materiale AA7010 na podstawie równania (28)

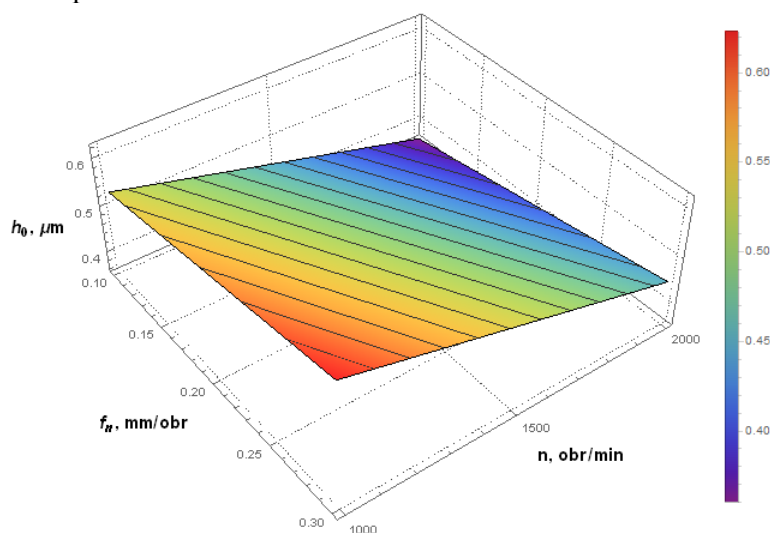
Najmniejszą wysokość zadzioru otrzymamy przy: posuwie na obrót wynoszącym około 0,18 do 0,22 mm/obr oraz prędkości skrawania na poziomie od 80 do 150 m/min. Największe zadziory powstaną dla bardzo małym posuwie na obrót wynoszącym 0,8 mm/obr oraz małej prędkości skrawania 50 m/min.



Rys. 22. Wpływ posuwu na obrót i prędkości skrawania na wysokość zadziorów wokół otworu w materiale Ti-6Al-4V na podstawie równania (29)

W tym przypadku na rys. 22. mamy dwie optymalne kombinacje doboru parametrów wejściowych. Pierwsza z zakresu posuwu na obrót od 0,14 do

0,21 mm/obr oraz małej prędkości skrawania wynoszącej 10 m/min. Drugą opcją jest wysoka prędkość skrawania rzędu 30 m/min oraz takim samym zakresem posuwu na obrót co w pierwszej opcji. Druga opcja jest optymalna ze względu na produktywność procesu wiercenia.



Rys. 23. Wpływ posuwu na obrót oraz prędkości obrotowej wrzeciona na wysokość zadziorów wokół otworu na podstawie równania (30)

Badanie symulacyjne wysokości zadzioru przedstawiono na rys. 23. Najmniejszą wysokość zadzioru powstanie przy następujących parametrach wejściowych: prędkość obrotowa wrzeciona wynosząca 2000 obr/min oraz posuwie na obrót wynoszącym 0,1 mm/obr. Zmniejszenie posuwu na obrót niezależnie od zastosowanej prędkości obrotowej wrzeciona zmniejsza wysokość zadzioru. Natomiast zwiększanie prędkości obrotowej wrzeciona również powoduje zmniejszanie wysokości zadzioru.

#### Wnioski:

1. Analiza literatury wykazała, że jakość wykonanego otworu oceniana jest najczęściej za pomocą następujących parametrów wyjściowych: odchyłki walcowości, odchyłki okrągłości, odchyłki prostoliniowości, błędu średnicy, chropowatości powierzchni oraz wysokości zadzioru na wyjściu.
2. Modele matematyczne pozwalają określać przedziały w których to parametr badany może uzyskać małe bądź duże wartości
3. Osiągnięcie jak najlepszych parametrów jakości otworu pozwala na zmniejszenie błędów w dalszych operacjach (brak tzw. dziedziczenia technologicznego).
4. Dla częstych przypadków, gdzie wiercenie jest obróbką ostateczną jakość technologiczna otworu decyduje o jego właściwościach eksploatacyjnych.

### **3. HIPOTEZY I ZAKRES PRACY**

Na podstawie przeglądu literatury, który został, przedstawiony w poprzednich rozdziałach zauważono, że parametrami wyjściowymi procesu wiercenia, na podstawie których prowadzona jest ocena jakości wykonanego otworu to: odchyłka walcowości, odchyłka okrągłości, odchyłka prostoliniowości, błąd średnicy otworu, chropowatość powierzchni oraz wysokość i szerokość zadzioru na wyjściu. Jednakże większość prac badawczo-rozwojowych uwzględnia tylko parametry technologiczne procesu wiercenia.

W literaturze spotyka się podział procesu wiercenia ze względu na różne układy kinematyk. Jednakże brak jest jakichkolwiek badań uwzględniających ten czynnik wejściowy jako zmienna wpływająca na jakość wykonanych otworów.

#### **3.1. Hipotezy pracy**

Na podstawie analizy literatury przedstawionej w pierwszym i drugim rozdziale, korzystając z wiedzy i doświadczeń nabytych w wyniku przeprowadzonych prac badawczych oraz obserwacji sformułowano poniższe hipotezy:

- istnieje silny związek pomiędzy parametrami procesu wiercenia, układami kinematycznymi a parametrami jakościowymi wykonanego otworu,
- istnieją zakresy optymalnych parametrów technologicznych w każdym układzie kinematycznym względem badanych parametrów oceny jakości otworów,
- dokładna analiza parametrów wejściowych i wyjściowych procesu wiercenia umożliwi zbudowanie modeli matematycznych do przewidywania odchyłki walcowości, odchyłki prostoliniowości, odchyłki okrągłości, błędu średnicy, chropowatości powierzchni, szerokości oraz wysokości zadzioru na wyjściu otworu.

#### **3.2. Zakres pracy**

Udowodnienie postawionych w pracy hipotez wymagało przeprowadzenia badań procesu wiercenia. Poniżej przedstawiono plan oraz cele pracy badawczej:

- opracowanie metodyki procesu wiercenia,
- opracowanie stanowiska badawczego oraz metodyki pomiarów odchyłki walcowości, odchyłki okrągłości, odchyłki prostoliniowości, błędu średnicy, chropowatości powierzchni, szerokości oraz wysokości zadzioru,
- analiza i ocena parametrów wejściowych takich jak: prędkość skrawania, posuw na obrót oraz układ kinematyczny na jakość wykonanego otworu,
- opracowanie tablic ortogonalnych w celu weryfikacji poszczególnych parametrów wejściowych,

- zbudowanie modeli prognozujących parametry oceny jakości otworu dla różnych materiałów,
- zestawienie i porównanie wyników eksperymentalnych z opracowanymi modelami,
- zobrazowanie prognozowanych wartości oceny jakości otworu dla wybranych przedziałów prędkości skrawania, posuwu na obrót oraz układów kinematycznych,
- wnikliwa analiza powstających odchyłek walcowości oraz odchyłek okrągłości otworu.
- optymalizacja wielokryterialna parametrów wejściowych – Grey Relational Analysis

### **3.3. Elementy nowości w pracy**

- uwzględnienie w ocenie jakości wierconego otworu wcześniej nie ujmowanego parametru wejściowego jakim jest układ kinematyczny procesu wiercenia,
- opracowanie modeli matematycznych do prognozowania odchyłek walcowości, odchyłek okrągłości, odchyłek prostoliniowości, błędów średnic, chropowatości powierzchni, szerokości oraz wysokości zadziorów dla różnych materiałów,
- wnikliwa analiza odchyłki walcowości oraz odchyłki okrągłości zawierająca nie uwzględniany dotychczas w pracach naukowo badawczych parametr wejściowy jakim jest układ kinematyczny procesu wiercenia.

#### 4. METODYKA BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH PROCESU WIERCENIA

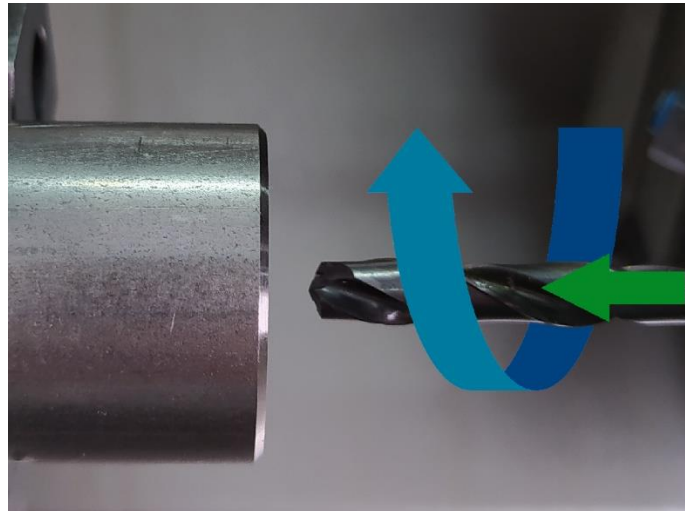
Badany proces wiercenia przedmiotów obrotowo-symetrycznych przy różnych kinematykach procesu wiercenia zostanie przeprowadzony przy pomocy centrum tokarskiego z napędzanymi narzędziami.

Rozdział czwarty przedstawia charakterystyki trzech układów kinematycznych, narzędzi, oprawki, maszyn, materiałów, mocowań, kształtu oraz kodowania próbek wykorzystanych w badaniach.

##### 4.1. Charakterystyka procesu wiercenia w różnych układach kinematycznych

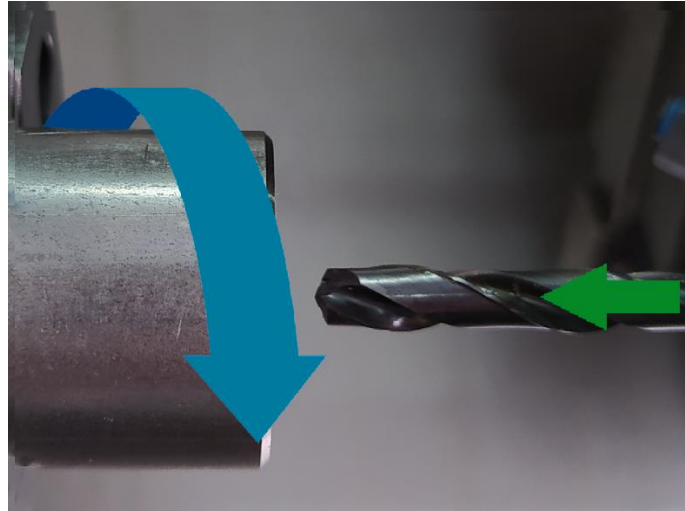
Wszystkie prace eksperymentalne zostały wykonane w trzech różnych układach kinematycznych procesu wiercenia:

- układ kinematyczny pierwszy (KIN I) – przedmiot obrabiany jest nieruchomy, natomiast narzędzie wykonuje jednocześnie ruch główny (obrotowy) oraz posuwowy - prostoliniowy, co zostało przedstawione na rys. 24,



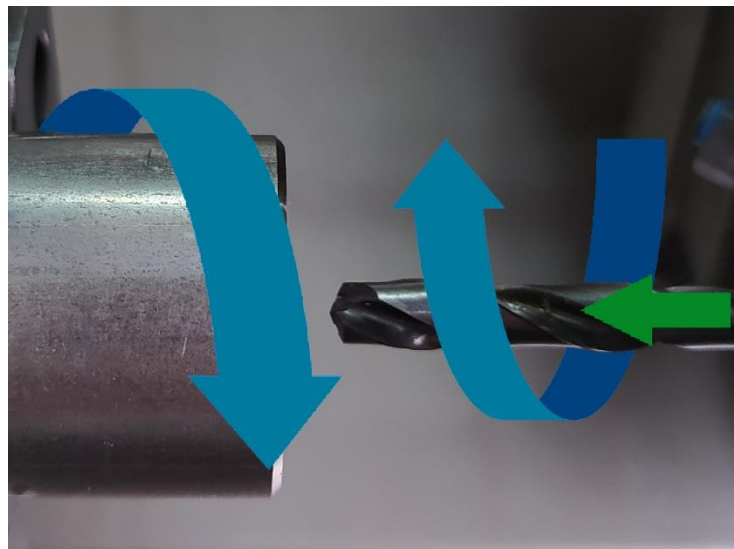
Rys. 24. Układ kinematyczny pierwszy

- układ kinematyczny drugi (KIN II) – przedmiot obrabiany wykonuje ruch główny (obrotowy), natomiast narzędzie wykonuje tylko ruch posuwowy - prostoliniowy, równoległy do osi obrotu przedmiotu, co zostało przedstawione na rys. 25,



Rys. 25. Układ kinematyczny drugi

- układ kinematyczny trzeci (KIN III) – przedmiot obrabiany wykonuje ruch obrotowy, natomiast narzędzie wykonuje ruch obrotowy w przeciwnym kierunku do ruchu przedmiotu oraz ruch posuwowy - prostoliniowy, co przedstawiono na rys. 26.



Rys. 26. Układ kinematyczny trzeci



## 4.2. Charakterystyka narzędzia użytego do badań

W badaniach procesu wiercenia zastosowano wiertło z węglików spiekanych 5D o średnicy  $\phi$  6,0 mm firmy ATORN UNI z powłoką TiAlNPlus (azotek tytanu glinu) z możliwością chłodzenia wewnętrznego przez narzędzie. Powłoka azotku tytanu aluminium posiadała mikrotwardość rzędu 30 – 33 GPa i charakteryzuje się odpornością na działanie wysokich temperatur. Stosowanie takiej powłoki zalecane jest przy obróbce stali zwykłej, stali ulepszonej cieplnie, stali nierdzewnej, żeliwa szarego, aluminium, stopów aluminium, miedzi, stopów miedzi, tworzyw sztucznych oraz stopów tytanu i niklu [S1]. W próbach skrawania zdecydowano się na zastosowanie powyższego wiertła ze względu na możliwość wykorzystania go do wiercenia otworów w szerokiej gamie materiałów, dużej żywotności, która zapewnia wielowarstwowa powłoka oraz odpowiednie wykończenie krawędzi skrawającej. Poniżej w tabeli 1 przedstawiono podstawowe parametry techniczne wiertła stosowanego w próbach skrawania.

Tabela 1. Parametry techniczne wiertła wykorzystanego w badaniach

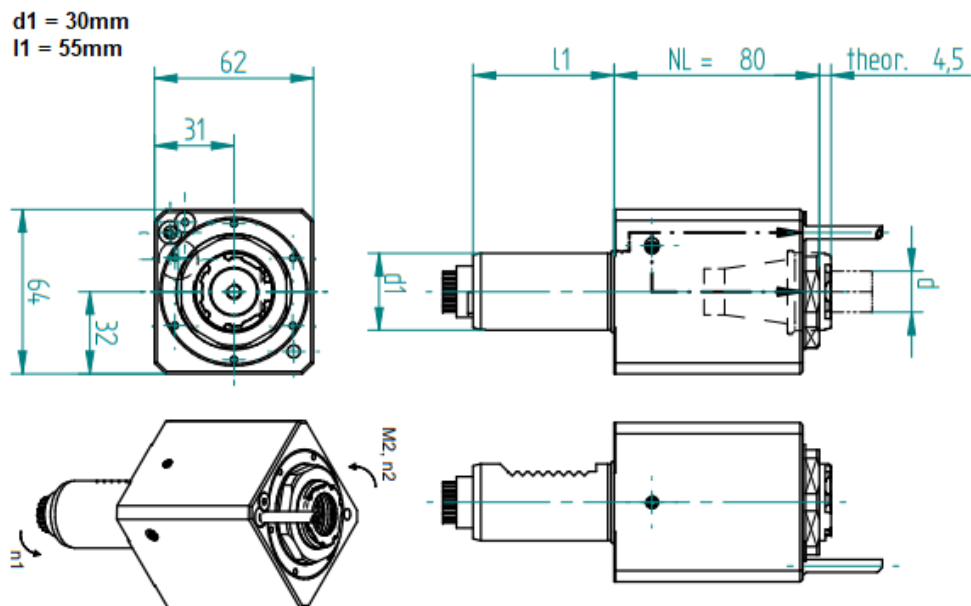
Średnica wiercenia	$\phi$ 6 mm
Materiał narzędzia	VHM
Powłoka części skrawającej	TiAlNPlus
Typ	HPC UNI
Zasilanie płynem chłodzącym	Wewnętrzne
Mocowanie od strony maszyny	Chwyt cylindryczny HA
Kąt wierzchołkowy	140°
Średnica walcowej części chwytowej	6 mm
Długość rowka wiórowego	44 mm
DIN	6537
Ciężar brutto	0,036 kg



Rys. 27. Widok wiertła ATORN UNI z powłoką TiAlNPlus

## 4.3. Charakterystyka oprawki narzędziowej

Wiertło zostało zamocowane w oprawce napędzanej osiowo VDI30 SAUTER 113180 za pomocą tulejki ER25. Jest to oprawka z możliwością zastosowania chłodzenia wewnętrznego oraz zewnętrznego.



Rys. 28. Widok oprawki napędzanej VDI30 firmy SAUTER model 113180 [S2]

Oprawka przedstawiona na rys. 28 charakteryzuje się bardzo dobrą odpornością na zginanie i skręcanie. Głównymi zaletami oprawki są:

- możliwość napędzania osiowego narzędzi,
- chłodzenie narzędzia wewnątrz bądź zewnątrz co pozwala na zwiększenie żywotności ostrza oraz ułatwia ewakuację wiórów,
- łatwy system mocowania narzędzi w postaci tulei zaciskowej.

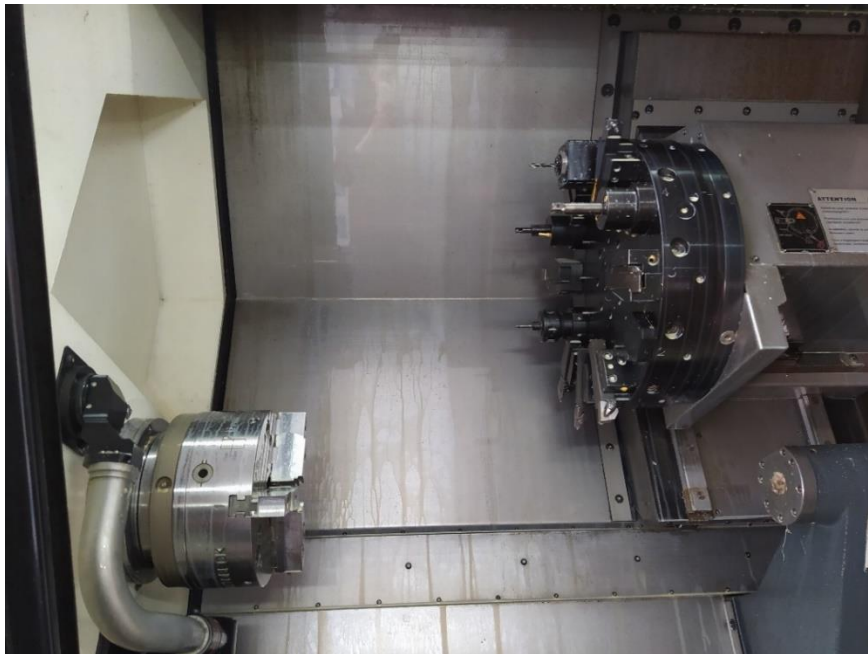
#### 4.4. Charakterystyka maszyn stosowanych w badaniach

Głównym celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu kinematyki procesu wiercenia na jakość uzyskanych otworów. W celu przebadania trzech różnych układów kinematycznych procesu wiercenia zastosowano centrum tokarskie firmy Gildemeister model CTX alpha 500 znajdujące się w Laboratorium Obrabiarek Sterowanych Numerycznie Politechniki Świętokrzyskiej. Obrabiarka posiadała dwunastopozycyjną głowicę z napędzanymi narzędziami w standardzie VDI30 DIN 5480, maksymalna prędkość obrotowa wrzeciona 5000 obr/min, moc znamionowa napędu 20 kW oraz moment obrotowy 2200 Nm. Maszyna dzięki swojej konstrukcji posiada dużą sztywność, która zapewnia stabilność procesom obróbki. Obrabiarka posiada również stację filtrującą chłodziwo.

##### Parametry obrabiarki:

- głowica: dwanaście narzędzi na oprawki VDI 30,

- 12 gniazd napędzanych,
- sterowana oś C,
- moc napędu 20 kW,
- średnica toczenia nad łożem  $\varnothing$  290 mm,
- maksymalna długość toczenia 500 mm,
- droga osi X (planowanie) 190 mm,
- uchwyt trójścękowy na wrzecionie głównym SMW Autoblok  $\varnothing$  210mm, przelot  $\varnothing$  52 mm,
- maksymalna średnica wałka przelotowego  $\varnothing$  50 mm,
- przelotowe wrzeciono,
- odbiornik detalu,
- system chłodzenia,
- waga maszyny 4300 kg,
- wymiary gabarytowe maszyny 3465 x 2510 x 1825 mm [S3].



Rys. 29. Widok przestrzeni roboczej obrabiarki CTX alpha 500 firmy DMG  
Gildemeister

Do pomiaru średnicy, odchyłki walcowości, odchyłki prostoliniowości oraz odchyłki okrągłości wykorzystano współrzędnościową maszynę pomiarową Prismo Navigator firmy Zeiss (rys. 30.) znajdującą się w Laboratorium Komputerowych Pomiarów Wielkości Geometrycznych Politechniki Świętokrzyskiej. Maszyna charakteryzuje się: wysoką dynamiką, dokładnością, dużą odpornością na warunki

otoczenia, dużą sztywnością, szybkością wykonywania pomiarów oraz pasywnym tłumieniem drgań elastomeru [S4]. W tabeli poniżej przedstawiono parametry stosowanej maszyny pomiarowej.

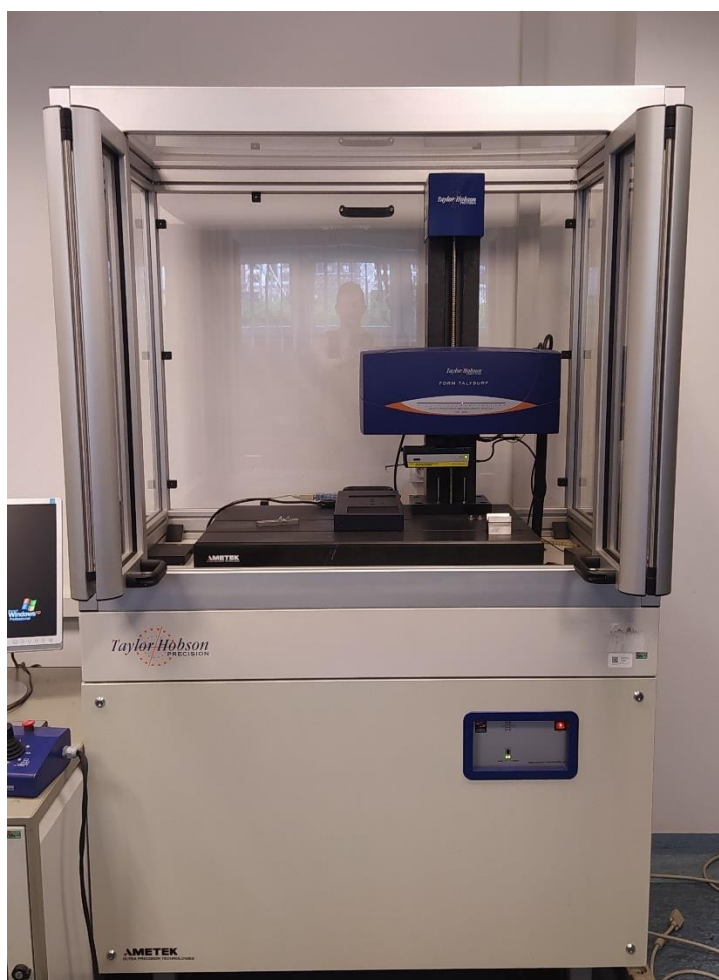
Tabela 2. Parametry techniczne współrzędnościowej maszyny pomiarowej Prismo Navigator

Zakres pomiarowy X	900 mm
Zakres pomiarowy Y	1200 mm
Zakres pomiarowy Z	700 mm
Błąd pomiaru długości	$0,9+L/350 \mu\text{m}$
Dokładność sondy pomiarowej	$1,0 \mu\text{m}$
Błąd pomiaru kształtu	$1,0 \mu\text{m}$
Błąd pomiaru skanowania	$1,9 \mu\text{m}$



Rys. 30. Widok współrzędnościowej maszyny pomiarowej Prismo Navigator firmy Zeiss

Do pomiaru chropowości powierzchni zastosowano profilometr stykowy Form Talysurf PGI 1230 firmy Taylor Hobson (rys. 31.) znajdujący się w Laboratorium Komputerowych Pomiarów Wielkości Geometrycznych Politechniki Świętokrzyskiej. Profilometr umożliwia bardzo dokładne pomiary chropowości powierzchni ze względu na zastosowaną głowicę interferometryczną. Rozdzielczość pozycjonowania wynosi poniżej 1  $\mu\text{m}$ . Zakres pomiarowy wynosi 12,5 mm. Prostoliniowość zespołu przesuwu jest mniejsza niż 0,2  $\mu\text{m}$  na długości 200 mm.



Rys. 31. Widok profilometru stykowego Form Talysurf PGI 1230 firmy Taylor Hobson

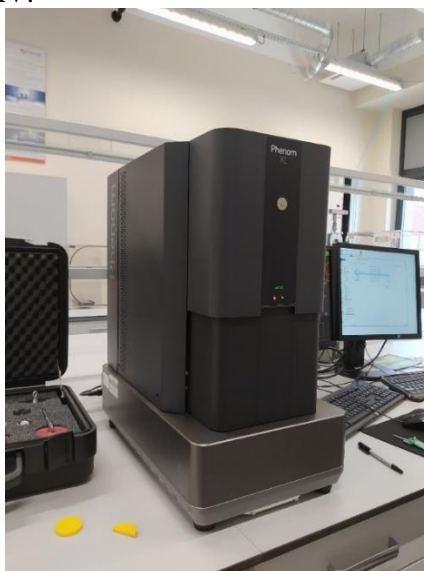
Do pomiaru wysokości oraz szerokości zadzioru na wyjściu i wejściu wykorzystano mikroskop Hirox KH-8700 (rys. 32.) wyposażony w obiektyw rewolwerowy z zakresem powiększeń 32x-5000x z podwójnym i mieszanim

systemem oświetlenia (współosiowe i pierścieniowe). Posiada oświetlenie LED o dużej intensywności z temperaturą barwową 5700 K.



Rys. 32. Widok mikroskopu Hirox KH-8700

Do pomiaru rzeczywistego składu każdego materiału wykorzystano skaningowy mikroskop elektronowy Phenom XL przedstawiony na rys. 33. Czas niezbędny do uzyskania obrazu elektronowego wynosi do 60 s. Ma on możliwość uzyskania powiększenia do 200 000x. Posiada on bardzo długi czas życia źródła elektronów CeB6 (2000 godzin). Źródło elektronów pracuje z napięciem przyspieszającym w zakresie od 5 do 20 kV.



Rys. 33. Widok skaningowego mikroskopu elektronowego Phenom XL

#### 4.5. Charakterystyka materiałów

Po przeprowadzonej analizie materiałów stosowanych w przemyśle wytypowano pięć materiałów w których wiercone są otwory: stal C45, stal ulepszoną cieplnie 40HM+QT, stop aluminium PA6, stop miedzi MO58 oraz stop niklowo-chromowy Inconel 718. Rzeczywiste składy chemiczne badanych materiałów określono za pomocą przedstawionego w poprzednim podrozdziale skaningowego mikroskopu elektronowego Phenom XL.

**Stal C45 (1.0503)** – stal niestopowa jakościowa do ulepszania cieplnego, bardzo popularna w produkcji części maszyn szczególnie elementów odporniejszych na ścieranie, łatwa w obróbce, duża wytrzymałość, duża ciągliwość, trudna w spawaniu, słaba skrawalność.

Tabela 3. Rzeczywisty procentowy skład chemiczny stali C45

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
0,45	0,5	0,32	0,03	0,02	0,2	0,15	0,03

Tabela 4. Właściwości stali C45 [S5]

Twardość HB	Wytrzymałość na rozciąganie, Rm	Granica plastyczności, Re	Moduł sprężystości podłużnej, E
≤ 229	560 – 850 MPa	275 – 490 MPa	198 - 207 GPa

**Stal ulepszona cieplnie 40HM+QT (1.7225+qt, 42CrMo4+QT)** – stal ulepszona cieplnie, łatwa w obróbce cieplnej i mechanicznej, nie spawalna, zastosowanie przy elementach maszyn narażonych na zmienne obciążenia o bardzo dużej ciągliwości i wytrzymałości.

Tabela 5. Rzeczywisty procentowy skład chemiczny stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
0,41	0,63	0,32	0,03	0,02	0,93	0,1	0,2

Tabela 6. Właściwości stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT [S5]

Twardość HB	Wytrzymałość na rozciąganie, Rm	Granica plastyczności, Re	Moduł sprężystości podłużnej, E
290 - 330	1000 - 1200 MPa	> 750 MPa	200- 210 GPa

**Stop aluminium PA6 (3.1325, AlCuMg1)** – stop aluminium, niska odporność na korozję, dobra podatność na zginanie, tłoczenie, łatwo obrabialny, słabo spawalny. Wykorzystywany w niskich oraz podwyższonych temperaturach do produkcji elementów konstrukcyjnych samolotów, sprzętu wojskowego, części do budowy maszyn, motoryzacji.

Tabela 7. Rzeczywisty procentowy skład chemiczny stopu aluminium PA6

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
0,22	0,62	3,69	0,44	0,97	0,09	0,27	0,18

Tabela 8. Właściwości stopu aluminium PA6 [S5]

Twardość HB	Wytrzymałość na rozciąganie, Rm	Granica plastyczności, Re	Moduł sprężystości podłużnej, E
101 - 110	350 - 390 MPa	240 - 260 MPa	72,5 GPa

**Mosiądz MO58 (2.0402, CuZn40Pb2)** – stop miedzi, dobra podatność do obróbki skrawaniem, podatny do obróbki plastycznej na gorąco oraz kucia. Wykorzystywany do produkcji skomplikowanych części, do przewodów rurowych, zacisków oraz armatury przemysłowej.

Tabela 9. Rzeczywisty procentowy skład chemiczny miedzi MO58

Cu	Al.	Fe	Ni	Pb	Sn
57,2	0,02	0,28	0,29	1,73	0,25

Tabela 10. Właściwości miedzi MO58 [S5]

Twardość HB	Wytrzymałość na rozciąganie, Rm	Granica plastyczności, Re	Moduł sprężystości podłużnej, E
90	410 MPa	160 MPa	96 GPa

**Inconel 718** – stop niklowo-chromowy zawierający duże ilości molibdenu, niobu, żelaza oraz mniejsze ilości tytanu i aluminium. Posiada dużą wytrzymałość, odporność na korozję, odporność na pękanie. Znajduje zastosowanie w reaktorach jądrowych, pompach, silnikach rakietowych, statkach kosmicznych oraz turbinach gazowych.

Tabela 11. Rzeczywisty procentowy skład chemiczny Inconelu 718

Cu	Al.	Ni	Cr	Nb + Ta	Ti
0,28	0,52	52,59	20,51	4,81	0,96

Tabela 12. Właściwości Inconelu 718 [S5]

Twardość HB	Wytrzymałość na rozciąganie, Rm	Granica plastyczności, Re	Moduł sprężystości podłużnej, E
363	930 MPa	550 MPa	204,9 GPa



#### 4.6. Mocowanie, kształt oraz sposób kodowania próbek do badań

Kształt próbki został dobrany tak, aby odpowiadał możliwością mocowania w centrum tokarskim. Próbki o wymiarach  $\varnothing$  30 mm i długości 30 mm zostały splanowane czołowo. Następnie zamocowano je w uchwycie trójszczękowym samocentrującym SMW Autoblok KNCS-N 210-52 o zacisku 6,5kN, gdzie wiercono otwory przelotowe o średnicy  $\varnothing$  6 mm ( $l/d = 5$ ).

**Ti I 1 A**  
 1 2 3 4

Rys. 34. Kodowanie próbek badawczych

Na rys. 34 przedstawiono sposób kodowania próbek, gdzie część pierwsza oznacza rodzaj narzędzia stosowanego w badaniu (Ti- wiertło węglikowe ATORN UNI z powłoką azotku tytanu aluminium). Część druga oznacza rodzaj układu kinematycznego procesu wiercenia zastosowanego podczas badania (KIN I – pierwszy układ kinematyczny, KIN II – drugi układ kinematyczny, KIN III – trzeci układ kinematyczny). Część trzecia oznacza parametry technologiczne procesu, które przedstawione są w tabeli 13. Część czwarta oznacza rodzaj materiału zastosowanego w badaniu (A – stop aluminium PA6, S – Stal 45, Q – Stal ulepszona cieplnie 40HM+QT, M – mosiądz MO58, I – Inconel 718).

Tabela 13. Zestawy wartości parametrów technologicznych użytych w badaniach

Materiał	C45, 40HM+QT, PA6, MO58		Inconel 718	
	$n$ , obr/min	$f_n$ , mm/obr	$n$ , obr/min	$f_n$ , mm/obr
1	4775	0,14	800	0,075
2	3979	0,12	637	0,06
3	3979	0,10	955	0,09



Rys. 35. Przykłady kodowanych próbek

## 5. ANALIZA ORAZ OPRACOWANIE WYNIKÓW BADAŃ

W tym rozdziale przedstawiono wyniki badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych. Obliczono wpływ parametrów wejściowych procesu wiercenia: prędkości skrawania, posuwu na obrót oraz układu kinematycznego na parametry wyjściowe otworu takie jak: odchyłka walcowości, odchyłka prostoliniowości, odchyłka okrągłości, błąd średnicy, chropowatość powierzchni, wysokość oraz szerokość zadzioru na wyjściu otworu. Część badań zawartych w tej dysertacji opublikowano jako cztery publikacje w czasopiśmie z listy Filadelfijskiej [80, 81, 82, 83].

Na podstawie przeglądu literatury stwierdzono, brak jakichkolwiek badań wpływu parametru wejściowego jakim jest układ kinematyki procesu wiercenia na jakość wykonania otworów. Postanowiono wykonać badania eksperymentalne w celu uzupełnienia luki w stanie prac naukowo badawczych związanych z różnymi układami kinematycznymi stosowanymi podczas wiercenia. Na wstępie wytypowano zestawy parametrów technologicznych dla procesu wiercenia na podstawie przeglądu literatury, prac badawczych oraz własnych doświadczeń. Do przeprowadzenia prac eksperymentalnych stworzono zestaw kombinacji różnych parametrów wejściowych przedstawionych w tabeli 14. Układ kinematyczny został zapisany jako równanie (34) zawierające wypadkową prędkość obrotową procesu skrawania.

$$KIN = n_n - n \quad (34)$$

gdzie: KIN – układ kinematyczny  $n_n$  – prędkość obrotowa narzędzia,  $n$  – prędkość obrotowa wrzeciona

Tabela 14. Zestawy parametrów wejściowych stosowanych w badaniach

Materiał	C45, 40HM+QT, PA6, MO58			Inconel 718			
	Nr eksperymentu	$n$ , obr/min	$f_n$ , mm/obr	KIN, obr/min	$n$ , obr/min	$f_n$ , mm/obr	KIN, obr/min
	1	4775	0,14	4775	800	0,075	800
	2	4775	0,14	-4775	800	0,075	-800
	3	4775	0,14	0	800	0,075	0
	4	3979	0,14	3979	637	0,075	637
	5	3979	0,14	-3979	637	0,075	-637
	6	3979	0,14	0	637	0,075	0
	7	3183	0,14	3183	955	0,075	955
	8	3183	0,14	-3183	955	0,075	-955
	9	3183	0,14	0	955	0,075	0
	10	4775	0,12	4775	800	0,06	800

Material	C45, 40HM+QT, PA6, MO58			Inconel 718		
Nr eksperymentu	$n$ , obr/min	$f_n$ , mm/obr	KIN, obr/min	$n$ , obr/min	$f_n$ , mm/obr	KIN, obr/min
11	4775	0,12	-4775	800	0,06	-800
12	4775	0,12	0	800	0,06	0
13	3979	0,12	3979	637	0,06	637
14	3979	0,12	-3979	637	0,06	-637
15	3979	0,12	0	637	0,06	0
16	3183	0,12	3183	955	0,06	955
17	3183	0,12	-3183	955	0,06	-955
18	3183	0,12	0	955	0,06	0
19	4775	0,1	4775	800	0,09	800
20	4775	0,1	-4775	800	0,09	-800
21	4775	0,1	0	800	0,09	0
22	3979	0,1	3979	637	0,09	637
23	3979	0,1	-3979	637	0,09	-637
24	3979	0,1	0	637	0,09	0
25	3183	0,1	3183	955	0,09	955
26	3183	0,1	-3183	955	0,09	-955
27	3183	0,1	0	955	0,09	0

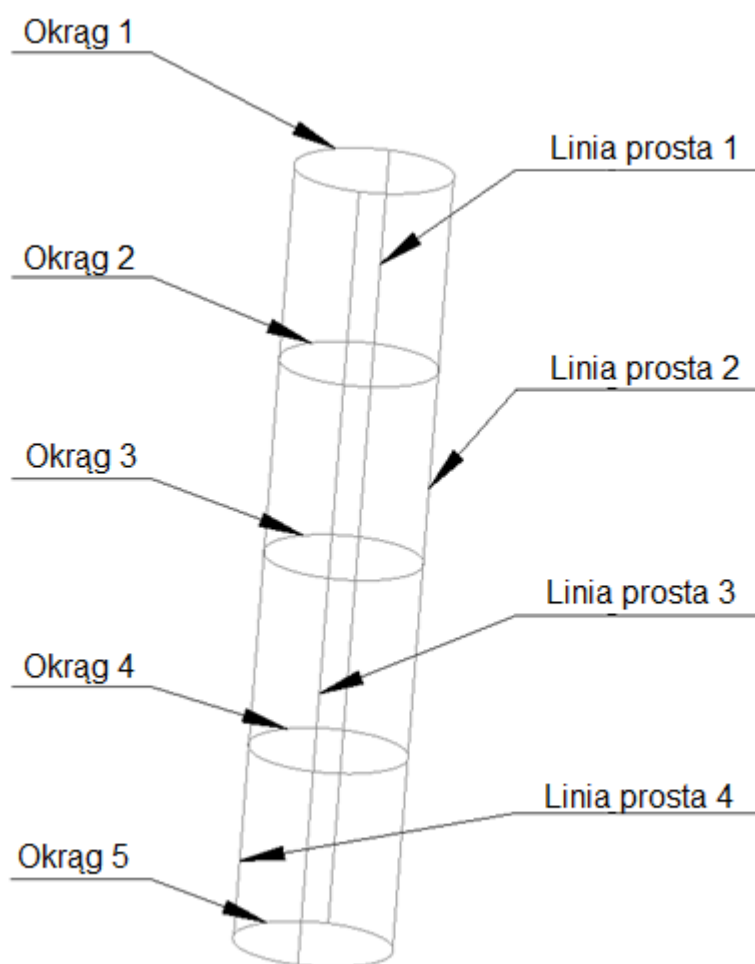
## 5.1. Analiza dokładności wymiarowo kształtowej wykonanych otworów

W tym podrozdziale przedstawiono analizę odchyłki walcowości, odchyłki prostoliniowości, odchyłki okrągłości oraz błędu średnicy otworu w stosunku do parametrów wejściowych przedstawionych w tab. 14. Analiza została podzielona na trzy etapy. Pierwsza analiza pomiarów geometrii wyrobów, w której przedstawiono oraz opisano parametry mierzone. Metody zastosowane do pomiarów oraz ich parametry. W drugiej części wykonano analizę statystyczną ANOVA oraz dokładnie przeanalizowano jej wyniki i wyciągnięto wnioski. W ostatniej części przedstawiono badania symulacyjne, w których to układ kinematyczny ma największy wpływ na badany parametr wyjściowy.

### 5.1.1. Analiza pomiarów geometrii wyrobów

Po przeprowadzeniu prób skrawania przystąpiono do kolejnej części badań tj.: pomiaru średnicy otworu, odchyłki walcowości, czterech odchyłek prostoliniowości przesuniętych względem siebie o  $90^\circ$  oraz odchyłki okrągłości, które przeprowadzono na współrzędnościowej maszynie pomiarowej Prismo Navigator firmy Zeiss. Pomiarów otworów przeprowadzone zostały z zastosowaniem sondy

pomiarowej z kulką rubinową o średnicy 3 mm. Pomiary realizowane były z prędkością 5 mm/s, dla każdego mierzonego okręgu zebrano 1500 punktów pomiarowych. Do pomiaru odchyłki walcowości zastosowano strategię profilu okrągłości (w pięciu przekrojach). Dla odchyłki okrągłości i walcowości zastosowano filtr Gaussa w zakresie 15 – 50 fal/obrót. Natomiast podczas pomiarów odchyłki prostoliniowości użyto filtr Gaussa  $\lambda_c = 2,5$  mm oraz  $\lambda_c = 0,8$  mm. Wybrano 15 UPR i 50 UPR ze względu na wymogi norm [N4, N5] mówiące o stosunku średnicy okręgu odniesienia i promienia końcówki trzpienia pomiarowego. Do dalszych analiz wybrano 15 UPR i F2,5 ze względu na większą redukcję błędów tzw. większe odfiltrowanie profilu. Plan pomiarowy został przedstawiony na rys. 36.



Rys. 36. Strategia pomiaru próbek

Po obliczeniu i uporządkowaniu danych wyniki zostały zestawione w tabelach 15-19. Całkowity stopień swobody efektów wyjściowych wynosi 9. Aby umieścić wszystkie dane wybrano tablicę ortogonalną L27. Kolorem zielonym zaznaczono wartości dla rozstępu 0 – 30%. Kolorem żółtym oznaczono przedział od 30 – 70 %. Natomiast kolorem czerwonym powyżej 70%. Rozstęp liczony jest jako różnica granicznych wartości.

Tabela 15. Wyniki dokładności wymiaru i kształtu próbek ze stali 45

Kodowanie	CYL <sub>t</sub> 15 UPR, μm	STR <sub>t</sub> F2.5, μm	RON <sub>t</sub> 15 UPR, μm	DE, μm
TiI1S	17,5	16,7	7,6	-0,5
TiII1S	14,4	10,9	6,1	-1,0
TiIII1S	17,4	9,2	5,5	-2,0
TiI2S	11,4	14,0	5,1	-1,7
TiII2S	9,5	10,4	5,2	-1,4
TiIII2S	10,7	8,5	3,4	-0,4
TiI3S	12,1	10,2	5,8	-3,0
TiII3S	11,8	14,3	5,1	-1,7
TiIII3S	19,7	14,1	4,3	-0,3
TiI4S	11,4	10,6	4,4	-0,4
TiII4S	11,4	11,5	4,7	-0,7
TiIII4S	16,5	12,9	3,7	0,6
TiI5S	16,3	14,9	4,5	-1,3
TiII5S	19,6	15,6	3,1	0,5
TiIII5S	16,8	14,5	3,3	0,0
TiI6S	23,8	20,2	4,8	-2,4
TiII6S	13,5	17,2	4,4	-0,8
TiIII6S	18,6	20,0	4,6	0,6
TiI7S	17,5	16,8	7,0	3,8
TiII7S	20,4	18,4	5,2	1,3
TiIII7S	25,0	21,2	4,7	0,4
TiI8S	21,6	17,8	5,2	0,6
TiII8S	22,1	20,1	5,3	1,3
TiIII8S	27,2	28,7	4,4	2,7
TiI9S	35,9	26,8	5,8	-2,4
TiII9S	36,6	29,8	6,0	3,0
TiIII9S	51,8	44,3	6,4	3,6

Tabela 16. Wyniki dokładności wymiaru i kształtu próbek ze stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT

Kodowanie	CYL <sub>t</sub> 15 UPR, μm	STR <sub>t</sub> F2.5, μm	RON <sub>t</sub> 15 UPR, μm	DE, μm
TiI1Q	9,7	10,4	4,1	0,0
TiII1Q	12,7	11,8	3,9	0,8
TiIII1Q	12,7	11,8	3,6	0,5
TiI2Q	14,4	15,7	4,7	-1,0
TiII2Q	12,1	12,5	4,5	-0,7
TiIII2Q	15,6	14,3	5,0	-0,5
TiI3Q	16,3	11,6	4,2	-0,7
TiII3Q	13,2	14,3	4,7	-1,3
TiIII3Q	10,7	11,2	4,8	0,2
TiI4Q	7,5	7,4	4,4	-0,6
TiII4Q	9,8	9,6	4,4	-0,7
TiIII4Q	14,5	14,6	3,7	0,5
TiI5Q	9,8	9,5	4,1	-1,1
TiII5Q	12,7	12,0	4,6	-0,9
TiIII5Q	12,2	11,0	4,2	-0,4
TiI6Q	10,3	12,7	3,8	-1,2
TiII6Q	12,9	13,6	4,6	-1,7
TiIII6Q	13,6	17,6	4,3	-0,3
TiI7Q	12,5	10,6	3,9	0,1
TiII7Q	14,8	13,2	4,0	-0,4
TiIII7Q	18,6	11,3	3,9	1,1
TiI8Q	13,7	11,2	3,4	-0,5
TiII8Q	13,9	13,0	4,0	-0,4
TiIII8Q	12,7	9,8	4,1	-0,4
TiI9Q	16,8	16,8	3,2	-0,9
TiII9Q	24,2	21,6	4,3	1,2
TiIII9Q	24,6	21,7	4,1	1,9

Tabela 17. Wyniki dokładności wymiaru i kształtu próbek ze stopu aluminium PA6

Kodowanie	CYL <sub>t</sub> 15 UPR, μm	STR <sub>t</sub> F2.5, μm	RON <sub>t</sub> 15 UPR, μm	DE, μm
TiI1A	28,2	22,7	9,0	9,9
TiII1A	28,8	21,1	11,1	9,3
TiIII1A	39,2	36,6	14,9	22,8
TiI2A	48,0	34,1	16,9	30,4
TiII2A	46,3	33,1	15,9	21,6
TiIII2A	37,1	24,5	17,4	22,6
TiI3A	49,2	37,6	14,4	30,2
TiII3A	43,4	32,5	15,8	28,1
TiIII3A	41,7	31,4	16,2	28,7
TiI4A	39,8	33,0	12,0	32,4
TiII4A	39,8	34,7	16,2	27,6
TiIII4A	47,8	38,0	14,9	25,4
TiI5A	56,5	48,2	18,0	41,4
TiII5A	52,7	35,1	15,4	36,5
TiIII5A	61,2	50,5	17,9	47,1
TiI6A	48,2	42,2	14,8	38,8
TiII6A	52,2	44,0	16,6	31,0
TiIII6A	51,1	40,0	18,0	41,6
TiI7A	37,7	29,8	10,9	30,7
TiII7A	44,1	31,6	10,9	28,8
TiIII7A	39,5	37,3	14,5	41,2
TiI8A	49,8	36,7	12,5	43,1
TiII8A	49,5	35,1	11,8	38,3
TiIII8A	49,1	43,6	12,4	44,4
TiI9A	48,2	42,3	12,8	32,7
TiII9A	53,5	45,7	5,7	37,9
TiIII9A	45,6	44,4	5,8	38,7

Tabela 18. Wyniki dokładności wymiaru i kształtu próbek z mosiądzu MO58

Kodowanie	CYL <sub>t</sub> 15 UPR, μm	STR <sub>t</sub> F2.5, μm	RON <sub>t</sub> 15 UPR, μm	DE, μm
TiI1M	101,0	76,7	6,6	93,8
TiII1M	104,7	78,7	7,6	99,3
TiIII1M	62,3	56,4	6,2	92,8
TiI2M	104,7	89,4	6,8	90,5
TiII2M	102,2	79,1	10,5	102,4
TiIII2M	102,2	52,4	12,2	108,7
TiI3M	112,2	80,4	4,9	106,6
TiII3M	125,5	63,2	5,0	111,5
TiIII3M	121,5	60,8	9,7	116,2
TiI4M	86,2	63,3	4,3	105,2
TiII4M	98,0	66,7	3,2	106,1
TiIII4M	86,8	51,5	4,7	116,2
TiI5M	119,5	76,9	6,4	98,6
TiII5M	103,0	79,6	5,1	98,2
TiIII5M	100,3	63,1	9,0	108,0
TiI6M	101,1	69,6	7,7	99,8
TiII6M	105,4	73,8	5,5	110,0
TiIII6M	112,0	64,6	7,2	117,5
TiI7M	99,4	49,3	4,7	99,8
TiII7M	104,6	57,3	3,2	103,4
TiIII7M	87,6	44,8	4,9	112,7
TiI8M	101,1	63,4	9,8	75,5
TiII8M	84,9	64,5	8,1	108,7
TiIII8M	91,1	59,3	8,5	105,9
TiI9M	74,7	52,6	5,8	84,5
TiII9M	88,6	65,7	5,8	100,9
TiIII9M	81,8	57,2	9,4	106,1



Tabela 19. Wyniki dokładności wymiaru i kształtu próbek z Inconelu 718

Kodowanie	CYL <sub>t</sub> 15 UPR, μm	STR <sub>t</sub> F2.5, μm	RON <sub>t</sub> 15 UPR, μm	DE, μm
TiI1I	33,3	32,0	7,0	20,6
TiII1I	48,0	39,2	6,3	24,7
TiIII1I	47,8	27,4	6,7	26,8
TiI2I	63,2	35,9	5,6	14,5
TiII2I	30,0	27,1	6,1	8,4
TiIII2I	14,3	12,0	5,7	-3,0
TiI3I	34,9	31,8	7,1	12,7
TiII3I	26,6	18,5	4,5	2,5
TiIII3I	10,9	13,3	5,0	-1,7
TiI4I	18,8	10,4	6,4	9,1
TiII4I	21,4	12,2	5,8	7,6
TiIII4I	23,5	16,8	5,4	5,1
TiI5I	19,9	12,8	5,1	9,5
TiII5I	14,4	10,3	4,9	12,3
TiIII5I	20,4	11,9	4,8	4,1
TiI6I	23,9	14,3	5,5	13,5
TiII6I	26,7	17,8	3,6	16,3
TiIII6I	22,0	12,3	4,8	11,0
TiI7I	55,6	23,6	4,9	53,8
TiII7I	47,0	21,2	5,6	32,6
TiIII7I	45,0	24,4	5,4	38,7
TiI8I	52,1	41,8	4,2	63,0
TiII8I	55,3	29,1	5,2	37,1
TiIII8I	58,1	38,7	5,6	42,9
TiI9I	64,0	34,0	5,8	51,2
TiII9I	59,5	42,7	4,0	33,2
TiIII9I	51,0	31,1	5,3	40,6

Błąd średnicy otworu dla stali C45 oraz stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT w niektórych kombinacjach był ujemny. Jest to spowodowane niepewnością pomiaru rzędu 1 μm oraz odkształceniami sprężystymi materiałów podczas badań.

Optymalnymi parametrami wejściowymi (które umożliwiają uzyskanie najmniejszych wartości parametrów wyjściowych) dla stali C45 były następujące zestawy: TiIII2S, TiIII3S, TiI4S, TiIII4S, TiII5S, TiIII5S oraz TiII6S. Wartości błędów średnicy i odchyłki kształtu były najniższe, mieszczące się w 30% strefie

wszystkich wyników. Dla stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT nie uzyskano w żadnym badaniu wartości każdego parametru wyjściowego na poziomie poniżej 30%. Jednakże otrzymano najbardziej optymalne rozwiązania dla wartości wejściowych TiI1Q. Dla stopu aluminium PA6 optymalnym rozwiązaniem dla wartości wejściowych był zestaw TiI1A. Dla mosiądzu MO58, uzyskano jeden zestaw parametrów mieszczących się w zielonej strefie dla TiI9M. Natomiast dla Inconelu 718 optymalnymi parametrami wejściowymi były zestawy: TiI3I oraz TiI6I.

### 5.1.2. Analiza statystyczna ANOVA

Do analizy wyników badań użyta została DOE tablica ortogonalna L27 metody Taguchi w celu oceny istotności wpływu parametrów wejściowych ( $n$ ,  $f_n$ , KIN) zawartych w tabeli 12 na parametry wyjściowe (CYL<sub>t</sub>, STR<sub>t</sub>, RON<sub>t</sub>, DE; wyniki zamieszczone w tabelach 15 – 19) przy zastosowaniu wieloczynnikowej analizy statystycznej ANOVA.

Istnieje kilka rodzajów modeli regresji. Regresja prosta dotyczy pojedynczego predyktora, równanie (35)

$$Y = b_0 + b_1X \quad (35)$$

Regresja wieloraka zawiera układ regresji prostej dla dwóch bądź większej liczby predyktorów, równanie (36).

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n \quad (36)$$

Regresja czynnikowa jest to układ w których występują wszystkie możliwe kombinacje iloczynów predyktorów. Równanie (37) przedstawia model regresji czynnikowej dla dwóch zmiennych.

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_1X_2 \quad (37)$$

Regresja wielomianowa zawiera główne oraz wyższych rzędów dla predyktorów, ale bez interakcji pomiędzy nimi, równanie (38)

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_1^2 + b_4X_2^2 \quad (38)$$

Regresja powierzchni odpowiedzi jest układem hybrydowym, gdyż zawiera cechy modeli regresji wielomianowej jak i modeli regresji czynnikowej (frakcyjnej). Równanie (39) przedstawia przykład dla dwóch zmiennych.

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_1^2 + b_4X_2^2 + b_5X_1X_2 \quad (39)$$

ANOVA pozwala zbudować model predykcyjny wraz ze sprawdzeniem jego istotności. W analizie wykorzystano przedział ufności 95% na 5% poziomie istotności. Do zbudowania modeli zastosowano regresję powierzchni odpowiedzi ze względu na jej hybrydowość. Wyniki analizy przedstawiono w tabelach 20-39. Z poniższych analiz zaobserwowano, że wszystkie modele posiadają wartość istotności mniejszą niż 0,05 co wskazuje na istotność zbudowanych modeli. Każdy

z poniższych modeli charakteryzował się współczynnikiem determinacji większym niż 60% co wskazuje na bardzo dobre dopasowanie eksperymentalnych wyników z przewidywanymi wynikami.

Tabela 20. Analiza statystyczna ANOVA dla odchyłki walcowości stali C45

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Model	1982,9308	9	220,3256	11,3064	0,0000	
Wyraz wolny	675,6187	1	675,6187	34,6705	0,0000	
n	274,8777	1	274,8777	14,1058	0,0016	20,98
n <sup>2</sup>	82,1441	1	82,1441	4,2154	0,0558	6,27
f <sub>n</sub>	332,6110	1	332,6110	17,0685	0,0007	25,38
f <sub>n</sub> <sup>2</sup>	139,5230	1	139,5230	7,1598	0,0160	10,65
KIN	0,0252	1	0,0252	0,0013	0,9718	0,00
KIN <sup>2</sup>	89,5840	1	89,5840	4,5972	0,0468	6,84
n·f <sub>n</sub>	375,2008	1	375,2008	19,2540	0,0004	28,63
n·KIN	7,7092	1	7,7092	0,3956	0,5377	0,59
f <sub>n</sub> ·KIN	8,7795	1	8,7795	0,4505	0,5111	0,67
Błąd	331,2766	17	19,4869			14,31
Łącznie	2314,2074	26				100,00

R = 0,9256; R<sup>2</sup> = 0,8569

Z tabeli 20 wynika, że posuw na obrót wpłynął w 50,68% na odchyłkę walcowości. Kolejnym wpływowym parametrem wejściowym była prędkość obrotowa wrzeczona 41,85%, reszta przypadła układowi kinematycznemu.

Tabela 21. Analiza statystyczna ANOVA dla odchyłki prostoliniowości stali C45

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Model	1284,218	9	142,6909	8,4116	0,0001	
Wyraz wolny	305,8640	1	305,8640	18,0306	0,0005	
n	103,7136	1	103,7136	6,1139	0,0243	18,79
n <sup>2</sup>	25,2856	1	25,2856	1,4906	0,2388	4,58
f <sub>n</sub>	149,3337	1	149,3337	8,8032	0,0086	27,06
f <sub>n</sub> <sup>2</sup>	61,0141	1	61,0141	3,5968	0,0750	11,06
KIN	18,1472	1	18,1472	1,0698	0,3155	3,29
KIN <sup>2</sup>	22,4959	1	22,4959	1,3261	0,2654	4,08
n·f <sub>n</sub>	151,9408	1	151,9408	8,9569	0,0082	27,53
n·KIN	4,2474	1	4,2474	0,2504	0,6232	0,77

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
$f_n \cdot \text{KIN}$	15,6834	1	15,6834	0,9245	0,3498	2,84
Błąd	288,3808	17	16,9636			18,34
Łącznie	1572,5985	26				100,00

$R = 0,9036$ ;  $R^2 = 0,8166$

Analizując dane zawarte w tabeli 21 stwierdzono, że posuw na obrót miał największy wpływ wynoszący 53,3% na odchyłkę prostoliniowości. Kolejnym wpływowym parametrem wejściowym była prędkość obrotowa wrzeczona 37,53%, reszta przypadła układowi kinematycznemu.

Tabela 22. Analiza statystyczna ANOVA dla odchyłki okrągłości stali C45

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Model	24,6731	9	2,7415	9,4084	0,0000	
Wyraz wolny	19,6029	1	19,6029	67,2752	0,0000	
n	7,3694	1	7,3694	25,2909	0,0001	17,61
$n^2$	5,1616	1	5,1616	17,7140	0,0006	12,34
$f_n$	12,0041	1	12,0041	41,1969	0,0000	28,69
$f_n^2$	9,8817	1	9,8817	33,9128	0,0000	23,62
KIN	0,0563	1	0,0563	0,1934	0,6657	0,13
$\text{KIN}^2$	4,8290	1	4,8290	16,5725	0,0008	11,54
$n \cdot f_n$	2,3408	1	2,3408	8,0335	0,0114	5,59
$n \cdot \text{KIN}$	0,1862	1	0,1862	0,6389	0,4351	0,45
$f_n \cdot \text{KIN}$	0,0105	1	0,0105	0,0361	0,8516	0,03
Błąd	4,9535	17	0,2914			16,72
Łącznie	29,6267	26				100,00

$R = 0,9125$ ;  $R^2 = 0,8328$

Z tabeli 22 wynika, że posuw na obrót miał największy wpływ wynoszący 55,12% na odchyłkę okrągłości. Kolejnym wpływowym parametrem wejściowym była prędkość obrotowa wrzeczona 32,97%, reszta przypadła układowi kinematycznemu.

Tabela 23. Analiza statystyczna ANOVA dla błędu średnicy stali C45

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Model	57,9223	9	6,4358	4,0102	0,0067	
Wyraz wolny	1,5329	1	1,5329	0,9551	0,3421	

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
n	0,1236	1	0,1236	0,0770	0,7848	0,46
n <sup>2</sup>	0,0958	1	0,0958	0,0597	0,8099	0,35
f <sub>n</sub>	2,6215	1	2,6215	1,6335	0,2184	9,66
f <sub>n</sub> <sup>2</sup>	1,8891	1	1,8891	1,1771	0,2931	6,96
KIN	7,8855	1	7,8855	4,9135	0,0406	29,05
KIN <sup>2</sup>	1,5261	1	1,5261	0,9509	0,3432	5,62
n·f <sub>n</sub>	0,0033	1	0,0033	0,0021	0,9642	0,01
n·KIN	12,8694	1	12,8694	8,0189	0,0115	47,41
f <sub>n</sub> ·KIN	0,1329	1	0,1329	0,0828	0,7770	0,49
Błąd	27,2828	17	1,6049			32,02
Łącznie	85,2052	26				100,00

R = 0,8244; R<sup>2</sup> = 0,6798

Analizując dane zawarte w tabeli 23 stwierdzono, że układ kinematyczny zdominował pozostałe parametry wejściowe. Uzyskał on wpływ wynoszący 58,62% na błąd średnicy. Kolejnym wpływowym parametrem wejściowym była prędkość obrotowa wrzeciona 24,52%, reszta przypadła posuwowi na obrót 16,86%

Tabela 24. Analiza statystyczna ANOVA dla odchyłki walcowości stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Model	263,6023	9	29,2891	3,8855	0,0078	
Wyraz wolny	127,4833	1	127,4833	16,9119	0,0007	
n	21,7993	1	21,7993	2,8919	0,1072	8,41
n <sup>2</sup>	9,1009	1	9,1009	1,2073	0,2872	3,51
f <sub>n</sub>	94,6023	1	94,6023	12,5499	0,0025	36,49
f <sub>n</sub> <sup>2</sup>	72,5696	1	72,5696	9,6271	0,0065	27,99
KIN	6,4595	1	6,4595	0,8569	0,3676	2,49
KIN <sup>2</sup>	28,7400	1	28,7400	3,8126	0,0675	11,09
n·f <sub>n</sub>	17,7633	1	17,7633	2,3565	0,1432	6,85
n·KIN	0,0150	1	0,0150	0,0020	0,9649	0,01
f <sub>n</sub> ·KIN	8,2136	1	8,2136	1,0896	0,3112	3,17
Błąd	128,1474	17	7,5381			32,71
Łącznie	391,7496	26				100,00

R = 0,8202; R<sup>2</sup> = 0,6729

Z tabeli 24 wynika, że posuw na obrót zdominował pozostałe parametry wejściowe. Uzyskał on wpływ wynoszący 69,49% na odchyłkę walcowości. Prędkość obrotowa wrzeczona oraz układ kinematyczny wpłynęły na wartość badanego parametru prawie po tyle samo odpowiednio 15,35% oraz 15,16%.

Tabela 25. Analiza statystyczna ANOVA dla odchyłki prostoliniowości stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Model	193,7509	9	21,5279	3,5667	0,0116	
Wyraz wolny	74,0995	1	74,0995	12,2768	0,0027	
n	35,3896	1	35,3896	5,8633	0,0269	23,63
n <sup>2</sup>	10,9087	1	10,9087	1,8074	0,1965	7,28
f <sub>n</sub>	29,6872	1	29,6872	4,9186	0,0405	19,82
f <sub>n</sub> <sup>2</sup>	13,3007	1	13,3007	2,2037	0,1560	8,88
KIN	7,2959	1	7,2959	1,2088	0,2869	4,87
KIN <sup>2</sup>	6,9083	1	6,9083	1,1446	0,2996	4,61
n·f <sub>n</sub>	39,9675	1	39,9675	6,6218	0,0197	26,69
n·KIN	0,9367	1	0,9367	0,1552	0,6985	0,63
f <sub>n</sub> ·KIN	5,3517	1	5,3517	0,8867	0,3596	3,57
Błąd	102,6076	17	6,0357			34,62
Łącznie	296,3585	26				100,00

R = 0,8085; R<sup>2</sup> = 0,6538

Z tabeli 25 wynika, że parametry technologiczne: prędkość obrotowa wrzeczona 44,58% oraz posuw na obrót 43,84% wpłynęły na odchyłkę prostoliniowości otworu. Reszta przypadła układowi kinematycznemu.

Tabela 26. Analiza statystyczna ANOVA dla odchyłki okrągłości stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Model	3,4204	9	0,3800	4,7519	0,0028	
Wyraz wolny	0,2877	1	0,2877	3,5966	0,0750	
n	0,4167	1	0,4167	5,2105	0,0356	13,18
n <sup>2</sup>	0,2043	1	0,2043	2,5548	0,1284	6,46
f <sub>n</sub>	0,2229	1	0,2229	2,7868	0,1134	7,05
f <sub>n</sub> <sup>2</sup>	0,0600	1	0,0600	0,7502	0,3985	1,90
KIN	0,9129	1	0,9129	11,4148	0,0036	28,88

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
KIN <sup>2</sup>	0,0156	1	0,0156	0,1948	0,6645	0,49
n·f <sub>n</sub>	0,4408	1	0,4408	5,5120	0,0313	13,95
n·KIN	0,6690	1	0,6690	8,3649	0,0101	21,17
f <sub>n</sub> ·KIN	0,2183	1	0,2183	2,7296	0,1169	6,91
Błąd	1,3596	17	0,0800			28,44
Łącznie	4,7800	26				100,00

R = 0,8459; R<sup>2</sup> = 0,7156

Z tabeli 26 wynika, że układ kinematyczny (43,42%) miał największy wpływ na odchyłkę okrągłości otworu. Prędkość obrotowa wrzeciona osiągnęła wpływ wynoszący 37,20%. Reszta przypadła posuwowi na obrót 19,38%.

Tabela 27. Analiza statystyczna ANOVA dla błędu średnicy stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Model	11,8143	9	1,3127	3,4240	0,0139	
Wyraz wolny	6,0791	1	6,0791	15,8563	0,0010	
n	3,0412	1	3,0412	7,9325	0,0119	18,16
n <sup>2</sup>	2,0920	1	2,0920	5,4567	0,0320	12,49
f <sub>n</sub>	3,8149	1	3,8149	9,9505	0,0058	22,78
f <sub>n</sub> <sup>2</sup>	2,5785	1	2,5785	6,7256	0,0189	15,40
KIN	0,1021	1	0,1021	0,2662	0,6125	0,61
KIN <sup>2</sup>	3,3291	1	3,3291	8,6835	0,0090	19,88
n·f <sub>n</sub>	1,6875	1	1,6875	4,4016	0,0512	10,08
n·KIN	0,0865	1	0,0865	0,2258	0,6407	0,52
f <sub>n</sub> ·KIN	0,0130	1	0,0130	0,0338	0,8562	0,08
Błąd	6,5176	17	0,3834			35,55
Łącznie	18,3319	26				100,00

R = 0,8028; R<sup>2</sup> = 0,6445

Analizując dane zawarte w tabeli 27 stwierdzono, że wpływ poszczególnych parametrów wejściowych na błąd średnicy otworu był następujący: posuw na obrót 43,25%, prędkość obrotowa wrzeciona 35,95% oraz układ kinematyczny 20,79%.

Tabela 28. Analiza statystyczna ANOVA dla odchyłki walcowości stopu aluminium PA6

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Model	1197,8067	9	133,0896	7,0541	0,0003	
Wyraz wolny	304,1953	1	304,1953	16,1231	0,0009	
n	242,4367	1	242,4367	12,8497	0,0023	22,07
n <sup>2</sup>	274,1171	1	274,1171	14,5289	0,0014	24,95
f <sub>n</sub>	255,8686	1	255,8686	13,5617	0,0018	23,29
f <sub>n</sub> <sup>2</sup>	265,3350	1	265,3350	14,0634	0,0016	24,15
KIN	8,3119	1	8,3119	0,4406	0,5158	0,76
KIN <sup>2</sup>	14,7133	1	14,7133	0,7798	0,3895	1,34
n·f <sub>n</sub>	12,2008	1	12,2008	0,6467	0,4324	1,11
n·KIN	1,5686	1	1,5686	0,0831	0,7766	0,14
f <sub>n</sub> ·KIN	24,1237	1	24,1237	1,2786	0,2739	2,20
Błąd	320,7400	17	18,8671			21,12
Łącznie	1518,5467	26				100,00

R = 0,8881; R<sup>2</sup> = 0,7888

Z tabeli 28 wynika, że parametry technologiczne wpłynęły w 96,73% na odchyłkę walcowości otworu (posuw na obrót 49,09%, prędkość obrotowa wrzeciona 47,64%). Bardzo mały wpływ wynoszący 3,25% miał układ kinematyczny.

Tabela 29. Analiza statystyczna ANOVA dla odchyłki prostoliniowości stopu aluminium PA6

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Model	1001,4231	9	111,2692	4,8885	0,0024	
Wyraz wolny	62,4926	1	62,4926	2,7456	0,1159	
n	5,0843	1	5,0843	0,2234	0,6425	0,93
n <sup>2</sup>	22,7492	1	22,7492	0,9995	0,3315	4,17
f <sub>n</sub>	161,1526	1	161,1526	7,0801	0,0165	29,53
f <sub>n</sub> <sup>2</sup>	229,4017	1	229,4017	10,0785	0,0055	42,03
KIN	0,4898	1	0,4898	0,0215	0,8851	0,09
KIN <sup>2</sup>	102,2620	1	102,2620	4,4928	0,0491	18,74
n·f <sub>n</sub>	13,2300	1	13,2300	0,5812	0,4563	2,42
n·KIN	2,8578	1	2,8578	0,1256	0,7274	0,52
f <sub>n</sub> ·KIN	8,5773	1	8,5773	0,3768	0,5474	1,57



Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Błąd	386,9435	17	22,7614			27,87
Łącznie	1388,3667	26				100,00

$R = 0,8493$ ;  $R^2 = 0,7213$

Z tabeli 29 wynika, że posuw na obrót zdominował pozostałe parametry wejściowe. Spowodował on wpływ wynoszący 73,55% na odchyłkę prostoliniowości otworu. Kolejnym wpływowym parametrem wejściowym był układ kinematyczny 19,87%, reszta przypadła prędkości obrotowej wrzeciona.

Tabela 30. Analiza statystyczna ANOVA dla odchyłki okrągłości stopu aluminium PA6

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Model	241,6086	9	26,8454	8,1059	0,0001	
Wyraz wolny	133,0856	1	133,0856	40,1850	0,0000	
n	60,9210	1	60,9210	18,3950	0,0005	17,45
$n^2$	31,3793	1	31,3793	9,4749	0,0068	8,99
$f_n$	98,6792	1	98,6792	29,7960	0,0000	28,27
$f_n^2$	63,8091	1	63,8091	19,2671	0,0004	18,28
KIN	16,1376	1	16,1376	4,8727	0,0413	4,62
$KIN^2$	15,8030	1	15,8030	4,7717	0,0432	4,53
$n \cdot f_n$	45,6300	1	45,6300	13,7779	0,0017	13,07
$n \cdot KIN$	10,0853	1	10,0853	3,0452	0,0990	2,89
$f_n \cdot KIN$	6,6034	1	6,6034	1,9939	0,1760	1,89
Błąd	56,3010	17	3,3118			18,90
Łącznie	297,9096	26				100,00

$R = 0,9006$ ;  $R^2 = 0,8110$

Z tabeli 30 wynika, że również posuw na obrót zdominował pozostałe parametry wejściowe. Spowodował on wpływ wynoszący 54,03% na odchyłkę okrągłości otworu. Kolejnym wpływowym parametrem wejściowym była prędkość obrotowa wrzeciona 34,42%, reszta przypadła posuwowi na obrót 11,55%.

Tabela 31. Analiza statystyczna ANOVA dla błędu średnicy stopu aluminium PA6

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Model	2058,5104	9	228,7234	13,3858	0,0000	
Wyraz wolny	323,3141	1	323,3141	18,9216	0,0004	
n	305,8570	1	305,8570	17,9000	0,0006	25,29

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
$n^2$	236,3222	1	236,3222	13,8305	0,0017	19,54
$f_n$	228,5186	1	228,5186	13,3738	0,0020	18,89
$f_n^2$	201,0674	1	201,0674	11,7673	0,0032	16,62
KIN	0,1563	1	0,1563	0,0091	0,9249	0,01
$KIN^2$	120,7119	1	120,7119	7,0645	0,0166	9,98
$n \cdot f_n$	110,4133	1	110,4133	6,4618	0,0211	9,13
$n \cdot KIN$	0,8328	1	0,8328	0,0487	0,8279	0,07
$f_n \cdot KIN$	5,5642	1	5,5642	0,3256	0,5757	0,46
Błąd	290,4792	17	17,0870			12,37
Łącznie	2348,9896	26				100,00

$R = 0,9361$ ;  $R^2 = 0,8763$

Analizując dane zawarte w tabeli 31 stwierdzono, że parametry technologiczne zdominowały wpływ na błąd średnicy, odpowiednio prędkość obrotowa wrzeciona 49,43%, posuw na obrót 40,31%, reszta przypadła układowi kinematycznemu 10,26%.

Tabela 32. Analiza statystyczna ANOVA dla odchyłki walcowości mosiądzu MO58

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Model	3647,6190	9	405,2910	4,4311	0,0041	
Wyraz wolny	634,5816	1	634,5816	6,9380	0,0174	
n	503,2850	1	503,2850	5,5025	0,0314	15,06
$n^2$	87,8464	1	87,8464	0,9604	0,3408	2,63
$f_n$	495,7528	1	495,7528	5,4202	0,0325	14,84
$f_n^2$	102,7824	1	102,7824	1,1237	0,3039	3,08
KIN	1,4278	1	1,4278	0,0156	0,9020	0,04
$KIN^2$	557,4176	1	557,4176	6,0943	0,0245	16,69
$n \cdot f_n$	1580,1075	1	1580,1075	17,2756	0,0007	47,30
$n \cdot KIN$	1,5799	1	1,5799	0,0173	0,8970	0,05
$f_n \cdot KIN$	10,5855	1	10,5855	0,1157	0,7379	0,32
Błąd	1554,8995	17	91,4647			29,89
Łącznie	5202,5185	26				100,00

$R = 0,8373$ ;  $R^2 = 0,7011$

Z tabeli 32 wynika, że posuw na obrót osiągnął 41,72% wpływ na walcowość otworu. Następnie prawie z takim samym wpływem była prędkość obrotowa wrzeciona 41,37%, reszta przypadła układowi kinematycznemu 16,91%.

Tabela 33. Analiza statystyczna ANOVA dla odchyłki prostoliniowości mosiądzu MO58

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Model	2585,7630	9	287,3070	7,7271	0,0002	
Wyraz wolny	86,5155	1	86,5155	2,3268	0,1455	
n	127,0940	1	127,0940	3,4182	0,0819	6,73
n <sup>2</sup>	306,2079	1	306,2079	8,2355	0,0106	16,21
f <sub>n</sub>	56,3510	1	56,3510	1,5156	0,2351	2,98
f <sub>n</sub> <sup>2</sup>	83,1296	1	83,1296	2,2358	0,1532	4,40
KIN	41,7632	1	41,7632	1,1232	0,3041	2,21
KIN <sup>2</sup>	1026,3009	1	1026,3009	27,6024	0,0001	54,34
n·f <sub>n</sub>	82,6875	1	82,6875	2,2239	0,1542	4,38
n·KIN	16,2026	1	16,2026	0,4358	0,5180	0,86
f <sub>n</sub> ·KIN	148,9559	1	148,9559	4,0062	0,0616	7,89
Błąd	632,0866	17	37,1816			19,64
Łącznie	3217,8496	26				100,00

R = 0,8964; R<sup>2</sup> = 0,8036

Z tabeli 33 wynika, że układ kinematyczny zdominował pozostałe parametry wejściowe. Uzyskał on wpływ wynoszący 60,92% na odchyłkę prostoliniowości otworu. Kolejnym wpływowym parametrem wejściowym była prędkość obrotowa wrzeczona 25,56%, reszta przypadła posuwowi na obrót 13,52%.

Tabela 34. Analiza statystyczna ANOVA dla odchyłki okrągłości mosiądzu MO58

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Model	93,1434	9	10,3493	4,0471	0,0064	
Wyraz wolny	0,5042	1	0,5042	0,1972	0,6626	
n	21,1196	1	21,1196	8,2588	0,0105	18,89
n <sup>2</sup>	38,7855	1	38,7855	15,1670	0,0012	34,68
f <sub>n</sub>	13,6650	1	13,6650	5,3437	0,0336	12,22
f <sub>n</sub> <sup>2</sup>	10,2269	1	10,2269	3,9992	0,0618	9,14
KIN	3,7688	1	3,7688	1,4738	0,2413	3,37
KIN <sup>2</sup>	11,6564	1	11,6564	4,5582	0,0476	10,42
n·f <sub>n</sub>	6,7500	1	6,7500	2,6396	0,1226	6,04
n·KIN	0,0234	1	0,0234	0,0092	0,9248	0,02
f <sub>n</sub> ·KIN	5,8370	1	5,8370	2,2825	0,1492	5,22

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Błąd	43,4729	17	2,5572			31,82
Łącznie	136,6163	26				100,00

$R = 0,8257$ ;  $R^2 = 0,6818$

Analizując dane zawarte w tabeli 34 stwierdzono, że najbardziej wpływowym parametrem wejściowym była prędkość obrotowa wrzeciona 56,6%, następnie posuw na obrót 26,99% oraz układ kinematyczny 16,41% na odchyłkę okrągłości otworu.

Tabela 35. Analiza statystyczna ANOVA dla błędu średnicy mosiądzu MO58

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Model	1807,8345	9	200,8705	5,4514	0,0014	74,27
Wyraz wolny	63,0649	1	63,0649	1,7115	0,2082	
n	10,7778	1	10,7778	0,2925	0,5956	0,54
$n^2$	160,7500	1	160,7500	4,3625	0,0521	8,08
$f_n$	369,5070	1	369,5070	10,0279	0,0056	18,57
$f_n^2$	184,8150	1	184,8150	5,0156	0,0388	9,29
KIN	216,5273	1	216,5273	5,8763	0,0268	10,88
$KIN^2$	435,6873	1	435,6873	11,8240	0,0031	21,89
$n \cdot f_n$	441,6533	1	441,6533	11,9859	0,0030	22,19
$n \cdot KIN$	105,8104	1	105,8104	2,8716	0,1084	5,32
$f_n \cdot KIN$	64,6364	1	64,6364	1,7541	0,2029	3,25
Błąd	626,4121	17	36,8478			25,73
Łącznie	2434,2467	26				100,00

$R = 0,8618$ ;  $R^2 = 0,7427$

Analizując dane zawarte w tabeli 35 stwierdzono, że posuw na obrót uzyskał 40,57% wpływ na błąd średnicy otworu. Kolejnym parametrem był układ kinematyczny 37,05%, a reszta przypadła prędkości obrotowej wrzeciona 22,38%.

Tabela 36. Analiza statystyczna ANOVA dla odchyłki walcowości Inconelu 718

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Model	5340,7055	9	593,4117	4,5815	0,0034	
Wyraz wolny	3,5449	1	3,5449	0,0274	0,8706	
n	23,8408	1	23,8408	0,1841	0,6733	5,22
$n^2$	22,1095	1	22,1095	0,1707	0,6847	4,84
$f_n$	6,537	1	6,537	0,0505	0,8249	1,43

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
$f_n^2$	59,3252	1	59,3252	0,458	0,5076	12,99
KIN	17,6398	1	17,6398	0,1362	0,7167	3,86
$KIN^2$	241,773	1	241,773	1,8667	0,1897	52,94
$n \cdot f_n$	7,1696	1	7,1696	0,0554	0,8168	1,57
$n \cdot KIN$	64,5272	1	64,5272	0,4982	0,4899	14,13
$f_n \cdot KIN$	13,7839	1	13,7839	0,1064	0,7482	3,02
Błąd	2201,862	17	129,5213			29,19
Łącznie	7542,568	26				100

$R = 0,8415$ ;  $R^2 = 0,7081$

Z tabeli 36 wynika, że układ kinematyczny zdominował pozostałe parametry wejściowe. Wpłynął on w 65,37% na odchyłkę walцовości otworu. Parametry technologiczne uzyskały prawie taki sam wpływ odpowiednio prędkość obrotowa wrzeczona 17,91% oraz posuw na obrót 16,72%.

Tabela 37. Analiza statystyczna ANOVA dla odchyłki prostoliniowości Inconelu 718

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Model	2039,678	9	226,6308	4,9514	0,0022	
Wyraz wolny	17,3389	1	17,3389	0,3788	0,5464	
n	27,9898	1	27,9898	0,6115	0,445	1,77
$n^2$	297,9125	1	297,9125	6,5089	0,0207	18,84
$f_n$	220,5234	1	220,5234	4,818	0,0423	13,95
$f_n^2$	31,8029	1	31,8029	0,6948	0,4161	2,01
KIN	126,7622	1	126,7622	2,7695	0,1144	8,02
$KIN^2$	11,6122	1	11,6122	0,2537	0,6209	0,73
$n \cdot f_n$	83,562	1	83,562	1,8257	0,1943	5,28
$n \cdot KIN$	3,0603	1	3,0603	0,0669	0,7991	0,19
$f_n \cdot KIN$	778,0949	17	45,7703			49,21
Błąd	778,0949	17	45,7702			27,61
Łącznie	2817,773	26				100

$R = 0,8508$ ;  $R^2 = 0,7239$

Analizując dane zawarte w tabeli 37 stwierdzono, że każdy parametr badany miał dość duży wpływ na odchyłkę prostoliniowości otworu. Posuw na obrót 43,2%, układ kinematyczny 33,45% oraz prędkość obrotowa wrzeczona 23,35%.

Tabela 38. Analiza statystyczna ANOVA dla odchyłki okrągłości Inconelu 718

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Model	15,6865	9	1,7429	9,5558	0,0000	
Wyraz wolny	4,1656	1	4,1656	22,8382	0,0002	
n	2,8668	1	2,8668	15,7176	0,0010	14,22
n <sup>2</sup>	3,7282	1	3,7282	20,4401	0,0003	18,50
f <sub>n</sub>	3,7062	1	3,7062	20,3194	0,0003	18,39
f <sub>n</sub> <sup>2</sup>	4,6699	1	4,6699	25,6030	0,0001	23,17
KIN	0,6661	1	0,6661	3,6521	0,0730	3,30
KIN <sup>2</sup>	0,0043	1	0,0043	0,0236	0,8797	0,02
n·f <sub>n</sub>	0,0971	1	0,0971	0,5325	0,4755	0,48
n·KIN	3,9205	1	3,9205	21,4942	0,0002	19,45
f <sub>n</sub> ·KIN	0,4987	1	0,4987	2,7341	0,1166	2,47
Błąd	3,1007	17	0,1824			16,50
Łącznie	18,787226	26				100

R = 0,9138; R<sup>2</sup> = 0,8350

Z tabeli 38 wynika, że parametry technologiczne spowodowały podobny wpływ na odchyłkę okrągłości otworu, odpowiednio posuw na obrót 43,03% oraz prędkość obrotowa wrzeczona 42,68%, reszta przypadła układowi kinematycznemu 14,29%.

Tabela 39. Analiza statystyczna ANOVA dla błędu średnicy Inconelu 718

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Model	7488,8109	9	832,0901	14,4959	0,0000	
Wyraz wolny	79,6530	1	79,6530	1,3876	0,2550	
n	144,4206	1	144,4206	2,5160	0,1311	4,78
n <sup>2</sup>	96,1904	1	96,1904	1,6757	0,2128	3,19
f <sub>n</sub>	761,4815	1	761,4815	13,2658	0,0020	25,22
f <sub>n</sub> <sup>2</sup>	1356,0067	1	1356,0067	23,6230	0,0002	44,91
KIN	70,2335	1	70,2335	1,2235	0,2841	2,33
KIN <sup>2</sup>	117,8613	1	117,8613	2,0533	0,1700	3,90
n·f <sub>n</sub>	89,5009	1	89,5009	1,5592	0,2287	2,96
n·KIN	12,5481	1	12,5481	0,2186	0,6461	0,42
f <sub>n</sub> ·KIN	371,4573	1	371,4573	6,4712	0,0210	12,30
Błąd	975,8315	17	57,4019			11,53
Łącznie	8464,6424	26				100,00

$R = 0,9406$ ;  $R^2 = 0,8847$

Z tabeli 39 wynika, że posuw na obrót zdominował pozostałe parametry wejściowe. Spowodował on wpływ wynoszący 77,75% na błąd średnicy otworu. Kolejnym wpływowym parametrem wejściowym był układ kinematyczny 12,59%, reszta przypadła prędkości obrotowej wrzeciona 9,66%.

Po przeprowadzeniu obszernych analiz statystycznych przedstawionych w tabelach 20-39 stwierdzono, że zbudowane modele matematyczne są istotne. Wartości  $p$  są mniejsze niż 0,05 co wskazuje na istotność tych modeli.

Wykorzystując równanie hybrydowe (39) zbudowano modele matematyczne dla: odchyłki walcowości, odchyłki prostoliniowości, odchyłki okrągłości oraz błędu średnicy dla każdego badanego materiału. Równania 40-43 dotyczą stali C45, równania 44-47 dotyczą stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT, równania 48-51 dotyczą stopu aluminium PA6, równania 52-55 dotyczą stopu mosiądzu MO58, natomiast równania 56-59 dotyczą Inconelu 718.

$$\begin{aligned} CYL_{C45} = & 510,04 - 9,24 \cdot 10^{-2} \cdot n + 5,84 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + \\ & -4662 \cdot f_n + 12055,55 \cdot f_n^2 - 9,29 \cdot 10^{-5} \cdot KIN + \\ & -2,26 \cdot 10^{-7} \cdot KIN^2 + 0,35 \cdot n \cdot f_n - 2,61 \cdot 10^{-7} \cdot n \cdot KIN + \\ & +1,06 \cdot 10^{-2} \cdot f_n \cdot KIN \end{aligned} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} STR_{C45} = & 343,17 - 5,68 \cdot 10^{-2} \cdot n + 3,24 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + \\ & -3123,80 \cdot f_n + 7972,22 \cdot f_n^2 - 2,49 \cdot 10^{-3} \cdot KIN + \\ & -1,13 \cdot 10^{-7} \cdot KIN^2 + 2,23 \cdot 10^{-1} \cdot n \cdot f_n + 1,94 \cdot 10^{-7} \cdot n \cdot KIN + \\ & -1,41 \cdot 10^{-2} \cdot f_n \cdot KIN \end{aligned} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} RON_{C45} = & 86,87 - 1,51 \cdot 10^{-2} \cdot n + 1,46 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + \\ & -885,66 \cdot f_n + 3208,33 \cdot f_n^2 - 1,39 \cdot 10^{-4} \cdot KIN + \\ & +5,25 \cdot 10^{-8} \cdot KIN^2 + 2,77 \cdot 10^{-2} \cdot n \cdot f_n + 4,06 \cdot 10^{-8} \cdot n \cdot KIN + \\ & +3,67 \cdot 10^{-4} \cdot f_n \cdot KIN \end{aligned} \quad (42)$$

$$\begin{aligned} DE_{C45} = & 24,29 + 1,96 \cdot 10^{-3} \cdot n - 1,99 \cdot 10^{-7} \cdot n^2 + \\ & -413,88 \cdot f_n + 1402,77 \cdot f_n^2 - 1,64 \cdot 10^{-3} \cdot KIN + \\ & -2,95 \cdot 10^{-8} \cdot KIN^2 + 1,04 \cdot 10^{-2} \cdot n \cdot f_n + 3,37 \cdot 10^{-7} \cdot n \cdot KIN + \\ & +1,3 \cdot 10^{-3} \cdot f_n \cdot KIN \end{aligned} \quad (43)$$

$$\begin{aligned} CYL_{40HM} = & 221,55 - 2,6 \cdot 10^{-2} \cdot n + 1,94 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + \\ & -2486,31 \cdot f_n + 8694,44 \cdot f_n^2 - 1,48 \cdot 10^{-3} \cdot KIN + \\ & -1,28 \cdot 10^{-7} \cdot KIN^2 + 7,64 \cdot 10^{-2} \cdot n \cdot f_n + 1,15 \cdot 10^{-8} \cdot n \cdot KIN + \\ & +1,02 \cdot 10^{-2} \cdot f_n \cdot KIN \end{aligned} \quad (44)$$

$$\begin{aligned}
STR_{40HM} = & 168,91 - 3,31 \cdot 10^{-2} \cdot n + 2,12 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + \\
& -1392,80 \cdot f_n + 3722,22 \cdot f_n^2 - 1,58 \cdot 10^{-3} \cdot KIN + \\
& -6,28 \cdot 10^{-8} \cdot KIN^2 + 1,14 \cdot 10^{-1} \cdot n \cdot f_n + 9,11 \cdot 10^{-8} \cdot n \cdot KIN + \\
& +8,28 \cdot 10^{-3} \cdot f_n \cdot KIN
\end{aligned} \tag{45}$$

$$\begin{aligned}
RON_{40HM} = & -10,52 + 3,6 \cdot 10^{-3} \cdot n - 2,91 \cdot 10^{-7} \cdot n^2 + \\
& +120,68 \cdot f_n - 250 \cdot f_n^2 - 5,59 \cdot 10^{-4} \cdot KIN + 2,98 \cdot 10^{-9} \cdot KIN^2 + \\
& -1,2 \cdot 10^{-2} \cdot n \cdot f_n + 7,7 \cdot 10^{-8} \cdot n \cdot KIN + 1,67 \cdot 10^{-3} \cdot f_n \cdot KIN
\end{aligned} \tag{46}$$

$$\begin{aligned}
DE_{40HM} = & 48,38 - 9,72 \cdot 10^{-3} \cdot n + 9,32 \cdot 10^{-7} \cdot n^2 + \\
& -499,28 \cdot f_n + 1638,88 \cdot f_n^2 - 1,87 \cdot 10^{-4} \cdot KIN + \\
& -4,36 \cdot 10^{-8} \cdot KIN^2 + 2,35 \cdot 10^{-2} \cdot n \cdot f_n + 2,77 \cdot 10^{-8} \cdot n \cdot KIN + \\
& +4,07 \cdot 10^{-4} \cdot f_n \cdot KIN
\end{aligned} \tag{47}$$

$$\begin{aligned}
CYL_{PA6} = & -324,24 + 8,68 \cdot 10^{-2} \cdot n - 1,06 \cdot 10^{-5} \cdot n^2 + \\
& +4088,96 \cdot f_n - 16625 \cdot f_n^2 - 1,68 \cdot 10^{-3} \cdot KIN + \\
& -9,17 \cdot 10^{-8} \cdot KIN^2 - 6,33 \cdot 10^{-2} \cdot n \cdot f_n - 1,17 \cdot 10^{-7} \cdot n \cdot KIN + \\
& +1,75 \cdot 10^{-2} \cdot f_n \cdot KIN
\end{aligned} \tag{48}$$

$$\begin{aligned}
STR_{PA6} = & -155,12 + 1,25 \cdot 10^{-2} \cdot n - 3,07 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + \\
& +3245,06 \cdot f_n - 15458,33 \cdot f_n^2 - 4,1 \cdot 10^{-4} \cdot KIN + \\
& -2,41 \cdot 10^{-7} \cdot KIN^2 + 6,59 \cdot 10^{-2} \cdot n \cdot f_n - 1,59 \cdot 10^{-7} \cdot n \cdot KIN + \\
& +1,04 \cdot 10^{-2} \cdot f_n \cdot KIN
\end{aligned} \tag{49}$$

$$\begin{aligned}
RON_{PA6} = & -226,37 + 4,35 \cdot 10^{-2} \cdot n - 3,61 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + \\
& +2539,32 \cdot f_n - 8152,77 \cdot f_n^2 + 2,35 \cdot 10^{-3} \cdot KIN + \\
& -9,51 \cdot 10^{-8} \cdot KIN^2 - 1,22 \cdot 10^{-1} \cdot n \cdot f_n - 2,99 \cdot 10^{-7} \cdot n \cdot KIN + \\
& -9,19 \cdot 10^{-3} \cdot f_n \cdot KIN
\end{aligned} \tag{50}$$

$$\begin{aligned}
DE_{PA6} = & -352,83 + 9,75 \cdot 10^{-2} \cdot n - 9,9 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + \\
& +3864,25 \cdot f_n - 14472,22 \cdot f_n^2 - 2,31 \cdot 10^{-4} \cdot KIN + \\
& -2,62 \cdot 10^{-7} \cdot KIN^2 - 1,9 \cdot 10^{-1} \cdot n \cdot f_n - 8,59 \cdot 10^{-8} \cdot n \cdot KIN + \\
& +8,44 \cdot 10^{-3} \cdot f_n \cdot KIN
\end{aligned} \tag{51}$$

$$\begin{aligned}
CYL_{MO58} = & -494,31 + 1,25 \cdot 10^{-1} \cdot n - 6,04 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + \\
& +5691,64 \cdot f_n - 10347,22 \cdot f_n^2 + 7 \cdot 10^{-4} \cdot KIN + \\
& +5,64 \cdot 10^{-7} \cdot KIN^2 - 7,2 \cdot 10^{-1} \cdot n \cdot f_n + 1,18 \cdot 10^{-7} \cdot n \cdot KIN + \\
& -1,16 \cdot 10^{-2} \cdot f_n \cdot KIN
\end{aligned} \tag{52}$$



$$\begin{aligned}
STR_{M058} = & -182,51 + 6,28 \cdot 10^{-2} \cdot n - 1,12 \cdot 10^{-5} \cdot n^2 + \\
& + 1918,91 \cdot f_n - 9305,55 \cdot f_n^2 - 3,78 \cdot 10^{-3} \cdot KIN + \\
& + 7,66 \cdot 10^{-7} \cdot KIN^2 + 1,64 \cdot 10^{-1} \cdot n \cdot f_n - 3,79 \cdot 10^{-7} \cdot n \cdot KIN + \\
& + 4,36 \cdot 10^{-2} \cdot f_n \cdot KIN
\end{aligned} \tag{53}$$

$$\begin{aligned}
RON_{M058} = & 13,93 + 2,56 \cdot 10^{-2} \cdot n - 4,01 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + \\
& - 944,95 \cdot f_n + 3263,88 \cdot f_n^2 + 1,13 \cdot 10^{-3} \cdot KIN + \\
& - 8,16 \cdot 10^{-8} \cdot KIN^2 + 4,71 \cdot 10^{-2} \cdot n \cdot f_n - 1,44 \cdot 10^{-8} \cdot n \cdot KIN + \\
& - 8,64 \cdot 10^{-3} \cdot f_n \cdot KIN
\end{aligned} \tag{54}$$

$$\begin{aligned}
DE_{M058} = & -155,82 - 1,83 \cdot 10^{-2} \cdot n + 8,17 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + \\
& + 4913,78 \cdot f_n - 13875 \cdot f_n^2 - 8,62 \cdot 10^{-3} \cdot KIN + \\
& - 4,99 \cdot 10^{-7} \cdot KIN^2 - 3,81 \cdot 10^{-1} \cdot n \cdot f_n + 9,69 \cdot 10^{-7} \cdot n \cdot KIN + \\
& + 2,87 \cdot 10^{-2} \cdot f_n \cdot KIN
\end{aligned} \tag{55}$$

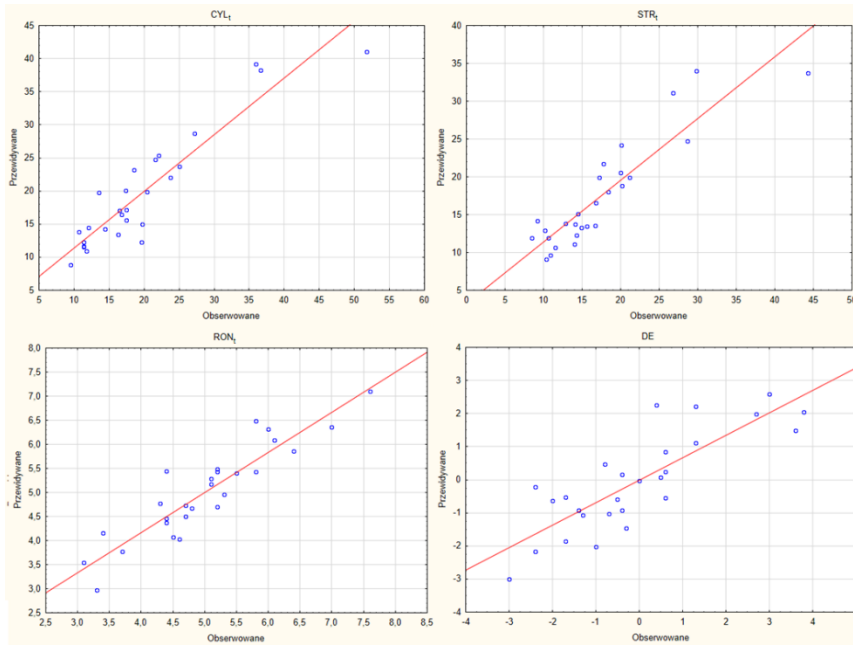
$$\begin{aligned}
CYL_{I718} = & -29,94 - 1,33 \cdot 10^{-1} \cdot n - 7,60 \cdot 10^{-5} \cdot n^2 + \\
& - 739,39 \cdot f_n + 13975,31 \cdot f_n^2 + 1,12 \cdot 10^{-2} \cdot KIN + \\
& + 9,27 \cdot 10^{-6} \cdot KIN^2 - 3,24 \cdot 10^{-1} \cdot n \cdot f_n - 1,89 \cdot 10^{-5} \cdot n \cdot KIN + \\
& + 8,84 \cdot 10^{-2} \cdot f_n \cdot KIN
\end{aligned} \tag{56}$$

$$\begin{aligned}
STR_{I718} = & -137,65 - 1,13 \cdot 10^{-1} \cdot n + 8,55 \cdot 10^{-5} \cdot n^2 + \\
& + 4991,51 \cdot f_n - 26944,44 \cdot f_n^2 + 1,51 \cdot 10^{-2} \cdot KIN + 6,71 \cdot 10^{-6} \\
& \cdot KIN^2 - 4,12 \cdot 10^{-1} \cdot n \cdot f_n + \\
& - 2,16 \cdot 10^{-5} \cdot n \cdot KIN + 4,16 \cdot 10^{-2} \cdot f_n \cdot KIN
\end{aligned} \tag{57}$$

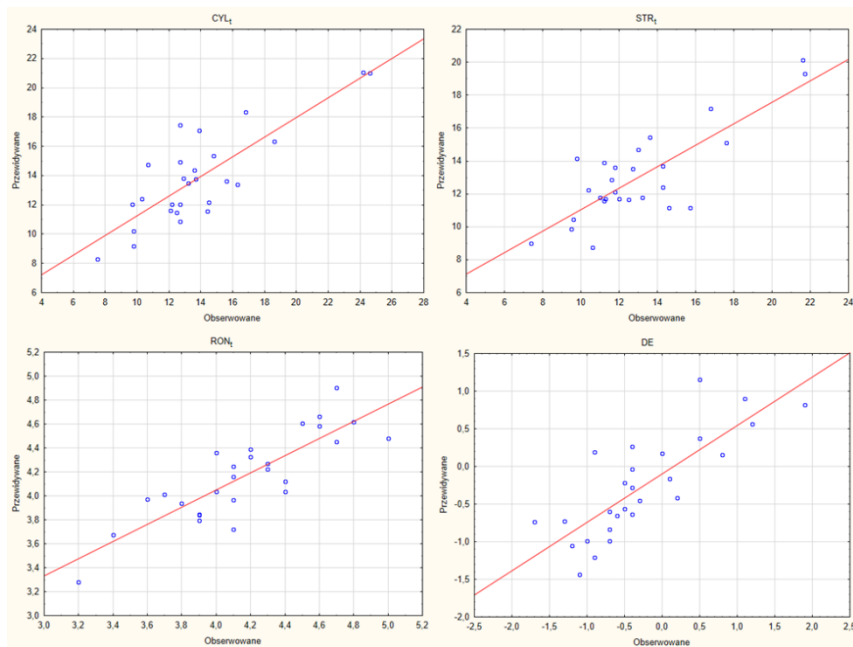
$$\begin{aligned}
RON_{I718} = & -32,45 + 4,62 \cdot 10^{-2} \cdot n - 3,12 \cdot 10^{-5} \cdot n^2 + \\
& + 556,74 \cdot f_n - 3920,98 \cdot f_n^2 - 2,19 \cdot 10^{-3} \cdot KIN + \\
& + 3,91 \cdot 10^{-8} \cdot KIN^2 + 3,77 \cdot 10^{-2} \cdot n \cdot f_n + 4,68 \cdot 10^{-6} \cdot n \cdot KIN + \\
& - 1,68 \cdot 10^{-2} \cdot f_n \cdot KIN
\end{aligned} \tag{58}$$

$$\begin{aligned}
DE_{I718} = & 141,92 + 3,28 \cdot 10^{-1} \cdot n - 1,58 \cdot 10^{-4} \cdot n^2 + \\
& - 7980,27 \cdot f_n + 66814,81 \cdot f_n^2 - 2,25 \cdot 10^{-2} \cdot KIN + \\
& + 6,47 \cdot 10^{-6} \cdot KIN^2 - 1,14 \cdot n \cdot f_n - 8,37 \cdot 10^{-6} \cdot n \cdot KIN + \\
& + 4,59 \cdot 10^{-1} \cdot f_n \cdot KIN
\end{aligned} \tag{59}$$

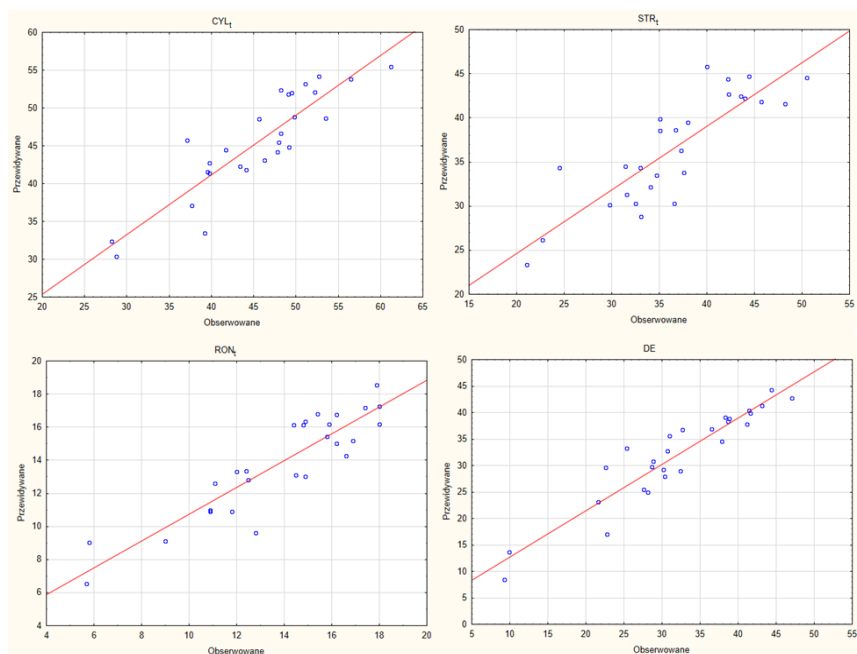
gdzie:  $n$  – wartość prędkości obrotowej wrzeciona,  $f_n$  – wartość posuwu na obrót,  $KIN$  – układ kinematyczny,  $n \cdot f_n$  – interakcja wartości prędkości obrotowej wrzeciona z wartością posuwu na obrót,  $n \cdot KIN$  – interakcja wartości prędkości obrotowej wrzeciona z układem kinematycznym,  $f_n \cdot KIN$  – interakcja wartości posuwu na obrót z układem kinematycznym.



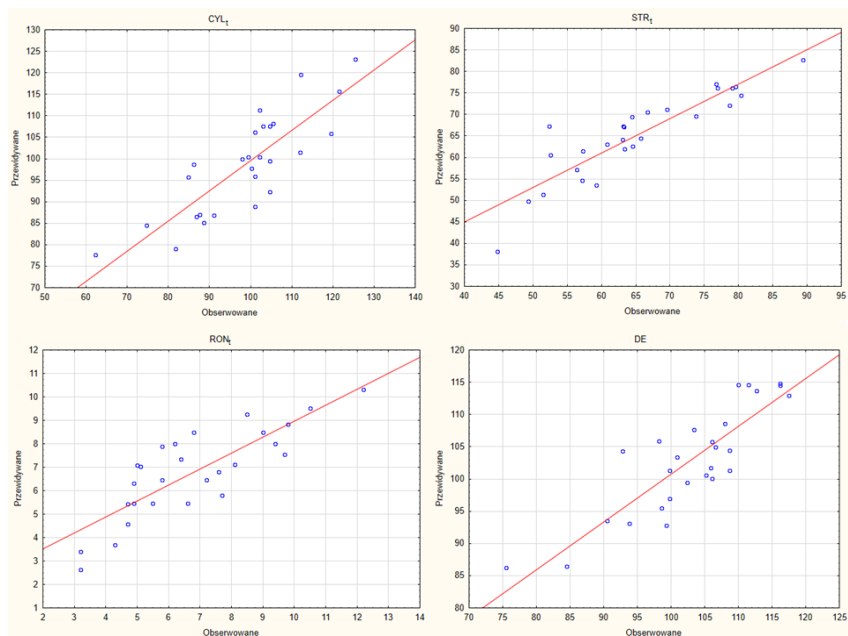
Rys. 37. Zestawione wartości eksperymentalne z wartościami predykcyjnymi błędów kształtu oraz dokładności wykonania otworów dla stali C45



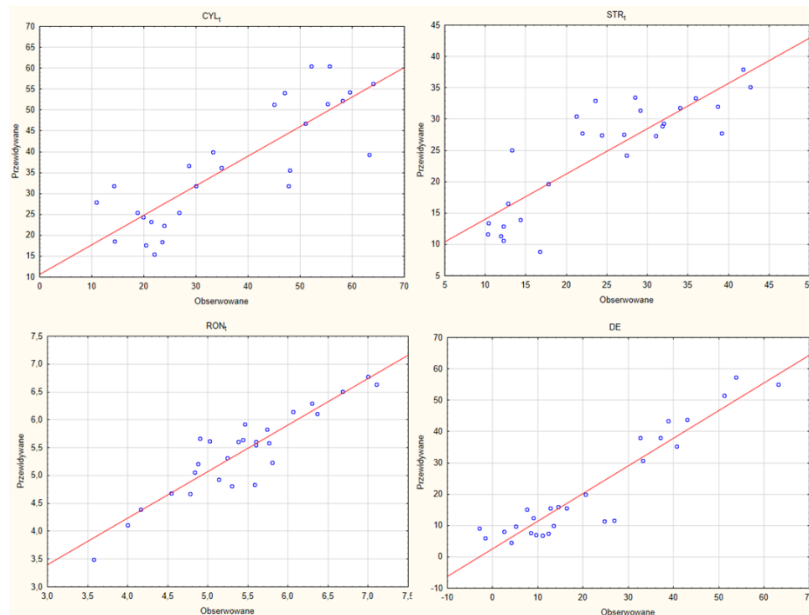
Rys. 38. Zestawione wartości eksperymentalne z wartościami predykcyjnymi błędów kształtu oraz dokładności wykonania otworów dla stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT



Rys. 39. Zestawione wartości eksperymentalne z wartościami predykcyjnymi błędów kształtu oraz dokładności wykonania otworów dla stopu aluminium PA6



Rys. 40. Zestawione wartości eksperymentalne z wartościami predykcyjnymi błędów kształtu oraz dokładności wykonania otworów dla stopu miedzi MO58



Rys. 41. Zestawione wartości eksperymentalne z wartościami predykcyjnymi błędów kształtu oraz dokładności wykonania otworów dla Inconelu 718

Wartości przewidywane i eksperymentalne dla odchyłki walcowości, odchyłki prostoliniowości, odchyłki okrągłości oraz błędu średnicy otworu zostały przedstawione na rys. 37-41. Zauważono, że wszystkie wartości są w bardzo dobrej korelacji ze zbudowanymi modelami.

W tabelach 40-44 zestawiono porównanie wartości eksperymentalnych z przewidywanymi. Wartości te wskazują na dokładność modeli ze względu na zbliżone wartości. Dla stali C45 wartości błędów względnych były następujące: dla  $CYL_t$  12%, dla  $STR_t$  15%, dla  $RON_t$  7% oraz DE 87%. Dla stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT wartości błędów względnych były następujące: dla  $CYL_t$  12%, dla  $STR_t$  12%, dla  $RON_t$  4% oraz DE 6%. Dla stopu aluminium PA6 wartości błędów względnych były następujące: dla  $CYL_t$  6%, dla  $STR_t$  8%, dla  $RON_t$  9% oraz DE 9%. Dla stopu miedzi MO58 wartości błędów względnych były następujące: dla  $CYL_t$  6%, dla  $STR_t$  5%, dla  $RON_t$  16% oraz DE 3%. Dla Inconelu 718 wartości błędów względnych były następujące: dla  $CYL_t$  26%, dla  $STR_t$  24%, dla  $RON_t$  9% oraz DE 53%.

Tabela 40. Wyniki badań wartości eksperymentalnych oraz przewidywanych dla stali C45

Kodowanie	Eksperymentalne wyniki				Przewidywane wyniki			
	CYL <sub>t</sub> 15 UPR, μm	STR <sub>t</sub> F2.5, μm	RON <sub>t</sub> 15 UPR, μm	DE, μm	CYL <sub>t</sub> 15 UPR, μm	STR <sub>t</sub> F2.5, μm	RON <sub>t</sub> 15 UPR, μm	DE, μm
TiI1S	17,5	16,7	7,6	-0,5	15,6	13,6	7,1	-0,6
TiII1S	14,4	10,9	6,1	-1,0	14,2	9,6	6,1	-2,0
TiIII1S	17,4	9,2	5,5	-2,0	20,1	14,2	5,4	-0,6
TiI2S	11,4	14,0	5,1	-1,7	11,6	11,1	5,3	-1,9
TiII2S	9,5	10,4	5,2	-1,4	8,8	9,1	4,7	-0,9
TiIII2S	10,7	8,5	3,4	-0,4	13,8	11,9	4,2	-0,9
TiI3S	12,1	10,2	5,8	-3,0	14,5	12,9	5,4	-3,0
TiII3S	11,8	14,3	5,1	-1,7	10,9	12,2	5,2	-0,5
TiIII3S	19,7	14,1	4,3	-0,3	15,0	13,7	4,8	-1,5
TiI4S	11,4	10,6	4,4	-0,4	11,6	11,9	5,5	0,2
TiII4S	11,4	11,5	4,7	-0,7	12,2	10,6	4,5	-1,0
TiIII4S	16,5	12,9	3,7	0,6	17,1	13,8	3,8	0,2
TiI5S	16,3	14,9	4,5	-1,3	13,4	13,2	4,1	-1,1
TiII5S	19,6	15,6	3,1	0,5	12,3	13,4	3,5	0,1
TiIII5S	16,8	14,5	3,3	0,0	16,4	15,1	3,0	0,0
TiI6S	23,8	20,2	4,8	-2,4	22,0	18,8	4,7	-2,2
TiII6S	13,5	17,2	4,4	-0,8	19,8	19,9	4,5	0,5
TiIII6S	18,6	20,0	4,6	0,6	23,2	20,5	4,0	-0,6
TiI7S	17,5	16,8	7,0	3,8	17,2	16,6	6,4	2,0
TiII7S	20,4	18,4	5,2	1,3	19,9	18,0	5,5	1,1
TiIII7S	25,0	21,2	4,7	0,4	23,7	19,9	4,7	2,2
TiI8S	21,6	17,8	5,2	0,6	24,8	21,7	5,4	0,8
TiII8S	22,1	20,1	5,3	1,3	25,4	24,2	5,0	2,2
TiIII8S	27,2	28,7	4,4	2,7	28,7	24,7	4,4	2,0
TiI9S	35,9	26,8	5,8	-2,4	39,2	31,1	6,5	-0,2
TiII9S	36,6	29,8	6,0	3,0	38,3	34,0	6,3	2,6
TiIII9S	51,8	44,3	6,4	3,6	41,0	33,7	5,9	1,5

Tabela 41. Wyniki badań wartości eksperymentalnych oraz przewidywanych dla stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT

Kodowanie	Eksperymentalne wyniki				Przewidywane wyniki			
	CYL <sub>t</sub> 15 UPR, μm	STR <sub>t</sub> F2.5, μm	RON <sub>t</sub> 15 UPR, μm	DE, μm	CYL <sub>t</sub> 15 UPR, μm	STR <sub>t</sub> F2.5, μm	RON <sub>t</sub> 15 UPR, μm	DE, μm
TiI1Q	9,7	10,4	4,1	0,0	12,0	12,2	4,2	0,2
TiII1Q	12,7	11,8	3,9	0,8	12,0	12,1	3,8	0,2
TiIII1Q	12,7	11,8	3,6	0,5	14,9	13,6	4,0	1,2
TiI2Q	14,4	15,7	4,7	-1,0	11,6	11,2	4,5	-1,0
TiII2Q	12,1	12,5	4,5	-0,7	11,6	11,7	4,6	-0,8
TiIII2Q	15,6	14,3	5,0	-0,5	13,6	12,4	4,5	-0,2
TiI3Q	16,3	11,6	4,2	-0,7	13,4	12,8	4,4	-1,0
TiII3Q	13,2	14,3	4,7	-1,3	13,5	13,7	4,9	-0,7
TiIII3Q	10,7	11,2	4,8	0,2	14,7	13,9	4,6	-0,4
TiI4Q	7,5	7,4	4,4	-0,6	8,3	9,0	4,1	-0,7
TiII4Q	9,8	9,6	4,4	-0,7	10,2	10,5	4,0	-0,6
TiIII4Q	14,5	14,6	3,7	0,5	12,2	11,2	4,0	0,4
TiI5Q	9,8	9,5	4,1	-1,1	9,2	9,9	4,2	-1,4
TiII5Q	12,7	12,0	4,6	-0,9	10,9	11,7	4,6	-1,2
TiIII5Q	12,2	11,0	4,2	-0,4	12,0	11,8	4,3	-0,6
TiI6Q	10,3	12,7	3,8	-1,2	12,4	13,5	3,9	-1,1
TiII6Q	12,9	13,6	4,6	-1,7	13,8	15,4	4,7	-0,7
TiIII6Q	13,6	17,6	4,3	-0,3	14,4	15,1	4,3	-0,5
TiI7Q	12,5	10,6	3,9	0,1	11,5	8,7	3,8	-0,2
TiII7Q	14,8	13,2	4,0	-0,4	15,4	11,8	4,0	0,0
TiIII7Q	18,6	11,3	3,9	1,1	16,3	11,7	3,8	0,9
TiI8Q	13,7	11,2	3,4	-0,5	13,7	11,6	3,7	-0,6
TiII8Q	13,9	13,0	4,0	-0,4	17,1	14,7	4,4	-0,3
TiIII8Q	12,7	9,8	4,1	-0,4	17,4	14,1	4,0	0,3

Kodowanie	Eksperymentalne wyniki				Przewidywane wyniki			
	CYL <sub>t</sub> 15 UPR, μm	STR <sub>t</sub> F2.5, μm	RON <sub>t</sub> 15 UPR, μm	DE, μm	CYL <sub>t</sub> 15 UPR, μm	STR <sub>t</sub> F2.5, μm	RON <sub>t</sub> 15 UPR, μm	DE, μm
TiI9Q	16,8	16,8	3,2	-0,9	18,3	17,2	3,3	0,2
TiII9Q	24,2	21,6	4,3	1,2	21,1	20,1	4,2	0,6
TiIII9Q	24,6	21,7	4,1	1,9	21,0	19,3	3,7	0,8

Tabela 42. Wyniki badań wartości eksperymentalnych oraz przewidywanych dla stopu aluminium PA6

Kodowanie	Eksperymentalne wyniki				Przewidywane wyniki			
	CYL <sub>t</sub> 15 UPR, μm	STR <sub>t</sub> F2.5, μm	RON <sub>t</sub> 15 UPR, μm	DE, μm	CYL <sub>t</sub> 15 UPR, μm	STR <sub>t</sub> F2.5, μm	RON <sub>t</sub> 15 UPR, μm	DE, μm
TiI1A	28,2	22,7	9,0	9,9	32,3	26,2	9,1	13,6
TiII1A	28,8	21,1	11,1	9,3	30,3	23,3	12,6	8,5
TiIII1A	39,2	36,6	14,9	22,8	33,4	30,3	13,0	17,0
TiI2A	48,0	34,1	16,9	30,4	45,5	32,2	15,2	27,9
TiII2A	46,3	33,1	15,9	21,6	43,1	28,8	16,2	23,1
TiIII2A	37,1	24,5	17,4	22,6	45,7	34,3	17,2	29,7
TiI3A	49,2	37,6	14,4	30,2	44,8	33,8	16,2	29,2
TiII3A	43,4	32,5	15,8	28,1	42,3	30,3	15,4	24,9
TiIII3A	41,7	31,4	16,2	28,7	44,5	34,5	16,8	29,7
TiI4A	39,8	33,0	12,0	32,4	41,4	34,3	13,3	29,0
TiII4A	39,8	34,7	16,2	27,6	42,7	33,5	15,0	25,4
TiIII4A	47,8	38,0	14,9	25,4	44,2	39,4	16,3	33,2
TiI5A	56,5	48,2	18,0	41,4	53,8	41,6	17,3	40,4
TiII5A	52,7	35,1	15,4	36,5	54,2	39,9	16,8	36,9
TiIII5A	61,2	50,5	17,9	47,1	55,4	44,6	18,5	42,8
TiI6A	48,2	42,2	14,8	38,8	52,4	44,4	16,1	38,8
TiII6A	52,2	44,0	16,6	31,0	52,1	42,2	14,2	35,5
TiIII6A	51,1	40,0	18,0	41,6	53,2	45,8	16,2	39,8
TiI7A	37,7	29,8	10,9	30,7	37,1	30,2	11,0	32,8
TiII7A	44,1	31,6	10,9	28,8	41,8	31,3	10,9	30,8
TiIII7A	39,5	37,3	14,5	41,2	41,6	36,3	13,1	37,8

Kodowanie	Eksperymentalne wyniki				Przewidywane wyniki			
	CYL <sub>t</sub> 15 UPR, μm	STR <sub>t</sub> F2.5, μm	RON <sub>t</sub> 15 UPR, μm	DE, μm	CYL <sub>t</sub> 15 UPR, μm	STR <sub>t</sub> F2.5, μm	RON <sub>t</sub> 15 UPR, μm	DE, μm
TiI8A	49,8	36,7	12,5	43,1	48,8	38,6	12,8	41,3
TiII8A	49,5	35,1	11,8	38,3	52,0	38,6	10,9	39,1
TiIII8A	49,1	43,6	12,4	44,4	51,8	42,4	13,4	44,3
TiI9A	48,2	42,3	12,8	32,7	46,7	42,7	9,6	36,8
TiII9A	53,5	45,7	5,7	37,9	48,6	41,8	6,5	34,6
TiIII9A	45,6	44,4	5,8	38,7	48,6	44,7	9,0	38,3

Tabela 43. Wyniki badań wartości eksperymentalnych oraz przewidywanych dla mosiądzu MO58

Kodowanie	Eksperymentalne wyniki				Przewidywane wyniki			
	CYL <sub>t</sub> 15 UPR, μm	STR <sub>t</sub> F2.5, μm	RON <sub>t</sub> 15 UPR, μm	DE, μm	CYL <sub>t</sub> 15 UPR, μm	STR <sub>t</sub> F2.5, μm	RON <sub>t</sub> 15 UPR, μm	DE, μm
TiI1M	101,0	76,7	6,6	93,8	88,8	77,0	5,4	93,0
TiII1M	104,7	78,7	7,6	99,3	92,3	72,1	6,8	92,7
TiIII1M	62,3	56,4	6,2	92,8	77,7	57,1	8,0	104,3
TiI2M	104,7	89,4	6,8	90,5	107,6	82,6	8,5	93,5
TiII2M	102,2	79,1	10,5	102,4	111,2	76,1	9,5	99,4
TiIII2M	102,2	52,4	12,2	108,7	100,5	67,2	10,3	104,4
TiI3M	112,2	80,4	4,9	106,6	119,6	74,5	6,3	105,0
TiII3M	125,5	63,2	5,0	111,5	123,1	67,3	7,1	114,6
TiIII3M	121,5	60,8	9,7	116,2	115,6	63,1	7,5	114,8
TiI4M	86,2	63,3	4,3	105,2	98,7	67,1	3,7	100,6
TiII4M	98,0	66,7	3,2	106,1	100,0	70,5	3,4	105,8
TiIII4M	86,8	51,5	4,7	116,2	86,5	51,4	5,4	114,5
TiI5M	119,5	76,9	6,4	98,6	105,8	76,1	7,4	95,4
TiII5M	103,0	79,6	5,1	98,2	107,6	76,5	7,0	105,9



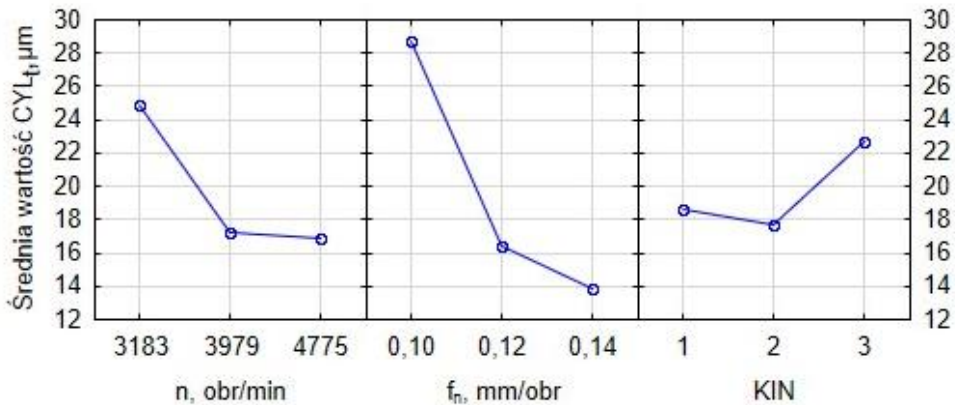
Kodowanie	Eksperymentalne wyniki				Przewidywane wyniki			
	CYL <sub>t</sub> 15 UPR, μm	STR <sub>t</sub> F2.5, μm	RON <sub>t</sub> 15 UPR, μm	DE, μm	CYL <sub>t</sub> 15 UPR, μm	STR <sub>t</sub> F2.5, μm	RON <sub>t</sub> 15 UPR, μm	DE, μm
TiIII5 M	100,3	63,1	9,0	108,0	97,8	64,1	8,5	108,6
TiII6M	101,1	69,6	7,7	99,8	106,2	71,2	5,8	101,3
TiII6M	105,4	73,8	5,5	110,0	108,2	69,6	5,5	114,6
TiIII6 M	112,0	64,6	7,2	117,5	101,5	62,6	6,5	113,0
TiII7M	99,4	49,3	4,7	99,8	100,4	49,8	4,6	97,0
TiII7M	104,6	57,3	3,2	103,4	99,4	61,5	2,6	107,7
TiIII7 M	87,6	44,8	4,9	112,7	87,0	38,2	5,5	113,7
TiII8M	101,1	63,4	9,8	75,5	95,8	62,0	8,8	86,3
TiII8M	84,9	64,5	8,1	108,7	95,8	69,4	7,1	101,3
TiIII8 M	91,1	59,3	8,5	105,9	86,9	53,6	9,3	101,7
TiII9M	74,7	52,6	5,8	84,5	84,5	60,5	7,9	86,5
TiII9M	88,6	65,7	5,8	100,9	85,1	64,5	6,4	103,4
TiIII9 M	81,8	57,2	9,4	106,1	79,1	54,7	8,0	100,0

Tabela 44. Wyniki badań wartości eksperymentalnych oraz przewidywanych dla Inconelu 718

Kodowanie	Eksperymentalne wyniki				Przewidywane wyniki			
	CYL <sub>t</sub> 15 UPR, μm	STR <sub>t</sub> F2.5, μm	RON <sub>t</sub> 15 UPR, μm	DE, μm	CYL <sub>t</sub> 15 UPR, μm	STR <sub>t</sub> F2.5, μm	RON <sub>t</sub> 15 UPR, μm	DE, μm
TiII1I	33,3	32,0	7,0	20,6	42,0	43,9	6,8	19,0
TiIII1I	48,0	39,2	6,3	24,7	58,6	41,6	6,8	23,3
TiIII1I	47,8	27,4	6,7	26,8	48,7	39,9	6,3	15,2
TiII2I	63,2	35,9	5,6	14,5	35,9	32,1	6,9	12,0
TiIII2I	30,0	27,1	6,1	8,4	33,5	26,0	4,8	12,6
TiIII2I	14,3	12,0	5,7	-3,0	33,6	27,1	5,5	8,2
TiII3I	34,9	31,8	7,1	12,7	30,6	23,3	7,7	6,8

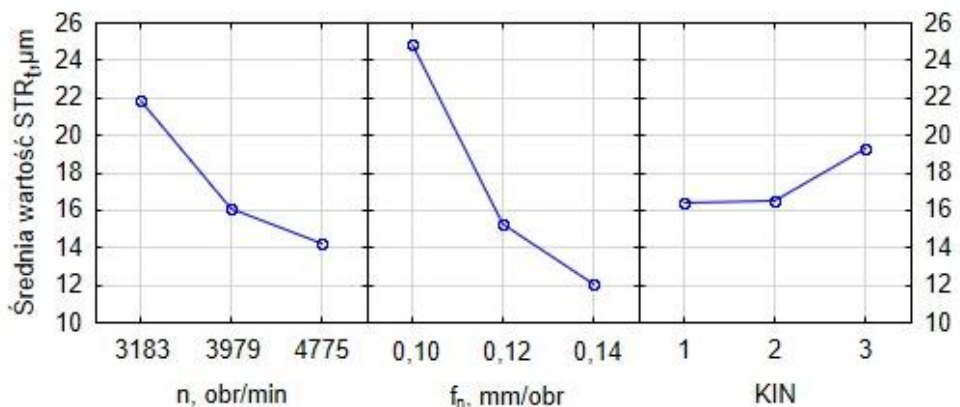
Kodowanie	Eksperymentalne wyniki				Przewidywane wyniki			
	CYL <sub>t</sub> 15 UPR, μm	STR <sub>t</sub> F2.5, μm	RON <sub>t</sub> 15 UPR, μm	DE, μm	CYL <sub>t</sub> 15 UPR, μm	STR <sub>t</sub> F2.5, μm	RON <sub>t</sub> 15 UPR, μm	DE, μm
TiII3I	26,6	18,5	4,5	2,5	15,7	15,2	4,3	5,0
TiIII3I	10,9	13,3	5,0	-1,7	22,5	18,0	5,8	3,3
TiI4I	18,8	10,4	6,4	9,1	16,5	15,7	5,2	17,7
TiII4I	21,4	12,2	5,8	7,6	33,8	16,2	6,5	11,1
TiIII4I	23,5	16,8	5,4	5,1	23,5	13,1	5,4	8,5
TiI5I	19,9	12,8	5,1	9,5	22,2	14,5	5,4	14,7
TiII5I	14,4	10,3	4,9	12,3	20,5	10,7	4,4	6,2
TiIII5I	20,4	11,9	4,8	4,1	20,2	10,7	4,6	6,3
TiI6I	23,9	14,3	5,5	13,5	28,8	16,2	6,3	13,5
TiII6I	26,7	17,8	3,6	16,3	14,5	9,9	3,8	4,3
TiIII6I	22,0	12,3	4,8	11,0	20,9	11,8	4,8	6,3
TiI7I	55,6	23,6	4,9	53,8	33,9	24,9	4,7	52,2
TiII7I	47,0	21,2	5,6	32,6	52,0	28,1	7,3	34,5
TiIII7I	45,0	24,4	5,4	38,7	41,3	23,7	5,5	37,4
TiI8I	52,1	41,8	4,2	63,0	51,6	34,2	5,0	53,1
TiII8I	55,3	29,1	5,2	37,1	50,4	32,7	5,0	35,4
TiIII8I	58,1	38,7	5,6	42,9	49,8	31,5	4,7	40,2
TiI9I	64,0	34,0	5,8	51,2	70,0	46,5	5,9	55,9
TiII9I	59,5	42,7	4,0	33,2	56,1	42,0	4,2	39,3
TiIII9I	51,0	31,1	5,3	40,6	62,3	43,0	4,9	45,0

Na rys. 42-61 przedstawiono efekty główne (średnie odpowiedzi) wartości parametrów wyjściowych (CYL<sub>t</sub>, STR<sub>t</sub>, RON<sub>t</sub>, DE) w stosunku do każdego badanego parametru wejściowego (prędkość obrotowa wrzeciona, posuw na obrót oraz układ kinematyczny) dla stali C45, stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT, stopu aluminium PA6, stopu mosiądzu MO58 oraz Inconelu 718.



Rys. 42. Wykresy efektów głównych odchyłki walcowości dla stali C45

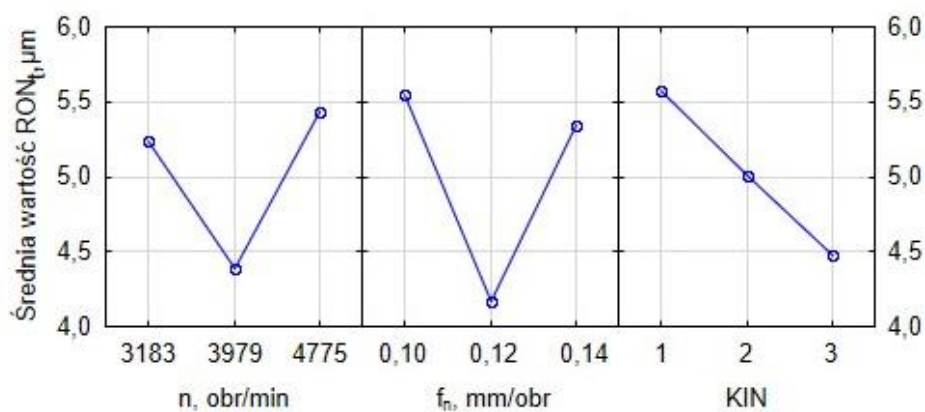
Z danych przedstawionych na rys. 42 wynika, że przy prędkości obrotowej wynoszącej 4775 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki walcowości wynoszącą 16,8  $\mu m$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość odchyłki walcowości na poziomie ( $CYL_t = 13,8 \mu m$ ) jest 0,14 mm/obr. Stosując w procesie wiercenia stali C45 układ kinematyczny drugi, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki walcowości otworu wynoszącą 17,7  $\mu m$ . Zauważono, że wzrost parametrów technologicznych powoduje zmniejszenie wartości odchyłki walcowości otworu w stali C45.



Rys. 43. Wykresy efektów głównych odchyłki prostoliniowości dla stali C45

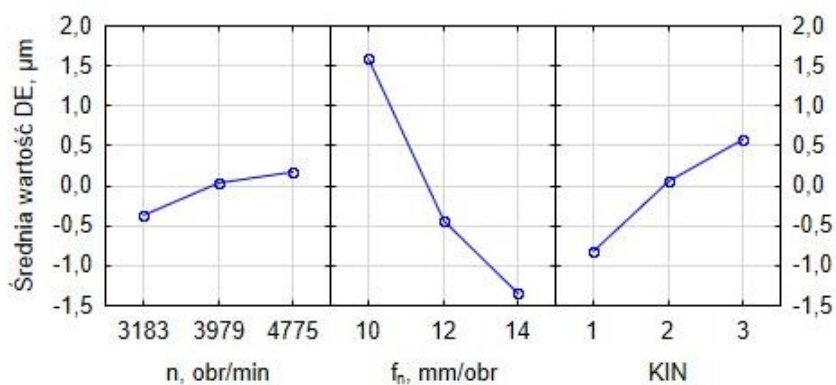
Z rys. 43 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 4775 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki prostoliniowości wynoszącą 14,2  $\mu m$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość odchyłki prostoliniowości na poziomie ( $STR_t = 12 \mu m$ ) jest 0,14 mm/obr. Wykorzystując

w procesie wiercenia stali C45 układ kinematyczny pierwszy oraz drugi, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki walcowości otworu wynoszącą 16,4  $\mu\text{m}$ . Zauważono, że wzrost parametrów technologicznych powoduje zmniejszenie wartości odchyłki prostoliniowości otworu w stali C45.



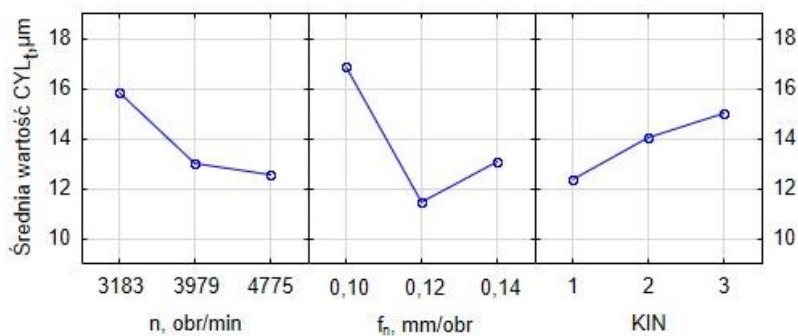
Rys. 44. Wykresy efektów głównych odchyłki okrągłości dla stali C45

Z danych przedstawionych na rys. 44 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 3979 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki okrągłości wynoszącą 4,4  $\mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość odchyłki okrągłości na poziomie ( $RON_t = 4,2 \mu\text{m}$ ) jest 0,12 mm/obr. Wykorzystując w procesie wiercenia stali C45 układ kinematyczny trzeci, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki okrągłości otworu wynoszącą 4,5  $\mu\text{m}$ .



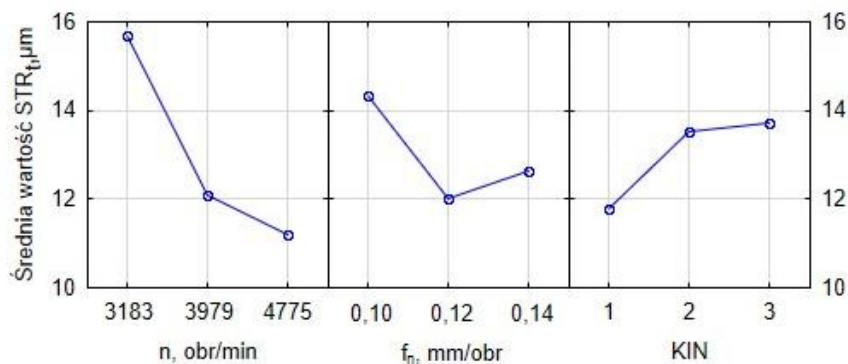
Rys. 45. Wykresy efektów głównych błędu średnicy dla stali C45

Z rys. 45 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 3979 obr/min, uzyskano idealną średnicę otworu wynoszącą 6 mm. Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość błędu średnicy otworu na poziomie ( $DE = -0,4 \mu\text{m}$ ) jest 0,12 mm/obr. Wykorzystując w procesie wiercenia stali C45 układ kinematyczny drugi, uzyskano najkorzystniejszą wartość błędu średnicy otworu wynoszącą 0,1  $\mu\text{m}$ .



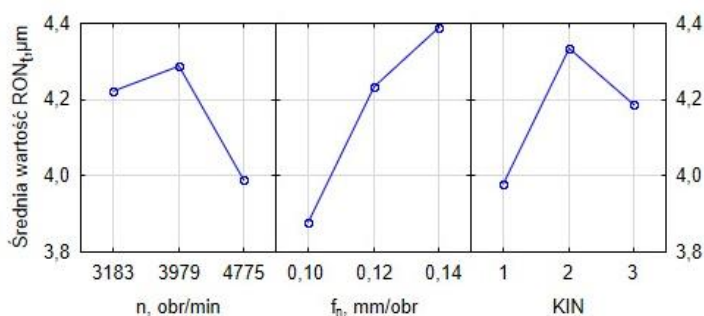
Rys. 46. Wykresy efektów głównych odchyłki walcowości dla stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT

Z danych przedstawionych na rys. 46 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 4775 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki walcowości wynoszącą 12,5  $\mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość odchyłki walcowości na poziomie ( $CYL_t = 11,5 \mu\text{m}$ ) jest 0,12 mm/obr. Wykorzystując w procesie wiercenia stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT układ kinematyczny pierwszy, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki walcowości otworu wynoszącą 12,3  $\mu\text{m}$ . Zauważono, że wzrost prędkości obrotowej wrzeciona powoduje zmniejszenie wartości odchyłki walcowości otworu.



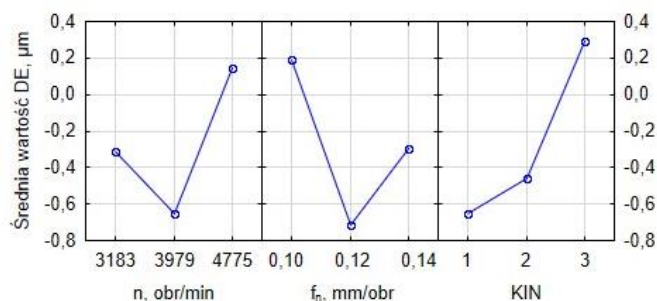
Rys. 47. Wykresy efektów głównych odchyłki prostoliniowości dla stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT

Z rys. 47 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 4775 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki prostoliniowości wynoszącą 11,2  $\mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość odchyłki prostoliniowości na poziomie ( $\text{STR}_t = 12 \mu\text{m}$ ) jest 0,12 mm/obr. Wykorzystując w procesie wiercenia układ kinematyczny pierwszy, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki prostoliniowości otworu wynoszącą 11,8  $\mu\text{m}$ . Zauważono, że wzrost prędkości obrotowej wrzeciona powoduje zmniejszenie wartości odchyłki prostoliniowości otworu.



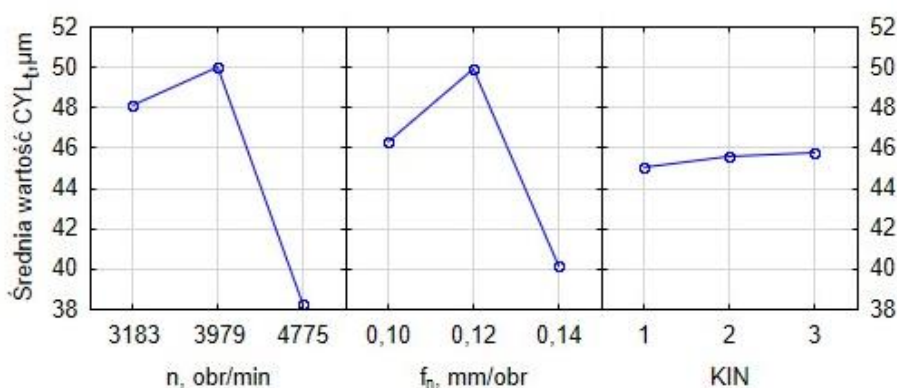
Rys. 48. Wykresy efektów głównych odchyłki okrągłości dla stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT

Z danych przedstawionych na rys. 48 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 4775 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki okrągłości wynoszącą 4,2  $\mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość odchyłki okrągłości na poziomie ( $\text{RON}_t = 3,9 \mu\text{m}$ ) jest 0,1 mm/obr. Wykorzystując w procesie wiercenia układ kinematyczny pierwszy, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki okrągłości otworu wynoszącą 4  $\mu\text{m}$ . Zauważono, że wzrost prędkości obrotowej wrzeciona oraz zmniejszenie posuwu na obrót powoduje zmniejszenie wartości odchyłki okrągłości otworu w stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT.



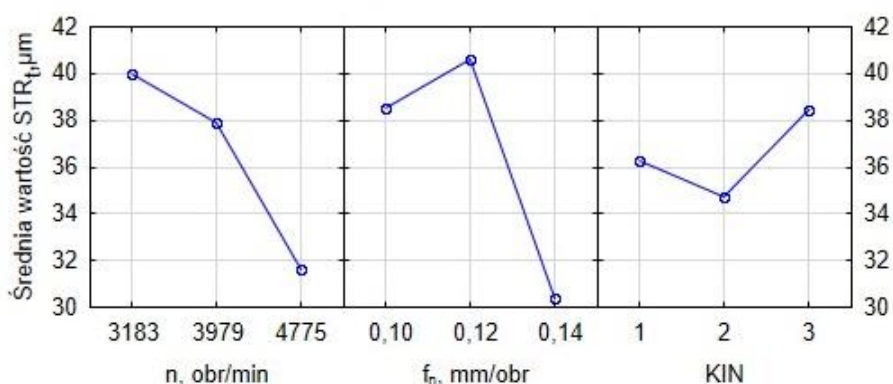
Rys. 49. Wykresy efektów głównych błędu średnicy dla stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT

Z rys. 49 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 4775 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość błędu średnicy wynoszącą  $0,2 \mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość odchyłki walcowości na poziomie ( $DE = 0,2 \mu\text{m}$ ) jest  $0,1 \text{ mm/obr}$ . Wykorzystując w procesie wiercenia układ kinematyczny trzeci, uzyskano najmniejszą wartość błędu średnicy otworu wynoszącą  $0,3 \mu\text{m}$ .



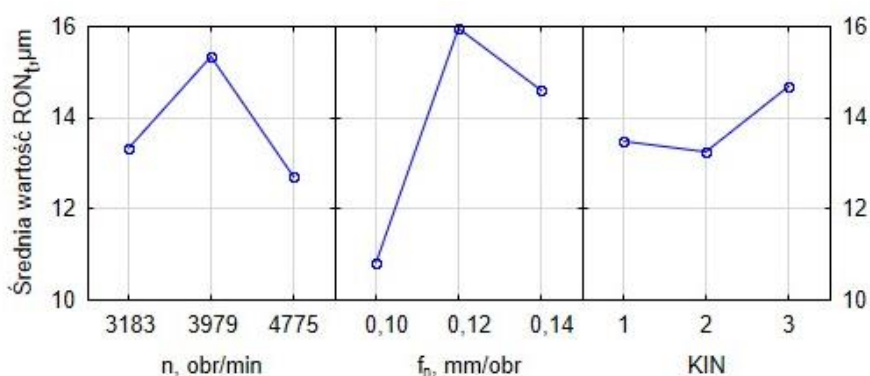
Rys. 50. Wykresy efektów głównych odchyłki walcowości dla stopu aluminium PA6

Z danych przedstawionych na rys. 50 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 4775 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki walcowości wynoszącą  $38,3 \mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość odchyłki walcowości na poziomie ( $CYL_t = 40,2 \mu\text{m}$ ) jest  $0,14 \text{ mm/obr}$ . Zauważono, że niezależnie od zastosowanego układu kinematycznego podczas wiercenia stopu aluminium PA6, uzyskano prawie takie same wartości odchyłki walcowości otworu.



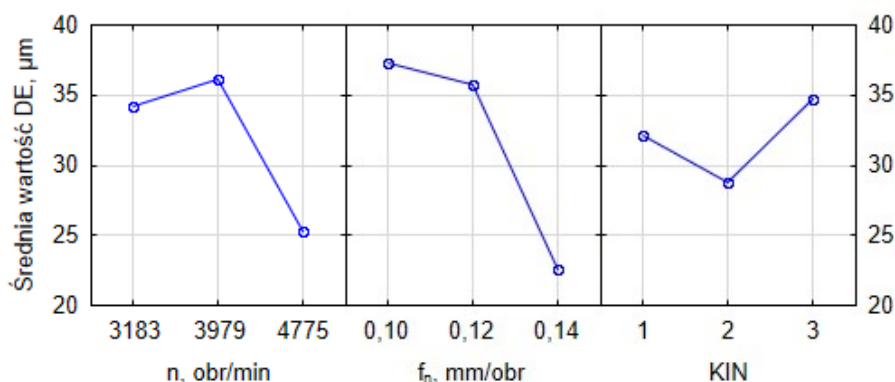
Rys. 51. Wykresy efektów głównych odchyłki prostoliniowości dla stopu aluminium PA6

Z rys. 51 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 4775 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki prostoliniowości wynoszącą 31,6  $\mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość odchyłki prostoliniowości na poziomie ( $\text{STR}_t = 30,4 \mu\text{m}$ ) jest 0,14 mm/obr. Wykorzystując układ kinematyczny drugi, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki prostoliniowości otworu wynoszącą 34,8  $\mu\text{m}$ . Zauważono, że wzrost prędkości obrotowej wrzeciona powoduje zmniejszenie wartości odchyłki prostoliniowości otworu w stopie aluminium.



Rys. 52. Wykresy efektów głównych odchyłki okrągłości dla stopu aluminium PA6

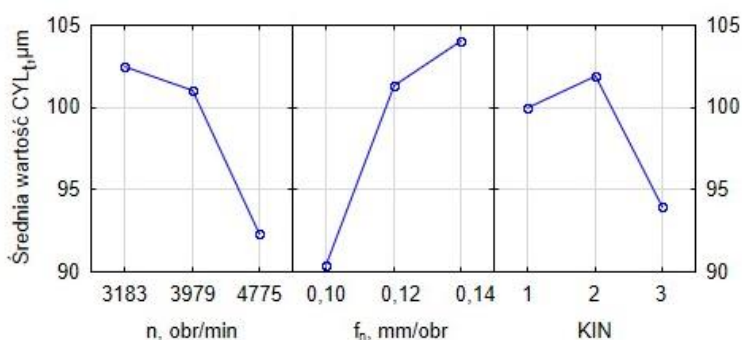
Z danych przedstawionych na rys. 52 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 4775 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki okrągłości wynoszącą 12,7  $\mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość odchyłki okrągłości na poziomie ( $\text{RON}_t = 10,8 \mu\text{m}$ ) jest 0,14 mm/obr. Wykorzystując układ kinematyczny drugi, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki okrągłości otworu wynoszącą 13,3  $\mu\text{m}$ .



Rys. 53. Wykresy efektów głównych błędu średnicy dla stopu aluminium PA6

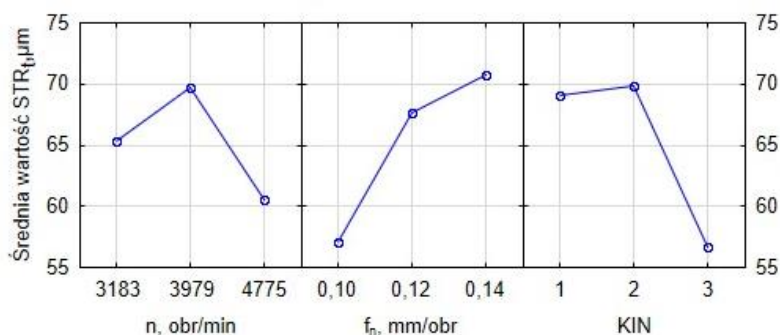


Z rys. 53 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 4775 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość błędu średnicy wynoszącą 25,3  $\mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość błąd średnicy na poziomie ( $DE = 22,6 \mu\text{m}$ ) jest 0,14 mm/obr. Wykorzystując układ kinematyczny drugi, uzyskano najmniejszą wartość błędu średnicy otworu wynoszącą 28,8  $\mu\text{m}$ . Zauważono, że zwiększenie posuwu na obrót powoduje zmniejszenie wartości błędu średnicy otworu w stopie aluminium PA6.



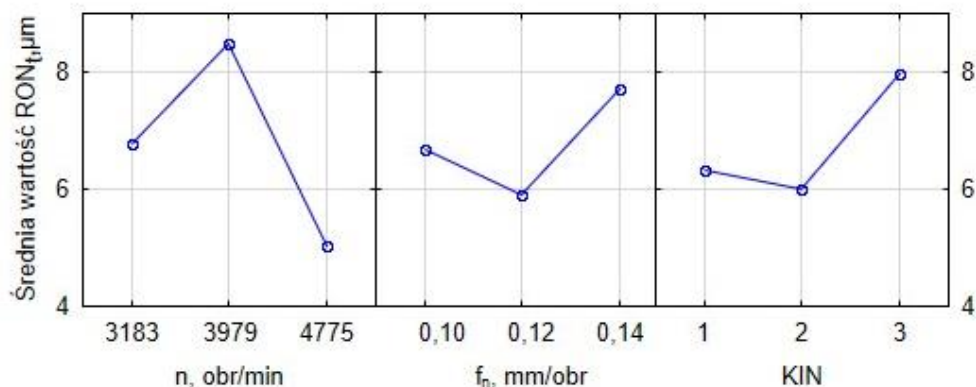
Rys. 54. Wykresy efektów głównych odchyłki walcowości dla stopu mosiądzu MO58

Z danych przedstawionych na rys. 54 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 4775 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki walcowości wynoszącą 92,3  $\mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość odchyłki walcowości na poziomie ( $CYL_t = 90,4 \mu\text{m}$ ) jest 0,1 mm/obr. Wykorzystując w procesie wiercenia stopie mosiądzu MO58 układ kinematyczny trzeci, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki walcowości otworu wynoszącą 93,9  $\mu\text{m}$ . Zauważono, że wzrost wartości prędkości obrotowej wrzeciona oraz spadek wartości posuwu na obrót powoduje zmniejszenie wartości odchyłki walcowości otworu w stopie mosiądzu MO58.



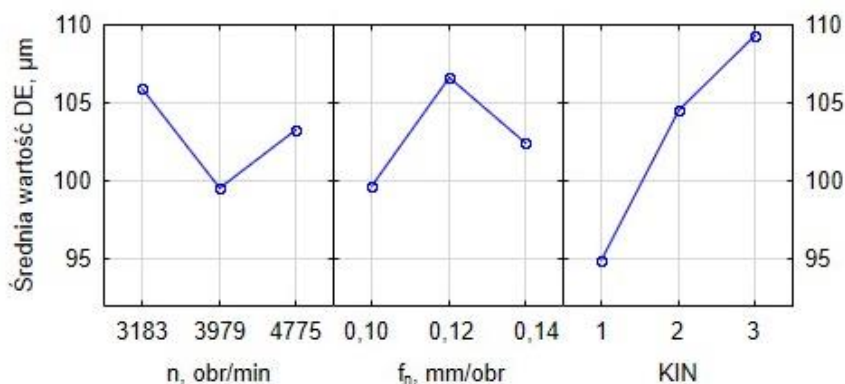
Rys. 55. Wykresy efektów głównych odchyłki prostoliniowości dla stopu mosiądzu MO58

Z rys. 55 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 4775 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki prostoliniowości wynoszącą 60,5  $\mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość odchyłki prostoliniowości na poziomie ( $\text{STR}_t = 57,1 \mu\text{m}$ ) jest 0,11 mm/obr. Wykorzystując w procesie wiercenia układ kinematyczny trzeci, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki prostoliniowości otworu wynoszącą 56,7  $\mu\text{m}$ . Zauważono, że spadek posuwu na obrót powoduje zmniejszenie wartości odchyłki prostoliniowości.



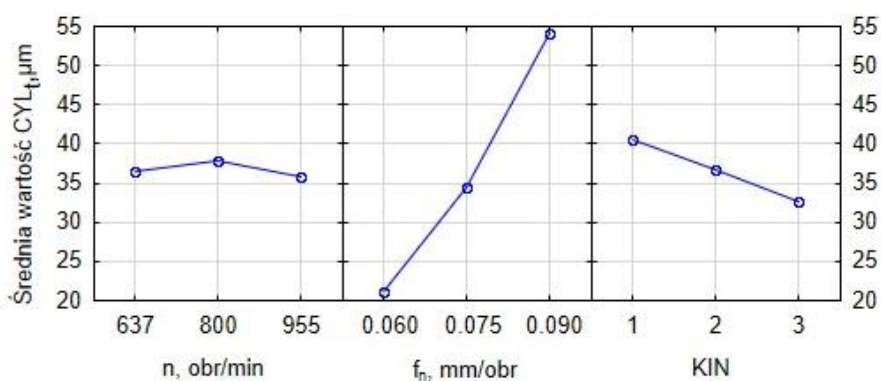
Rys. 56. Wykresy efektów głównych odchyłki okrągłości dla stopu mosiądzu MO58

Z danych przedstawionych na rys. 56 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 4775 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki okrągłości wynoszącą 5  $\mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość odchyłki walcowości na poziomie ( $\text{RON}_t = 5,9 \mu\text{m}$ ) jest 0,12 mm/obr. Wykorzystując w procesie wiercenia układ kinematyczny drugi, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki okrągłości otworu wynoszącą 6  $\mu\text{m}$ .



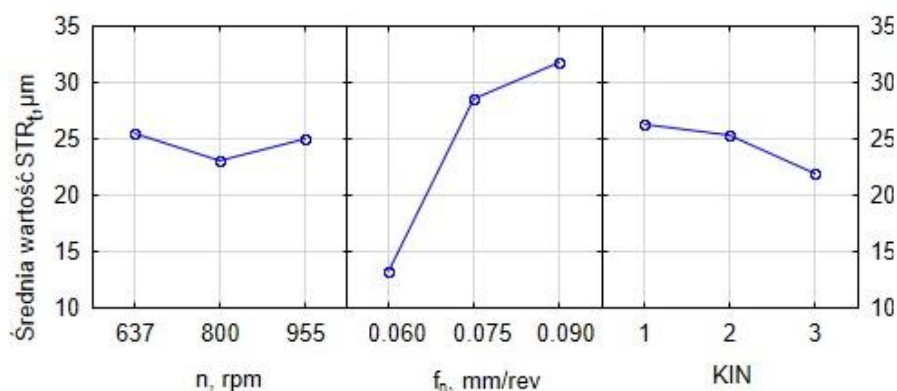
Rys. 57. Wykresy efektów głównych błędu średnicy dla stopu mosiądzu MO58

Z rys. 57 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 3979 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość błędu średnicy wynoszącą 99,6  $\mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość błędu średnicy na poziomie ( $DE = 99,7 \mu\text{m}$ ) jest 0,11 mm/obr. Wykorzystując w procesie wiercenia stopie mosiądzu MO58 układ kinematyczny pierwszy, uzyskano najmniejszą wartość błędu średnicy otworu wynoszącą 94,9  $\mu\text{m}$ .



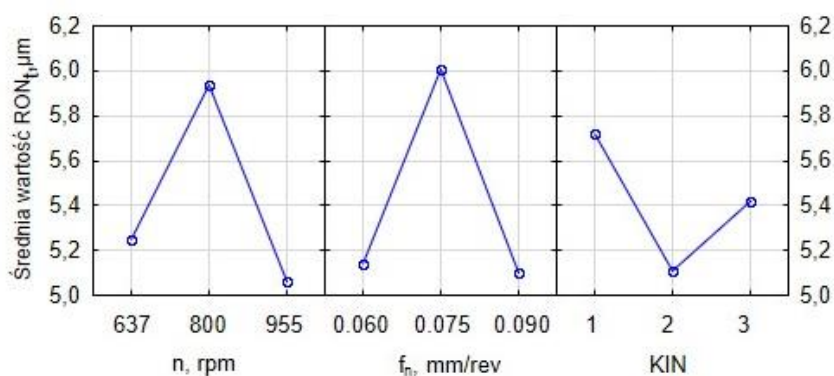
Rys. 58. Wykresy efektów głównych odchyłki walcowości dla Inconelu 718

Z danych przedstawionych na rys. 58 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 955 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki walcowości wynoszącą 35,7  $\mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość odchyłki walcowości na poziomie ( $CYL_t = 21,2 \mu\text{m}$ ) jest 0,06 mm/obr. Wykorzystując w procesie wiercenia Inconelu 718 układ kinematyczny trzeci, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki walcowości otworu wynoszącą 32,6  $\mu\text{m}$ . Zauważono, że zmniejszenie wartości posuwu na obrót powoduje zmniejszenie wartości odchyłki walcowości w Inconelu 718.



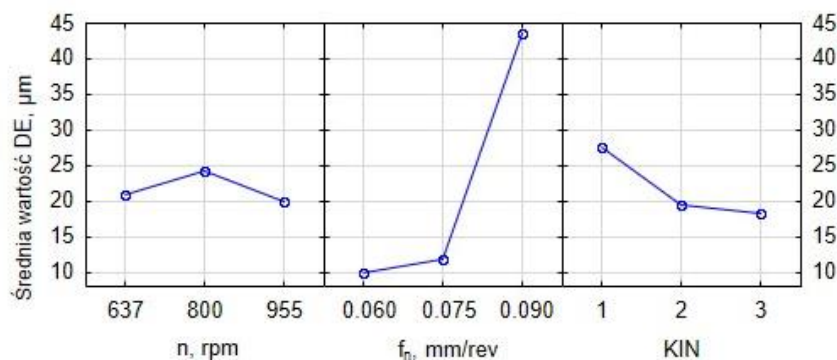
Rys. 59. Wykresy efektów głównych odchyłki prostoliniowości dla Inconelu 718

Z rys. 59 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 800 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki prostoliniowości wynoszącą 23  $\mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość odchyłki prostoliniowości na poziomie ( $\text{STR}_t = 13,2 \mu\text{m}$ ) jest 0,06 mm/obr. Wykorzystując w procesie wiercenia Inconelu 718 układ kinematyczny trzeci, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki prostoliniowości otworu wynoszącą 22  $\mu\text{m}$ . Zauważono, że spadek wartości posuwu na obrót powoduje zmniejszenie wartości odchyłki prostoliniowości otworu.



Rys. 60. Wykresy efektów głównych odchyłki okrągłości dla Inconelu 718

Z danych przedstawionych na rys. 60 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 955 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki okrągłości wynoszącą 5,1  $\mu\text{m}$ . Najkorzystniejszymi wartościami posuwu na obrót pozwalającymi uzyskać wartość odchyłki okrągłości na poziomie ( $\text{RON}_t = 5,1 \mu\text{m}$ ) są 0,06 mm/obr oraz 0,09 mm/obr. Wykorzystując w procesie wiercenia układ kinematyczny drugi, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki okrągłości otworu wynoszącą 5,1  $\mu\text{m}$ .



Rys. 61. Wykresy efektów głównych błędu średnicy dla Inconelu 718

Z rys. 61 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 955 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość błędu średnicy wynoszącą 19,9  $\mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość błędu średnicy na poziomie ( $DE = 9,8 \mu\text{m}$ ) jest 0,06 mm/obr. Wykorzystując w procesie wiercenia Inconelu 718 układ kinematyczny trzeci, uzyskano najmniejszą wartość błędu średnicy otworu wynoszącą 18,3  $\mu\text{m}$ . Zauważono, że zmniejszenie wartości posuwu na obrót powoduje zmniejszenie wartości błędu średnicy otworu.

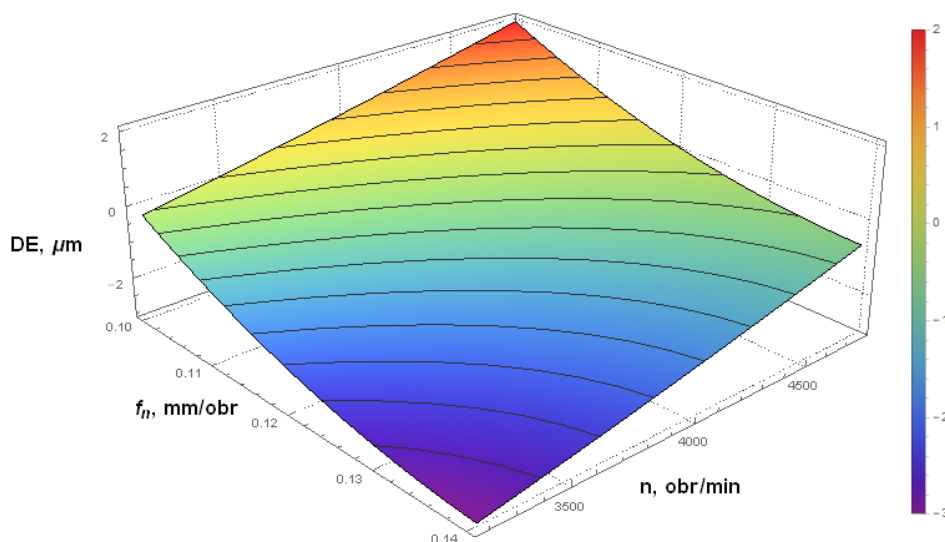
### **Wnioski:**

1. Tablicę ortogonalną TaguchiL27 zastosowano do oceny wpływu parametrów wejściowych takich jak prędkość skrawania, posuw na obrót oraz kinematyka obróbki na parametry wyjściowe np. błąd średnicy, odchyłki walcowości, prostoliniowości i okrągłości.
2. Przedstawione równania posłużą do przewidywania (prognozowania) odchyłek kształtu i położenia otworów wykonywanych w wymienionych wyżej materiałach.
3. Zbudowane empiryczne modele matematyczne cechują się bardzo dużą korelacją w stosunku do obszernych badań dla stali C45: odchyłka walcowości  $R^2 = 85,69\%$ , odchyłka prostoliniowości  $R^2 = 81,66\%$ , odchyłka okrągłości  $R^2 = 83,28\%$ , błąd średnicy otworu  $R^2 = 67,98\%$ . Dla stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT: odchyłka walcowości  $R^2 = 67,29\%$ , odchyłka prostoliniowości  $R^2 = 65,38\%$ , odchyłka okrągłości  $R^2 = 71,56\%$ , błąd średnicy otworu  $R^2 = 64,45\%$ . Dla stopu aluminium PA6: odchyłka walcowości  $R^2 = 78,88\%$ , odchyłka prostoliniowości  $R^2 = 72,13\%$ , odchyłka okrągłości  $R^2 = 81,10\%$ , błąd średnicy otworu  $R^2 = 87,63\%$ . Dla mosiądzu MO58: odchyłka walcowości  $R^2 = 70,11\%$ , odchyłka prostoliniowości  $R^2 = 80,36\%$ , odchyłka okrągłości  $R^2 = 68,18\%$ , błąd średnicy otworu  $R^2 = 74,27\%$ . Dla Inconelu 718: odchyłka walcowości  $R^2 = 70,81\%$ , odchyłka prostoliniowości  $R^2 = 72,39\%$ , odchyłka okrągłości  $R^2 = 83,50\%$ , błąd średnicy otworu  $R^2 = 88,47\%$ .
4. Zbudowane modele matematyczne są istotne ze względu na to, że wartości p są mniejsze niż 0,05.
5. Wysokie wartości współczynnika determinacji, ukazuje dobre dopasowanie przewidywanych wartości z eksperymentalnymi wynikami.
6. Wykresy reszt wskazują, że założenie rozkładu normalności jest spełnione ze względu na małą odległość punktów umieszczonych względem linii.
7. Układ kinematyczny ma kluczowe znaczenie w ocenie następujących parametrów: dla stali C45 w błędzie średnicy 58,62%, dla stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT w odchyłce okrągłości 43,42%, dla stopu mosiądzu MO58 w odchyłce prostoliniowości 60,92% oraz w błędzie średnicy 37,05%, dla Inconelu 718 w odchyłce walcowości 65,37%.
8. Wartości eksperymentalne z przewidywanymi dla większości wyników różnią się tylko o  $0 \pm 2 \mu\text{m}$ .

9. Wybór układu kinematycznego zależy od obrabianego materiału. W stali C45 nie ma jednoznacznego wyboru. Dla stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT, stosując układ kinematyczny pierwszy, uzyskano najmniejsze wartości parametrów wyjściowych ( $CYL_t$ ,  $STR_t$ ,  $RON_t$ ,  $DE$ ). Dla stopu aluminium PA6, stosując drugi układ kinematyczny, uzyskano 3 z 4 parametrów wyjściowych ( $STR_t$ ,  $RON_t$ ,  $DE$ ) na najmniejszych wartościach. Dla stopu mosiądzu MO58 układ kinematyczny trzeci był najkorzystniejszy, gdyż 2 z 4 parametrów wyjściowych ( $CYL_t$ ,  $STR_t$ ) uzyskano najmniejsze wartości. Dla Inconelu 718 również układ kinematyczny trzeci był najlepszy ze względu na to, że 3 z 4 parametrów badanych ( $CYL_t$ ,  $STR_t$ ,  $DE$ ) osiągnęły najmniejsze wartości.

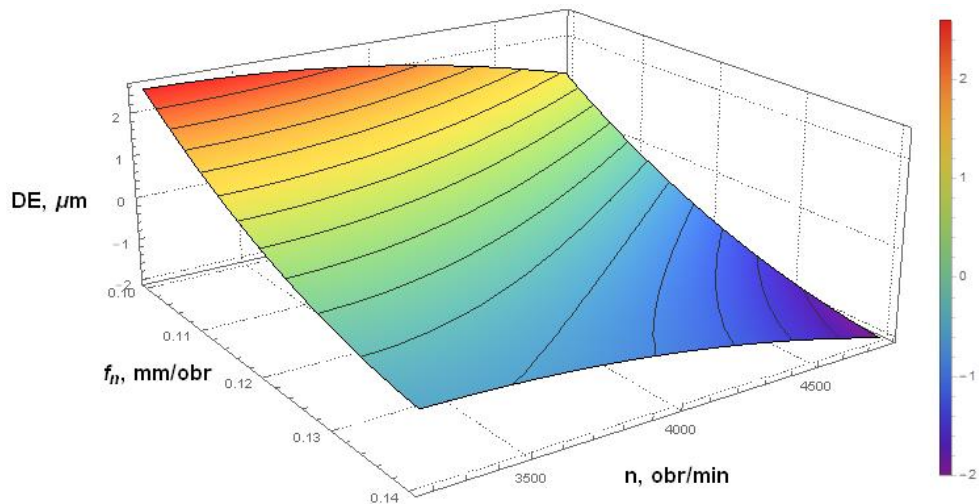
### 5.1.3. Badania symulacyjne wybranych modeli

W tym podrozdziale przedstawiono badania symulacyjne zbudowanych modeli do przewidywania wartości wyjściowych. Analizując wyniki przeprowadzonych badań stwierdzono, że układ kinematyczny miał największy wpływ w następujących wzorach (43), (46), (53), (55) oraz (56), dlatego też poniżej przedstawiono symulację tych wzorów.



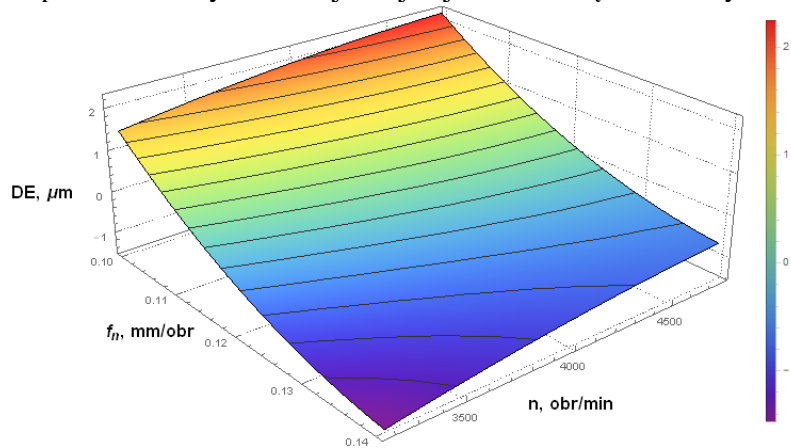
Rys. 62. Wpływ parametrów technologicznych w pierwszej kinematyce na błąd średnicy otworu w stali C45 na podstawie równania (43)

Analizując rys. 62 dla pierwszego układu kinematycznego zauważono, że liniowe zwiększanie posuwu na obrót przy jednoczesnym zwiększaniu prędkości obrotowej wrzeciona pozwala na uzyskanie najmniejszej wartości błędu średnicy otworu.



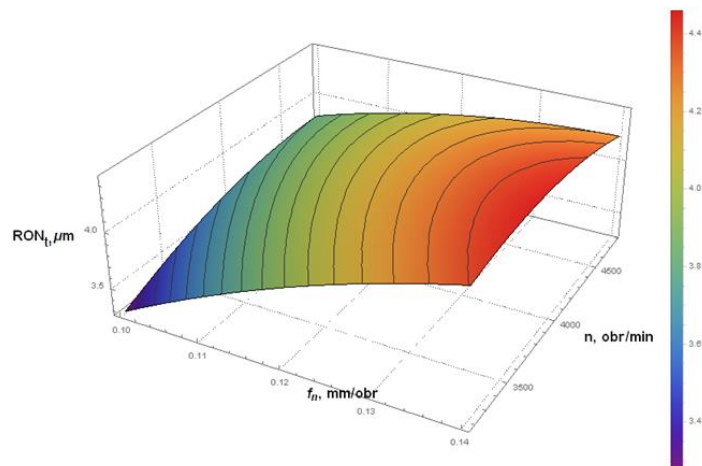
Rys. 63. Wpływ parametrów technologicznych w drugiej kinematyce na błąd średnicy otworu w stali C45 na podstawie równania (43)

Analizując rys. 63 dla drugiego układu kinematycznego stwierdzono, że liniowe zmniejszanie posuwu na obrót przy jednoczesnym zwiększaniu prędkości obrotowej wrzeciona pozwala na uzyskanie najmniejszej wartości błędu średnicy otworu.



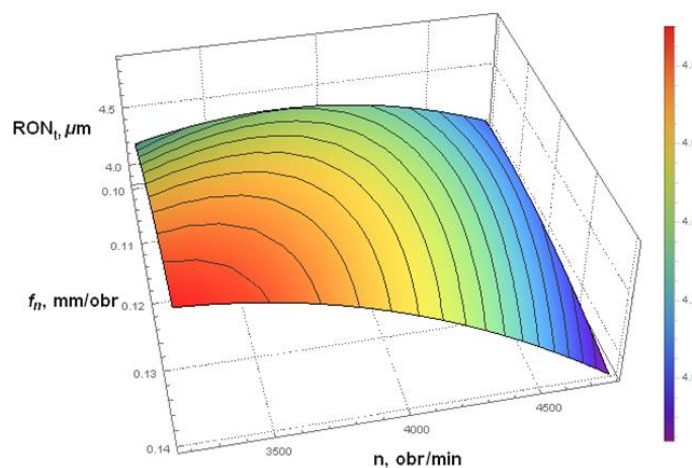
Rys. 64. Wpływ parametrów technologicznych w trzeciej kinematyce na błąd średnicy otworu w stali C45 na podstawie równania (43)

Analizując rys. 64 dla trzeciego układu drugiego stwierdzono, że zastosowanie stałej wartości posuwu na obrót wynoszącego 0,115 mm/obr niezależnie od zastosowanej prędkości obrotowej wrzeciona pozwala na uzyskanie najmniejszej wartości błędu średnicy otworu.



Rys. 65. Wpływ parametrów technologicznych w pierwszej kinematyce na odchyłkę okrągłości otworu w stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT na podstawie równania (46)

Analizując rys. 65 dla pierwszego układu kinematycznego zauważono, że stosując najmniejszy posuw na obrót 0,11 mm/obr oraz najmniejszą prędkość obrotową wrzeciona 3183 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki okrągłości otworu. W tym przypadku zmiana prędkości obrotowej wrzeciona nie wpływa drastycznie na zmianę wartości odchyłki okrągłości. Jednakże wzrost posuwu na obrót gwałtownie zmienia wartość wyżej wymienionego parametru.

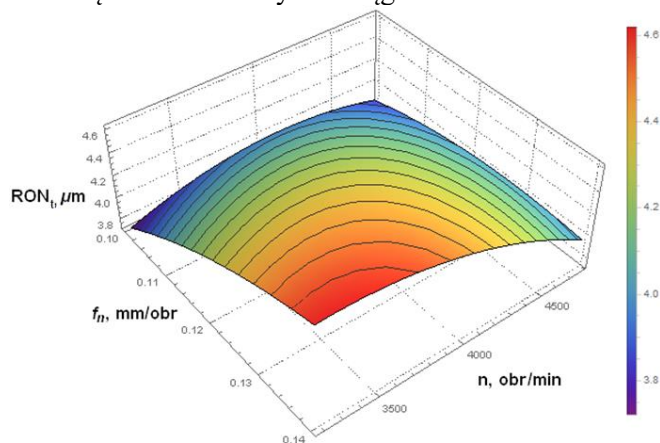


Rys. 66. Wpływ parametrów technologicznych w drugiej kinematyce na odchyłkę okrągłości otworu w stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT na podstawie równania (46)

Analizując rys. 66 dla drugiego układu kinematycznego stwierdzono, że największa prędkość obrotowa wrzeciona 4775 obr/min pozwala uzyskać

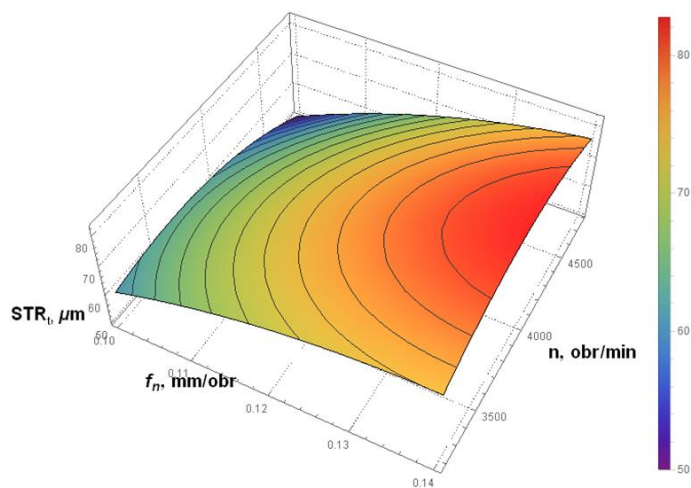


najmniejszą wartość odchyłki okrągłości. Niezależnie od zastosowanego posuwu na obrót. W tym przypadku zwiększenie prędkości obrotowej wrzeciona wpływa drastycznie na zmianę wartości odchyłki okrągłości.



Rys. 67. Wpływ parametrów technologicznych w trzeciej kinematyce na odchyłkę okrągłości otworu w stali ulepszonej cieplnie 40HM+QTn na podstawie równania (46)

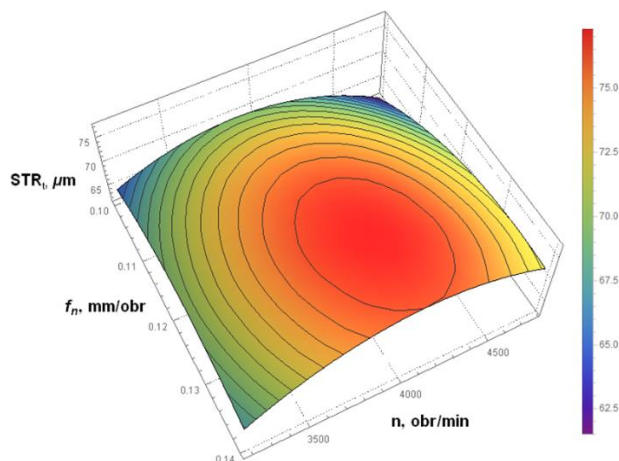
Analizując rys. 67 dla trzeciego układu kinematycznego zauważono, że stosując najmniejszy posuw na obrót 0,11 mm/obr oraz małą prędkość obrotową wrzeciona 3183 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki okrągłości otworu.



Rys. 68. Wpływ parametrów technologicznych w pierwszej kinematyce na odchyłkę prostoliniowości otworu w mosiądzu MO58 na podstawie równania (53)

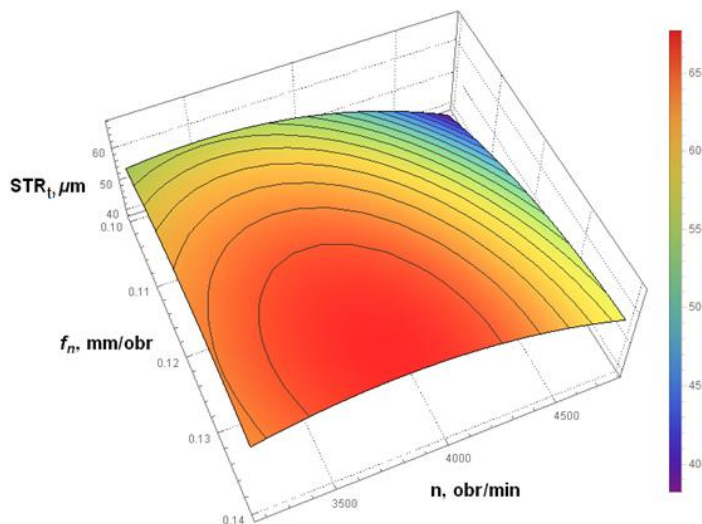
Analizując rys. 68 dla pierwszego układu kinematycznego stwierdzono, że wierząc z najmniejszym posuwem na obrót 0,1 mm/obr oraz z największą prędkością

obrotową wrzeciona 4775 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki prostoliniowości otworu.



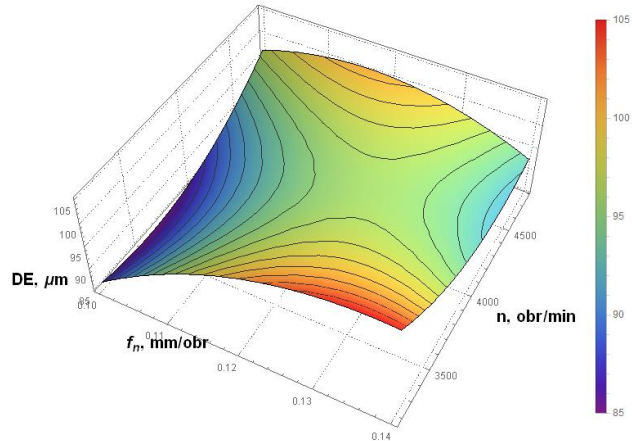
Rys. 69. Wpływ parametrów technologicznych w drugiej kinematyce na odchyłkę prostoliniowości otworu w mosiądzu MO58 na podstawie równania (53)

Analizując rys. 69 dla drugiego układu kinematycznego stwierdzono, że stosując najmniejszy posuw na obrót 0,1 mm/obr oraz największą wartość prędkości obrotowej wrzeciona 4775 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki prostoliniowości otworu. W tym przypadku istnieje inna możliwość uzyskania małej wartości odchyłki prostoliniowości dla wartości posuwu na obrót 0,1 mm/obr oraz małej wartości prędkości obrotowej wrzeciona 3183 obr/min.



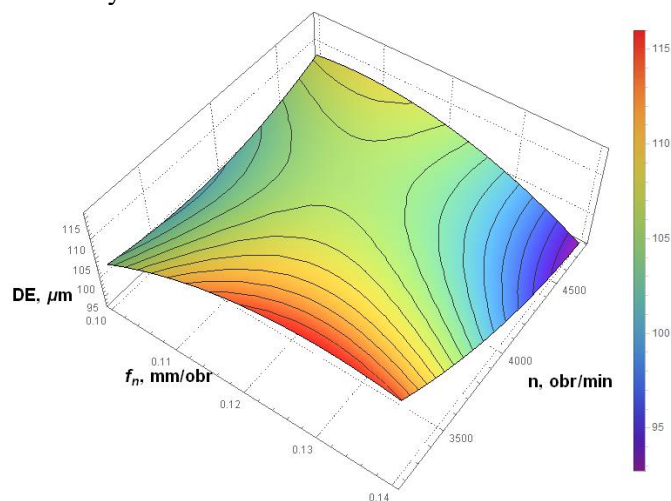
Rys. 70. Wpływ parametrów technologicznych w trzeciej kinematyce na odchyłkę prostoliniowości otworu w mosiądzu MO58 na podstawie równania (53)

Analizując rys. 70 dla trzeciego układu kinematycznego zauważono, że stosując najmniejszy posuw na obrót 0,1 mm/obr oraz największą wartość prędkości obrotowej wrzeciona 4775 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki prostoliniowości otworu. W tym przypadku zmiana prędkości obrotowej wrzeciona oraz posuwu na obrót drastycznie pogarsza badany parametr.



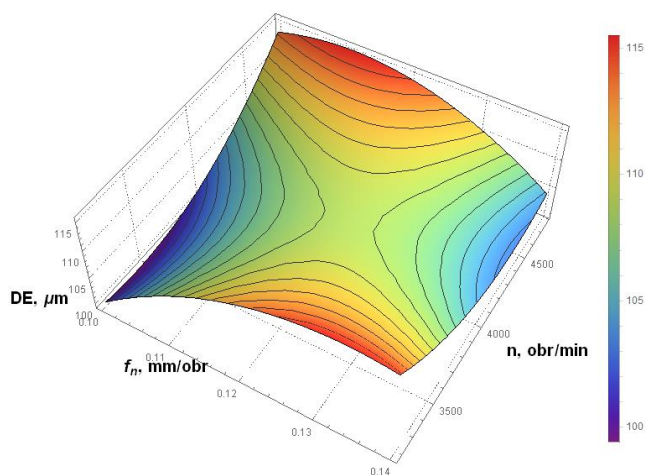
Rys. 71. Wpływ parametrów technologicznych w pierwszej kinematyce na błąd średnicy otworu w mosiądzu MO58 na podstawie równania (55)

Analizując rys. 71 dla pierwszego układu kinematycznego stwierdzono, że stosując najmniejszy posuw na obrót 0,1 mm/obr oraz wartość prędkości obrotowej wrzeciona z przedziału od 3183 obr/min do 4000 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość błędu średnicy otworu.



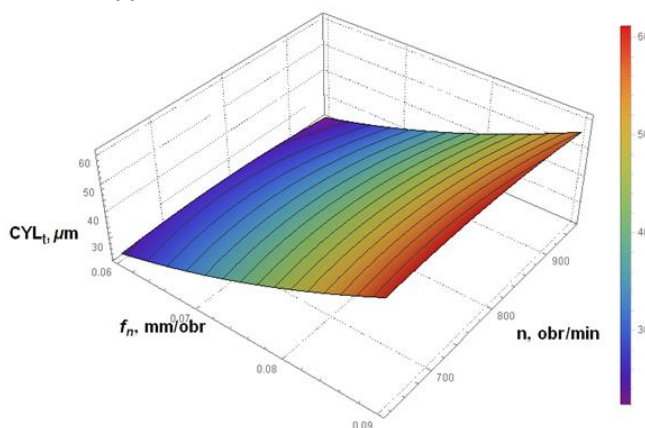
Rys. 72. Wpływ parametrów technologicznych w drugiej kinematyce na błąd średnicy otworu w mosiądzu MO58 na podstawie równania (55)

Analizując rys. 72 dla drugiego układu kinematycznego zauważono, że stosując największy posuw na obrót 0,14 mm/obr oraz największa wartość prędkości obrotowej wrzeciona 4775 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość błędu średnicy otworu.



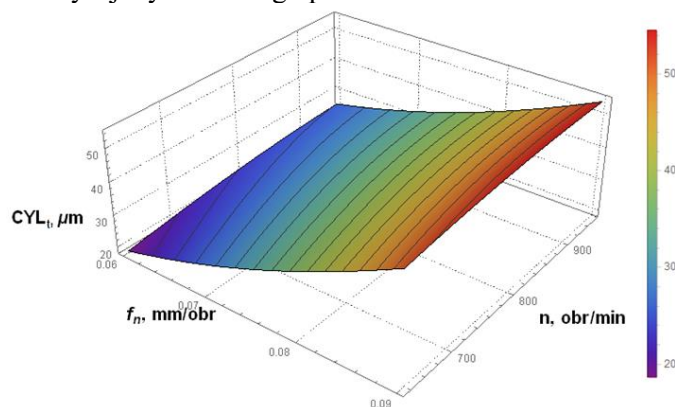
Rys. 73. Wpływ parametrów technologicznych w trzeciej kinematyce na błąd średnicy otworu w mosiądzu MO58 na podstawie równania (55)

Analizując rys. 73 dla trzeciego układu kinematycznego stwierdzono, że stosując najmniejszy posuw na obrót 0,1 mm/obr oraz wartość prędkości obrotowej wrzeciona od 3183 obr/min do 4000 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość błędu średnicy otworu. W tym przypadku widać, że mniejszą wartość możemy uzyskać, stosując jeszcze drugi przedział: posuw na obrót 0,14 mm/obr oraz prędkość obrotową wrzeciona 4400 obr/min.



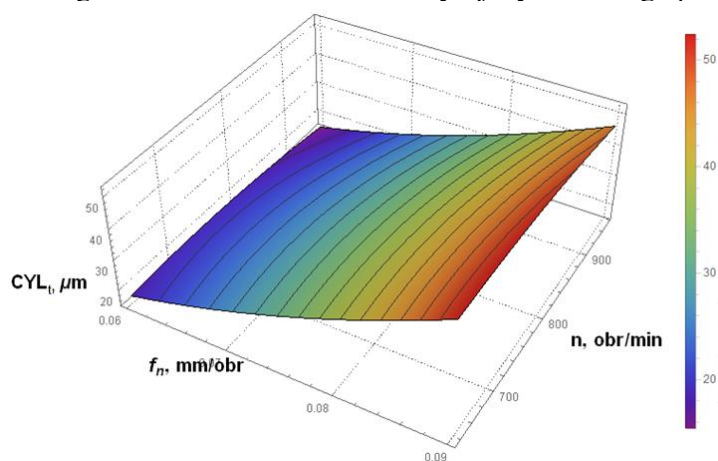
Rys. 74. Wpływ parametrów technologicznych w pierwszej kinematyce na odchyłkę walcowości otworu w Inconelu 718 na podstawie równania (56)

Analizując rys. 74 dla pierwszego układu kinematycznego stwierdzono, że stosując najmniejszy posuw na obrót 0,06 mm/obr oraz niezależna wartość prędkości obrotowej wrzeciona, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki walcowości otworu. W tym przypadku zmiana prędkości obrotowej wrzeciona nie wpływa na zmianę wartości odchyłki walcowości. Jednakże wzrost posuwu na obrót gwałtownie zmienia wartość wyżej wymienionego parametru.



Rys. 75. Wpływ parametrów technologicznych w drugiej kinematyce na odchyłkę walcowości otworu w Inconelu 718 na podstawie równania (56)

Analizując rys. 75 dla drugiego układu kinematycznego zauważono, że stosując najmniejszy posuw na obrót 0,06 mm/obr oraz najmniejsza wartość prędkości obrotowej wrzeciona 637 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki walcowości otworu. W tym przypadku zmiana prędkości obrotowej wrzeciona nie wpływa drastycznie na zmianę wartości odchyłki walcowości. Jednakże wzrost posuwu na obrót gwałtownie zmienia wartość wyżej wymienionego parametru.



Rys. 76. Wpływ parametrów technologicznych w trzeciej kinematyce na odchyłkę walcowości otworu w Inconelu 718 na podstawie równania (56)

Analizując rys. 76 dla trzeciego układu kinematycznego stwierdzono, że stosując najmniejszy posuw na obrót 0,06 mm/obr oraz największą wartość prędkości obrotowej wrzeciona 955 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość odchyłki walcowości otworu. W tym przypadku zmiana prędkości obrotowej wrzeciona nie wpływa drastycznie na zmianę wartości odchyłki walcowości. Jednakże wzrost posuwu na obrót gwałtownie zwiększa wartość wyżej wymienionego parametru.

#### **Wnioski:**

1. Badania symulacyjne poszczególnych parametrów wykazały różne przedziały odpowiednich zakresów parametrów technologicznych w stosunku do układu kinematycznego.
2. Dla błędu średnicy otworu w stali C45 odpowiednie zakresy parametrów technologicznych były następujące: dla KIN I  $n \in < 3183; 4775 >$ ,  $f_n \in < 0,12; 0,14 >$ , dla KIN II  $n \in < 3183; 4775 >$ ,  $f_n \in < 0,125; 0,14 >$  oraz dla KIN III  $n \in < 3183; 4775 >$ ,  $f_n \in < 0,11; 0,12 >$ .
3. Dla odchyłki okrągłości otworu w stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT odpowiednie zakresy parametrów technologicznych były następujące: dla KIN I  $n = 3183$ ,  $f_n = 0,1$ , dla KIN II  $n = 4775$ ,  $f_n = 0,1$  lub  $f_n = 0,14$  oraz dla KIN III  $n = 3183$  lub  $n = 4775$ ,  $f_n \in < 0,1; 0,105 >$ .
4. Dla odchyłki prostoliniowości otworu w stopie mosiądzu MO58 odpowiednie zakresy parametrów technologicznych były następujące: dla KIN I  $n = 4775$ ,  $f_n = 0,1$ , dla KIN II  $n = 3183$  lub  $4775$ ,  $f_n = 0,1$  oraz dla KIN III  $n = 4775$ ,  $f_n = 0,1$ .
5. Dla błędu średnicy otworu w mosiądzu MO58 odpowiednie zakresy parametrów technologicznych były następujące: dla KIN I  $n \in < 3183; 4000 >$ ,  $f_n = 0,1$ , dla KIN II  $n = 4775$ ,  $f_n = 0,14$  oraz dla KIN III  $n \in < 3183; 4000 >$ ,  $f_n = 0,1$ .
6. Dla odchyłki walcowości otworu w Inconelu 718 odpowiednie zakresy parametrów technologicznych były następujące: dla KIN I  $n \in < 637; 955 >$ ,  $f_n = 0,06$ , dla KIN II  $n = 637$ ,  $f_n = 0,06$  oraz dla KIN III  $n = 955$ ,  $f_n = 0,06$ .

## **5.2. Analiza chropowatości powierzchni wykonanych otworów**

Kolejnym celem przeprowadzonych badań była analiza chropowatości powierzchni otworów wykonanych w różnych układach kinematycznych procesu wiercenia. W tym podrozdziale przedstawiono analizę wybranych parametrów chropowatości powierzchni.

### **5.2.1 Analiza pomiarów geometrii wyrobów**

Wykonane otwory zostały przebadane za pomocą profilometru stykowego Form Talysurf PGI 1230 firmy Taylor Hobson. Wykonano na nim pomiary: parametru amplitudowego średniej arytmetycznej bezwzględnych wartości rzędnych wewnątrz odcinka elementarnego ( $R_a$ ), parametru pionowego a mianowicie sumy wysokości

najwyższego wzniesienia profilu i największej głębokości wgłębienia profilu wewnątrz odcinka pomiarowego (Rt) oraz sumę wysokości najwyższego wzniesienia profilu i głębokości najniższego wgłębienia profilu wewnątrz odcinka elementarnego (Rz).

Parametry Ra oraz Rz liczone były na odcinku elementarnym 0,8 mm. Natomiast Rt na odcinku pomiarowym 5 mm. Zastosowano filtrację 0,8 Gaussa. Pomiar dokonano końcówką diamentową o promieniu zaokrąglenia 2  $\mu\text{m}$  z prędkością 0,5 mm/s. Krok próbkowania wynosił 0,125  $\mu\text{m}$ .

Aby umieścić wszystkie dane wybrano tablicę ortogonalną L27. Kolorem zielonym określono wartości dla rozstępu 30%. Kolorem żółtym oznaczono przedział od 30 – 70 %. Natomiast kolorem czerwonym powyżej 70%. Rozstęp liczony jest jako różnica granicznych wartości.

Tabela 45. Wyniki chropowatości powierzchni otworu w stali C45 oraz stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT

Kodowanie	Rz, $\mu\text{m}$	Rt, $\mu\text{m}$	Ra, $\mu\text{m}$	Kodowanie	Rz, $\mu\text{m}$	Rt, $\mu\text{m}$	Ra, $\mu\text{m}$
TiI1S	2,167	3,316	0,334	TiI1Q	2,598	2,222	0,506
TiII1S	2,416	4,328	0,374	TiII1Q	2,27	3,698	0,452
TiIII1S	2,358	3,048	0,422	TiIII1Q	2,375	3,806	0,447
TiI2S	2,918	4,882	0,43	TiI2Q	2,685	3,835	0,485
TiII2S	2,846	3,81	0,45	TiII2Q	2,297	4,138	0,412
TiIII2S	3,435	4,99	0,583	TiIII2Q	2,415	4,336	0,474
TiI3S	2,393	5,048	0,347	TiI3Q	2,306	3,711	0,462
TiII3S	1,823	2,858	0,338	TiII3Q	2,359	3,822	0,437
TiIII3S	2,316	4,529	0,422	TiIII3Q	2,505	4,254	0,438
TiI4S	3,834	4,949	0,356	TiI4Q	2,765	3,594	0,527
TiII4S	3,717	8,392	0,491	TiII4Q	2,602	4,38	0,402
TiIII4S	3,441	6,296	0,54	TiIII4Q	2,572	4,003	0,466
TiI5S	4,064	5,988	0,436	TiI5Q	2,897	3,987	0,532
TiII5S	3,764	6,139	0,458	TiII5Q	2,579	4,254	0,455
TiIII5S	3,513	6,168	0,514	TiIII5Q	2,859	4,574	0,453
TiI6S	2,894	5,933	0,35	TiI6Q	2,734	4,054	0,49
TiII6S	2,82	4,969	0,429	TiII6Q	2,736	4,107	0,417
TiIII6S	2,605	5,538	0,402	TiIII6Q	2,67	3,945	0,429
TiI7S	2,846	3,949	0,414	TiI7Q	2,571	3,924	0,405
TiII7S	3,633	8,808	0,391	TiII7Q	2,213	4,215	0,391
TiIII7S	3,889	5,842	0,594	TiIII7Q	2,556	4,209	0,41
TiI8S	3,916	4,078	0,369	TiI8Q	2,47	4,277	0,478

Kodowanie	Rz, $\mu\text{m}$	Rt, $\mu\text{m}$	Ra, $\mu\text{m}$	Kodowanie	Rz, $\mu\text{m}$	Rt, $\mu\text{m}$	Ra, $\mu\text{m}$
TiII8S	3,819	5,857	0,481	TiII8Q	2,391	4,116	0,381
TiIII8S	3,489	5,166	0,495	TiIII8Q	2,447	4,235	0,456
TiI9S	2,701	3,314	0,274	TiI9Q	2,344	4,152	0,429
TiII9S	2,124	3,002	0,354	TiII9Q	2,175	4,371	0,377
TiIII9S	2,303	2,906	0,377	TiIII9Q	2,194	4,006	0,372

Tabela 46. Wyniki chropowatości powierzchni otworu w stopie aluminium PA6 oraz w stopie mosiądzu MO58

Kodowanie	Rz, $\mu\text{m}$	Rt, $\mu\text{m}$	Ra, $\mu\text{m}$	Kodowanie	Rz, $\mu\text{m}$	Rt, $\mu\text{m}$	Ra, $\mu\text{m}$
TiI1A	23,523	38,314	5,479	TiI1M	3,88	11,894	0,474
TiII1A	25,445	33,726	5,291	TiII1M	4,683	13,218	0,59
TiIII1A	30,828	43,652	6,199	TiIII1M	6,922	16,953	0,815
TiI2A	27,802	36,992	5,52	TiI2M	5,262	19,382	0,62
TiII2A	24,773	34,878	4,658	TiII2M	6,95	35,818	0,767
TiIII2A	28,626	39,026	5,528	TiIII2M	8,622	30,988	0,9
TiI3A	21,675	25,554	3,726	TiI3M	4,328	17,363	0,633
TiII3A	19,927	29,746	3,959	TiII3M	6,095	25,824	0,797
TiIII3A	20,702	28,488	4,364	TiIII3M	7,465	25,508	0,855
TiI4A	22,625	34,135	5,202	TiI4M	4,029	8,759	0,414
TiII4A	29,388	32,59	5,285	TiII4M	2,756	5,851	0,34
TiIII4A	24,607	40,6	5,252	TiIII4M	6,746	22,877	0,694
TiI5A	23,477	31,389	4,87	TiI5M	5,956	12,838	0,642
TiII5A	26,356	30,943	4,315	TiII5M	5,067	14,36	0,556
TiIII5A	25,842	39,52	5,579	TiIII5M	7,943	22,625	0,951
TiI6A	19,096	28,126	3,263	TiI6M	5,345	12,556	0,98
TiII6A	18,606	27,91	3,832	TiII6M	6,246	22,273	0,639
TiIII6A	18,13	23,137	3,629	TiIII6M	6,645	26,997	0,639
TiI7A	20,329	39,492	4,891	TiI7M	4,291	16,955	0,401
TiII7A	22,908	34,79	5,072	TiII7M	1,819	7,919	0,192
TiIII7A	28,34	45,196	5,659	TiIII7M	9,852	26,534	0,721
TiI8A	23,987	42,561	4,278	TiI8M	7,112	28,238	0,981
TiII8A	22,11	41,657	4,205	TiII8M	6,524	16,498	0,656
TiIII8A	24,677	41	4,621	TiIII8M	8,876	29,569	0,807
TiI9A	18,507	30,985	3,18	TiI9M	4,739	16,818	0,932
TiII9A	14,519	26,716	3,492	TiII9M	5,381	17,045	0,724



Kodowanie	Rz, $\mu\text{m}$	Rt, $\mu\text{m}$	Ra, $\mu\text{m}$	Kodowanie	Rz, $\mu\text{m}$	Rt, $\mu\text{m}$	Ra, $\mu\text{m}$
TiIII9A	15,705	26,603	3,507	TiIII9M	8,079	22,6	1,04

Tabela 47. Wyniki chropowatości powierzchni otworu w Inconelu 718

Kodowanie	Rz, $\mu\text{m}$	Rt, $\mu\text{m}$	Ra, $\mu\text{m}$
TiII1	6,796	9,794	1,272
TiIII1	4,766	6,297	0,727
TiIII1I	5,609	8,383	0,837
TiI2I	6,047	9,609	1,282
TiII2I	5,917	6,923	1,061
TiIII2I	5,719	8,586	0,976
TiI3I	5,197	7,949	1,052
TiII3I	5,579	6,937	0,996
TiIII3I	5,744	8,078	1,012
TiI4I	8,462	10,978	1,314
TiII4I	7,53	10,002	1,179
TiIII4I	8,169	11,318	1,217
TiI5I	7,424	11,49	1,317
TiII5I	7,843	11,01	1,302
TiIII5I	7,42	11,282	1,183
TiI6I	6,74	10,131	1,182
TiII6I	7,236	9,864	1,311
TiIII6I	7,36	10,642	1,224
TiI7I	8,532	12,483	1,53
TiII7I	9,654	11,23	1,544
TiIII7I	8,039	11,63	1,452
TiI8I	7,682	10,852	1,373
TiII8I	8,88	12,629	1,628
TiIII8I	8,564	12,756	1,375
TiI9I	6,631	9,677	1,092
TiII9I	8,263	10,16	1,375
TiIII9I	7,567	10,963	1,23

Z tabel 45-47 wynika, że dla stali C45 najmniejsze wartości chropowatości powierzchni uzyskano dla: TiII5 oraz TiIII9S. W tych dwóch kombinacjach wszystkie wybrane trzy parametry opisujące chropowatość powierzchni przyjmowały najniższe wartości znajdujące się w 30% wszystkich badanych próbek.

Dla stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT nie uzyskano żadnego zestawu parametrów poniżej tzw. zielonej strefy. Jednakże widać, że najbardziej odpowiednim zestawem parametrów był zestaw TiIII9Q ze względu na uzyskanie 2 z 3 parametrów opisujących chropowatość powierzchni na najmniejszym poziomie oraz przyjmował on pozostały parametr na najniższym poziomie względem pozostałych wyników. W stopie aluminium aż pięć zestawów parametrów uzyskało wartości parametrów chropowatości powierzchni w tzw. zielonej strefie (TiI6A, TiII6A, TiIII6A, TiII9A oraz TiIII9A). Dla stopu mosiądzu MO58 najmniejsze wartości uzyskano dla następujących zestawów: TiI4M, TiII4M oraz TiIII7M. W Inconelu 718 najbardziej korzystnymi zestawami w stosunku do wybranych parametrów chropowatości powierzchni okazały się TiIII1 oraz TiIII3I.

### 5.2.2. Analiza statystyczna ANOVA

Tak jak omówiono w podrozdziale 5.1.2. w analizie statystycznej stosowano model regresji powierzchni ze względu na jej hybrydowość. Zbadano wpływ parametrów wejściowych ( $n$ ,  $f_n$ , KIN) na parametry wyjściowe ( $R_z$ ,  $R_t$ ,  $R_a$ ). Poniżej w tabelach przedstawiono wyniki tych analiz.

Tabela 48. Analiza statystyczna ANOVA dla parametru  $R_z$  otworu wywierconego w stali C45

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Model	10,4490	9	1,1610	15,3232	0,0000	
Wyraz wolny	4,3942	1	4,3942	57,9965	0,0000	
$n$	4,2236	1	4,2236	55,7442	0,0000	33,44
$n^2$	3,2431	1	3,2431	42,8037	0,0000	25,68
$f_n$	2,1242	1	2,1242	28,0356	0,0001	16,82
$f_n^2$	1,8194	1	1,8194	24,0130	0,0001	14,41
KIN	0,0991	1	0,0991	1,3086	0,2685	0,78
KIN <sup>2</sup>	0,0032	1	0,0032	0,0425	0,8391	0,03
$n \cdot f_n$	0,6679	1	0,6679	8,8149	0,0086	5,29
$n \cdot \text{KIN}$	0,4187	1	0,4187	5,5260	0,0311	3,32
$f_n \cdot \text{KIN}$	0,0307	1	0,0307	0,4052	0,5329	0,24
Błąd	1,2880	17	0,0758			10,97
Łącznie	11,7370	26	63,42	33,99	2,59	100,00

$R = 0,9435$ ;  $R^2 = 0,8903$

Z tabeli 48 wynika, że prędkość obrotowa wrzeczona wpłynęła w 63,42% na parametr  $R_t$  otworu. Reszta przypadła posuwowi na obrót 33,99% oraz układowi kinematycznemu 2,59%.

Tabela 49. Analiza statystyczna ANOVA dla parametru Rt otworu wywierconego w stali C45

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Model	58,5579	9	6,5064	58,6808	0,0000	
Wyraz wolny	21,2159	1	21,2159	191,3439	0,0000	
n	5,1975	1	5,1975	46,8757	0,0000	7,22
n <sup>2</sup>	0,9559	1	0,9559	8,6214	0,0092	1,33
f <sub>n</sub>	21,3710	1	21,3710	192,7428	0,0000	29,70
f <sub>n</sub> <sup>2</sup>	15,5880	1	15,5880	140,5868	0,0000	21,66
KIN	0,0525	1	0,0525	0,4735	0,5007	0,07
KIN <sup>2</sup>	0,0944	1	0,0944	0,8516	0,3690	0,13
n·f <sub>n</sub>	10,3045	1	10,3045	92,9354	0,0000	14,32
n·KIN	11,8626	1	11,8626	106,9874	0,0000	16,49
f <sub>n</sub> ·KIN	6,5307	1	6,5307	58,8995	0,0000	9,08
Błąd	1,8849	17	0,1109			3,12
Łącznie	60,4428	26				100,00

R = 0,9843; R<sup>2</sup> = 0,9688

Z tabeli 49 wynika, że posuw na obrót zdominował pozostałe parametry wejściowe wpłynął on w 63,07% na parametr Rt. Kolejnym wpływowym parametrem wejściowym była prędkość obrotowa wrzeczona 23,95%, reszta przypadła układowi kinematycznemu 12,99%.

Tabela 50. Analiza statystyczna ANOVA dla parametru Ra otworu wywierconego w stali C45

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Model	0,1318	9	0,0146	9,1953	0,0001	
Wyraz wolny	0,0283	1	0,0283	17,7655	0,0006	
n	0,0410	1	0,0410	25,7642	0,0001	27,57
n <sup>2</sup>	0,0258	1	0,0258	16,1998	0,0009	17,35
f <sub>n</sub>	0,0091	1	0,0091	5,7011	0,0288	6,12
f <sub>n</sub> <sup>2</sup>	0,0047	1	0,0047	2,9420	0,1045	3,16
KIN	0,0016	1	0,0016	1,0126	0,3284	1,08
KIN <sup>2</sup>	0,0541	1	0,0541	33,9536	0,0000	36,38
n·f <sub>n</sub>	0,0115	1	0,0115	7,2022	0,0157	7,73

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
n·KIN	0,0003	1	0,0003	0,1763	0,6798	0,20
f <sub>n</sub> ·KIN	0,0006	1	0,0006	0,3910	0,5401	0,40
Błąd	0,0271	17	0,0016			17,05
Łącznie	0,1589	26				100,00

$R = 0,9108$ ;  $R^2 = 0,8295$

Z tabeli 50 wynika, że prędkość obrotowa wrzeczona wpłynęła w 48,89% na parametr Ra. Układ kinematyczny wpłynął w 37,76%, natomiast posuw na obrót 13,35%.

Tabela 51. Analiza statystyczna ANOVA dla parametru Rz otworu wywierconego w stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Model	0,8992	9	0,0999	10,2015	0,0000	
Wyraz wolny	0,3960	1	0,3960	40,4345	0,0000	
n	0,0679	1	0,0679	6,9369	0,0174	4,95
n <sup>2</sup>	0,0434	1	0,0434	4,4315	0,0505	3,16
f <sub>n</sub>	0,6204	1	0,6204	63,3516	0,0000	45,22
f <sub>n</sub> <sup>2</sup>	0,5926	1	0,5926	60,5106	0,0000	43,20
KIN	0,0040	1	0,0040	0,4097	0,5307	0,29
KIN <sup>2</sup>	0,0004	1	0,0004	0,0407	0,8426	0,03
n·f <sub>n</sub>	0,0256	1	0,0256	2,6115	0,1245	1,87
n·KIN	0,0169	1	0,0169	1,7225	0,2068	1,23
f <sub>n</sub> ·KIN	0,0007	1	0,0007	0,0754	0,7869	0,05
Błąd	0,1665	17	0,0098			15,62
Łącznie	1,0657	26				100,00

$R = 0,9186$ ;  $R^2 = 0,8438$

Z tabeli 51 wynika, że posuw na obrót zdominował pozostałe parametry wejściowe. Wpłynął on w 89,38% na parametr Rz. Reszta przypadła prędkości obrotowej wrzeczona 9,66% oraz układowi kinematycznemu 0,96%.

Tabela 52. Analiza statystyczna ANOVA dla parametru Rt otworu wywierconego w stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Model	3,6093	9	0,4010	5,9780	0,0008	
Wyraz wolny	0,2835	1	0,2835	4,2264	0,0555	
n	0,6583	1	0,6583	9,8135	0,0061	21,84

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
$n^2$	0,4486	1	0,4486	6,6866	0,0192	14,89
$f_n$	0,1893	1	0,1893	2,8221	0,1113	6,28
$f_n^2$	0,1129	1	0,1129	1,6827	0,2119	3,75
KIN	0,4155	1	0,4155	6,1936	0,0235	13,79
KIN <sup>2</sup>	0,3510	1	0,3510	5,2316	0,0353	11,65
$n \cdot f_n$	0,2945	1	0,2945	4,3904	0,0514	9,77
$n \cdot \text{KIN}$	0,2806	1	0,2806	4,1834	0,0566	9,31
$f_n \cdot \text{KIN}$	0,2629	1	0,2629	3,9186	0,0642	8,72
Błąd	1,1405	17	0,0671			24,01
Łącznie	4,7498	26				100,00

$R = 0,8717$ ;  $R^2 = 0,7599$

Z tabeli 52 wynika, że prędkość obrotowa wrzeczona osiągnęła wpływ wynoszący 46,27% na parametr Rt. Układ kinematyczny wpłynął w 34,45%, natomiast reszta przypadła posuwowi na obrót 19,28%

Tabela 53. Analiza statystyczna ANOVA dla parametru Ra otworu wywierconego w stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Model	0,0389	9	0,0043	7,4301	0,0002	
Wyraz wolny	0,0038	1	0,0038	6,5581	0,0203	
n	0,0022	1	0,0022	3,7767	0,0687	13,58
$n^2$	0,0029	1	0,0029	5,0366	0,0384	17,90
$f_n$	0,0049	1	0,0049	8,5173	0,0096	30,25
$f_n^2$	0,0052	1	0,0052	8,9520	0,0082	32,10
KIN	0,0005	1	0,0005	0,8483	0,3699	3,09
KIN <sup>2</sup>	0,0002	1	0,0002	0,3695	0,5513	1,23
$n \cdot f_n$	0,0001	1	0,0001	0,2295	0,6380	0,62
$n \cdot \text{KIN}$	0,0002	1	0,0002	0,2953	0,5939	1,23
$f_n \cdot \text{KIN}$	0,0000	1	0,0000	0,0008	0,9777	0,00
Błąd	0,0099	17	0,0006			20,29
Łącznie	0,0487	26				100,00

$R = 0,8929$ ;  $R^2 = 0,7971$

Z tabeli 53 wynika, że posuw na obrót zdominował pozostałe parametry wejściowe. Uzyskał on wpływ wynoszący 62,65% na parametr Ra. Kolejnym

wpływowym parametrem wejściowym była prędkość obrotowa wrzeciona 32,41%, reszta przypadła układowi kinematycznemu 4,94%.

Tabela 54. Analiza statystyczna ANOVA dla parametru Rz otworu wywierconego w stopie aluminium PA6

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Model	389,9960	9	43,3329	12,5467	0,0000	
Wyraz wolny	27,7547	1	27,7547	8,0361	0,0114	
n	79,7159	1	79,7159	23,0810	0,0002	37,73
n <sup>2</sup>	65,5002	1	65,5002	18,9650	0,0004	31,00
f <sub>n</sub>	1,0616	1	1,0616	0,3074	0,5865	0,50
f <sub>n</sub> <sup>2</sup>	0,0648	1	0,0648	0,0188	0,8926	0,03
KIN	10,1880	1	10,1880	2,9499	0,1040	4,82
KIN <sup>2</sup>	27,2062	1	27,2062	7,8773	0,0121	12,88
n·f <sub>n</sub>	2,3888	1	2,3888	0,6916	0,4171	1,13
n·KIN	25,1459	1	25,1459	7,2808	0,0152	11,90
f <sub>n</sub> ·KIN	0,0018	1	0,0018	0,0005	0,9821	0,00
Błąd	58,7136	17	3,4537			13,08
Łącznie	448,7096	26				100,00

$R = 0,9323$ ;  $R^2 = 0,8692$

Z tabeli 54 wynika, że prędkość obrotowa wrzeciona zdominowała pozostałe parametry wejściowe. Osiągnęła ona wpływ wynoszący 75,25% na parametr Rz. Kolejnym wpływowym parametrem wejściowym był układ kinematyczny 23,65%, nieznaczny wpływ miał posuw na obrót 1,1%.

Tabela 55. Analiza statystyczna ANOVA dla parametru Rt otworu wywierconego w stopie aluminium PA6

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Model	856,9410	9	95,2157	11,4059	0,0000	
Wyraz wolny	0,4089	1	0,4089	0,0490	0,8275	
n	152,2585	1	152,2585	18,2391	0,0005	28,67
n <sup>2</sup>	131,7235	1	131,7235	15,7792	0,0010	24,81
f <sub>n</sub>	65,7530	1	65,7530	7,8766	0,0121	12,38
f <sub>n</sub> <sup>2</sup>	72,7459	1	72,7459	8,7142	0,0089	13,70
KIN	0,0133	1	0,0133	0,0016	0,9686	0,00
KIN <sup>2</sup>	98,6525	1	98,6525	11,8176	0,0031	18,58

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
$n \cdot f_n$	0,8911	1	0,8911	0,1067	0,7479	0,17
$n \cdot KIN$	6,3253	1	6,3253	0,7577	0,3962	1,19
$f_n \cdot KIN$	2,6327	1	2,6327	0,3154	0,5817	0,50
Błąd	141,9149	17	8,3479			14,21
Łącznie	998,8559	26				100,00

$R = 0,9262$ ;  $R^2 = 0,8579$

Z tabeli 55 wynika, że prędkość obrotowa wrzeciona osiągnęła największy wpływ na parametr  $R_t$  wynoszący 54,16%. Posuw na obrót wpłynął w 26,41%, reszta przypadła układowi kinematycznemu 19,42%.

Tabela 56. Analiza statystyczna ANOVA dla parametru Ra otworu wywierconego w stopie aluminium PA6

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Model	17,1637	9	1,9071	23,3909	0,0000	
Wyraz wolny	0,1882	1	0,1882	2,3083	0,1471	
$n$	0,9704	1	0,9704	11,9027	0,0031	30,20
$n^2$	0,5931	1	0,5931	7,2746	0,0153	18,46
$f_n$	0,0022	1	0,0022	0,0275	0,8702	0,07
$f_n^2$	0,0256	1	0,0256	0,3136	0,5828	0,80
KIN	0,1543	1	0,1543	1,8923	0,1868	4,80
$KIN^2$	1,2692	1	1,2692	15,5676	0,0010	39,50
$n \cdot f_n$	0,0228	1	0,0228	0,2796	0,6038	0,71
$n \cdot KIN$	0,0397	1	0,0397	0,4873	0,4946	1,24
$f_n \cdot KIN$	0,1361	1	0,1361	1,6696	0,2136	4,24
Błąd	1,3860	17	0,0815			7,47
Łącznie	18,5497	26				100,00

$R = 0,9619$ ;  $R^2 = 0,9253$

Z tabeli 56 wynika, że prędkość obrotowa wrzeciona 49,63% wraz z układem kinematycznym 47,03% zdominowały wpływ na parametr Ra. Reszta przypadła posuwowi na obrót 3,34%.

Tabela 57. Analiza statystyczna ANOVA dla parametru Rz otworu wywierconego w stopie mosiądzu MO58

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Model	80,9699	9	8,9967	13,6411	0,0000	
Wyraz wolny	0,1183	1	0,1183	0,1793	0,6773	

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
n	9,4218	1	9,4218	14,2857	0,0015	11,01
n <sup>2</sup>	10,6375	1	10,6375	16,1291	0,0009	12,43
f <sub>n</sub>	1,5397	1	1,5397	2,3346	0,1449	1,80
f <sub>n</sub> <sup>2</sup>	1,6412	1	1,6412	2,4884	0,1331	1,92
KIN	0,0866	1	0,0866	0,1314	0,7215	0,10
KIN <sup>2</sup>	54,9297	1	54,9297	83,2869	0,0000	64,20
n·f <sub>n</sub>	0,0023	1	0,0023	0,0035	0,9536	0,00
n·KIN	3,2090	1	3,2090	4,8656	0,0414	3,75
f <sub>n</sub> ·KIN	4,0987	1	4,0987	6,2146	0,0233	4,79
Błąd	11,2119	17	0,6595			12,16
Łącznie	92,1818	26				100,00

R = 0,9372; R<sup>2</sup> = 0,8784

Z tabeli 57 wynika, że wpływ układu kinematycznego był największy w porównaniu z pozostałymi na wartość parametru Rz wykonanego otworu w stopie MO58. Uzyskał on wpływ wynoszący 68,57% na parametr Rz. Kolejnym wpływowym parametrem wejściowym była prędkość obrotowa wrzeciona 25,32%. nieznaczny wpływ miał posuw na obrót 6,11%.

Tabela 58. Analiza statystyczna ANOVA dla parametru Rt otworu wywierconego w stopie mosiądzu MO58

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Model	1221,9442	9	135,7716	8,6749	0,0001	
Wyraz wolny	0,0368	1	0,0368	0,0023	0,9619	
n	212,4057	1	212,4057	13,5714	0,0018	16,11
n <sup>2</sup>	181,2734	1	181,2734	11,5822	0,0034	13,75
f <sub>n</sub>	74,3834	1	74,3834	4,7526	0,0436	5,64
f <sub>n</sub> <sup>2</sup>	121,0564	1	121,0564	7,7347	0,0128	9,18
KIN	13,8722	1	13,8722	0,8863	0,3597	1,05
KIN <sup>2</sup>	417,9162	1	417,9162	26,7022	0,0001	31,70
n·f <sub>n</sub>	38,7901	1	38,7901	2,4784	0,1338	2,94
n·KIN	77,9843	1	77,9843	4,9827	0,0393	5,91
f <sub>n</sub> ·KIN	180,7928	1	180,7928	11,5515	0,0034	13,71
Błąd	266,0669	17	15,6510			17,88
Łącznie	1488,0111	26				100,00



$R = 0,9062$ ;  $R^2 = 0,8212$

Z tabeli 58 wynika, że każdy parametr wejściowy miał duże znaczenie na parametr Rt. Układ kinematyczny 42,56%, prędkość obrotowa wrzeciona 34,29% oraz posuw na obrót 23,15%.

Tabela 59. Analiza statystyczna ANOVA dla parametru Ra otworu wywierconego w stopie mosiądzu MO58

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Model	0,9879	9	0,1098	10,8985	0,0000	
Wyraz wolny	0,0348	1	0,0348	3,4585	0,0803	
n	0,0086	1	0,0086	0,8543	0,3683	1,16
$n^2$	0,0588	1	0,0588	5,8333	0,0273	7,93
$f_n$	0,0554	1	0,0554	5,5010	0,0314	7,47
$f_n^2$	0,0264	1	0,0264	2,6257	0,1235	3,56
KIN	0,1037	1	0,1037	10,2931	0,0052	13,98
$KIN^2$	0,2918	1	0,2918	28,9677	0,0000	39,34
$n \cdot f_n$	0,0794	1	0,0794	7,8816	0,0121	10,71
$n \cdot KIN$	0,0085	1	0,0085	0,8398	0,3723	1,15
$f_n \cdot KIN$	0,1091	1	0,1091	10,8367	0,0043	14,71
Błąd	0,1712	17	0,0101			14,77
Łącznie	1,1591	26				100,00

$R = 0,9232$ ;  $R^2 = 0,8523$

Z tabeli 59 wynika, że układ kinematyczny zdominował pozostałe parametry wejściowe. Uzyskał on wpływ wynoszący 61,25% na parametr Ra. Kolejnym wpływowym parametrem wejściowym był posuw na obrót 23,74%, reszta przypadła prędkości obrotowej wrzeciona 15,01%.

Tabela 60. Analiza statystyczna ANOVA dla parametru Rz otworu wywierconego w Inconelu 718

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Model	35,2646	9	3,9183	11,8139	0,0000	
Wyraz wolny	7,8564	1	7,8564	23,6875	0,0001	
n	1,6095	1	1,6095	4,8528	0,0417	2,79
$n^2$	1,6453	1	1,6453	4,9608	0,0397	2,86
$f_n$	23,3127	1	23,3127	70,2894	0,0000	40,47
$f_n^2$	28,5260	1	28,5260	86,0081	0,0000	49,52
KIN	0,9235	1	0,9235	2,7843	0,1135	1,60

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
KIN <sup>2</sup>	0,0001	1	0,0001	0,0002	0,9886	0,00
n·f <sub>n</sub>	0,1428	1	0,1428	0,4306	0,5205	0,25
n·KIN	0,1179	1	0,1179	0,3555	0,5589	0,20
f <sub>n</sub> ·KIN	1,3275	1	1,3275	4,0026	0,0617	2,30
Błąd	5,6383	17	0,3317			13,78
Łącznie	40,9029	26				100,00

R = 0,9285; R<sup>2</sup> = 0,8622

Z tabeli 60 wynika, że posuw na obrót zdominował pozostałe parametry wejściowe. Uzyskał on wpływ wynoszący 91,27%% na parametr Rz. Reszta przypadła prędkości obrotowej wrzeciona 5,88% oraz układowi kinematycznemu 2,86%.

Tabela 61. Analiza statystyczna ANOVA dla parametru Rt otworu wywierconego w Inconelu 718

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Model	68,8560	9	7,6507	11,8608	0,0000	
Wyraz wolny	21,0740	1	21,0740	32,6709	0,0000	
n	0,5127	1	0,5127	0,7948	0,3851	0,50
n <sup>2</sup>	0,4134	1	0,4134	0,6409	0,4344	0,40
f <sub>n</sub>	43,8694	1	43,8694	68,0104	0,0000	42,59
f <sub>n</sub> <sup>2</sup>	53,9700	1	53,9700	83,6694	0,0000	52,39
KIN	1,2561	1	1,2561	1,9473	0,1808	1,22
KIN <sup>2</sup>	1,6956	1	1,6956	2,6286	0,1234	1,65
n·f <sub>n</sub>	0,4266	1	0,4266	0,6614	0,4273	0,41
n·KIN	0,3945	1	0,3945	0,6116	0,4449	0,38
f <sub>n</sub> ·KIN	0,4768	1	0,4768	0,7392	0,4019	0,46
Błąd	10,9657	17	0,6450			13,74
Łącznie	79,8216	26				100,00

R = 0,9288; R<sup>2</sup> = 0,8626

Z tabeli 61 wynika, że posuw na obrót zdominował pozostałe parametry wejściowe. Uzyskał on wpływ wynoszący 95,41% na parametr Rt. Reszta przypadła pozostałym parametrom wejściowym.

Tabela 62. Analiza statystyczna ANOVA dla parametru Ra otworu wywierconego w Inconelu 718

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział procentowy
Model	0,8015	9	0,0891	4,3502	0,0045	
Wyraz wolny	0,1901	1	0,1901	9,2880	0,0073	
n	0,0047	1	0,0047	0,2290	0,6381	0,44
n <sup>2</sup>	0,0010	1	0,0010	0,0470	0,8317	0,09
f <sub>n</sub>	0,3812	1	0,3812	18,6240	0,0005	35,73
f <sub>n</sub> <sup>2</sup>	0,5396	1	0,5396	26,3600	0,0001	50,57
KIN	0,0444	1	0,0444	2,1680	0,1592	4,16
KIN <sup>2</sup>	0,0245	1	0,0245	1,1960	0,2894	2,30
n·f <sub>n</sub>	0,0285	1	0,0285	1,3930	0,2542	2,67
n·KIN	0,0186	1	0,0186	0,9090	0,3539	1,74
f <sub>n</sub> ·KIN	0,0245	1	0,0245	1,1980	0,2890	2,30
Błąd	0,3480	17	0,0205			30,27
Łącznie	1,1495	26				100,00

R = 0,8350; R<sup>2</sup> = 0,6973

Z tabeli 62 wynika, że znów posuw na obrót zdominował pozostałe parametry wejściowe. Uzyskał on wpływ wynoszący 88,78% na parametr Ra.

Z tabel 48-62 nasuwa się wniosek, że poniższe modele są istotne gdyż wartości p są mniejsze niż 0,05.

Stosując równanie hybrydowe (39) zbudowano modele matematyczne dla następujących parametrów chropowatości powierzchni: Rz, Rt oraz Ra dla każdego badanego materiału. Poniżej zapisano równania dotyczące każdego wyżej wymienionego parametru oraz badanych materiałów.

$$\begin{aligned}
 Rz_{C45} = & -41,13 + 1,14 \cdot 10^{-2} \cdot n - 1,16 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + \\
 & + 372,5 \cdot f_n - 1376,6 \cdot f_n^2 + 1,84 \cdot 10^{-4} \cdot KIN + \\
 & - 1,36 \cdot 10^{-9} \cdot KIN^2 - 0,14 \cdot n \cdot f_n - 6,1 \cdot 10^{-8} \cdot n \cdot KIN + \\
 & + 6,27 \cdot 10^{-4} \cdot f_n \cdot KIN
 \end{aligned} \tag{60}$$

$$\begin{aligned}
 Rt_{C45} = & -90,38 + 1,27 \cdot 10^{-2} \cdot n - 6,3 \cdot 10^{-7} \cdot n^2 + \\
 & + 1181,72 \cdot f_n - 4029,58 \cdot f_n^2 + 1,34 \cdot 10^{-4} \cdot KIN + \\
 & + 7,35 \cdot 10^{-9} \cdot KIN^2 - 5,82 \cdot 10^{-2} \cdot n \cdot f_n - 3,24 \cdot 10^{-7} \cdot n \cdot KIN + \\
 & + 9,14 \cdot 10^{-3} \cdot f_n \cdot KIN
 \end{aligned} \tag{61}$$

$$\begin{aligned}
Ra_{C45} = & -3,3 + 1,12 \cdot 10^{-3} \cdot n - 1,03 \cdot 10^{-7} \cdot n^2 + 24,35 \cdot f_n + \\
& -69,86 \cdot f_n^2 - 2,35 \cdot 10^{-5} \cdot KIN - 5,56 \cdot 10^{-9} \cdot KIN^2 + \\
& -1,94 \cdot 10^{-3} \cdot n \cdot f_n + 1,58 \cdot 10^{-9} \cdot n \cdot KIN + 8,93 \cdot 10^{-5} \cdot f_n \cdot KIN
\end{aligned} \tag{62}$$

$$\begin{aligned}
Rz_{40HM} = & -12,34 + 1,14 \cdot 10^{-3} \cdot n - 1,34 \cdot 10^{-7} \cdot n^2 + \\
& +201,35 \cdot f_n - 785,69 \cdot f_n^2 - 3,71 \cdot 10^{-5} \cdot KIN + \\
& -4,78 \cdot 10^{-10} \cdot KIN^2 - 2,89 \cdot 10^{-3} \cdot n \cdot f_n + 1,22 \cdot 10^{-8} \cdot n \cdot KIN + \\
& +9,73 \cdot 10^{-5} \cdot f_n \cdot KIN
\end{aligned} \tag{63}$$

$$\begin{aligned}
Rt_{40HM} = & -10,44 + 4,52 \cdot 10^{-3} \cdot n - 4,31 \cdot 10^{-7} \cdot n^2 + \\
& +111,22 \cdot f_n - 342,91 \cdot f_n^2 + 3,77 \cdot 10^{-4} \cdot KIN + \\
& -1,42 \cdot 10^{-8} \cdot KIN^2 - 9,84 \cdot 10^{-3} \cdot n \cdot f_n - 4,99 \cdot 10^{-8} \cdot n \cdot KIN + \\
& -1,83 \cdot 10^{-3} \cdot f_n \cdot KIN
\end{aligned} \tag{64}$$

$$\begin{aligned}
Ra_{40HM} = & -1,21 + 2,61 \cdot 10^{-4} \cdot n - 3,48 \cdot 10^{-8} \cdot n^2 + \\
& +17,98 \cdot f_n - 73,61 \cdot f_n^2 + 1,3 \cdot 10^{-5} \cdot KIN + \\
& +3,51 \cdot 10^{-10} \cdot KIN^2 + 2,09 \cdot 10^{-4} \cdot n \cdot f_n - 1,23 \cdot 10^{-9} \cdot n \cdot KIN + \\
& +2,45 \cdot 10^{-6} \cdot f_n \cdot KIN
\end{aligned} \tag{65}$$

$$\begin{aligned}
Rz_{PA6} = & -103,37 + 4,98 \cdot 10^{-2} \cdot n - 5,21 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + \\
& +263,37 \cdot f_n - 259,86 \cdot f_n^2 + 1,87 \cdot 10^{-3} \cdot KIN + \\
& -1,25 \cdot 10^{-7} \cdot KIN^2 - 2,8 \cdot 10^{-2} \cdot n \cdot f_n - 4,72 \cdot 10^{-7} \cdot n \cdot KIN + \\
& +1,51 \cdot 10^{-4} \cdot f_n \cdot KIN
\end{aligned} \tag{66}$$

$$\begin{aligned}
Rt_{PA6} = & 12,54 + 6,88 \cdot 10^{-2} \cdot n - 7,39 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + \\
& -2072,82 \cdot f_n + 8704,99 \cdot f_n^2 - 6,75 \cdot 10^{-5} \cdot KIN + \\
& -2,38 \cdot 10^{-7} \cdot KIN^2 - 1,71 \cdot 10^{-2} \cdot n \cdot f_n + 2,37 \cdot 10^{-7} \cdot n \cdot KIN + \\
& -5,8 \cdot 10^{-3} \cdot f_n \cdot KIN
\end{aligned} \tag{67}$$

$$\begin{aligned}
Ra_{PA6} = & -8,51 + 5,49 \cdot 10^{-3} \cdot n - 4,96 \cdot 10^{-7} \cdot n^2 - 12,1 \cdot f_n + \\
& +163,19 \cdot f_n^2 - 2,3 \cdot 10^{-4} \cdot KIN - 2,7 \cdot 10^{-8} \cdot KIN^2 + \\
& -2,73 \cdot 10^{-3} \cdot n \cdot f_n + 1,88 \cdot 10^{-8} \cdot n \cdot KIN + 1,32 \cdot 10^{-3} \cdot f_n \cdot KIN
\end{aligned} \tag{68}$$

$$\begin{aligned}
Rz_{MO58} = & -6,74 + 1,71 \cdot 10^{-2} \cdot n - 2,1 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + \\
& -317,19 \cdot f_n + 1307,5 \cdot f_n^2 + 1,72 \cdot 10^{-4} \cdot KIN + \\
& -1,77 \cdot 10^{-7} \cdot KIN^2 - 8,68 \cdot 10^{-4} \cdot n \cdot f_n + 1,69 \cdot 10^{-7} \cdot n \cdot KIN + \\
& -7,24 \cdot 10^{-3} \cdot f_n \cdot KIN
\end{aligned} \tag{69}$$

$$\begin{aligned}
Rt_{MO58} = & -3,76 + 8,12 \cdot 10^{-2} \cdot n - 8,67 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + \\
& -2204,66 \cdot f_n + 11229,44 \cdot f_n^2 + 2,18 \cdot 10^{-3} \cdot KIN + \\
& -4,89 \cdot 10^{-7} \cdot KIN^2 - 1,12 \cdot 10^{-1} \cdot n \cdot f_n + 8,32 \cdot 10^{-7} \cdot n \cdot KIN + \\
& -4,81 \cdot 10^{-2} \cdot f_n \cdot KIN
\end{aligned} \quad (70)$$

$$\begin{aligned}
Ra_{MO58} = & 3,66 + 5,17 \cdot 10^{-4} \cdot n - 1,56 \cdot 10^{-7} \cdot n^2 + \\
& -60,16 \cdot f_n + 165,97 \cdot f_n^2 + 1,88 \cdot 10^{-4} \cdot KIN - 1,29 \cdot 10^{-8} \cdot KIN^2 + \\
& +5,1 \cdot 10^{-3} \cdot n \cdot f_n - 8,66 \cdot 10^{-9} \cdot n \cdot KIN - 1,18 \cdot 10^{-3} \cdot f_n \cdot KIN
\end{aligned} \quad (71)$$

$$\begin{aligned}
Rz_{I718} = & 44,57 + 3,46 \cdot 10^{-2} \cdot n - 2,07 \cdot 10^{-5} \cdot n^2 + \\
& -1396,31 \cdot f_n + 9690,86 \cdot f_n^2 + 2,58 \cdot 10^{-3} \cdot KIN + \\
& -4,96 \cdot 10^{-9} \cdot KIN^2 - 4,57 \cdot 10^{-2} \cdot n \cdot f_n - 8,12 \cdot 10^{-7} \cdot n \cdot KIN + \\
& -2,74 \cdot 10^{-2} \cdot f_n \cdot KIN
\end{aligned} \quad (72)$$

$$\begin{aligned}
Rt_{I718} = & 73 + 1,95 \cdot 10^{-2} \cdot n - 1,03 \cdot 10^{-5} \cdot n^2 + \\
& -1915,44 \cdot f_n + 13329,62 \cdot f_n^2 + 3 \cdot 10^{-3} \cdot KIN + \\
& -7,76 \cdot 10^{-7} \cdot KIN^2 - 7,9 \cdot 10^{-2} \cdot n \cdot f_n - 1,48 \cdot 10^{-6} \cdot n \cdot KIN + \\
& -1,64 \cdot 10^{-2} \cdot f_n \cdot KIN
\end{aligned} \quad (73)$$

$$\begin{aligned}
Ra_{I718} = & 6,93 + 1,87 \cdot 10^{-3} \cdot n - 4,99 \cdot 10^{-7} \cdot n^2 + \\
& -178,55 \cdot f_n + 1332,83 \cdot f_n^2 + 5,65 \cdot 10^{-4} \cdot KIN + \\
& +9,32 \cdot 10^{-8} \cdot KIN^2 + 2,04 \cdot 10^{-2} \cdot n \cdot f_n - 3,22 \cdot 10^{-7} \cdot n \cdot KIN + \\
& -3,73 \cdot 10^{-3} \cdot f_n \cdot KIN
\end{aligned} \quad (74)$$

gdzie:  $n$  – wartość prędkości obrotowej wrzeciona,  $f_n$  – wartość posuwu na obrót,  $KIN$  – układ kinematyczny,  $n \cdot f_n$  – interakcja wartości prędkości obrotowej wrzeciona z wartością posuwu na obrót,  $n \cdot KIN$  – interakcja wartości prędkości obrotowej wrzeciona z układem kinematycznym,  $f_n \cdot KIN$  – interakcja wartości posuwu na obrót z układem kinematycznym.

W tabelach poniżej zestawiono wartości wyników metrologicznych z przewidywanymi wynikami. Wartości są bardzo zbliżone do siebie (różnią się od siebie dziesiętnymi częściami mikrometra) co wskazuje na dokładność modeli. Dla stali C45 wartości błędów względnych były następujące: dla Rz 5%, dla Rt 4% oraz dla Ra 5%. Dla stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT wartości błędów względnych były następujące: dla Rz 2%, dla Rt 4% oraz dla Ra 3%. Dla stopu aluminium PA6 wartości błędów względnych były następujące: dla Rz 5%, dla Rt 6% oraz dla Ra 4%. Dla stopu mosiądzu MO58 wartości błędów względnych były następujące: dla Rz 10%, dla Rt 12% oraz dla Ra 8%. Dla Inconelu 718 wartości błędów względnych były następujące: dla Rz 2%, dla Rt 3% oraz dla Ra 3%.

Tabela 63. Wyniki badań wartości eksperymentalnych oraz przewidywanych chropowatości powierzchni dla stali C45

Kodowanie	Eksperymentalne wyniki			Przewidywane wyniki		
	Rz, $\mu\text{m}$	Rt, $\mu\text{m}$	Ra, $\mu\text{m}$	Rz, $\mu\text{m}$	Rt, $\mu\text{m}$	Ra, $\mu\text{m}$
TiI1S	2,167	3,316	0,334	2,289	3,048	0,333
TiII1S	2,416	4,328	0,374	2,468	4,329	0,367
TiIII1S	2,358	3,048	0,422	2,410	3,521	0,477
TiI2S	2,918	4,882	0,430	3,121	4,887	0,408
TiII2S	2,846	3,810	0,450	2,884	3,899	0,446
TiIII2S	3,435	4,990	0,583	3,024	4,276	0,515
TiI3S	2,393	5,048	0,347	2,403	5,525	0,347
TiII3S	1,823	2,858	0,338	1,905	3,091	0,385
TiIII3S	2,316	4,529	0,422	2,168	4,233	0,422
TiI4S	3,834	4,949	0,356	3,352	5,053	0,386
TiII4S	3,717	8,392	0,491	3,651	8,081	0,437
TiIII4S	3,441	6,296	0,540	3,532	6,399	0,538
TiI5S	4,064	5,988	0,436	3,958	6,110	0,432
TiII5S	3,764	6,139	0,458	3,821	6,578	0,484
TiIII5S	3,513	6,168	0,514	3,911	6,228	0,546
TiI6S	2,894	5,933	0,350	3,014	5,967	0,341
TiII6S	2,820	4,969	0,429	2,595	4,698	0,391
TiIII6S	2,605	5,538	0,402	2,818	5,258	0,422
TiI7S	2,846	3,949	0,414	3,313	3,833	0,383
TiII7S	3,633	8,808	0,391	3,732	8,609	0,451
TiIII7S	3,889	5,842	0,594	3,554	6,054	0,544
TiI8S	3,916	4,078	0,369	3,693	4,110	0,399
TiII8S	3,819	5,857	0,481	3,656	6,034	0,466
TiIII8S	3,489	5,166	0,495	3,696	4,956	0,521
TiI9S	2,701	3,314	0,274	2,524	3,186	0,279
TiII9S	2,124	3,002	0,354	2,185	3,081	0,340
TiIII9S	2,303	2,906	0,377	2,368	3,059	0,366

Tabela 64. Wyniki badań wartości eksperymentalnych oraz przewidywanych chropowatości powierzchni dla stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT

Kodowanie	Eksperymentalne wyniki			Przewidywane wyniki		
	Rz, $\mu\text{m}$	Rt, $\mu\text{m}$	Ra, $\mu\text{m}$	Rz, $\mu\text{m}$	Rt, $\mu\text{m}$	Ra, $\mu\text{m}$
TiI1Q	2,598	2,222	0,506	2,540	2,708	0,500
TiII1Q	2,27	3,698	0,452	2,206	3,830	0,429
TiIII1Q	2,375	3,806	0,447	2,384	3,592	0,456
TiI2Q	2,685	3,835	0,485	2,578	3,560	0,507
TiII2Q	2,297	4,138	0,412	2,377	4,179	0,440
TiIII2Q	2,415	4,336	0,474	2,485	4,094	0,468
TiI3Q	2,306	3,711	0,462	2,461	3,784	0,469
TiII3Q	2,359	3,822	0,437	2,363	4,026	0,409
TiIII3Q	2,505	4,254	0,438	2,417	4,049	0,435
TiI4Q	2,765	3,594	0,527	2,866	3,381	0,503
TiII4Q	2,602	4,38	0,402	2,551	4,153	0,432
TiIII4Q	2,572	4,003	0,466	2,719	4,090	0,459
TiI5Q	2,897	3,987	0,532	2,859	4,048	0,513
TiII5Q	2,579	4,254	0,455	2,675	4,375	0,447
TiIII5Q	2,859	4,574	0,453	2,775	4,436	0,474
TiI6Q	2,734	4,054	0,49	2,698	4,086	0,479
TiII6Q	2,736	4,107	0,417	2,612	4,095	0,419
TiIII6Q	2,67	3,945	0,429	2,660	4,234	0,445
TiI7Q	2,571	3,924	0,405	2,563	3,781	0,447
TiII7Q	2,213	4,215	0,391	2,267	4,202	0,376
TiIII7Q	2,556	4,209	0,41	2,426	4,314	0,404
TiI8Q	2,47	4,277	0,478	2,513	4,261	0,461
TiII8Q	2,391	4,116	0,381	2,343	4,296	0,394
TiIII8Q	2,447	4,235	0,456	2,435	4,503	0,422
TiI9Q	2,344	4,152	0,429	2,306	4,114	0,429
TiII9Q	2,175	4,371	0,377	2,233	3,889	0,370
TiIII9Q	2,194	4,006	0,372	2,274	4,145	0,396

Tabela 65. Wyniki badań wartości eksperymentalnych oraz przewidywanych chropowatości powierzchni dla stopu aluminium PA6

Kodowanie	Eksperymentalne wyniki			Przewidywane wyniki		
	Rz, $\mu\text{m}$	Rt, $\mu\text{m}$	Ra, $\mu\text{m}$	Rz, $\mu\text{m}$	Rt, $\mu\text{m}$	Ra, $\mu\text{m}$
TiI1A	23,523	38,314	5,479	23,956	37,298	5,678
TiII1A	25,445	33,726	5,291	27,430	34,906	5,255
TiIII1A	30,828	43,652	6,199	28,539	41,521	6,081
TiI2A	27,802	36,992	5,52	26,440	36,670	5,161
TiII2A	24,773	34,878	4,658	26,343	36,177	4,927
TiIII2A	28,626	39,026	5,528	28,367	40,186	5,471
TiI3A	21,675	25,554	3,726	21,556	26,667	4,005
TiII3A	19,927	29,746	3,959	19,085	27,473	3,913
TiIII3A	20,702	28,488	4,364	21,585	29,478	4,232
TiI4A	22,625	34,135	5,202	22,701	35,678	5,207
TiII4A	29,388	32,59	5,285	26,205	32,176	5,036
TiIII4A	24,607	40,6	5,252	27,299	39,346	5,736
TiI5A	23,477	31,389	4,87	24,741	34,685	4,668
TiII5A	26,356	30,943	4,315	24,669	33,267	4,644
TiIII5A	25,842	39,52	5,579	26,681	37,739	5,083
TiI6A	19,096	28,126	3,263	19,415	24,317	3,489
TiII6A	18,606	27,91	3,832	16,963	24,383	3,565
TiIII6A	18,13	23,137	3,629	19,453	26,758	3,800
TiI7A	20,329	39,492	4,891	21,239	41,022	4,867
TiII7A	22,908	34,79	5,072	24,772	36,411	4,948
TiIII7A	28,34	45,196	5,659	25,851	44,136	5,522
TiI8A	23,987	42,561	4,278	22,836	39,664	4,305
TiII8A	22,11	41,657	4,205	22,787	37,322	4,491
TiIII8A	24,677	41	4,621	24,787	42,256	4,825
TiI9A	18,507	30,985	3,18	17,065	28,931	3,103
TiII9A	14,519	26,716	3,492	14,632	28,258	3,347
TiIII9A	15,705	26,603	3,507	17,113	31,002	3,498



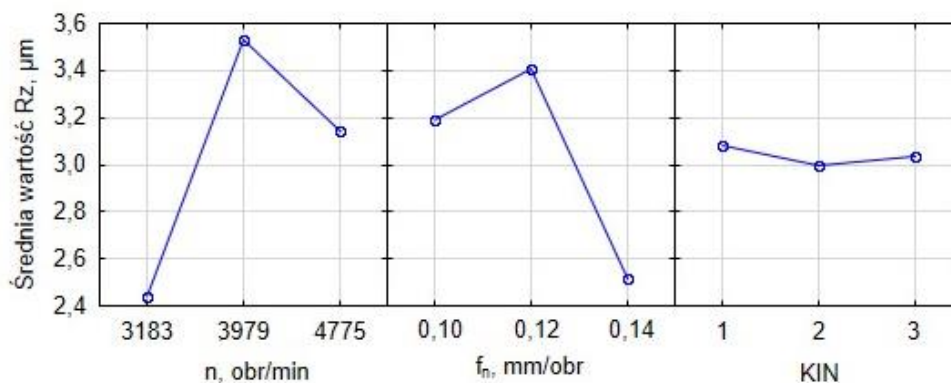
Tabela 66. Wyniki badań wartości eksperymentalnych oraz przewidywanych chropowatości powierzchni dla stopu mosiądzu MO58

Kodowanie	Eksperymentalne wyniki			Przewidywane wyniki		
	Rz, $\mu\text{m}$	Rt, $\mu\text{m}$	Ra, $\mu\text{m}$	Rz, $\mu\text{m}$	Rt, $\mu\text{m}$	Ra, $\mu\text{m}$
TiI1M	3,88	11,894	0,474	3,499	8,564	0,434
TiII1M	4,683	13,218	0,59	3,847	14,142	0,608
TiIII1M	6,922	16,953	0,815	7,717	22,507	0,815
TiI2M	5,262	19,382	0,62	5,346	18,146	0,673
TiII2M	6,95	35,818	0,767	6,704	28,063	0,763
TiIII2M	8,622	30,988	0,9	8,833	30,850	0,923
TiI3M	4,328	17,363	0,633	4,517	17,165	0,687
TiII3M	6,095	25,824	0,797	6,459	29,314	0,716
TiIII3M	7,465	25,508	0,855	7,285	28,196	0,832
TiI4M	4,029	8,759	0,414	3,819	9,647	0,399
TiII4M	2,756	5,851	0,34	2,783	6,030	0,347
TiIII4M	6,746	22,877	0,694	7,345	18,992	0,668
TiI5M	5,956	12,838	0,642	5,536	16,664	0,701
TiII5M	5,067	14,36	0,556	5,741	18,920	0,603
TiIII5M	7,943	22,625	0,951	8,447	25,537	0,857
TiI6M	5,345	12,556	0,98	4,579	13,119	0,778
TiII6M	6,246	22,273	0,639	5,598	19,140	0,655
TiIII6M	6,645	26,997	0,639	6,885	21,086	0,847
TiI7M	4,291	16,955	0,401	5,185	19,713	0,497
TiII7M	1,819	7,919	0,192	2,764	6,902	0,220
TiIII7M	9,852	26,534	0,721	8,019	24,462	0,653
TiI8M	7,112	28,238	0,981	6,773	24,166	0,862
TiII8M	6,524	16,498	0,656	5,825	18,761	0,575
TiIII8M	8,876	29,569	0,807	9,107	29,208	0,923
TiI9M	4,739	16,818	0,932	5,686	18,057	1,001
TiII9M	5,381	17,045	0,724	5,783	17,948	0,728
TiIII9M	8,079	22,6	1,04	7,531	22,959	0,995

Tabela 67. Wyniki badań wartości eksperymentalnych oraz przewidywanych chropowatości powierzchni dla Inconelu 718

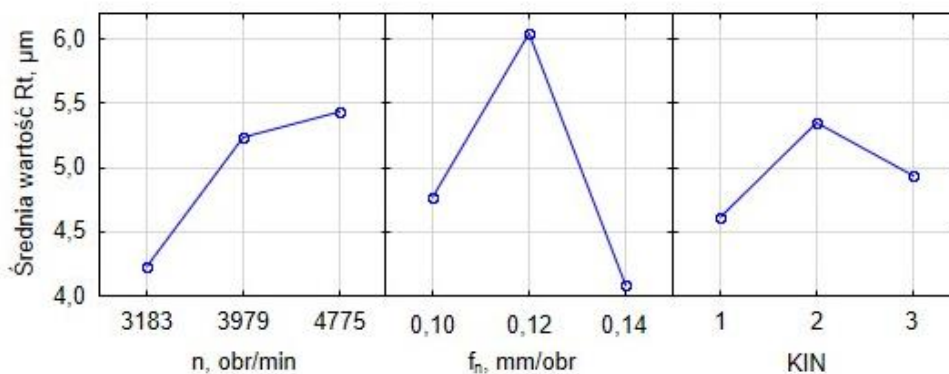
Kodowanie	Eksperymentalne wyniki			Przewidywane wyniki		
	Rz, $\mu\text{m}$	Rt, $\mu\text{m}$	Ra, $\mu\text{m}$	Rz, $\mu\text{m}$	Rt, $\mu\text{m}$	Ra, $\mu\text{m}$
TiI1	6,796	9,794	1,272	6,718	9,491	1,228
TiII1	4,766	6,297	0,727	4,975	6,088	0,737
TiIII1	5,609	8,383	0,837	5,686	8,369	0,863
TiI2	6,047	9,609	1,282	6,182	9,506	1,225
TiII2	5,917	6,923	1,061	5,540	7,369	0,985
TiIII2	5,719	8,586	0,976	5,749	8,840	1,022
TiI3	5,197	7,949	1,052	5,464	8,121	1,097
TiII3	5,579	6,937	0,996	5,599	6,970	1,042
TiIII3	5,744	8,078	1,012	5,460	7,803	1,016
TiI4	8,462	10,978	1,314	8,250	11,615	1,402
TiII4	7,53	10,002	1,179	7,698	9,839	1,186
TiIII4	8,169	11,318	1,217	7,813	11,307	1,174
TiI5	7,424	11,49	1,317	7,554	11,512	1,334
TiII5	7,843	11,01	1,302	7,904	10,731	1,324
TiIII5	7,42	11,282	1,183	7,617	11,524	1,246
TiI6	6,74	10,131	1,182	6,676	10,010	1,141
TiII6	7,236	9,864	1,311	7,604	9,944	1,270
TiIII6	7,36	10,642	1,224	7,068	10,235	1,152
TiI7	8,532	12,483	1,53	8,540	11,683	1,504
TiII7	9,654	11,23	1,544	9,178	11,534	1,564
TiIII7	8,039	11,63	1,452	8,698	12,189	1,414
TiI8	7,682	10,852	1,373	7,683	11,464	1,371
TiII8	8,88	12,629	1,628	9,025	12,038	1,592
TiIII8	8,564	12,756	1,375	8,242	12,153	1,398
TiI9	6,631	9,677	1,092	6,645	9,844	1,114
TiII9	8,263	10,16	1,375	8,366	10,863	1,426
TiIII9	7,567	10,963	1,23	7,434	10,611	1,217

Na rys. 63-67 przedstawiono średnie wartości parametrów chropowatości powierzchni (Rz, Rt, Ra) w stosunku do badanych parametrów wejściowych ( $n$ ,  $f_n$  oraz KIN) dla stali C45, stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT, stopu aluminium PA6, stopu mosiądzu MO58 oraz Inconelu 718.



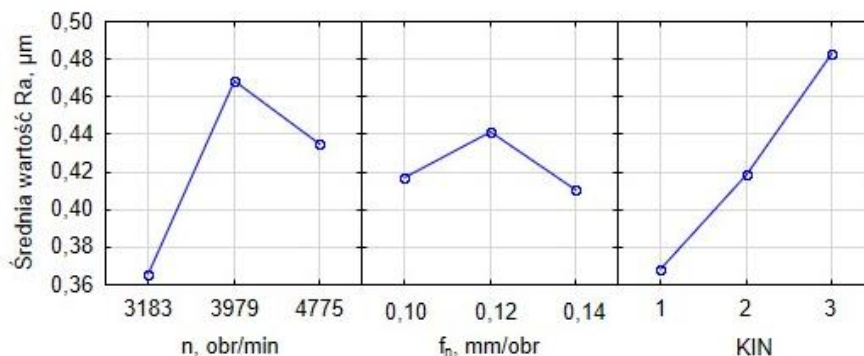
Rys. 77. Wykresy efektów głównych parametru Rz otworu dla stali C45

Z danych przedstawionych na rys. 77 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 3183 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość parametru Rz wynoszącą 2,442  $\mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość parametru Rz na poziomie ( $Rz = 2,519 \mu\text{m}$ ) jest 0,14 mm/obr. Wykorzystując w procesie wiercenia stali C45 układ kinematyczny drugi, uzyskano najmniejszą wartość parametru Rz wynoszącą 2,996  $\mu\text{m}$ .



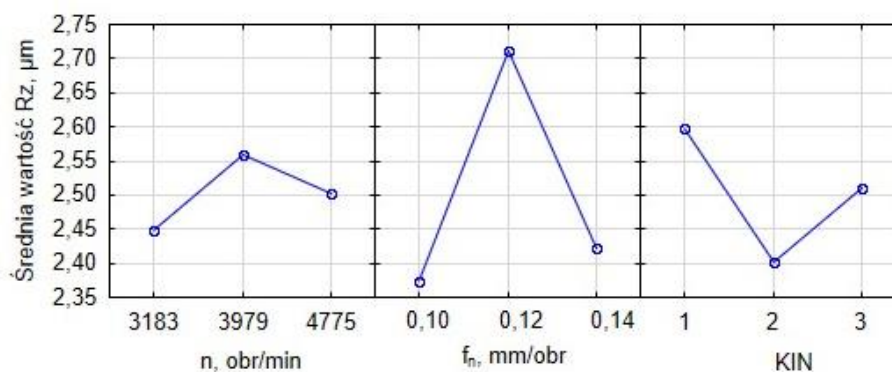
Rys. 78. Wykresy efektów głównych parametru Rt otworu dla stali C45

Z rys. 78 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 3183 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość parametru Rt wynoszącą 4,233  $\mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość parametru Rt na poziomie ( $Rt = 4,090 \mu\text{m}$ ) jest 0,14 mm/obr. Wykorzystując układ kinematyczny pierwszy, uzyskano najmniejszą wartość parametru Rt wynoszącą 4,606  $\mu\text{m}$ . Zauważono, że spadek wartości prędkości obrotowej wrzeciona powoduje zmniejszenie wartości parametru Rt.



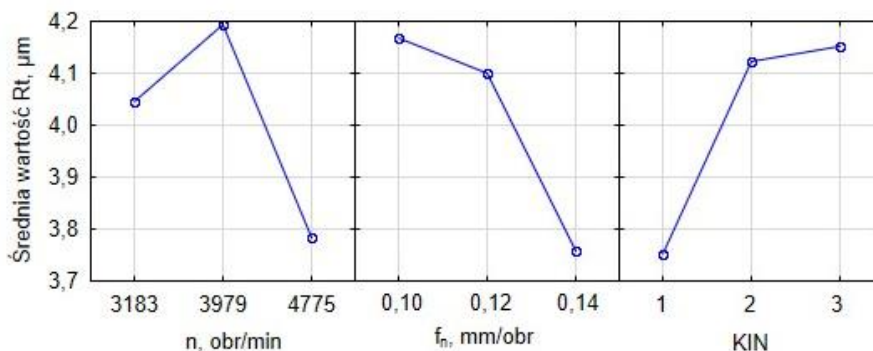
Rys. 79. Wykresy efektów głównych parametru Ra otworu dla stali C45

Z danych przedstawionych na rys. 79 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 3183 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość parametru Ra wynoszącą 0,366 μm. Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość parametru Ra na poziomie ( $Ra = 0,411 \mu\text{m}$ ) jest 0,14 mm/obr. Wykorzystując w procesie wiercenia stali C45 układ kinematyczny pierwszy, uzyskano najmniejszą wartość parametru Ra wynoszącą 0,368 μm.



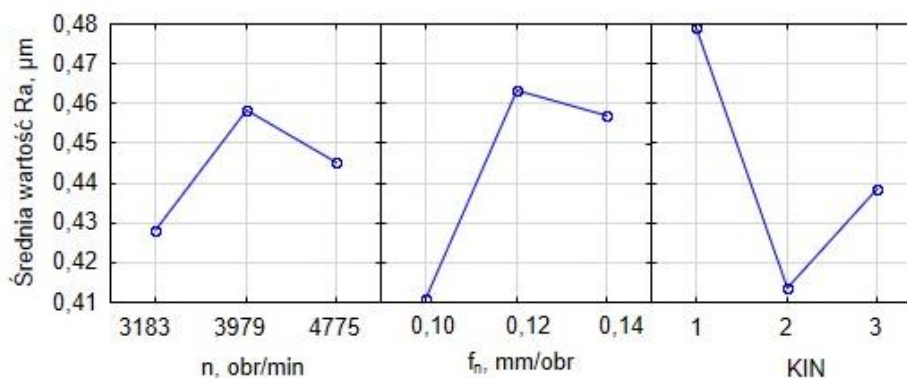
Rys. 80. Wykresy efektów głównych parametru Rz otworu dla stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT

Z rys. 80 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 3183 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość parametru Rz wynoszącą 2,447 μm. Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość parametru Rz na poziomie ( $Rz = 2,373 \mu\text{m}$ ) jest 0,1 mm/obr. Wykorzystując w procesie wiercenia układ kinematyczny drugi, uzyskano najmniejszą wartość parametru Rz wynoszącą 2,402 μm.



Rys. 81. Wykresy efektów głównych parametru Rt otworu dla stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT

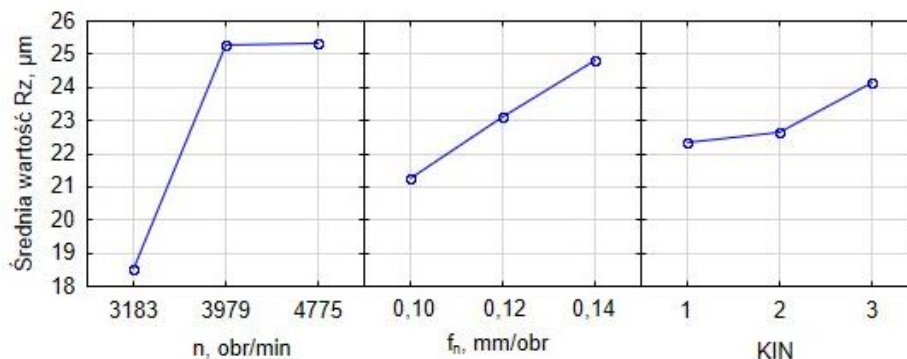
Z danych przedstawionych na rys. 81 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 4775 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość parametru Rt wynoszącą 3,783  $\mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość parametru Rt na poziomie ( $R_t = 3,758 \mu\text{m}$ ) jest 0,14 mm/obr. Wykorzystując w procesie wiercenia stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT układ kinematyczny pierwszy, uzyskano najmniejszą wartość parametru Rt wynoszącą 3,751  $\mu\text{m}$ . Zauważono, że zmniejszenie wartości posuwu na obrót powoduje zmniejszenie wartości parametru Rt.



Rys. 82. Wykresy efektów głównych parametru Ra otworu dla stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT

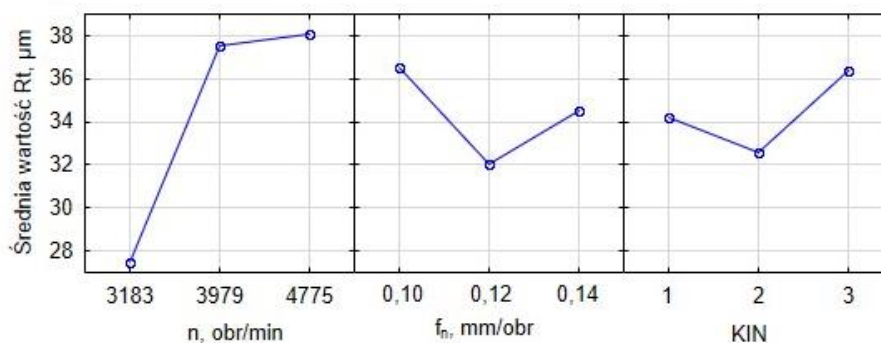
Z rys. 82 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 3183 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość parametru Ra wynoszącą 0,428  $\mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość parametru Ra na poziomie ( $R_a = 0,411 \mu\text{m}$ ) jest 0,1 mm/obr. Wykorzystując układ

kinematyczny drugi, uzyskano najmniejszą wartość parametru Ra wynoszącą 0,414  $\mu\text{m}$ .



Rys. 83. Wykresy efektów głównych parametru Rz otworu dla stopu aluminium PA6

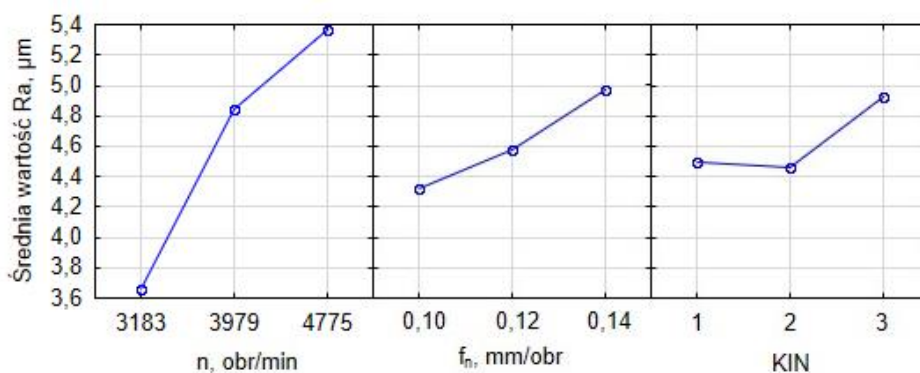
Z danych przedstawionych na rys. 83 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 3183 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość parametru Rz wynoszącą 18,541  $\mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość parametru Rz na poziomie ( $R_z = 21,23 \mu\text{m}$ ) jest 0,1 mm/obr. Wykorzystując w procesie wiercenia stopu aluminium PA6 układ kinematyczny pierwszy, uzyskano najmniejszą wartość parametru Rz wynoszącą 22,336  $\mu\text{m}$ . Zauważono, że zmniejszenie parametrów technologicznych powoduje zmniejszenie wartości parametru Rz.



Rys. 84. Wykresy efektów głównych parametru Rt otworu dla stopu aluminium PA6

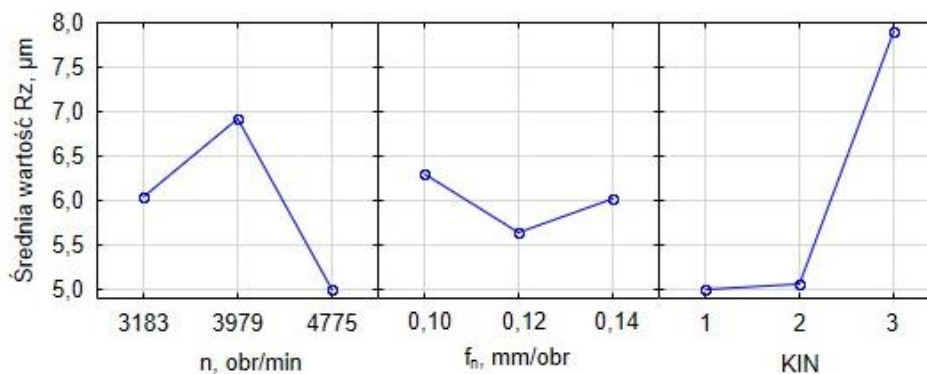
Z rys. 84 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 3183 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość parametru Rt wynoszącą 27,474  $\mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość parametru Rt na poziomie ( $R_t = 32,039 \mu\text{m}$ ) jest 0,12 mm/obr. Wykorzystując w

procesie wiercenia układ kinematyczny drugi, uzyskano najmniejszą wartość parametru  $R_t$  wynoszącą  $32,551 \mu\text{m}$ . Zauważono, że zmniejszenie wartości prędkości obrotowej wrzeciona powoduje zmniejszenie wartości parametru  $R_t$ .



Rys. 85. Wykresy efektów głównych parametru  $R_a$  otworu dla stopu aluminium PA6

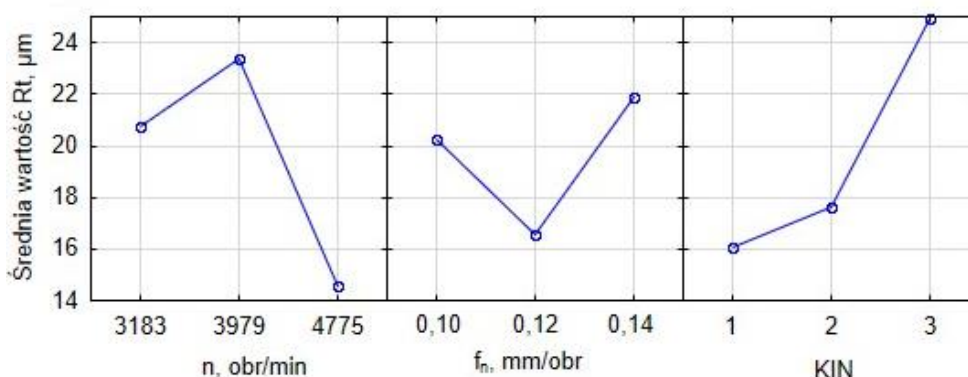
Z danych przedstawionych na rys. 85 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 3183 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość parametru  $R_a$  wynoszącą  $3,661 \mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość parametru  $R_a$  na poziomie ( $R_a = 4,323 \mu\text{m}$ ) jest  $0,1 \text{ mm/obr}$ . Wykorzystując układ kinematyczny drugi, uzyskano najmniejszą wartość parametru  $R_a$  wynoszącą  $4,457 \mu\text{m}$ . Zauważono, że zmniejszenie wartości parametrów technologicznych powoduje zmniejszenie wartości parametru  $R_a$ .



Rys. 86. Wykresy efektów głównych parametru  $R_z$  otworu dla stopu miedzi MO58

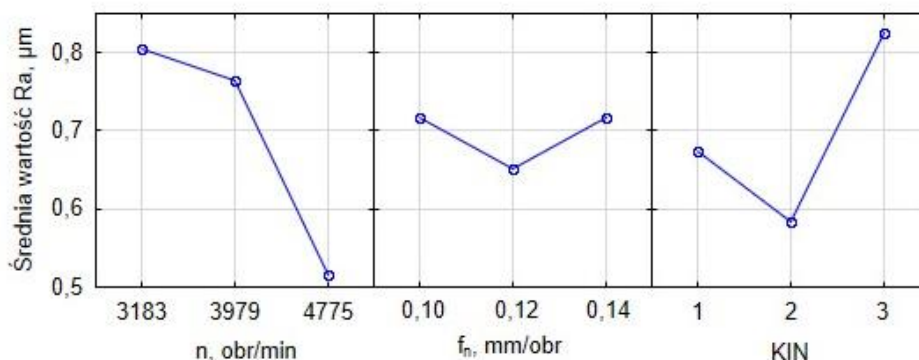
Z rys. 86 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 4775 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość parametru  $R_z$  wynoszącą  $4,998 \mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość

parametru Rz na poziomie ( $R_z = 5,637 \mu\text{m}$ ) jest 0,12 mm/obr. Wykorzystując w procesie wiercenia stopu mosiądzu MO58 układ kinematyczny pierwszy, uzyskano najmniejszą wartość parametru Rz wynoszącą 4,994  $\mu\text{m}$ .



Rys. 87. Wykresy efektów głównych parametru  $R_t$  otworu dla stopu mosiądzu MO58

Z danych przedstawionych na rys. 87 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 4775 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość parametru  $R_t$  wynoszącą 14,551  $\mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót dla której, uzyskano wartość parametru  $R_t$  na poziomie ( $R_t = 16,571 \mu\text{m}$ ) jest 0,12 mm/obr. Wykorzystując układ kinematyczny pierwszy, uzyskano najmniejszą wartość parametru  $R_t$  wynoszącą 16,089  $\mu\text{m}$ .

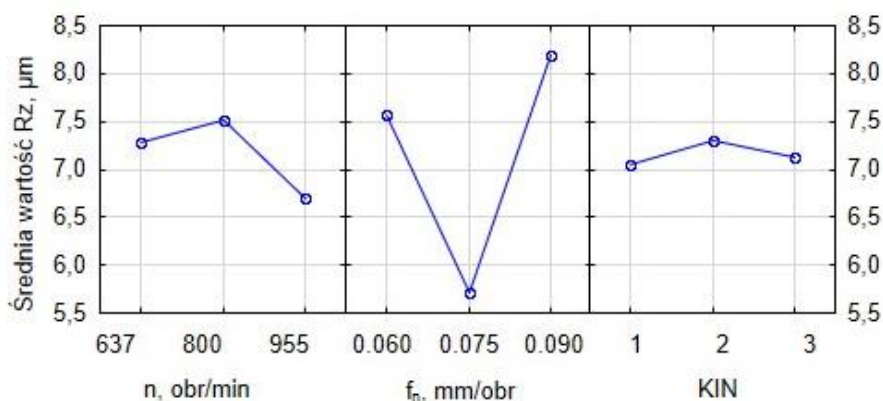


Rys. 88. Wykresy efektów głównych parametru  $R_a$  otworu dla stopu mosiądzu MO58

Z rys. 88 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 4775 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość parametru  $R_a$  wynoszącą 0,516  $\mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość parametru  $R_a$  na poziomie ( $R_a = 0,651 \mu\text{m}$ ) jest 0,12 mm/obr. Wykorzystując w

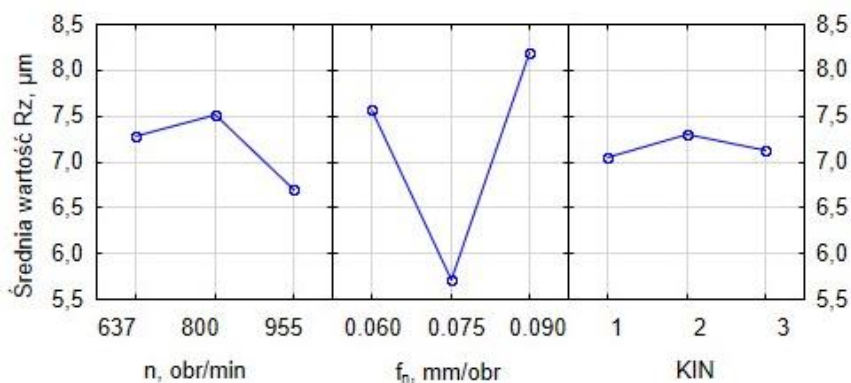


procesie wiercenia układ kinematyczny drugi, uzyskano najmniejszą wartość parametru Ra wynoszącą 0,585  $\mu\text{m}$ . Zauważono, że wzrost wartości prędkości obrotowej wrzeciona powoduje zmniejszenie wartości parametru Ra.



Rys. 89. Wykresy efektów głównych parametru Rz otworu dla Inconelu 718

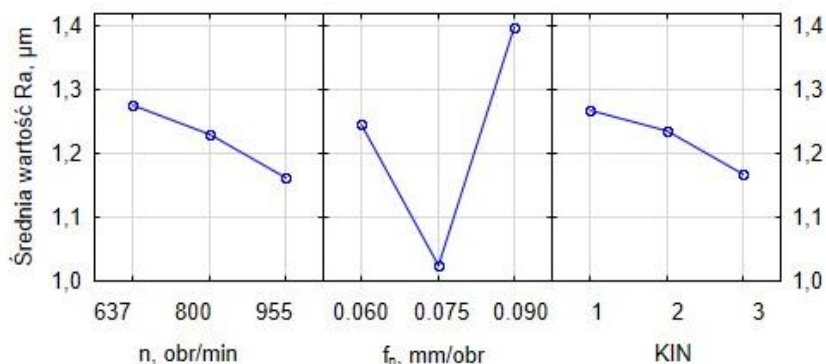
Z rys. 89 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 955 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość parametru Rz wynoszącą 6,702  $\mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość parametru Rz na poziomie ( $R_z = 5,708 \mu\text{m}$ ) jest 0,075 mm/obr. Wykorzystując w procesie wiercenia Inconelu 718 układ kinematyczny pierwszy, uzyskano najmniejszą wartość parametru Rz wynoszącą 7,057  $\mu\text{m}$ .



Rys. 90. Wykresy efektów głównych parametru Rt otworu dla Inconelu 718

Z danych przedstawionych na rys. 90 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 955 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość parametru Rt wynoszącą 9,378  $\mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość parametru Rt na poziomie ( $R_t = 8,062 \mu\text{m}$ ) jest 0,075 mm/obr.

Wykorzystując w procesie wiercenia układ kinematyczny pierwszy, uzyskano najmniejszą wartość parametru  $R_t$  wynoszącą  $9,450 \mu\text{m}$ .



Rys. 91. Wykresy efektów głównych parametru  $R_a$  otworu dla Inconelu 718

Z rys. 91 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 955 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość parametru  $R_a$  wynoszącą  $1,164 \mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość parametru  $R_a$  na poziomie ( $R_a = 1,024 \mu\text{m}$ ) jest  $0,075 \text{ mm/obr}$ . Wykorzystując układ kinematyczny drugi, uzyskano najmniejszą wartość parametru  $R_a$  wynoszącą  $1,167 \mu\text{m}$ . Zauważono, że zmniejszenie wartości prędkości obrotowej wrzeciona powoduje zmniejszenie wartości parametru  $R_a$ .

#### Wnioski:

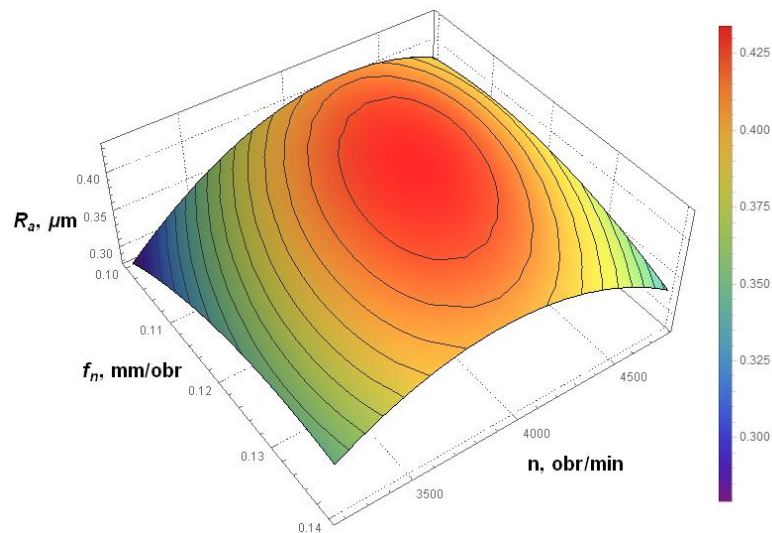
1. Zbudowane empiryczne modele matematyczne cechują się bardzo dużą korelacją w stosunku do obszernych badań dla stali C45: parametr  $R_z$   $R^2 = 89,03\%$ , parametr  $R_t$   $R^2 = 96,88\%$ , parametr  $R_a$   $R^2 = 82,95\%$ . Dla stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT: parametr  $R_z$   $R^2 = 84,38\%$ , parametr  $R_t$   $R^2 = 75,99\%$ , parametr  $R_a$   $R^2 = 79,71\%$ . Dla stopu aluminium PA6: parametr  $R_z$   $R^2 = 86,92\%$ , parametr  $R_t$   $R^2 = 85,79\%$ , parametr  $R_a$   $R^2 = 92,53\%$ . Dla mosiądzu MO58: parametr  $R_z$   $R^2 = 87,84\%$ , parametr  $R_t$   $R^2 = 82,12\%$ , parametr  $R_a$   $R^2 = 85,23\%$ . Dla Inconelu 718: odchyłka walcowości parametr  $R_z$   $R^2 = 86,22\%$ , parametr  $R_t$   $R^2 = 86,26\%$ , parametr  $R_a$   $R^2 = 69,73\%$ .
2. Zbudowane modele matematyczne są istotne ze względu na to, że wartości poziomu istotności  $p$  są mniejsze niż  $0,05$ .
3. Wysokie wartości współczynnika determinacji zbliżone do 1, powoduje dobre dopasowanie przewidywanych wartości z eksperymentalnymi wynikami.
4. Układ kinematyczny miał decydujący wpływ na chropowatość powierzchni obrobionych otworów ocenianą następującymi parametrami: dla stali C45 w parametrze  $R_a$   $37,76\%$ , dla stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT w parametrze  $R_t$   $47,03\%$ , dla stopu aluminium PA6 w parametrze  $R_a$   $47,03\%$ , dla stopu

mosiądzu MO58 w parametrze Rz 68,57%, w parametrze Rt 42,57% oraz w parametrze Ra 61,25%.

5. Zastosowanie układu kinematycznego procesu wiercenia zależy od materiału. W stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT oraz stopie aluminium stosując obróbkę według układu kinematycznego drugiego, uzyskano 2 z 3 parametrów chropowatości powierzchni na najmniejszym poziomie. Dla stali C45, stopu mosiądzu MO58 oraz Inconelu 718 stosując układ kinematyczny KIN I, uzyskano 2 z 3 parametrów o najmniejszych wartościach, pod tym względem układ ten okazał się najlepszy.

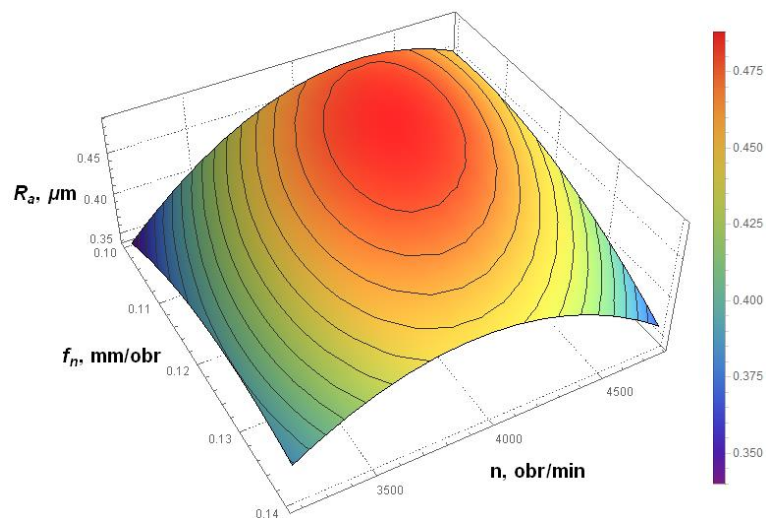
### 5.2.3. Badania symulacyjne wybranych modeli

W niniejszym podrozdziale zostaną przedstawione wyniki symulacyjnych badań zbudowanych modeli do przewidywania trzech parametrów chropowatości powierzchni. Wybrano modele w których to analiza statystyczna wykazała duży wpływ układu kinematycznego na parametry wyjściowe. Na rys. 92-109 przedstawiono badania opracowane na podstawie wzorów (62), (64), (68), (69), (70) oraz (71).



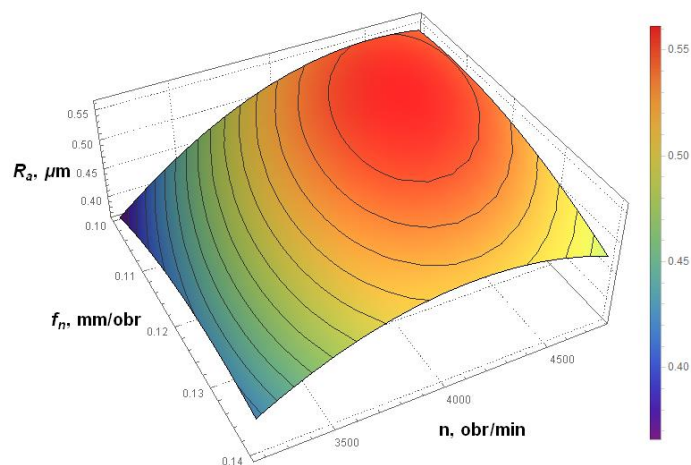
Rys. 92. Wpływ parametrów technologicznych w pierwszej kinematyce na parametr Ra otworu w stali C45 na podstawie równania (62)

Analizując rys. 92 dla pierwszego układu kinematycznego stwierdzono, że stosując najmniejszy posuw na obrót 0,1 mm/obr oraz najmniejsza wartość prędkości obrotowej wrzeciona 3183 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość parametru Ra.



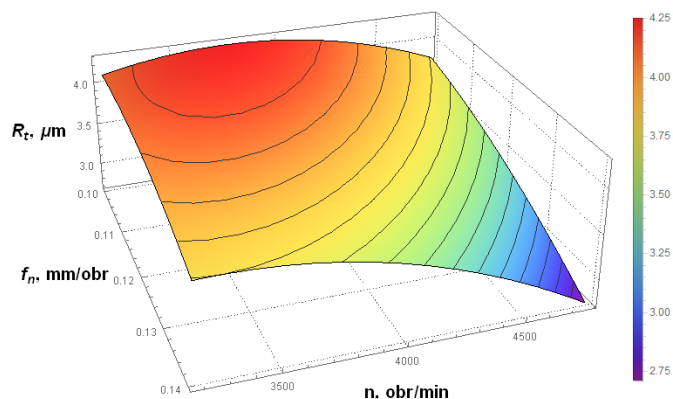
Rys. 93. Wpływ parametrów technologicznych w drugiej kinematyce na parametr Ra otworu w stali C45 na podstawie równania (62)

Analizując rys. 93 dla drugiego układu kinematycznego zauważono, że stosując najmniejszy posuw na obrót 0,1 mm/obr oraz największą wartość prędkości obrotowej wrzeciona 4775 obr/min, uzyskano najmniejszą parametru Ra. Małe wartości parametru Ra, uzyskano stosując największą wartość posuwu na obrót 0,14 mm/obr oraz prędkość obrotową wrzeciona wynoszącą 3183 obr/min lub 4775 obr/min.



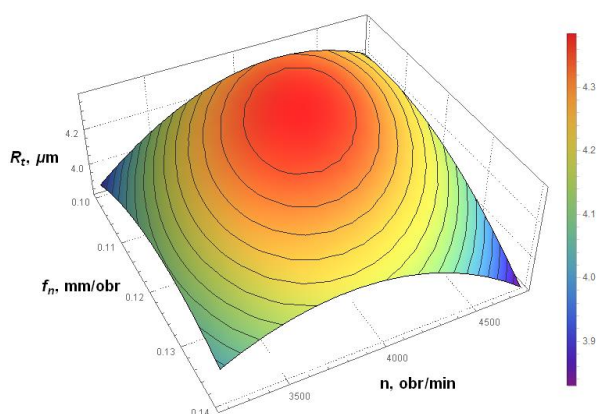
Rys. 94. Wpływ parametrów technologicznych w trzeciej kinematyce na parametr Ra otworu w stali C45 na podstawie równania (62)

Analizując rys. 94 dla trzeciego układu kinematycznego stwierdzono, że stosując najmniejszy posuw na obrót 0,1 mm/obr oraz najmniejszą wartość prędkości obrotowej wrzeciona 3183 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość parametru Ra. Zwiększenie posuwu na obrót przy zachowaniu najmniejszej wartości prędkości obrotowej wrzeciona pozwala również uzyskać małą wartość parametru Ra.



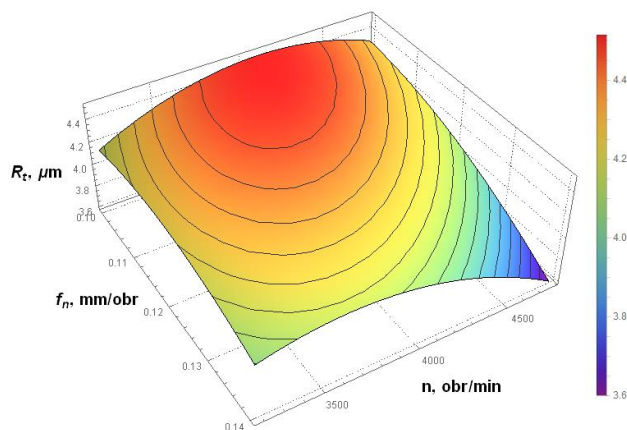
Rys. 95. Wpływ parametrów technologicznych w pierwszej kinematyce na parametr Rt otworu w stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT na podstawie równania (64)

Analizując rys. 95 dla pierwszego układu kinematycznego stwierdzono, że stosując największy badany posuw na obrót 0,14 mm/obr oraz największą wartość prędkości obrotowej wrzeciona 4775 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość parametru Rt. W tym przypadku zmiana prędkości obrotowej wrzeciona oraz posuwu na obrót pogarsza w znaczący sposób parametr Rt.



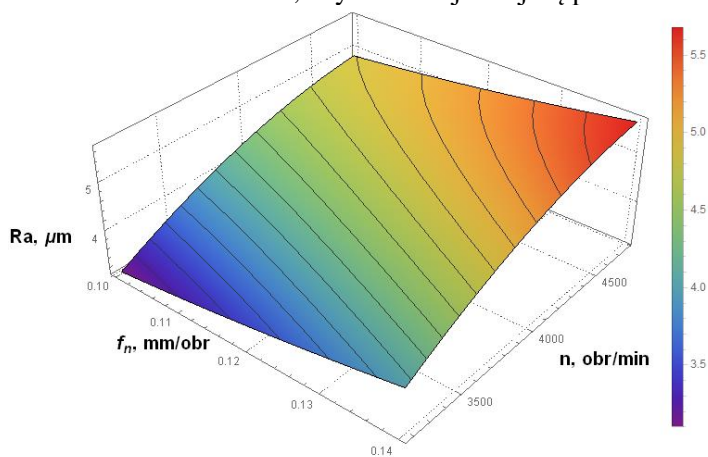
Rys. 96. Wpływ parametrów technologicznych w drugiej kinematyce na parametr Rt otworu w stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT na podstawie równania (64)

Analizując rys. 96 dla drugiego układu kinematycznego stwierdzono, że stosując najmniejszy posuw na obrót 0,1 mm/obr oraz najmniejszą wartość prędkości obrotowej wrzeciona 3183 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość parametru  $R_t$ . W tym przypadku zastosowania największej wartości posuwu 0,14 mm/obr oraz największej badanej wartości prędkości obrotowej wrzeciona, uzyskano również najmniejszą wartość parametru  $R_t$ .



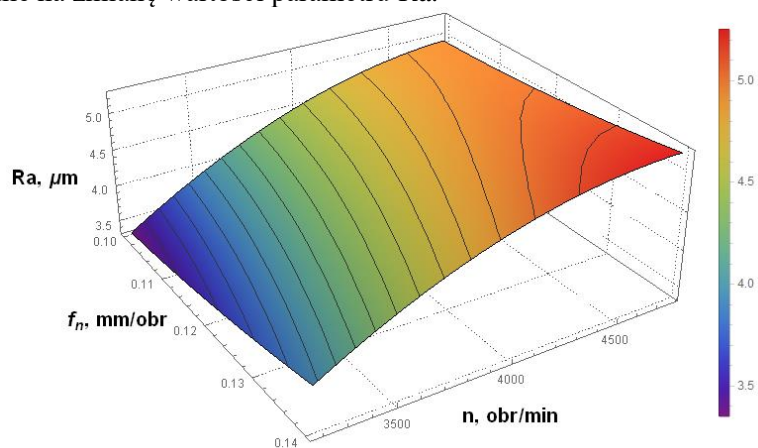
Rys. 97. Wpływ parametrów technologicznych w trzeciej kinematyce na parametr  $R_t$  otworu w stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT na podstawie równania (64)

Analizując rys. 97 dla trzeciego układu kinematycznego zauważono, że stosując największy posuw na obrót 0,14 mm/obr oraz największą wartość prędkości obrotowej wrzeciona 4775 obr/min, uzyskano najmniejszą parametru  $R_t$ .



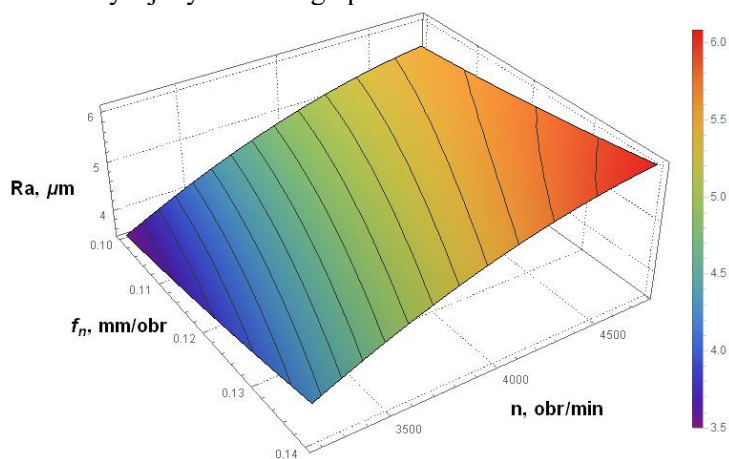
Rys. 98. Wpływ parametrów technologicznych w pierwszej kinematyce na parametr  $R_a$  otworu w stopie aluminium PA6 na podstawie równania (68)

Analizując rys. 98 dla pierwszego układu kinematycznego stwierdzono, że stosując posuw na obrót od 0,1 mm/obr do 0,11 mm/obr oraz najmniejszą wartość prędkości obrotowej wrzeciona 3183 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość parametru Ra. W tym przypadku zmiana prędkości obrotowej wrzeciona wpływa drastycznie na zmianę wartości parametru Ra.



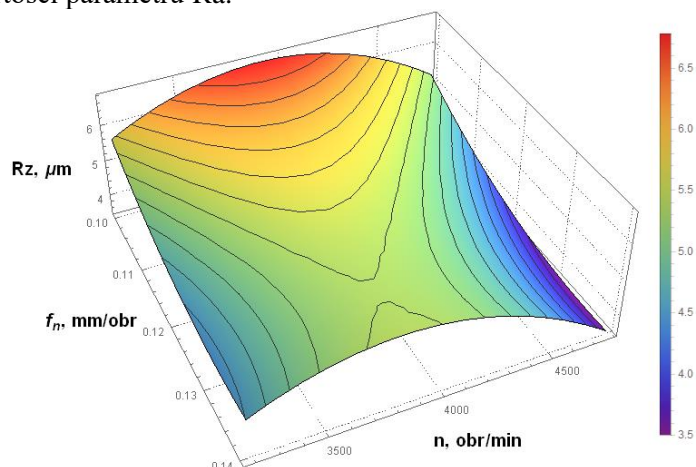
Rys. 99. Wpływ parametrów technologicznych w drugiej kinematyce na parametr Ra otworu w stopie aluminium PA6 na podstawie równania (68)

Analizując rys. 99 dla drugiego układu kinematycznego zauważono, że stosując posuw na obrót od 0,1 mm/obr do 0,115 mm/obr oraz najmniejszą wartość prędkości obrotowej wrzeciona 3183 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość parametru Ra. W tym przypadku zmiana prędkości obrotowej wrzeciona wpływa drastycznie na zmianę wartości wyżej wymienionego parametru.



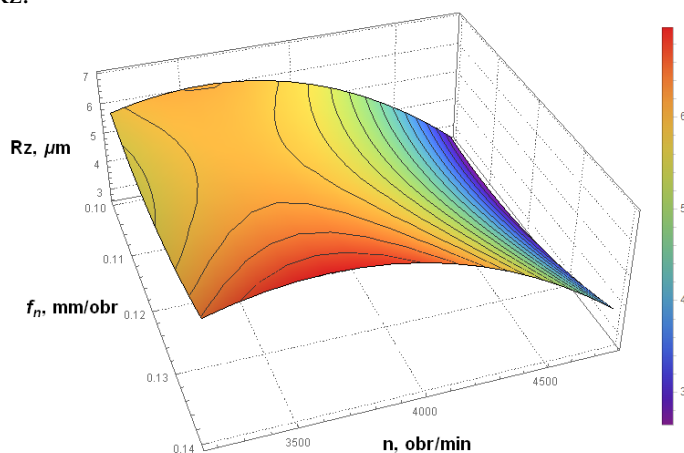
Rys. 100. Wpływ parametrów technologicznych w trzeciej kinematyce na parametr Ra otworu w stopie aluminium PA6 na podstawie równania (68)

Analizując rys. 100 dla trzeciego układu kinematycznego stwierdzono, że stosując najmniejszy posuw na obrót 0,1 mm/obr oraz najmniejszą wartość prędkości obrotowej wrzeciona 3183 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość parametru Ra. W tym przypadku zmiana prędkości obrotowej wrzeciona wpływa drastycznie na zmianę wartości parametru Ra.



Rys. 101. Wpływ parametrów technologicznych w pierwszej kinematyce na parametr Rz otworu w stopie mosiądzu MO58 na podstawie równania (69)

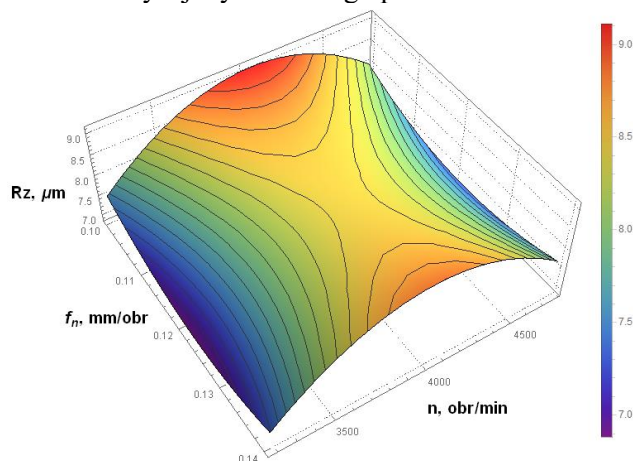
Analizując rys. 101 dla pierwszego układu kinematycznego stwierdzono, że stosując posuw na obrót od 0,12 mm/obr do 0,14 mm/obr oraz największą wartość prędkości obrotowej wrzeciona 4775 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość parametru Rz.



Rys. 102. Wpływ parametrów technologicznych w drugiej kinematyce na parametr Rz otworu w stopie mosiądzu MO58 na podstawie równania (69)

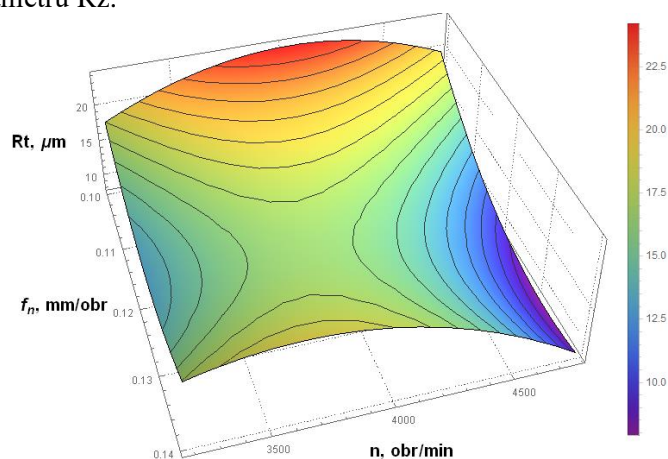


Analizując rys. 102 dla drugiego układu kinematycznego stwierdzono, że stosując posuw na obrót od 0,1 mm/obr do 0,13 mm/obr oraz największą wartość prędkości obrotowej wrzeciona 4775 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość parametru Rz. W tym przypadku zmiana prędkości obrotowej wrzeciona wpływa drastycznie na zmianę wartości parametru Rz. Jednakże wzrost posuwu na obrót nie zmienia bardzo wartość wyżej wymienionego parametru.



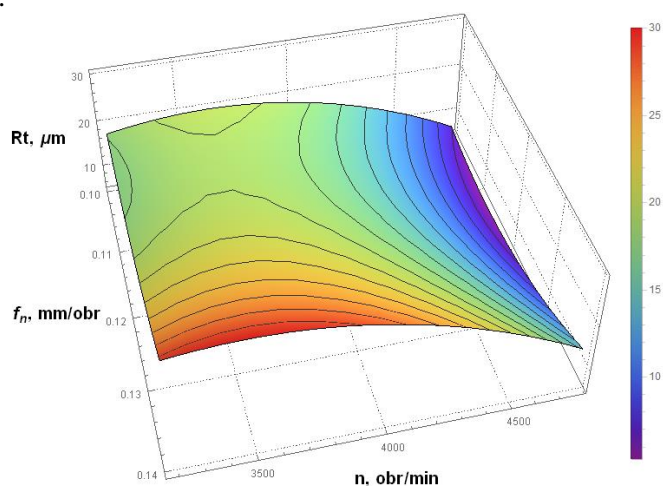
Rys. 103. Wpływ parametrów technologicznych w trzeciej kinematyce na parametr Rz otworu w stopie mosiądzu MO58 na podstawie równania (69)

Analizując rys. 103 dla trzeciego układu kinematycznego zauważono, że stosując posuw na obrót od 0,11 mm/obr do 0,14 mm/obr oraz wartość prędkości obrotowej wrzeciona wynosząca 3183 obr/min lub 4775 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość parametru Rz.



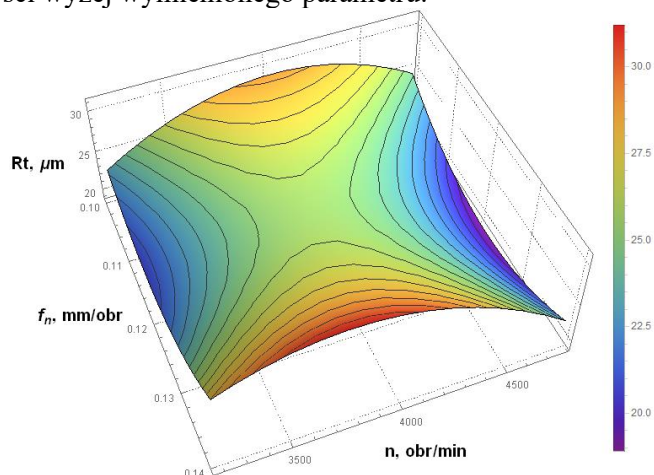
Rys. 104. Wpływ parametrów technologicznych w pierwszej kinematyce na parametr Rt otworu w stopie mosiądzu MO58 na podstawie równania (70)

Analizując rys. 104 dla pierwszego układu kinematycznego stwierdzono, że stosując posuw na obrót od 0,12 mm/obr do 0,14 mm/obr oraz największą wartość prędkości obrotowej wrzeciona 4775 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość parametru Rt.



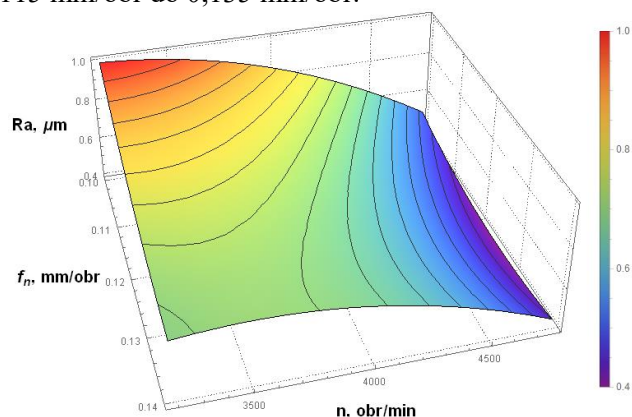
Rys. 105. Wpływ parametrów technologicznych w drugiej kinematyce na parametr Rt otworu w stopie mosiądzu MO58 na podstawie równania (70)

Analizując rys. 105 dla drugiego układu kinematycznego stwierdzono, że stosując posuw na obrót od 0,1 mm/obr do 0,125 mm/obr oraz największą wartość prędkości obrotowej wrzeciona 4775 obr/min, uzyskano najmniejszą parametru Rt. W tym przypadku zmiana prędkości obrotowej wrzeciona wpływa drastycznie na zmianę wartości wyżej wymienionego parametru.



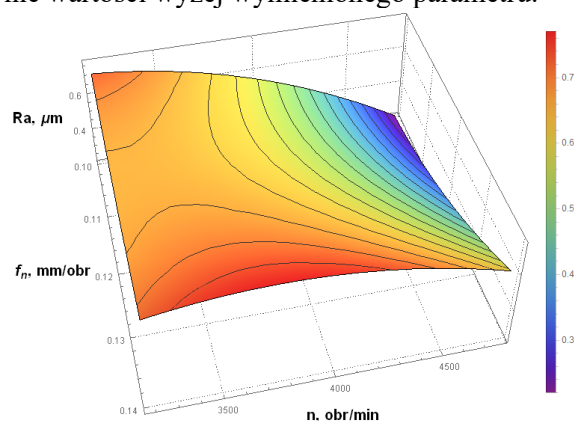
Rys. 106. Wpływ parametrów technologicznych w trzeciej kinematyce na parametr Rt otworu w stopie mosiądzu MO58 na podstawie równania (70)

Analizując rys. 106 dla trzeciego układu kinematycznego stwierdzono, że stosując posuw na obrót 0,11 mm/obr oraz najmniejszą wartość prędkości obrotowej wrzeciona 3183 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość parametru  $R_t$ . W tym przypadku istnieje również drugi przedział dla którego można uzyskać najmniejszą wartość parametru  $R_t$  dla prędkości obrotowej wrzeciona 4775 obr/min oraz posuwu na obrót od 0,115 mm/obr do 0,135 mm/obr.



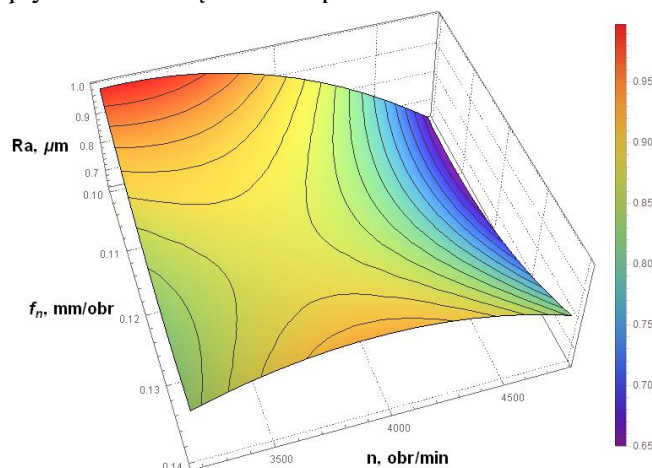
Rys. 107. Wpływ parametrów technologicznych w pierwszej kinematyce na parametr  $R_a$  otworu w stopie mosiądzu MO58 na podstawie równania (71)

Analizując rys. 107 dla pierwszego układu kinematycznego zauważono, że stosując posuw na obrót od 0,11 mm/obr do 0,14 mm/obr oraz największą wartość prędkości obrotowej wrzeciona 4775 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość parametru  $R_a$ . W tym przypadku zmiana prędkości obrotowej wrzeciona wpływa drastycznie na zmianę wartości parametru  $R_a$ . Jednakże zmiana posuwu na obrót nie zmienia gwałtownie wartości wyżej wymienionego parametru.



Rys. 108. Wpływ parametrów technologicznych w drugiej kinematyce na parametr  $R_a$  otworu stopie mosiądzu MO58 na podstawie równania (71)

Analizując rys. 108 dla pierwszego układu kinematycznego stwierdzono, że stosując najmniejszy posuw na obrót 0,1 mm/obr oraz największą wartość prędkości obrotowej wrzeciona 4775 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość parametru Ra. W tym przypadku zmiana prędkości obrotowej wrzeciona oraz posuwu na obrót drastycznie wpływa na zmianę wartości parametru Ra.



Rys. 109. Wpływ parametrów technologicznych w trzeciej kinematyce na parametr Ra otworu w stopie mosiądzu MO58 na podstawie równania (71)

Analizując rys. 109 dla drugiego układu kinematycznego zauważono, że stosując posuw na obrót od 0,1 mm/obr do 0,125 mm/obr oraz największą wartość prędkości obrotowej wrzeciona 4775 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość parametru Ra. W tym przypadku zmiana prędkości obrotowej wrzeciona lub posuwu na obrót wpływa drastycznie na zmianę wartości parametru Ra.

### Wnioski:

1. Najmniejsze wartości parametru Ra, dla otworu w stali C45, uzyskano dla następujących zakresów parametrów technologicznych: dla KIN I  $n = 3183, f_n = 0,1$ , lub  $n = 4775, f_n = 0,14$ , dla KIN II  $n = 3183, f_n = 0,1$  oraz dla KIN III  $n = 3183, f_n = 0,1$ .
2. Najmniejsze wartości parametru Rt, dla otworu w stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT, uzyskano dla następujących zakresów parametrów technologicznych: dla KIN I  $n = 4775, f_n = 0,14$ , dla KIN II  $n = 3183, f_n = 0,1$  lub  $n = 4775, f_n = 0,14$  oraz dla KIN III  $n = 4775, f_n = 0,14$ .
3. Najmniejsze wartości parametru Ra, dla otworu w stopie aluminium PA6, uzyskano dla następujących zakresów parametrów technologicznych: dla każdego układu kinematycznego były następujące  $n = 3183, f_n \in < 0,1; 0,11 >$ .

4. Najmniejsze wartości parametru Rz, dla otworu w stopie mosiądzu MO58, uzyskano dla następujących zakresów parametrów technologicznych: dla KIN I  $n = 4775, f_n \in < 0,12; 0,14 >$ , dla KIN II  $n = 4775, f_n \in < 0,1; 0,13 >$  oraz dla KIN III  $n = 3183, f_n \in < 0,11; 0,14 >$  lub  $n = 4775, f_n \in < 0,11; 0,14 >$ .
5. Najmniejsze wartości parametru Rt, dla otworu w stopie mosiądzu MO58, uzyskano dla następujących zakresów parametrów technologicznych: dla KIN I  $n = 4775, f_n \in < 0,12; 0,14 >$ , dla KIN II  $n = 4775, f_n \in < 0,1; 0,125 >$  oraz dla KIN III  $n = 4775, f_n \in < 0,115; 0,135 >$  lub  $n = 3183, f_n = 0,11$ .
6. Najmniejsze wartości parametru Ra, dla otworu w stopie mosiądzu MO58, uzyskano dla następujących zakresów parametrów technologicznych: dla KIN I  $n = 4775, f_n \in < 0,11; 0,14 >$ , dla KIN II  $n = 4775, f_n = 0,1$  oraz dla KIN III  $n = 4775, f_n \in < 0,1; 0,125 >$ .

### 5.3. Analiza zadziorów na wyjściu otworu

Ostatnim etapem badań była analiza zadziorów powstających na wyjściu wierconego otworu. W tym podrozdziale przedstawiono analizę wysokości oraz szerokości zadziorów na wyjściu wykonanych otworów.

#### 5.3.1. Analiza pomiarów geometrii wyrobów

Badania charakterystycznych wymiarów zadziorów zostały zrealizowane za pomocą mikroskopu Hirox KH-8700. Wykonano na nim pomiary wysokości ( $h_0$ ) oraz szerokości ( $b_f$ ) zadzioru na wyjściu otworu. Podczas badań stopu aluminium PA6 zadziory były bardzo małe. Zmierzone wartości powyższych parametrów zostały zestawione w tabeli 68. Aby umieścić wszystkie dane wybrano tablice ortogonalną L27. Kolorem zielonym określono wartości dla rozstępu 0 – 30%. Kolorem żółtym oznaczono przedział od 30 – 70 %. Natomiast kolorem czerwonym powyżej 70%. Rozstęp liczony jest jako różnica granicznych wartości.

Tabela 68. Wyniki wymiarów zadzioru otworu w każdym badanym materiale.

Kod	$h_0$ , $\mu\text{m}$	$b_f$ , $\mu\text{m}$	Kod	$h_0$ , $\mu\text{m}$	$b_f$ , $\mu\text{m}$	Kod	$h_0$ , $\mu\text{m}$	$b_f$ , $\mu\text{m}$	Kod	$h_0$ , $\mu\text{m}$	$b_f$ , $\mu\text{m}$
TiI1S	90	221	TiI1 Q	75	224	TiI1 M	202	442	TiI1I	111	137
TiII1 S	117	128	TiII1 Q	94	204	TiII1 M	313	494	TiII1 I	70	136
TiIII 1S	114	164	TiIII1 Q	84	177	TiIII1 M	146	375	TiIII 1I	74	133
TiI2S	66	134	TiI2 Q	65	165	TiI2 M	152	407	TiI2I	168	148

Kod	$h_0$ , $\mu\text{m}$	$b_f$ , $\mu\text{m}$	Kod	$h_0$ , $\mu\text{m}$	$b_f$ , $\mu\text{m}$	Kod	$h_0$ , $\mu\text{m}$	$b_f$ , $\mu\text{m}$	Kod	$h_0$ , $\mu\text{m}$	$b_f$ , $\mu\text{m}$
TiII2 S	77	98	TiII2 Q	71	139	TiII2 M	224	479	TiII2 I	74	168
TiIII 2S	91	128	TiIII2 Q	81	147	TiIII2 M	121	349	TiIII 2I	131	147
TiI3S	56	145	TiI3 Q	73	207	TiI3 M	153	384	TiI3I	108	149
TiII3 S	108	114	TiII3 Q	88	144	TiII3 M	206	341	TiII3 I	68	171
TiIII 3S	71	123	TiIII3 Q	86	154	TiIII3 M	110	384	TiIII 3I	80	150
TiI4S	77	157	TiI4 Q	67	214	TiI4 M	267	407	TiI4I	67	154
TiII4 S	66	204	TiII4 Q	79	185	TiII4 M	293	491	TiII4 I	114	162
TiIII 4S	69	171	TiIII4 Q	69	137	TiIII4 M	201	384	TiIII 4I	81	174
TiI5S	60	174	TiI5 Q	53	172	TiI5 M	211	437	TiI5I	87	185
TiII5 S	57	157	TiII5 Q	65	203	TiII5 M	201	467	TiII5 I	127	190
TiIII 5S	75	165	TiIII5 Q	74	124	TiIII5 M	160	387	TiIII 5I	86	205
TiI6S	41	204	TiI6 Q	51	188	TiI6 M	310	487	TiI6I	109	198
TiII6 S	51	167	TiII6 Q	57	154	TiII6 M	315	434	TiII6 I	68	207
TiIII 6S	76	201	TiIII6 Q	64	150	TiIII6 M	224	394	TiIII 6I	108	192
TiI7S	127	105	TiI7 Q	86	187	TiI7 M	198	398	TiI7I	122	178
TiII7 S	85	192	TiII7 Q	91	217	TiII7 M	259	347	TiII7 I	122	173
TiIII 7S	98	168	TiIII7 Q	98	147	TiIII7 M	137	242	TiIII 7I	123	174
TiI8S	63	149	TiI8 Q	52	221	TiI8 M	252	341	TiI8I	141	188
TiII8 S	91	204	TiII8 Q	89	187	TiII8 M	253	289	TiII8 I	156	185
TiIII 8S	78	187	TiIII8 Q	58	167	TiIII8 M	156	301	TiIII 8I	131	281

Kod	$h_0$ , $\mu\text{m}$	$b_f$ , $\mu\text{m}$	Kod	$h_0$ , $\mu\text{m}$	$b_f$ , $\mu\text{m}$	Kod	$h_0$ , $\mu\text{m}$	$b_f$ , $\mu\text{m}$	Kod	$h_0$ , $\mu\text{m}$	$b_f$ , $\mu\text{m}$
TiI9S	126	167	TiI9Q	68	231	TiI9M	222	328	TiI9I	166	209
TiII9S	110	174	TiII9Q	64	164	TiII9M	218	291	TiII9I	143	194
TiIII9S	95	196	TiIII9Q	55	182	TiIII9M	248	290	TiIII9I	97	174

Analizując tabelę 68 stwierdzono, że najbardziej odpowiednimi parametrami wejściowymi powodującymi powstanie najmniejszych zadziorów dla badanych materiałów były następujące zestawy: TiI2S (dla stali C45), TiII6Q, TiII6Q (dla stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT), TiIII7M, TiIII8M (dla stopu mosiądzu MO58), TiIII1I, TiIII1I, TiIII2I, TiIII3I, TiIII3I, TiI4I oraz TiIII9I (dla Inconelu 718). Powyższe zestawy parametrów wejściowych były najniższe mieszczące się w 30% strefie wszystkich wyników.

### 5.3.2. Analiza statystyczna ANOVA

Tak jak przedstawiono w podrozdziale 5.1.2. wybrano również w analizie statystycznej model regresji powierzchni ze względu na jej hybrydowość. Zbadano wpływ parametrów wejściowych ( $n$ ,  $f_n$ , KIN) na parametry wyjściowe ( $h_0$ ,  $b_f$ ). Poniżej w tabelach przedstawiono wyniki tych analiz.

Tabela 69. Analiza statystyczna ANOVA dla wysokości zadzioru powstającego na wyjściu otworu wywierconego w stali C45

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział %
Model	10141,4129	9	1126,8237	4,8952	0,0024	
Wyraz wolny	7674,6493	1	7674,6493	33,3403	0,0000	
$n$	1877,9105	1	1877,9105	8,1580	0,0109	11,08
$n^2$	1276,0635	1	1276,0635	5,5435	0,0308	7,53
$f_n$	5974,8542	1	5974,8542	25,9560	0,0001	35,27
$f_n^2$	4988,1667	1	4988,1667	21,6696	0,0002	29,44
KIN	69,1773	1	69,1773	0,3005	0,5907	0,41
$KIN^2$	75,6681	1	75,6681	0,3287	0,5739	0,45
$n \cdot f_n$	954,0833	1	954,0833	4,1447	0,0577	5,63
$n \cdot KIN$	552,8733	1	552,8733	2,4018	0,1396	3,26
$f_n \cdot KIN$	1172,7162	1	1172,7162	5,0945	0,0375	6,92
Błąd	3913,2538	17	230,1914			27,84

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział %
Łącznie	14054,6667	26				100,00

$R = 0,8495$ ;  $R^2 = 0,7216$

Z tabeli 69 wynika, że posuw na obrót zdominował pozostałe parametry wejściowe. Wpływał on w największym stopniu na wysokość zadziuru (wpływ wynoszący 70,99%). Kolejnym wpływowym parametrem wejściowym była prędkość obrotowa wrzeciona 23,06%, nieznaczny wpływ miał układ kinematyczny 5,95%.

Tabela 70. Analiza statystyczna ANOVA dla szerokości zadziuru powstającego na wyjściu otworu wywierconego w stali C45

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział %
Model	22051,4452	9	2450,1606	6,7773	0,0004	
Wyraz wolny	164,8368	1	164,8368	0,4559	0,5086	
n	2378,2102	1	2378,2102	6,5782	0,0201	10,11
$n^2$	823,8990	1	823,8990	2,2789	0,1495	3,50
$f_n$	1081,8733	1	1081,8733	2,9925	0,1018	4,60
$f_n^2$	3007,5741	1	3007,5741	8,3191	0,0103	12,78
KIN	2598,2362	1	2598,2362	7,1868	0,0158	11,04
$KIN^2$	119,9224	1	119,9224	0,3317	0,5722	0,51
$n \cdot f_n$	3434,0833	1	3434,0833	9,4988	0,0068	14,60
$n \cdot KIN$	844,1045	1	844,1045	2,3348	0,1449	3,59
$f_n \cdot KIN$	9240,4294	1	9240,4294	25,5594	0,0001	39,27
Błąd	6145,9622	17	361,5272			21,80
Łącznie	28197,4074	26				100,00

$R = 0,8843$ ;  $R^2 = 0,7820$

Z tabeli 70 wynika, że każdy z parametrów badanych miał znaczenie na szerokość zadziuru. Największy wpływ miał posuw na obrót 44,32%, układ kinematyczny 32,98% oraz prędkość obrotowa wrzeciona 22,7%.

Tabela 71. Analiza statystyczna ANOVA dla wysokości zadziuru powstającego na wyjściu otworu wywierconego w stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział %
Model	3719,3688	9	413,2632	5,8092	0,0009	
Wyraz wolny	463,3257	1	463,3257	6,5129	0,0206	
n	32,3644	1	32,3644	0,4549	0,5091	1,39
$n^2$	333,1860	1	333,1860	4,6836	0,0450	14,32



Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział %
$f_n$	457,8728	1	457,8728	6,4363	0,0213	19,68
$f_n^2$	896,2963	1	896,2963	12,5991	0,0025	38,52
KIN	5,1702	1	5,1702	0,0727	0,7907	0,22
KIN <sup>2</sup>	41,7434	1	41,7434	0,5868	0,4542	1,79
$n \cdot f_n$	560,3333	1	560,3333	7,8765	0,0121	24,08
$n \cdot KIN$	0,0276	1	0,0276	0,0004	0,9845	0,00
$f_n \cdot KIN$	0,0811	1	0,0811	0,0011	0,9735	0,00
Błąd	1209,3720	17	71,1395			24,54
Łącznie	4928,7407	26				100,00

$R = 0,8687$ ;  $R^2 = 0,7546$

Z tabeli 71 wynika, że posuw na obrót zdominował pozostałe parametry wejściowe. Wpływał on w największym stopniu na wysokość zadzioru (wpływ wynoszący 70,23%). Kolejnym wpływowym parametrem wejściowym była prędkość obrotowa wrzeczona 27,75%, nieznaczny wpływ miał układ kinematyczny 2,02%.

Tabela 72. Analiza statystyczna ANOVA dla szerokości zadzioru powstającego na wyjściu otworu wywierconego w stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział %
Model	17571,6378	9	1952,4042	5,4101	0,0014	
Wyraz wolny	3808,7045	1	3808,7045	10,5538	0,0047	
$n$	1578,6874	1	1578,6874	4,3745	0,0518	9,02
$n^2$	734,5337	1	734,5337	2,0354	0,1718	4,20
$f_n$	1536,1031	1	1536,1031	4,2565	0,0547	8,78
$f_n^2$	816,6667	1	816,6667	2,2630	0,1509	4,67
KIN	643,0278	1	643,0278	1,7818	0,1995	3,68
KIN <sup>2</sup>	8504,2398	1	8504,2398	23,5650	0,0001	48,61
$n \cdot f_n$	1323,0000	1	1323,0000	3,6660	0,0725	7,56
$n \cdot KIN$	2164,6285	1	2164,6285	5,9981	0,0255	12,37
$f_n \cdot KIN$	193,3177	1	193,3177	0,5357	0,4742	1,11
Błąd	6135,0289	17	360,8841			25,88
Łącznie	23706,6667	26				100,00

$R = 0,8609$ ;  $R^2 = 0,7412$

Z tabeli 72 wynika, że układ kinematyczny zdominował pozostałe parametry wejściowe. Wpływał on w największym stopniu na szerokość zadzioru (wpływ

wynoszący 59,03%). Kolejnym wpływowym parametrem wejściowym była prędkość obrotowa wrzeciona 23,19% oraz posuw na obrót 17,78%.

Tabela 73. Analiza statystyczna ANOVA dla wysokości zadzioru powstającego na wyjściu otworu wywierconego w stopie mosiądzu MO58

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział %
Model	70956,1668	9	7884,0185	7,2894	0,0002	
Wyraz wolny	138,7874	1	138,7874	0,1283	0,7246	
n	10482,5018	1	10482,5018	9,6919	0,0063	13,57
n <sup>2</sup>	5196,4431	1	5196,4431	4,8045	0,0426	6,73
f <sub>n</sub>	5898,2297	1	5898,2297	5,4534	0,0320	7,64
f <sub>n</sub> <sup>2</sup>	11674,7407	1	11674,7407	10,7942	0,0044	15,12
KIN	2500,0822	1	2500,0822	2,3115	0,1468	3,24
KIN <sup>2</sup>	31152,2065	1	31152,2065	28,8026	0,0001	40,33
n·f <sub>n</sub>	6816,3333	1	6816,3333	6,3022	0,0225	8,83
n·KIN	983,1922	1	983,1922	0,9090	0,3537	1,27
f <sub>n</sub> ·KIN	2531,4147	1	2531,4147	2,3405	0,1444	3,28
Błąd	18386,7962	17	1081,5762			20,58
Łącznie	89342,9630	26				100,00

R = 0,8912; R<sup>2</sup> = 0,7942

Z tabeli 73 wynika, że układ kinematyczny 45,85% uzyskał największy wpływ na wysokość zadzioru. Kolejnym wpływowym parametrem był posuw na obrót 28,8% oraz prędkość obrotowa wrzeciona 25,35%.

Tabela 74. Analiza statystyczna ANOVA dla szerokości zadzioru powstającego na wyjściu otworu wywierconego w stopie mosiądzu MO58

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział %
Model	107403,3394	9	11933,7044	12,8592	0,0000	
Wyraz wolny	12478,9704	1	12478,9704	13,4467	0,0019	
n	115,5241	1	115,5241	0,1245	0,7286	0,11
n <sup>2</sup>	16,5898	1	16,5898	0,0179	0,8952	0,02
f <sub>n</sub>	28099,9192	1	28099,9192	30,2791	0,0000	27,55
f <sub>n</sub> <sup>2</sup>	31008,0741	1	31008,0741	33,4128	0,0000	30,40
KIN	7940,0917	1	7940,0917	8,5559	0,0094	7,79
KIN <sup>2</sup>	25299,6441	1	25299,6441	27,2617	0,0001	24,81
n·f <sub>n</sub>	1281,3333	1	1281,3333	1,3807	0,2562	1,26

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział %
n·KIN	3439,1030	1	3439,1030	3,7058	0,0711	3,37
f <sub>n</sub> ·KIN	4785,2054	1	4785,2054	5,1563	0,0365	4,69
Błąd	15776,5124	17	928,0301			12,81
Łącznie	123179,8519	26				100,00

R = 0,9338; R<sup>2</sup> = 0,8719

Z tabeli 74 wynika, że posuw na obrót zdominował pozostałe parametry wejściowe. Wpływał on w największym stopniu na szerokość zadzioru (wpływ wynoszący 60,94%). Kolejnym wpływowym parametrem wejściowym był układ kinematyczny 36,62%, nieznaczny wpływ miała prędkość obrotowa wrzeciona 2,44%.

Tabela 75. Analiza statystyczna ANOVA dla wysokości zadzioru powstającego na wyjściu otworu wywierconego w Inconelu 718.

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział %
Model	12953,6371	9	1439,293	6,4277	0,0005	
Wyraz wolny	1804,3087	1	1804,309	8,0578	0,0113	
n	991,9494	1	991,9494	4,4299	0,0505	16,09
n <sup>2</sup>	1271,4728	1	1271,473	5,6782	0,0291	20,62
f <sub>n</sub>	654,636	1	654,636	2,9235	0,1055	10,62
f <sub>n</sub> <sup>2</sup>	1360,0185	1	1360,019	6,0736	0,0247	22,06
KIN	301,5366	1	301,5366	1,3466	0,2619	4,89
KIN <sup>2</sup>	1018,2224	1	1018,222	4,5472	0,0479	16,52
n·f <sub>n</sub>	177,584	1	177,584	0,7931	0,3856	2,88
n·KIN	184,0126	1	184,0126	0,8218	0,3773	2,98
f <sub>n</sub> ·KIN	205,4368	1	205,4368	0,9175	0,3516	3,33
Błąd	3806,6592	17	223,9211			22,71
Łącznie	16760,2963	26				100

R = 0,8791; R<sup>2</sup> = 0,7729

Z tabeli 75 wynika, że każdy z parametrów wejściowych miał podobny wpływ na wysokość zadzioru. Prędkość obrotowa wrzeciona 39,65%, posuw na obrót 35,79% oraz układ kinematyczny 24,56%.

Tabela 76. Analiza statystyczna ANOVA dla szerokości zadzioru powstającego na wyjściu otworu wywierconego w Inconelu 718.

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział %
Model	16498,91	9	1833,213	4,009144	0,006685	

Efekt	SS	DF	MS	F	p	Udział %
Wyraz wolny	10796,9419	1	10796,94	23,6124	0,0001	
n	3078,3147	1	3078,315	6,7321	0,0189	11,71
n <sup>2</sup>	4588,4014	1	4588,401	10,0346	0,0056	17,46
f <sub>n</sub>	7264,4713	1	7264,471	15,887	0,001	27,64
f <sub>n</sub> <sup>2</sup>	10278,2407	1	10278,24	22,478	0,0002	39,10
KIN	144,9856	1	144,9856	0,3171	0,5807	0,55
KIN <sup>2</sup>	2,8487	1	2,8487	0,0062	0,938	0,01
n·f <sub>n</sub>	734,0779	1	734,0779	1,6054	0,2222	2,79
n·KIN	6,8027	1	6,8027	0,0149	0,9044	0,03
f <sub>n</sub> ·KIN	188,4505	1	188,4505	0,4121	0,5295	0,72
Błąd	7773,3837	17	457,2579			32,03
Łącznie	24272,2937	26				100

R = 0,8245; R<sup>2</sup> = 0,6797

Z tabeli 76 wynika, że posuw na obrót zdominował pozostałe parametry wejściowe. Wpływał on w największym stopniu na szerokość zadzioru (wpływ wynoszący 68,49%). Kolejnym wpływowym parametrem wejściowym była prędkość obrotowa wrzeczona 30,58%, nieznaczny wpływ miał układ kinematyczny 0,93%.

Z tabel 69-76 nasuwa się wniosek, że poniższe modele są istotne gdyż wartości p są mniejsze niż 0,05.

Stosując równanie hybrydowe (39) zbudowano modele matematyczne dla wysokości oraz szerokości zadzioru na wyjściu dla każdego badanego materiału. Poniżej zapisano równania dotyczące każdego wyżej wymienionego parametru oraz badanych materiałów.

$$\begin{aligned}
 h_{0C45} = & 1719,03 - 2,41 \cdot 10^{-1} \cdot n + 2,30 \cdot 10^{-5} \cdot n^2 + \\
 & -19759,16 \cdot f_n + 72083,33 \cdot f_n^2 + 4,87 \cdot 10^{-3} \cdot KIN + \\
 & -2,08 \cdot 10^{-7} \cdot KIN^2 + 5,6 \cdot 10^{-1} \cdot n \cdot f_n + 2,21 \cdot 10^{-6} \cdot n \cdot KIN + \\
 & -1,22 \cdot 10^{-1} \cdot f_n \cdot KIN
 \end{aligned} \tag{75}$$

$$\begin{aligned}
 b_{fC45} = & 251,93 - 2,72 \cdot 10^{-1} \cdot n + 1,84 \cdot 10^{-5} \cdot n^2 + \\
 & +8408 \cdot f_n - 55972,22 \cdot f_n^2 - 2,98 \cdot 10^{-2} \cdot KIN + \\
 & -2,62 \cdot 10^{-7} \cdot KIN^2 + 1,06 \cdot n \cdot f_n - 2,73 \cdot 10^{-6} \cdot n \cdot KIN + \\
 & +3,44 \cdot 10^{-1} \cdot f_n \cdot KIN
 \end{aligned} \tag{76}$$

$$\begin{aligned}
h_{0_{40HM}} = & 422,37 - 3,17 \cdot 10^{-2} \cdot n + 1,17 \cdot 10^{-5} \cdot n^2 + \\
& -5469,87 \cdot f_n + 30555,55 \cdot f_n^2 - 1,33 \cdot 10^{-3} \cdot KIN + \\
& -1,54 \cdot 10^{-7} \cdot KIN^2 - 4,29 \cdot 10^{-1} \cdot n \cdot f_n - 1,56 \cdot 10^{-8} \cdot n \cdot KIN + \\
& -1,01 \cdot 10^{-3} \cdot f_n \cdot KIN
\end{aligned} \tag{77}$$

$$\begin{aligned}
b_{f_{40HM}} = & 1211 - 2,21 \cdot 10^{-1} \cdot n + 1,74 \cdot 10^{-5} \cdot n^2 + \\
& -10018,78 \cdot f_n + 29166,66 \cdot f_n^2 + 1,48 \cdot 10^{-2} \cdot KIN + \\
& +2,2 \cdot 10^{-6} \cdot KIN^2 + 6,59 \cdot 10^{-1} \cdot n \cdot f_n - 4,38 \cdot 10^{-6} \cdot n \cdot KIN + \\
& +4,97 \cdot 10^{-2} \cdot f_n \cdot KIN
\end{aligned} \tag{78}$$

$$\begin{aligned}
h_{0_{MO58}} = & 231,16 - 5,71 \cdot 10^{-1} \cdot n + 4,64 \cdot 10^{-5} \cdot n^2 + \\
& +19632,05 \cdot f_n - 110277,77 \cdot f_n^2 + 2,93 \cdot 10^{-2} \cdot KIN + \\
& +4,22 \cdot 10^{-6} \cdot KIN^2 + 1,49 \cdot n \cdot f_n - 2,95 \cdot 10^{-6} \cdot n \cdot KIN + \\
& -1,8 \cdot 10^{-1} \cdot f_n \cdot KIN
\end{aligned} \tag{79}$$

$$\begin{aligned}
b_{f_{MO58}} = & -2192,02 - 5,99 \cdot 10^{-2} \cdot n - 2,62 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + \\
& +42850,64 \cdot f_n - 179722,22 \cdot f_n^2 + 5,22 \cdot 10^{-2} \cdot KIN + \\
& +3,8 \cdot 10^{-6} \cdot KIN^2 + 6,49 \cdot 10^{-1} \cdot n \cdot f_n - 5,52 \cdot 10^{-6} \cdot n \cdot KIN + \\
& -2,47 \cdot 10^{-1} \cdot f_n \cdot KIN
\end{aligned} \tag{80}$$

$$\begin{aligned}
h_{0_{I718}} = & 675,48 - 8,59 \cdot 10^{-1} \cdot n + 5,76 \cdot 10^{-4} \cdot n^2 + \\
& -7399,25 \cdot f_n + 66913,58 \cdot f_n^2 - 4,66 \cdot 10^{-2} \cdot KIN + \\
& +1,9 \cdot 10^{-5} \cdot KIN^2 - 1,61 \cdot n \cdot f_n + 3,2 \cdot 10^{-5} \cdot n \cdot KIN + \\
& +3,41 \cdot 10^{-1} \cdot f_n \cdot KIN
\end{aligned} \tag{81}$$

$$\begin{aligned}
b_{f_{I718}} = & 1652,38 - 1,51 \cdot n + 1,09 \cdot 10^{-3} \cdot n^2 + \\
& -2464,47 \cdot f_n + 183950,61 \cdot f_n^2 - 3,23 \cdot 10^{-2} \cdot KIN + \\
& -1 \cdot 10^{-6} \cdot KIN^2 - 3,27 \cdot n \cdot f_n + 6,16 \cdot 10^{-6} \cdot n \cdot KIN + \\
& +3,27 \cdot 10^{-1} \cdot f_n \cdot KIN
\end{aligned} \tag{82}$$

gdzie:  $n$  – wartość prędkości obrotowej wrzeciona,  $f_n$  – wartość posuwu na obrót,  $KIN$  – układ kinematyczny,  $n \cdot f_n$  – interakcja wartości prędkości obrotowej wrzeciona z wartością posuwu na obrót,  $n \cdot KIN$  – interakcja wartości prędkości obrotowej wrzeciona z układem kinematycznym,  $f_n \cdot KIN$  – interakcja wartości posuwu na obrót z układem kinematycznym.

W tabelach poniżej zestawiono wartości zmierzone z przewidywanymi. Wartości te wskazują na dokładność modeli gdyż wartości są bardzo zbliżone do siebie. Dla stali C45 wartości błędów względnych były następujące: dla  $h_0$  13% oraz dla  $b_f$  7%. Dla stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT wartości błędów względnych były następujące: dla  $h_0$  7% oraz dla  $b_f$  6%. Dla stopu mosiądzu MO58 wartości błędów

względnych były następujące: dla  $h_0$  9% oraz dla  $b_f$  4%. Dla Inconelu 718 wartości błędów względnych były następujące: dla  $h_0$  14% oraz dla  $b_f$  5%.

Tabela 77. Zestawione wyniki badań eksperymentalnych z przewidywanymi dla wysokości oraz szerokości zadziuru na wyjściu otworu w stali C45.

Kodowanie	Eksperymentalne wyniki		Przewidywane wyniki	
	$h_0, \mu\text{m}$	$b_f, \mu\text{m}$	$h_0, \mu\text{m}$	$b_f, \mu\text{m}$
TiI1S	90	221	98	184
TiII1S	117	128	114	134
TiIII1S	114	164	111	165
TiI2S	66	134	63	160
TiII2S	77	98	91	101
TiIII2S	91	128	80	134
TiI3S	56	145	60	155
TiII3S	108	114	94	94
TiIII3S	71	123	79	127
TiI4S	77	157	76	173
TiII4S	66	204	69	189
TiIII4S	69	171	78	187
TiI5S	60	174	49	171
TiII5S	57	157	57	167
TiIII5S	75	165	56	173
TiI6S	41	204	53	188
TiII6S	51	167	71	171
TiIII6S	76	201	64	182
TiI7S	127	105	113	117
TiII7S	85	192	82	198
TiIII7S	98	168	102	163
TiI8S	63	149	92	137
TiII8S	91	204	81	187
TiIII8S	78	187	90	166
TiI9S	126	167	103	177
TiII9S	110	174	105	203
TiIII9S	95	196	106	193

Tabela 78. Zestawione wyniki badań eksperymentalnych z przewidywanymi dla wysokości oraz szerokości zadzioru na wyjściu otworu w stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT.

Kodowanie	Eksperymentalne wyniki		Przewidywane wyniki	
	$h_0, \mu\text{m}$	$b_f, \mu\text{m}$	$h_0, \mu\text{m}$	$b_f, \mu\text{m}$
TiI1Q	75	224	74	216
TiII1Q	94	204	89	207
TiIII1Q	84	177	85	161
TiI2Q	65	165	68	195
TiII2Q	71	139	80	160
TiIII2Q	81	147	76	142
TiI3Q	73	207	76	193
TiII3Q	88	144	86	143
TiIII3Q	86	154	82	145
TiI4Q	67	214	66	197
TiII4Q	79	185	81	197
TiIII4Q	69	137	77	147
TiI5Q	53	172	53	187
TiII5Q	65	203	65	160
TiIII5Q	74	124	61	138
TiI6Q	51	188	54	196
TiII6Q	57	154	63	153
TiIII6Q	64	150	60	152
TiI7Q	86	187	82	201
TiII7Q	91	217	96	211
TiIII7Q	98	147	93	156
TiI8Q	52	221	62	202
TiII8Q	89	187	74	183
TiIII8Q	58	167	70	158
TiI9Q	68	231	56	223
TiII9Q	64	164	66	186
TiIII9Q	55	182	63	182

Tabela 79. Zestawione wyniki badań eksperymentalnych z przewidywanymi dla wysokości oraz szerokości zadzioru na wyjściu otworu w stopie mosiądzu MO58

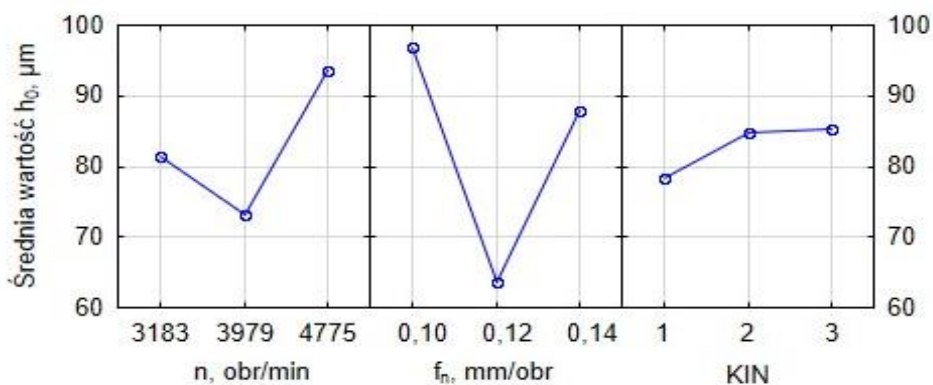
Kodowanie	Eksperymentalne wyniki		Przewidywane wyniki	
	$h_0, \mu\text{m}$	$b_r, \mu\text{m}$	$h_0, \mu\text{m}$	$b_r, \mu\text{m}$
TiI1M	202	442	200	417
TiII1M	313	494	296	501
TiIII1M	146	375	151	372
TiI2M	152	407	152	409
TiII2M	224	479	213	444
TiIII2M	121	349	115	366
TiI3M	153	384	164	395
TiII3M	206	341	198	395
TiIII3M	110	384	138	356
TiI4M	267	407	255	456
TiII4M	293	491	316	493
TiIII4M	201	384	189	388
TiI5M	211	437	228	454
TiII5M	201	467	260	450
TiIII5M	160	387	177	392
TiI6M	310	487	261	447
TiII6M	315	434	272	415
TiIII6M	224	394	224	393
TiI7M	198	398	222	352
TiII7M	259	347	249	341
TiIII7M	137	242	139	260
TiI8M	252	341	216	356
TiII8M	253	289	219	312
TiIII8M	156	301	150	274
TiI9M	222	328	270	355
TiII9M	218	291	258	292
TiIII9M	248	290	221	285



Tabela 80. Zestawione wyniki badań eksperymentalnych z przewidywanymi dla wysokości oraz szerokości zadziuru na wyjściu otworu w Inconelu 718

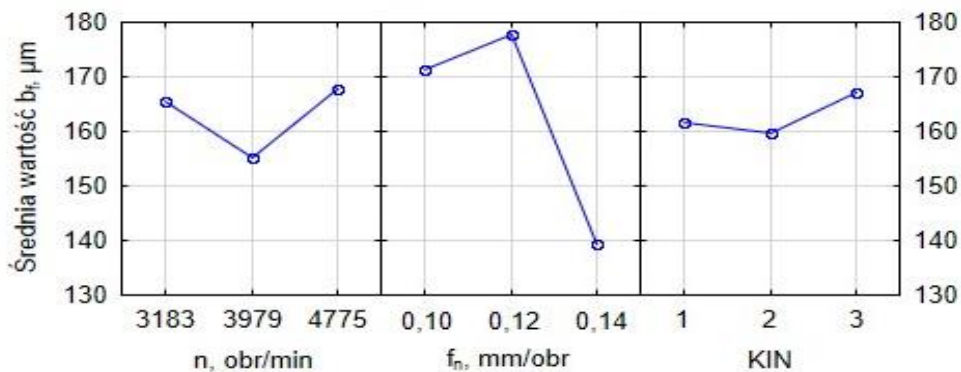
Kodowanie	Eksperymentalne wyniki		Przewidywane wyniki	
	$h_0, \mu\text{m}$	$b_f, \mu\text{m}$	$h_0, \mu\text{m}$	$b_f, \mu\text{m}$
TiI1I	111	137	110	119
TiII1I	70	136	81	132
TiIII1I	74	133	82	137
TiI2I	168	148	138	151
TiII2I	74	168	92	165
TiIII2I	131	147	106	166
TiI3I	108	149	121	147
TiII3I	68	171	67	161
TiIII3I	80	150	88	160
TiI4I	67	154	86	162
TiII4I	114	162	90	164
TiIII4I	81	174	75	175
TiI5I	87	185	120	192
TiII5I	127	190	102	197
TiIII5I	86	205	102	203
TiI6I	109	198	108	186
TiII6I	68	207	77	193
TiIII6I	108	192	87	195
TiI7I	122	178	105	178
TiII7I	122	173	143	169
TiIII7I	123	174	111	186
TiI8I	141	188	145	207
TiII8I	156	185	155	202
TiIII8I	131	281	141	213
TiI9I	166	209	140	199
TiII9I	143	194	131	198
TiIII9I	97	174	129	204

Na rys. 110-117 przedstawiono średnie wartości wysokości oraz szerokości zadziuru na wyjściu otworu ( $h_0$  oraz  $b_f$ ) w stosunku do badanych parametrów wejściowych ( $n$ ,  $f_n$  oraz KIN) dla stali C45, stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT, stopu mosiądzu MO58 oraz Inconelu 718.



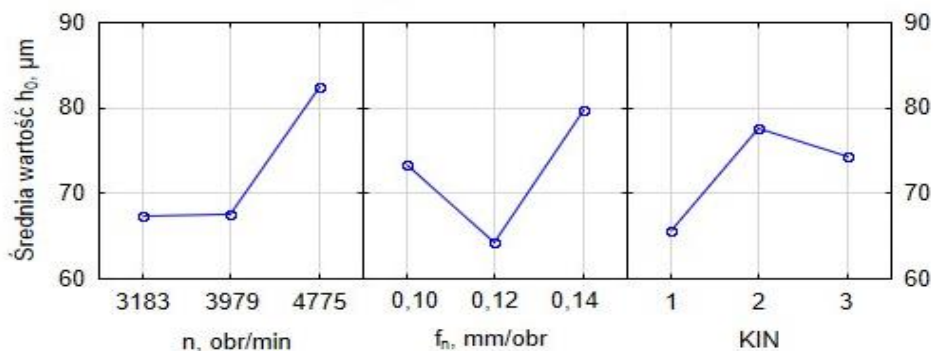
Rys. 110. Wykresy efektów głównych wysokości zadzioru powstałego na wyjściu otworu dla stali C45

Z danych przedstawionych na rys. 110 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 3979 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość wysokości zadzioru wynoszącą 73,6  $\mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość wysokości zadzioru na poziomie ( $h_0 = 63,6 \mu\text{m}$ ) jest 0,12 mm/obr. Wykorzystując w procesie wiercenia stali C45 układ kinematyczny pierwszy, uzyskano najmniejszą wartość wysokości zadzioru wynoszącą 78,4  $\mu\text{m}$ .



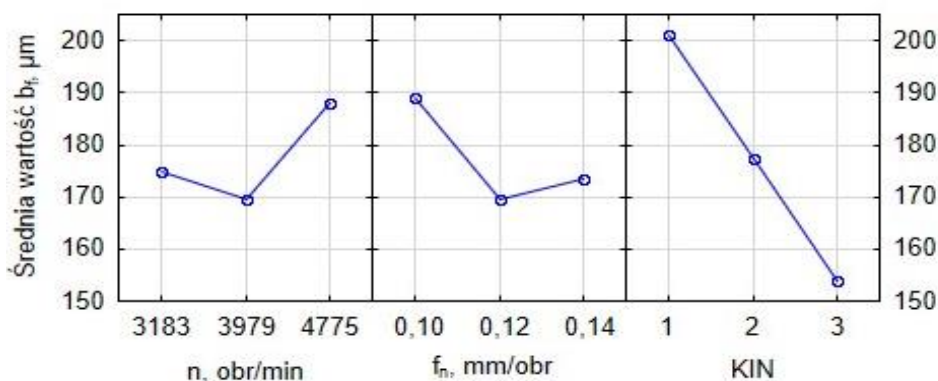
Rys. 111. Wykresy efektów głównych szerokości zadzioru powstałego na wyjściu otworu dla stali C45

Z rys. 111 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 3979 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość szerokości zadzioru wynoszącą 155,1  $\mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość szerokości zadzioru na poziomie ( $b_f = 139,1 \mu\text{m}$ ) jest 0,14 mm/obr. Wykorzystując w procesie wiercenia układ kinematyczny drugi, uzyskano najmniejszą wartość szerokości zadzioru wynoszącą 159,1  $\mu\text{m}$ .



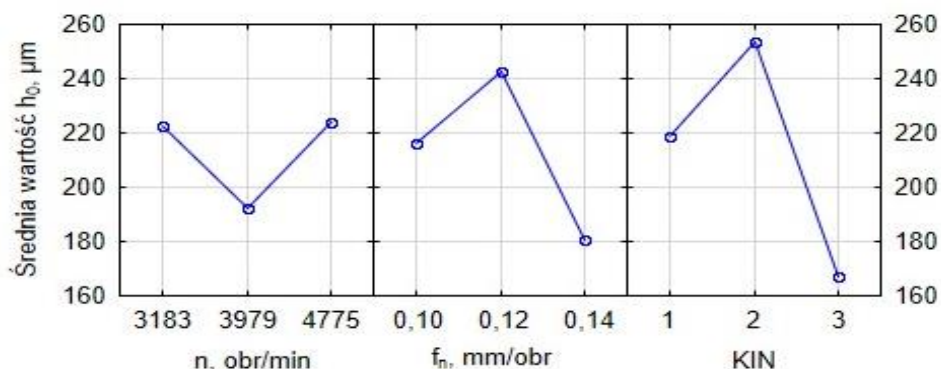
Rys. 112. Wykresy efektów głównych wysokości zadzioru powstałego na wyjściu otworu dla stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT

Z danych przedstawionych na rys. 112 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 3183 obr/min oraz 3979 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość wysokości zadzioru wynoszącą 67,4  $\mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość wysokości zadzioru na poziomie ( $h_0 = 64,3 \mu\text{m}$ ) jest 0,12 mm/obr. Wykorzystując układ kinematyczny pierwszy, uzyskano najmniejszą wartość wysokości zadzioru wynoszącą 65,6  $\mu\text{m}$ .



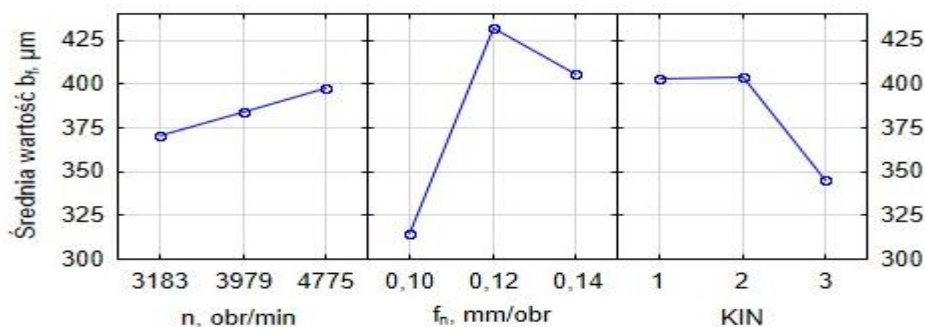
Rys. 113. Wykresy efektów głównych szerokości zadzioru powstałego na wyjściu otworu dla stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT

Z rys. 113 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 3979 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość szerokości zadzioru wynoszącą 169,4  $\mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość szerokości zadzioru na poziomie ( $b_f = 169,7 \mu\text{m}$ ) jest 0,12 mm/obr. Wykorzystując w procesie wiercenia stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT układ kinematyczny trzeci, uzyskano najmniejszą wartość szerokości zadzioru wynoszącą 153,9  $\mu\text{m}$ .



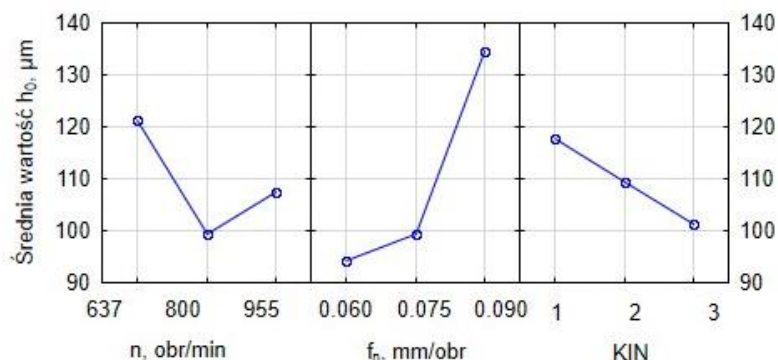
Rys. 114. Wykresy efektów głównych wysokości zadzioru powstałego na wyjściu otworu dla stopu mosiądzu MO58

Z danych przedstawionych na rys. 114 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 3979 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość wysokości zadzioru wynoszącą 192,2  $\mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość wysokości zadzioru na poziomie ( $h_0 = 180,8 \mu\text{m}$ ) jest 0,14 mm/obr. Wykorzystując układ kinematyczny trzeci, uzyskano najmniejszą wartość wysokości zadzioru wynoszącą 167  $\mu\text{m}$ .



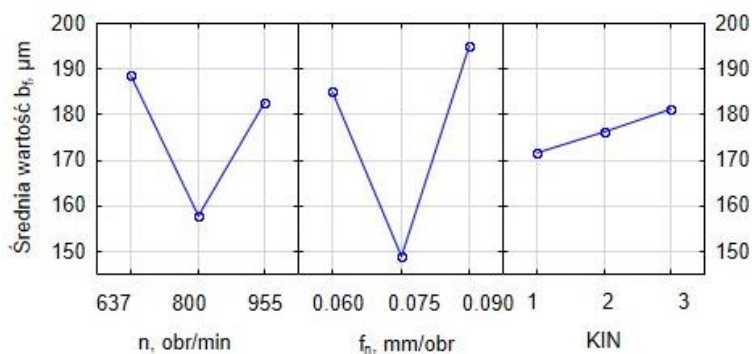
Rys. 115. Wykresy efektów głównych szerokości zadzioru powstałego na wyjściu otworu dla stopu mosiądzu MO58

Z na rys. 115 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 3183 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość szerokości zadzioru wynoszącą 370,3  $\mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość szerokość zadzioru na poziomie ( $b_f = 314,1 \mu\text{m}$ ) jest 0,11 mm/obr. Wykorzystując w procesie wiercenia w stopie mosiądzu MO58 układ kinematyczny trzeci, uzyskano najmniejszą wartość szerokość zadzioru wynoszącą 345,1  $\mu\text{m}$ . Zauważono, że zmniejszenie wartości prędkości obrotowej wrzeciona powoduje zmniejszenie wartości szerokości zadzioru.



Rys. 116. Wykresy efektów głównych wysokości zadzioru powstałego na wyjściu otworu dla Inconelu 718

Z rys. 116 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 800 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość wysokości zadzioru wynoszącą 99,3  $\mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość wysokości zadzioru na poziomie ( $h_0 = 94,1 \mu\text{m}$ ) jest 0,06 mm/obr. Wykorzystując w procesie wiercenia Inconelu 718 układ kinematyczny trzeci, uzyskano najmniejszą wartość wysokości zadzioru wynoszącą 101,2  $\mu\text{m}$ . Zauważono, że zmniejszenie wartości posuwu na obrót powoduje zmniejszenie wartości wysokości zadzioru.



Rys. 117. Wykresy efektów głównych szerokości zadzioru powstałego na wyjściu otworu dla Inconelu 718

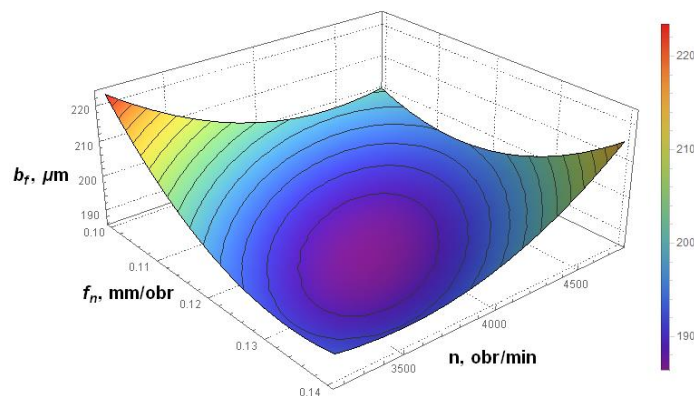
Z danych przedstawionych na rys. 117 wynika, że stosując prędkość obrotową wynoszącą 800 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość szerokości zadzioru wynoszącą 157,9  $\mu\text{m}$ . Najkorzystniejszą wartością posuwu na obrót, dla której uzyskano wartość wysokości zadzioru na poziomie ( $b_f = 148,8 \mu\text{m}$ ) jest 0,075 mm/obr. Wykorzystując układ kinematyczny pierwszy, uzyskano najmniejszą wartość szerokości zadzioru wynoszącą 171,8  $\mu\text{m}$ .

#### Wnioski:

1. Przedstawione równania posłużą do przewidywania wysokości oraz szerokości zadzioru na wyjściu otworu dla każdego badanego materiału.
2. Zbudowane modele matematyczne cechują się dobrą korelacją w stosunku do badań eksperymentalnych dla stali C45 parametr  $h_0$   $R^2 = 72,16\%$ , parametr  $b_f$   $R^2 = 78,2\%$ . Dla stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT parametr  $h_0$   $R^2 = 75,46\%$ , parametr  $b_f$   $R^2 = 74,12\%$ . Dla stopu mosiądzu MO58 parametr  $h_0$   $R^2 = 79,42\%$ , parametr  $b_f$   $R^2 = 87,19\%$ . Dla Inconelu 718 parametr  $h_0$   $R^2 = 77,29\%$ , parametr  $b_f$   $R^2 = 67,97\%$ .
3. Zbudowane modele matematyczne są istotne wartości  $p$  są mniejsze niż 0,05.
4. Układ kinematyczny ma bardzo duży wpływ w ocenie następujących parametrów: dla stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT w parametrze  $b_f$  59,03%, dla stopu mosiądzu MO58 w parametrze  $h_0$  45,85% oraz w parametrze  $b_f$  36,62%.
5. Wybór układu kinematycznego zależy od obrabianego materiału. W stali C45, stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT oraz Inconelu 718 nie można wskazać konkretnego układu kinematycznego ze względu na to, że dla każdego parametru wybrano inny najkorzystniejszy układ kinematyczny. Natomiast dla stopu mosiądzu MO58 najkorzystniejszym układem kinematycznym był KIN III osiągnął on najmniejsze wartości w każdym badanym parametrze.

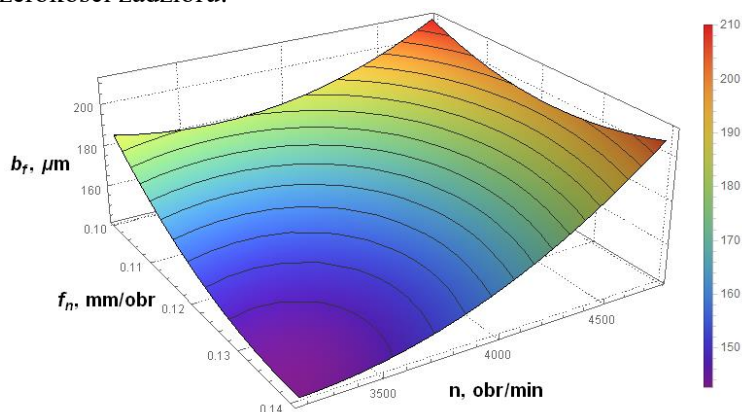
### 5.3.3. Badania symulacyjne wybranych modeli

W tym podrozdziale przedstawiono wyniki badań symulacyjnych zbudowanych modeli dla wysokości oraz szerokości zadzioru na wyjściu otworu. Wybrane zostaną te modele na które jednym z najbardziej oddziaływującym czynnikiem na parametr wyjściowy był układ kinematyczny (posiadał on ponad 40% wpływu na parametr zadzioru). Na rys. 118-123 przedstawiono badania symulacyjne wzorów (78) oraz (79).



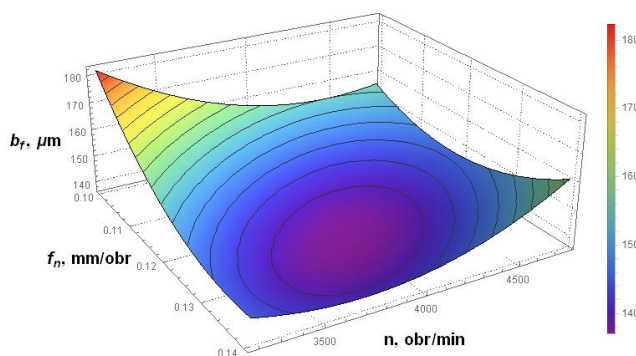
Rys. 118. Wpływ parametrów technologicznych w pierwszej kinematyce na szerokość zadzioru na wyjściu otworu w stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT na podstawie równania (78)

Analizując rys. 118 dla pierwszego układu kinematycznego stwierdzono, że stosując posuw na obrót od 0,12 mm/obr do 0,135 mm/obr oraz wartość prędkości obrotowej wrzeciona od 3500 obr/min do 4200 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość szerokości zadzioru.



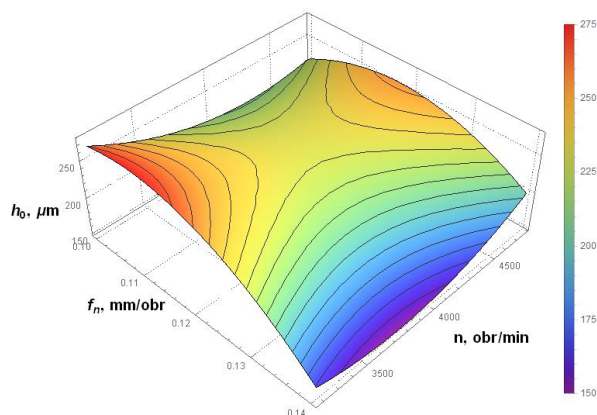
Rys. 119. Wpływ parametrów technologicznych w drugiej kinematyce na szerokość zadzioru na wyjściu otworu w stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT na podstawie równania (78)

Analizując rys. 119 dla drugiego układu kinematycznego zauważono, że stosując posuw na obrót od 0,13 mm/obr do 0,14 mm/obr oraz wartość prędkości obrotowej wrzeciona od 3183 obr/min do 3500 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość szerokości zadzioru. W tym przypadku zmiana prędkości obrotowej wrzeciona lub posuwu na obrót wpływa drastycznie na zmianę wartości wyżej wymienionego parametru.



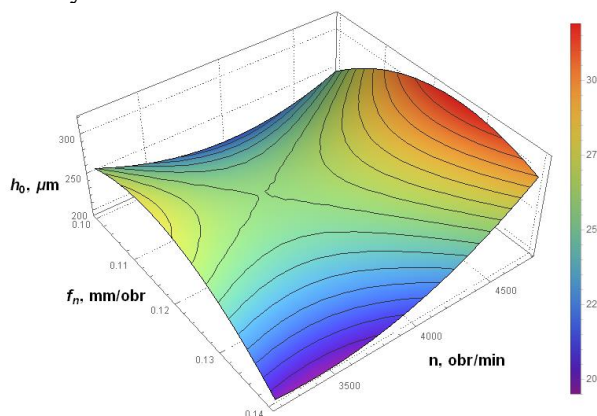
Rys. 120. Wpływ parametrów technologicznych w trzeciej kinematyce na szerokość zadzioru na wyjściu otworu w stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT na podstawie równania (78)

Analizując rys. 120 dla trzeciego układu kinematycznego stwierdzono, że stosując posuw na obrót od 0,12 mm/obr do 0,14 mm/obr oraz wartość prędkości obrotowej wrzeciona 3500 obr/min do 4300 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość szerokości zadzioru. W tym przypadku zmiana prędkości obrotowej wrzeciona lub posuwu na obrót wpływa drastycznie na zmianę wartości szerokości zadzioru.



Rys. 121. Wpływ parametrów technologicznych w pierwszej kinematyce na wysokość zadzioru na wyjściu otworu w stopie mosiądzu MO58 na podstawie równania (79)

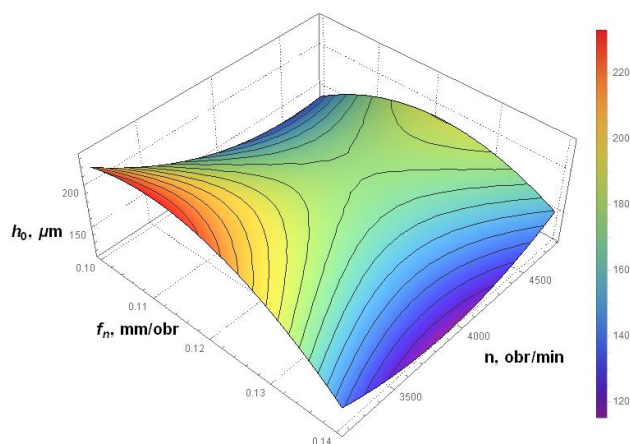
Analizując rys. 121 dla pierwszego układu kinematycznego stwierdzono, że stosując największy posuw na obrót 0,14 mm/obr oraz wartość prędkości obrotowej wrzeciona od 3500 obr/min do 4100 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość wysokości zadzioru. W tym przypadku zmiana posuwu na obrót wpływa drastycznie na zmianę wartości wysokości zadzioru.



Rys. 122. Wpływ parametrów technologicznych w drugiej kinematyce na wysokość zadzioru na wyjściu otworu w stopie mosiądzu MO58 na podstawie równania (79)



Analizując rys. 122 dla drugiego układu kinematycznego stwierdzono, że stosując największy posuw na obrót 0,14 mm/obr oraz wartość prędkości obrotowej wrzeciona od 3183 obr/min do 3800 obr/min, uzyskano najmniejszą wartość wysokości zadziuru. W tym przypadku najmniejszą wartość wysokości zadziuru możemy uzyskać dla posuwu na obrót 0,1 mm/obr oraz wartości prędkości obrotowej wrzeciona wynoszącej 3900 obr/min.



Rys. 123. Wpływ parametrów technologicznych w trzeciej kinematyce na wysokość zadziuru na wyjściu otworu w stopie mosiądzu MO58 na podstawie równania (79)

Analizując rys. 123 dla pierwszego układu kinematycznego stwierdzono, że najmniejszą wartość parametru  $h_0$  uzyskano dla dwóch zestawów parametrów technologicznych. Pierwszy zestaw dla największego badanego posuwu na obrót 0,14 mm/obr oraz prędkości obrotowej wrzeciona 3550-4150 obr/min. Drugi zestaw to najmniejszy posuw na obrót 0,1 mm/obr oraz prędkość obrotowa wrzeciona od 4450 do 4650 obr/min.

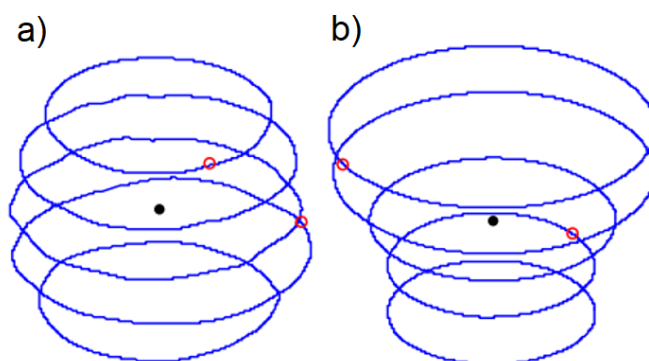
#### Wnioski:

1. Badania symulacyjne równania (78) oraz (79) wykazały różne przedziały odpowiednich zakresów (dla których to uzyskano najmniejsze wartości) parametrów technologicznych w stosunku do układu kinematycznego.
2. Dla szerokości zadziuru na wyjściu otworu w stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT odpowiednie zakresy parametrów technologicznych dla każdego układu kinematycznego technologicznych były następujące: dla KIN I  $n \in \langle 3500; 4200 \rangle$ ,  $f_n \in \langle 0,12; 0,135 \rangle$ , dla KIN II  $n \in \langle 3183; 3500 \rangle$ ,  $f_n \in \langle 0,13; 0,14 \rangle$  oraz dla KIN III  $n \in \langle 3500; 4300 \rangle$ ,  $f_n \in \langle 0,12; 0,14 \rangle$ .
3. Dla wysokości zadziuru na wyjściu otworu w stopie mosiądzu MO58 odpowiednie zakresy parametrów technologicznych były następujące: dla KIN I  $n \in \langle 3500; 4100 \rangle$ ,  $f_n = 0,14$  dla KIN II  $n \in \langle 3183; 3800 \rangle$ ,  $f_n = 0,14$

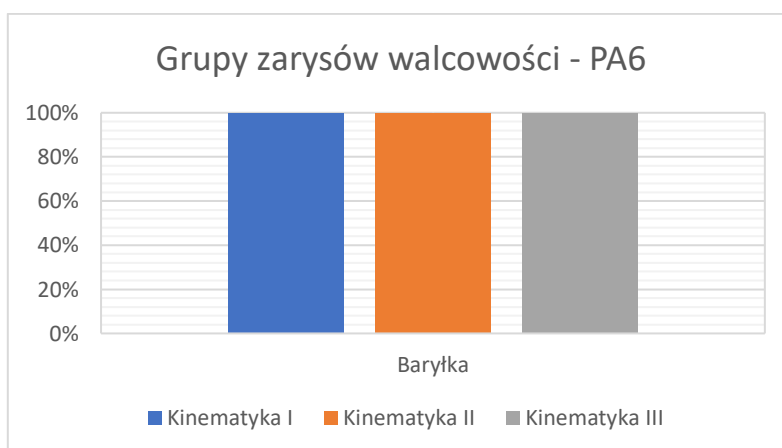
lub  $f_n = 0,1, n = 3900$  oraz dla KIN III  $n \in \langle 3550; 4150 \rangle$ ,  
 $f_n = 0,14$  lub  $n \in \langle 4450; 4650 \rangle$ ,  $f_n = 0,1$ .

#### 5.4. Szczegółowa analiza odchyłki walcowości

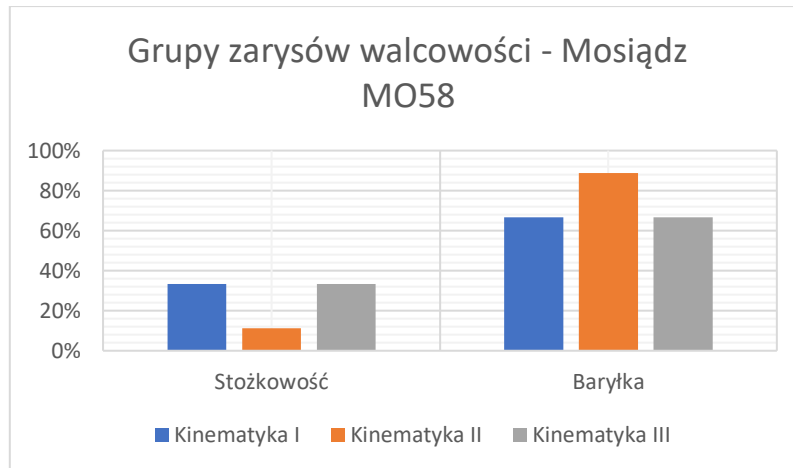
Zgodnie z normą [N3] rozróżniamy dwie grupy ocen zarysów walcowości (podrozdział 1.2). Postanowiono ocenić odchyłkę walcowości dla stopu aluminium i mosiądzu względem odchyłki promieniowej. Na rys. 124 przedstawiono dwie najczęściej występujące odchyłki promieniowe. Natomiast dla stali C45, stali ulepszonej cieplnie oraz Inconelu 718 zostanie przedstawiona analiza względem drugiej grupy a mianowicie zniekształcenia linii środkowej otworu, co zostało przedstawione na rys. 127.



Rys. 124. Odchyłki promieniowe a) baryłkowość dla TiI5A, b) stożkowość dla TiI4M

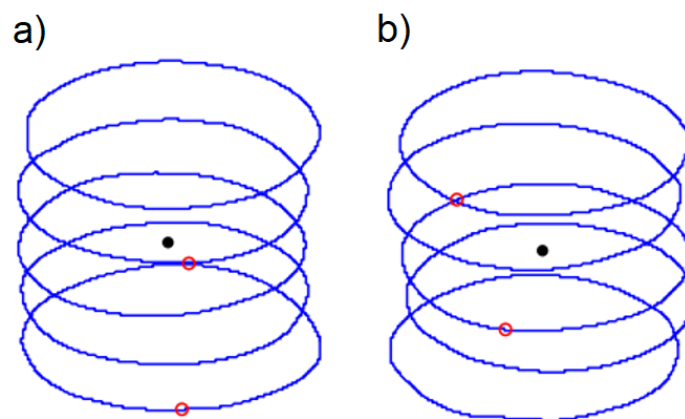


Rys. 125. Odchyłki promieniowe w stopie aluminium PA6

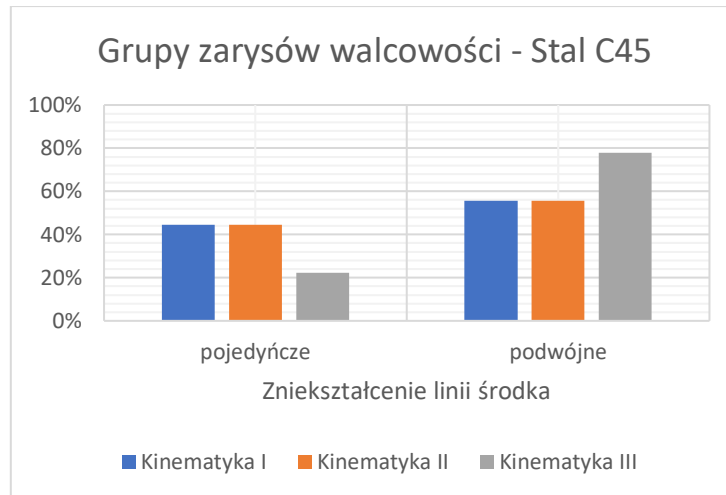


Rys. 126. Odchyłki promieniowe w mosiądzu MO58

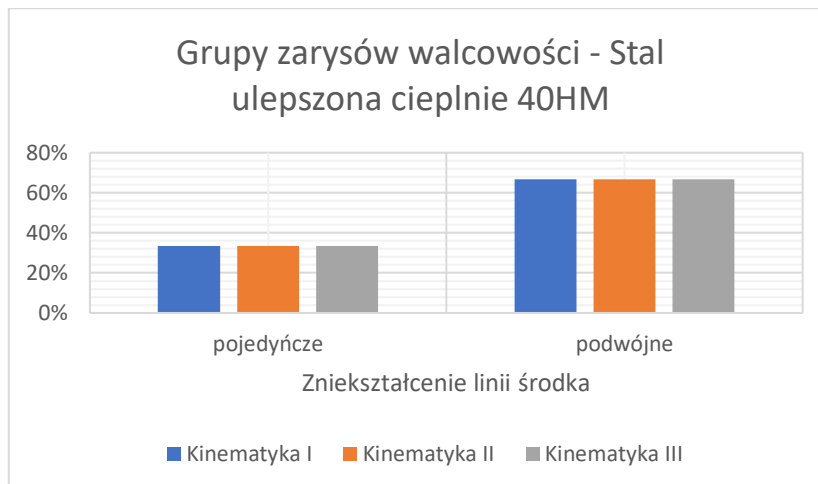
Z rys. 125 można zauważyć, że baryłkowość występuje w 100% niezależnie do zastosowanego układu kinematycznego. Na rys. 126 przedstawiono dwie odchyłki stożkowość oraz baryłkowość (tylko one wystąpiły) względem różnych układów kinematycznych. W każdym układzie kinematycznym dominowała baryłkowość dla kinematyki pierwszej i trzeciej 67% oraz dla kinematyki drugiej 89%. Stożkowość dla kinematyki pierwszej i trzeciej wyniosła 33%, natomiast dla kinematyki drugiej wyniosła 11%.



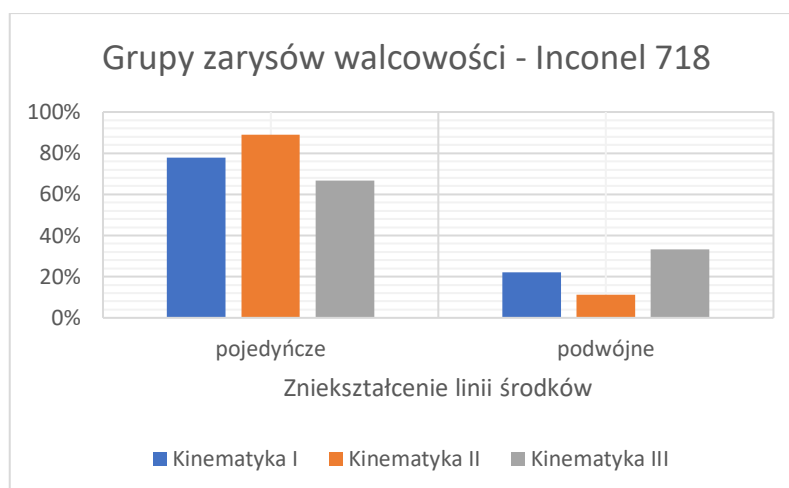
Rys. 127. Zarysy walcowości w stosunku do zniekształcenia linii środkowej  
a) pojedyncze dla TiIII2S b) podwójne dla TiIII6Q



Rys. 128. Grupy zarysów walcowości w stosunku do zniekształcenia linii środkowej w stali C45



Rys. 129. Grupy zarysów walcowości w stosunku do zniekształcenia linii środkowej w stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT



Rys. 130. Grupy zarysów walcowości w stosunku do zniekształcenia linii środkowej w Inconelu 718

Na rys. 128 dla kinematyki trzeciej, widać dominację podwójnego zniekształcenia linii środkowej na poziomie 78%. Reszta w tej kinematyce przypadła pojedynczemu zniekształceniu linii środkowej (22%). Dla kinematyki pierwszej i drugiej otrzymano te same wartości 56% dla podwójnego zniekształcenia linii środka oraz 44% dla pojedynczego zniekształcenia linii środka. Z rys. 129 zauważono, że niezależnie od kinematyki dominuje podwójne zniekształcenie linii środka na poziomie 67% wszystkich badanych próbek. Natomiast pojedyncze zniekształcenie linii środka jest na poziomie 33% dla stali ulepszonej cieplnie. Na rys. 130 widać dominację pojedynczego zniekształcenia linii środkowej. Dla kinematyki pierwszej wynosi 77%, dla kinematyki drugiej 88% oraz dla kinematyki trzeciej 66%.

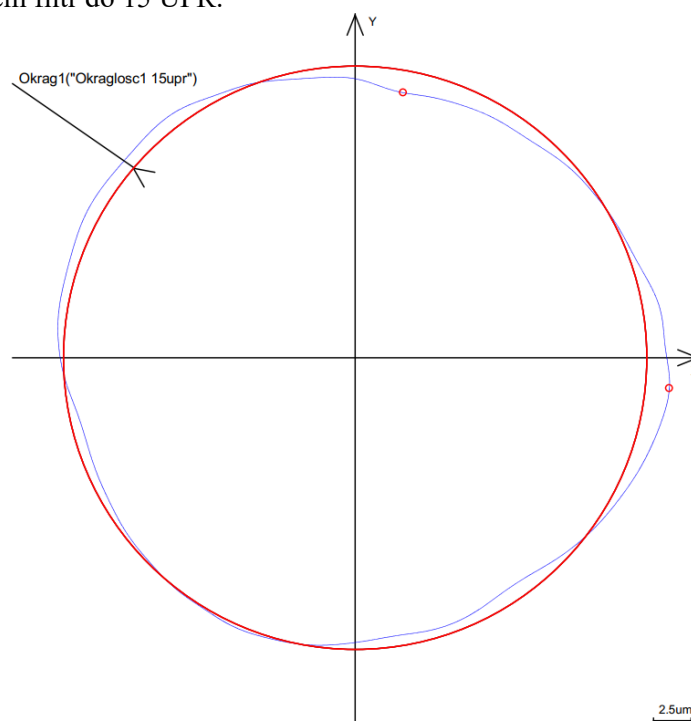
#### Wnioski:

1. Niezależnie od zastosowanego układu kinematycznego, uzyskano wszędzie zarys walcowości zwany baryłkowością.
2. W mosiądzu MO58 zależnie od układu kinematycznego, uzyskano następujący rozkład pomiędzy stożkowością a baryłkowością otworów: dla KIN I i KIN III stosunek 33% do 77%, natomiast dla KIN II stosunek 11% do 99%. Niezależnie od układu kinematycznego dominowała baryłkowość.
3. Dla stali C45 dominowało podwójne zniekształcenie linii środka: dla KIN I i KIN II wyniosło ono 56%, natomiast reszta przypadła pojedynczemu zniekształceniu, dla KIN III wyniosło ono aż 78%.
4. W stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT niezależnie od wybranego układu kinematycznego dominował zarys walcowości podwójnego zniekształcenia linii środka na poziomie 67%, reszta przypadła pojedynczemu zniekształceniu linii środka.
5. Dla Inconelu 718 dominowało pojedyncze zniekształcenie linii środka: dla KIN I wyniosło ono 77%, dla KIN II wyniosło ono 88%, natomiast dla KIN III

wyniosło 66%, pozostałe wartości przypadły podwójnemu zniekształceniu linii środka.

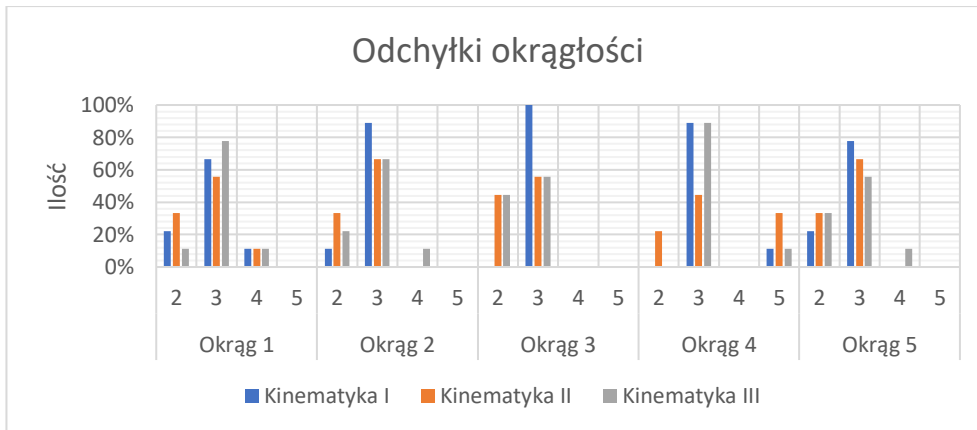
## 5.5. Analiza przypadków odchyłek okrągłości

Odchyłkę okrągłości można ocenić ze względu na kształt okręgu (w przypadku prowadzonych badań – otworu). W podrozdziale 1.2. scharakteryzowano dokładnie najbardziej znane przypadki odchyłki okrągłości. Zauważono, że nie wszystkie odchyłki okrągłości można jednoznacznie ocenić ze względu na kształt okręgu. Czasami pojawia się dylemat czy daną odchyłkę zakwalifikować do owalności czy trójgraniastoci (rys. 131.) Dlatego też postanowiono wykonać analizę długości fal inaczej nazywaną analizą Fouriera. Jest to analiza propagacji wielu sygnałów składających się z wielu sinusoid i cosinusoid. W profilu okrągłości jest trochę inaczej ponieważ początek i koniec sygnału łączą się. W tym przypadku podstawową długością fali szeregu Fouriera stanowi obwód okręgu lub po prostu 1 fala na obrót czyli UPR. W moim przypadku rozkładałem do 15 harmonicznej ponieważ zastosowałem filtr do 15 UPR.

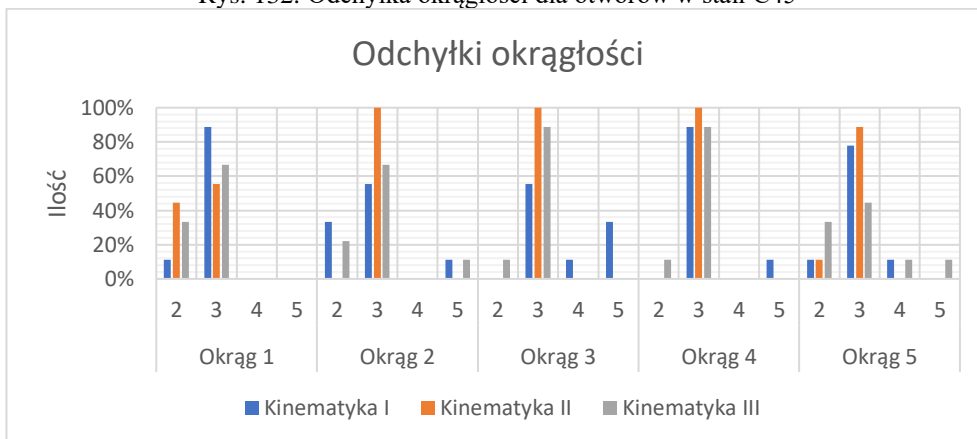


Rys. 131. Okrągłość dla TiIII9M\_o1

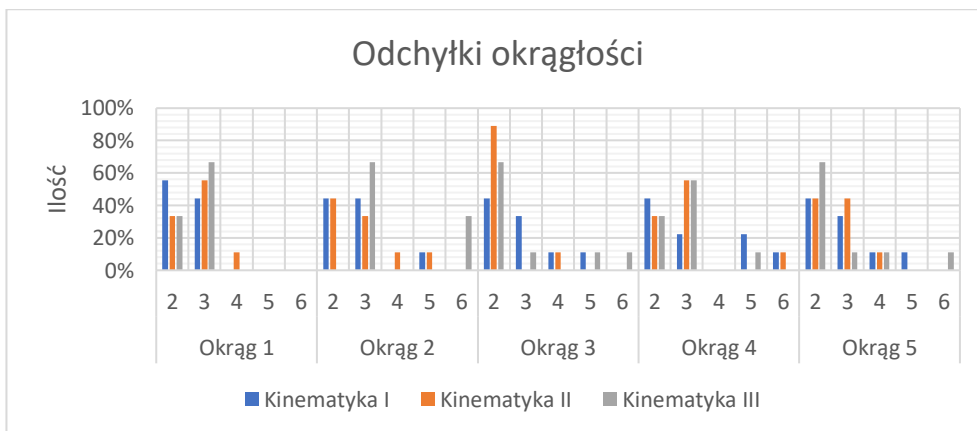
Ze względu na obszerność badań (8100 wartości wyników składowych harmonicznych z zakresu 1 do 15) przedstawiono wyniki jako wykresy, nie zamieszczając szczegółowych wartości dla każdej składowej harmonicznej.



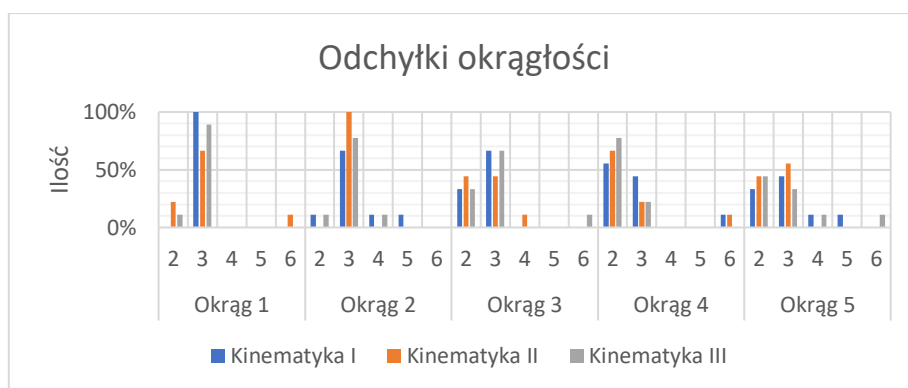
Rys. 132. Odchyłka okrągłości dla otworów w stali C45



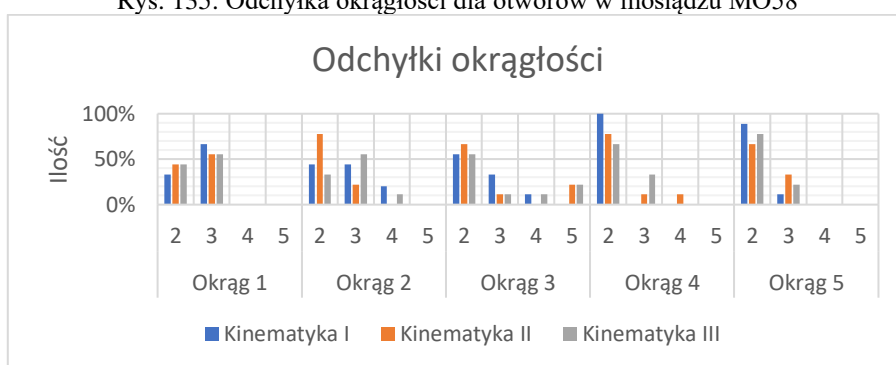
Rys. 133. Odchyłka okrągłości dla otworów w stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT



Rys. 134. Odchyłka okrągłości dla otworów w stopie aluminium PA6



Rys. 135. Odchyłka okrągłości dla otworów w mosiądzu MO58



Rys. 136. Odchyłka okrągłości dla otworów w Inconelu 718

Legenda dla rys. 132-136. Okrag 1 – okrag na wyjściu otworu, okrag 2 – okrag bliżej wyjścia, okrag 3 – srodek otworu, okrag 4 – okrag bliżej wejścia, okrag 5 – okrag na wejściu, „2” oznacza owalność, „3” oznacza trójgraniastosc, „4” oznacza czterograniastosc, „5” oznacza pięciograniastosc, „6” oznacza sześciograniastosc.

Dla stali C45 w kinematyce pierwszej w kazdej czesci mierzono otworu dominowala trójgraniastosc. Na wyjściu wynosila ona 67%, owalności przypadlo 22% oraz czterograniastosci 11%. W dalszej czesci otworu wynosila ona 89% pozostala wartosc przypadla owalności 11%. Na srodku otworu zdominowala ona calkowicie, gdyz nie wystapily inne odchyłki okrągłości. Bliżej wejścia otworu trójgraniastosc wyniosla 89%, pojawila sie rowniez pięciograniastosc 11%. Na wejściu otworu trójgraniastosc wyniosla 78%, reszta przypadla owalności 22%. W kinematyce drugiej rowniez dominowala trójgraniastosc. Na wyjściu wynosila ona 56%, owalność miala 33%, reszta przypadla czterograniastosci na poziomie 11%. W dalszej czesci otworu byla na poziomie 67%, reszta przypadla owalności na poziomie 33%. Na srodku otworu rozklad byl prawie rowny dla trójgraniastosci wynosila ona 56%, natomiast dla owalności 44%. Bliżej wejścia trójgraniastosc osiagnela 45% wszystkich wyników, pięciograniastosc miala 33%, reszta przypadla owalności na poziomie 22%. Na wejściu otworu osiagnela ona wartosc 67%, reszta



przypadła owalności 33%. W kinematyce ostatniej trójgraniastość wyniosła 56% wszystkich wyników, pozostałe wartości przypadły owalności 33% oraz czterograniastości 11%. W dalszej części otworu wyniosła ona 67%, natomiast dla owalności wyniosła 33%. Po środku otworu rozkład jest taki sam jak dla kinematyki drugiej. Bliżej wejścia otworu trójgraniastość niemalże w całości zdominowała wyniosła ona 89%, reszta przypadła pięciograniastości na poziomie 11%. Na wejściu otworu wyniosła ona 56%, reszta przypadła owalności 33% oraz czterograniastości 11%.

W stali ulepszonej cieplnie również dominowała trójgraniastość dla kinematyki pierwszej. Dla pierwszej kinematyki wyniosła ona 89%, reszta przypadła owalności na poziomie 11%. W dalszej części otworu wyniosła 56%, reszta przypadła owalności 33% oraz pięciograniastości 11%. W środku otworu uzyskała wartość 56%, 33% otrzymała pięciograniastość a reszta przypadła czterograniastości na poziomie 11%. Bliżej wejścia otworu trójgraniastość zdominowała prawie całkowicie 89%, reszta przypadła pięciograniastości na poziomie 11%. Na wejściu otworu trójgraniastość osiągnęła 78%, reszta przypadła dla owalności oraz czterograniastości na takich samych poziomach 11%. Dla drugiej kinematyki trójgraniastość na wyjściu osiągnęła podobny wynik co dla owalności 56% do 44%. W dalszej części otworu trójgraniastość całkowicie zdominowała inne odchyłki okrągłości. Dopiero na początku otworu dominacja trójgraniastości spadła do 89%, reszta przypadła owalności na poziomie 11%. Dla ostatniej kinematyki na wyjściu otworu trójgraniastość osiągnęła 67% wszystkich wartości, reszta przypadła owalności 33%. W dalszej części otworu trójgraniastość osiągnęła taką samą wartość co na wyjściu, resztę otrzymała owalność na poziomie 22% oraz pięciograniastość 11%. W środku i bliżej wejścia otworu prawie całkowicie zdominowała trójgraniastość 89%, reszta przypadła owalności 11%. Na wejściu trójgraniastość wynosiła tylko 45%, owalność 33%, a reszta przypadła czterograniastości i pięciograniastości po 11%.

W stopie aluminium PA6 pojawiła się w niektórych miejscach sześciograniastość otworu. Dla pierwszej kinematyki na wyjściu dominowała owalność otworu 56%, reszta przypadła trójgraniastości 44%. W dalszej części otworu owalność oraz trójgraniastość uzyskały po 44%, reszta przypadła pięciograniastości 12%. W środku otworu owalność uzyskała 45%, trójgraniastość 33%, czterograniastość wraz z pięciograniastością po 11%. Bliżej wejścia również dominowała owalność 45%, trójgraniastość wraz z pięciograniastością po 22%, resztę otrzymała sześciograniastość na poziomie 11%. Na wejściu owalność wyniosła 45% wszystkich wyników, następnie trójgraniastość 33%, reszta przypadła po równo czterograniastości oraz pięciograniastości po 11%. Dla kinematyki drugiej na wyjściu otworu dominowała trójgraniastość 56%, owalność 33%, reszta przypadła czterograniastości 11%. W dalszej części dominowała owalność 45%, trójgraniastość 33%, reszta przypadła dla czterograniastości i pięciograniastości po 11%. W środku otworu zdominowała prawie całkowicie owalność 89%, reszta przypadła czterograniastości 11%. Bliżej wejścia większa wartość osiągnęła

trójgraniastość 56%, następnie była owalność 33%, reszta przypadła sześciograniastości 11%. Na wejściu otworu owalność wraz z trójgraniastością osiągnęły po 44%, natomiast reszta przypadła czterograniastości 11%. W trzeciej kinematyce na wyjściu dominowała trójgraniastość 67%, reszta przypadła owalności na poziomie 33%. W dalszej części otworu dominowała również trójgraniastość z taką samą wartością co na wyjściu, jednakże pojawiła się sześciograniastość na wysokim poziomie 33%. W środku otworu dominowała owalność na poziomie 67%, reszta przypadła dla trójgraniastości, pięciograniastości oraz sześciograniastości po 11%. Bliżej wejścia otworu trójgraniastość wyniosła 56%, owalność 33% oraz pięciograniastość 11%. Na wejściu dominowała owalność 67%, reszta przypadła dla trójgraniastości, czterograniastości oraz sześciograniastości po 11%.

W mosiądzu na wyjściu i w środku otworu dominowała trójgraniastość, jednakże bliżej wejścia dominacja ta spadała na korzyść owalności. W pierwszej kinematyce trójgraniastość zdominowała całkowicie wyniosła 100% wszystkich badań. W dalszej części wyniosła ona 67%, reszta przypadła owalności, czterograniastości oraz pięciograniastości po 11%. W środku otworu wyniosła ona również 67%, reszta przypadła owalności 33%. Bliżej wejścia otworu dominację przejęła owalność 56%, reszta przypadła trójgraniastości na poziomie 44%. Na wejściu trójgraniastość wyniosła 45%, owalność 33%, resztę otrzymały czterograniastość oraz pięciograniastość po 11%. W kinematyce drugiej na wyjściu otworu również dominowała trójgraniastość 67%, owalność otrzymała 22%, reszta przypadła sześciograniastości na poziomie 11%. W dalszej części otworu zdominowała całkowicie trójgraniastość 100%. W środku otworu owalność wraz z trójgraniastością uzyskały po 44%, reszta przypadła czterograniastości na poziomie 12%. Bliżej wejścia otworu owalność uzyskała 67%, trójgraniastość 22% oraz pojawiła się sześciograniastość na poziomie 11%. Na wejściu otworu trójgraniastość wyniosła 56%, reszta przypadła owalności 44%. W ostatniej kinematyce na wyjściu otworu dominowała trójgraniastość 89%, reszta przypadła owalności 11%. W dalszej części otworu trójgraniastość osiągnęła 78%, reszta przypadła owalności i czterograniastości po 11%. W środku otworu również dominowała trójgraniastość 67%, owalność miała 33% oraz sześciograniastość 11%. Bliżej wejścia dominowała owalność 78%, reszta przypadła trójgraniastości 22%. Na wejściu również dominowała owalność 45%, trójgraniastość uzyskała 33%, reszta przypadła czterograniastości oraz sześciograniastości po 11%.

W Inconelu 718 dominowała owalność na wejściu otworu. W pierwszej kinematyce na wyjściu otworu wyniosła ona 33%, reszta przypadła trójgraniastości na poziomie 67%. W dalszej części otworu owalność i trójgraniastość uzyskały po 44%, reszta przypadła czterograniastości 22%. W środku otworu zdominowała owalność 55%, trójgraniastość 33%, reszta przypadła czterograniastości 11%. Bliżej wejścia otworu owalność zdominowała całkowicie przyjęła ona wartość 100%. Na wejściu otworu owalność osiągnęła 99%, reszta przypadła dla trójgraniastości 11%. Dla drugiej kinematyki trójgraniastość na wyjściu osiągnęła wartość 55%, reszta przypadła owalności 44%. W dalszej części otworu owalność wyniosła aż 77%,

reszta przypadła trójgraniastości. W środku otworu dominowała również owalność 66%, jednakże pojawiła się w niektórych przypadkach pięciograniastość 22%, reszta przypadła trójgraniastości. Bliżej wejścia otworu dominowała również owalność 77%, reszta przypadła w równym podziale dla trójgraniastości i czterograniastości 11%. Na wejściu owalność uzyskała 66% wszystkich przypadków, reszta przypadła trójgraniastości. Dla trzeciej kinematyki na wyjściu najczęściej przypadków było trójgraniastości 55%, jednakże owalność była na dosyć bliskim poziomie 44%. W dalszej części otworu również najczęściej przypadków było trójgraniastości 55%, reszta przypadła owalności 33% oraz czterograniastości 11%. Na środku otworu dominowała owalność 55%, reszta przypadła pięciograniastości 22%, trójgraniastości 11% oraz czterograniastości 11%. Bliżej wejścia otworu dominowała również owalność 66%, reszta przypadków to trójgraniastość. Tak samo na wejściu owalność 77%, reszta to trójgraniastość.

#### **Wnioski:**

1. Stosując analizę Fouriera oceniono w sposób przejrzysty przypadki odchyłek okrągłości.
2. W stali C45 oraz stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT w każdej części otworu dominowała trójgraniastość.
3. W stopie aluminium PA6 po środku otworu oraz na końcu pojawiła się sześciograniastość dla KIN II i KIN III. W pozostałych miejscach najczęściej wystąpiła owalność oraz trójgraniastość otworu.
4. Dla otworów wykonanych w mosiądzu MO58 na wyjściu otworu dominowała prawie całkowicie trójgraniastość. W połowie oraz na początku otworu dominowały wspólnie owalność wraz z trójgraniastością na podobnych poziomach. Dla ww. materiału w KIN II i KIN III pojawiła się również sześciograniastość w niektórych przypadkach.
5. W Inconelu 718 odchyłki okrągłości na wyjściu otworu cechowały się rozkładem pomiędzy trójgraniastością oraz owalnością, z zaznaczeniem większego udziału trójgraniastości. W środku otworu oraz na wejściu niezależnie od układu kinematycznego dominowała owalność otworu.

## **5.6. Optymalizacja wielokryterialna – Grey Relational Analysis**

Analiza szarych relacji może być wykorzystywana do rozwiązywania skomplikowanych współzależności pomiędzy wyznaczonymi danymi. Dzięki tej analizie, szara relacyjna ocena jest korzystnie zdefiniowana jako wskaźnik wielu cech wydajności. W powyższej analizie złożony problem optymalizacji wielu odpowiedzi może zostać uproszczony do optymalizacji pojedynczej odpowiedzi GRA. Parametry będą przetwarzane stosując równanie (83) ze względu na to, że wszystkie wartości wyjściowe na najmniejszym poziomie są najlepsze (smaller the better). W celu przeniesienia danych wejściowych ( $CYL_t$ ,  $STR_t$ ,  $RON_t$ ,  $DE$ ,  $Rz$ ,  $Rt$ ,  $Ra$ ,  $h_0$ ,  $b_f$ ) do porównywalnej sekwencji przetworzono je w zakresie od zera do jednego, co przedstawiono w tabelach 81–85.

$$x_{ij} = \frac{\max(y_{ij}) - y_{ij}}{\max(y_{ij}) - \min(y_{ij})} \quad (83)$$

Tabela 81. Normalizacja danych dla stali C45

Normalizacja danych									
Kod	CYL <sub>t</sub>	STR <sub>t</sub>	RON <sub>t</sub>	DE	Rz	Rt	Ra	h <sub>0</sub>	b <sub>f</sub>
TiI1S	0,811	0,771	0,000	0,632	0,846	0,923	0,813	0,430	0,000
TiII1S	0,884	0,933	0,333	0,706	0,735	0,753	0,688	0,116	0,756
TiIII1S	0,813	0,980	0,467	0,853	0,761	0,968	0,538	0,151	0,463
TiI2S	0,955	0,846	0,556	0,809	0,511	0,660	0,513	0,709	0,707
TiII2S	1,000	0,947	0,533	0,765	0,544	0,840	0,450	0,581	1,000
TiIII2S	0,972	1,000	0,933	0,618	0,281	0,642	0,034	0,419	0,756
TiI3S	0,939	0,953	0,400	1,000	0,746	0,632	0,772	0,826	0,618
TiII3S	0,946	0,838	0,556	0,809	1,000	1,000	0,800	0,221	0,870
TiIII3S	0,759	0,844	0,733	0,603	0,780	0,719	0,538	0,651	0,797
TiI4S	0,955	0,941	0,711	0,618	0,103	0,649	0,744	0,581	0,520
TiII4S	0,955	0,916	0,644	0,662	0,155	0,070	0,322	0,709	0,138
TiIII4S	0,835	0,877	0,867	0,471	0,278	0,422	0,169	0,674	0,407
TiI5S	0,839	0,821	0,689	0,750	0,000	0,474	0,494	0,779	0,382
TiII5S	0,761	0,802	1,000	0,485	0,134	0,449	0,425	0,814	0,520
TiIII5S	0,827	0,832	0,956	0,559	0,246	0,444	0,250	0,605	0,455
TiI6S	0,662	0,673	0,622	0,912	0,522	0,483	0,763	1,000	0,138
TiII6S	0,905	0,757	0,711	0,676	0,555	0,645	0,516	0,884	0,439
TiIII6S	0,785	0,679	0,667	0,471	0,651	0,550	0,600	0,593	0,163
TiI7S	0,811	0,768	0,133	0,000	0,544	0,817	0,563	0,000	0,943
TiII7S	0,742	0,723	0,533	0,368	0,192	0,000	0,634	0,488	0,236
TiIII7S	0,634	0,645	0,644	0,500	0,078	0,498	0,000	0,337	0,431
TiI8S	0,714	0,740	0,533	0,471	0,066	0,795	0,703	0,744	0,585
TiII8S	0,702	0,676	0,511	0,368	0,109	0,496	0,353	0,419	0,138
TiIII8S	0,582	0,436	0,711	0,162	0,257	0,612	0,309	0,570	0,276
TiI9S	0,376	0,489	0,400	0,912	0,608	0,923	1,000	0,012	0,439
TiII9S	0,359	0,405	0,356	0,118	0,866	0,976	0,750	0,198	0,382
TiIII9S	0,000	0,000	0,267	0,029	0,786	0,992	0,678	0,372	0,203

Tabela 82. Normalizacja danych dla stali ulepszonej cieplnie 40HM + QT

Kod	Normalizacja danych								
	CYL <sub>t</sub>	STR <sub>t</sub>	RON <sub>t</sub>	DE	Rz	Rt	Ra	h <sub>0</sub>	b <sub>f</sub>
TiI1Q	0,871	0,790	0,500	0,528	0,414	1,000	0,163	0,489	0,065
TiII1Q	0,696	0,692	0,611	0,306	0,868	0,372	0,500	0,085	0,252
TiIII1Q	0,696	0,692	0,778	0,389	0,723	0,327	0,531	0,298	0,505
TiI2Q	0,596	0,420	0,167	0,806	0,294	0,314	0,294	0,702	0,617
TiII2Q	0,731	0,643	0,278	0,722	0,831	0,185	0,750	0,574	0,860
TiIII2Q	0,526	0,517	0,000	0,667	0,668	0,101	0,363	0,362	0,785
TiI3Q	0,485	0,706	0,444	0,722	0,819	0,367	0,438	0,532	0,224
TiII3Q	0,667	0,517	0,167	0,889	0,745	0,320	0,594	0,213	0,813
TiIII3Q	0,813	0,734	0,111	0,472	0,543	0,136	0,588	0,255	0,720
TiI4Q	1,000	1,000	0,333	0,694	0,183	0,417	0,031	0,660	0,159
TiII4Q	0,865	0,846	0,333	0,722	0,409	0,082	0,813	0,404	0,430
TiIII4Q	0,591	0,497	0,722	0,389	0,450	0,243	0,413	0,617	0,879
TiI5Q	0,865	0,853	0,500	0,833	0,000	0,250	0,000	0,957	0,551
TiII5Q	0,696	0,678	0,222	0,778	0,440	0,136	0,481	0,702	0,262
TiIII5Q	0,725	0,748	0,444	0,639	0,053	0,000	0,494	0,511	1,000
TiI6Q	0,836	0,629	0,667	0,861	0,226	0,221	0,263	1,000	0,402
TiII6Q	0,684	0,566	0,222	1,000	0,223	0,199	0,719	0,872	0,720
TiIII6Q	0,643	0,287	0,389	0,611	0,314	0,267	0,644	0,723	0,757
TiI7Q	0,708	0,776	0,611	0,500	0,452	0,276	0,794	0,255	0,411
TiII7Q	0,573	0,594	0,556	0,639	0,947	0,153	0,881	0,149	0,131
TiIII7Q	0,351	0,727	0,611	0,222	0,472	0,155	0,763	0,000	0,785
TiI8Q	0,637	0,734	0,889	0,667	0,591	0,126	0,338	0,979	0,093
TiII8Q	0,626	0,608	0,556	0,639	0,701	0,195	0,944	0,191	0,411
TiIII8Q	0,696	0,832	0,500	0,639	0,623	0,144	0,475	0,851	0,598
TiI9Q	0,456	0,343	1,000	0,778	0,766	0,179	0,644	0,638	0,000
TiII9Q	0,023	0,007	0,389	0,194	1,000	0,086	0,969	0,723	0,626
TiIII9Q	0,000	0,000	0,500	0,000	0,974	0,241	1,000	0,915	0,458

Tabela 83. Normalizacja danych dla stopu aluminium PA6

Kod	Normalizacja danych						
	CYL <sub>t</sub>	STR <sub>t</sub>	RON <sub>t</sub>	DE	Rz	Rt	Ra
TiI1A	1,000	0,946	0,732	0,984	0,448	0,312	0,238
TiII1A	0,982	1,000	0,561	1,000	0,330	0,520	0,301
TiIII1A	0,667	0,473	0,252	0,643	0,000	0,070	0,000
TiI2A	0,400	0,558	0,089	0,442	0,186	0,372	0,225
TiII2A	0,452	0,592	0,171	0,675	0,371	0,468	0,510
TiIII2A	0,730	0,884	0,049	0,648	0,135	0,280	0,222
TiI3A	0,364	0,439	0,293	0,447	0,561	0,890	0,819
TiII3A	0,539	0,612	0,179	0,503	0,668	0,700	0,742
TiIII3A	0,591	0,650	0,146	0,487	0,621	0,757	0,608
TiI4A	0,648	0,595	0,488	0,389	0,503	0,501	0,330
TiII4A	0,648	0,537	0,146	0,516	0,088	0,571	0,303
TiIII4A	0,406	0,425	0,252	0,574	0,381	0,208	0,314
TiI5A	0,142	0,078	0,000	0,151	0,451	0,626	0,440
TiII5A	0,258	0,524	0,211	0,280	0,274	0,646	0,624
TiIII5A	0,000	0,000	0,008	0,000	0,306	0,257	0,205
TiI6A	0,394	0,282	0,260	0,220	0,719	0,774	0,973
TiII6A	0,273	0,221	0,114	0,426	0,749	0,784	0,784
TiIII6A	0,306	0,357	0,000	0,146	0,779	1,000	0,851
TiI7A	0,712	0,704	0,577	0,434	0,644	0,259	0,433
TiII7A	0,518	0,643	0,577	0,484	0,486	0,472	0,373
TiIII7A	0,658	0,449	0,285	0,156	0,153	0,000	0,179
TiI8A	0,345	0,469	0,447	0,106	0,419	0,119	0,636
TiII8A	0,355	0,524	0,504	0,233	0,535	0,160	0,660
TiIII8A	0,367	0,235	0,455	0,071	0,377	0,190	0,523
TiI9A	0,394	0,279	0,423	0,381	0,755	0,644	1,000
TiII9A	0,233	0,163	1,000	0,243	1,000	0,838	0,897
TiIII9A	0,473	0,207	0,992	0,222	0,927	0,843	0,892

Tabela 84. Normalizacja danych dla stopu mosiądzu MO58

Normalizacja danych									
Kod	CYL <sub>t</sub>	STR <sub>t</sub>	RON <sub>t</sub>	DE	Rz	Rt	Ra	h <sub>0</sub>	b <sub>f</sub>
TiI1M	0,388	0,285	0,622	0,564	0,743	0,798	0,667	0,551	0,206
TiII1M	0,329	0,240	0,511	0,433	0,643	0,754	0,531	0,010	0,000
TiIII1M	1,000	0,740	0,667	0,588	0,365	0,630	0,265	0,824	0,472
TiI2M	0,329	0,000	0,600	0,643	0,571	0,548	0,495	0,795	0,345
TiII2M	0,369	0,231	0,189	0,360	0,361	0,000	0,322	0,444	0,060
TiIII2M	0,369	0,830	0,000	0,210	0,153	0,161	0,165	0,946	0,575
TiI3M	0,210	0,202	0,811	0,260	0,688	0,616	0,480	0,790	0,437
TiII3M	0,000	0,587	0,800	0,143	0,468	0,334	0,287	0,532	0,607
TiIII3M	0,063	0,641	0,278	0,031	0,297	0,344	0,218	1,000	0,437
TiI4M	0,622	0,585	0,878	0,293	0,725	0,903	0,738	0,234	0,345
TiII4M	0,435	0,509	1,000	0,271	0,883	1,000	0,825	0,107	0,012
TiIII4M	0,612	0,850	0,833	0,031	0,387	0,432	0,408	0,556	0,437
TiI5M	0,095	0,280	0,644	0,450	0,485	0,767	0,469	0,507	0,226
TiII5M	0,356	0,220	0,789	0,460	0,596	0,716	0,571	0,556	0,107
TiIII5M	0,399	0,590	0,356	0,226	0,238	0,440	0,105	0,756	0,425
TiI6M	0,386	0,444	0,500	0,421	0,561	0,776	0,071	0,024	0,028
TiII6M	0,318	0,350	0,744	0,179	0,449	0,452	0,473	0,000	0,238
TiIII6M	0,214	0,556	0,556	0,000	0,399	0,294	0,473	0,444	0,397
TiI7M	0,413	0,899	0,833	0,421	0,692	0,629	0,754	0,571	0,381
TiII7M	0,331	0,720	1,000	0,336	1,000	0,931	1,000	0,273	0,583
TiIII7M	0,600	1,000	0,811	0,114	0,000	0,310	0,376	0,868	1,000
TiI8M	0,386	0,583	0,267	1,000	0,341	0,253	0,070	0,307	0,607
TiII8M	0,642	0,558	0,456	0,210	0,414	0,645	0,453	0,302	0,813
TiIII8M	0,544	0,675	0,411	0,276	0,121	0,209	0,275	0,776	0,766
TiI9M	0,804	0,825	0,711	0,786	0,636	0,634	0,127	0,454	0,659
TiII9M	0,584	0,531	0,711	0,395	0,557	0,626	0,373	0,473	0,806
TiIII9M	0,691	0,722	0,311	0,271	0,221	0,441	0,000	0,327	0,810

Tabela 85. Normalizacja danych dla Inconelu 718

Normalizacja danych									
Kod	CYL <sub>t</sub>	STR <sub>t</sub>	RON <sub>t</sub>	DE	Rz	Rt	Ra	h <sub>0</sub>	b <sub>f</sub>
TiI1	0,578	0,330	0,029	0,642	0,585	0,459	0,395	0,564	0,973
TiII1	0,301	0,108	0,229	0,580	1,000	1,000	1,000	0,970	0,980
TiIII1	0,305	0,472	0,114	0,548	0,828	0,677	0,878	0,931	1,000
TiI2	0,015	0,210	0,429	0,735	0,738	0,487	0,384	0,000	0,899
TiII2	0,640	0,481	0,286	0,827	0,765	0,903	0,629	0,931	0,764
TiIII2	0,936	0,948	0,400	1,000	0,805	0,646	0,724	0,366	0,905
TiI3	0,548	0,336	0,000	0,762	0,912	0,744	0,639	0,594	0,892
TiII3	0,704	0,747	0,743	0,917	0,834	0,901	0,701	0,990	0,743
TiIII3	1,000	0,907	0,600	0,980	0,800	0,724	0,684	0,871	0,885
TiI4	0,851	0,997	0,200	0,817	0,244	0,275	0,349	1,000	0,858
TiII4	0,802	0,941	0,371	0,839	0,435	0,426	0,498	0,535	0,804
TiIII4	0,763	0,799	0,486	0,877	0,304	0,223	0,456	0,861	0,723
TiI5	0,831	0,923	0,571	0,811	0,456	0,196	0,345	0,802	0,649
TiII5	0,934	1,000	0,629	0,768	0,370	0,270	0,362	0,406	0,615
TiIII5	0,821	0,951	0,657	0,892	0,457	0,228	0,494	0,812	0,514
TiI6	0,755	0,877	0,457	0,750	0,596	0,406	0,495	0,584	0,561
TiII6	0,702	0,769	1,000	0,708	0,495	0,448	0,352	0,990	0,500
TiIII6	0,791	0,938	0,657	0,788	0,469	0,327	0,448	0,594	0,601
TiI7	0,158	0,590	0,629	0,139	0,230	0,042	0,109	0,455	0,696
TiII7	0,320	0,664	0,429	0,461	0,000	0,236	0,093	0,455	0,730
TiIII7	0,358	0,565	0,486	0,368	0,330	0,174	0,195	0,446	0,723
TiI8	0,224	0,028	0,829	0,000	0,403	0,295	0,283	0,267	0,628
TiII8	0,164	0,420	0,543	0,392	0,158	0,020	0,000	0,119	0,649
TiIII8	0,111	0,123	0,429	0,305	0,223	0,000	0,281	0,366	0,000
TiI9	0,000	0,269	0,371	0,179	0,618	0,477	0,595	0,020	0,486
TiII9	0,085	0,000	0,886	0,452	0,285	0,402	0,281	0,248	0,588
TiIII9	0,245	0,358	0,514	0,339	0,427	0,278	0,442	0,703	0,723

Na podstawie tabel (81–85) policzono oraz przedstawiono sekwencje odchyleń jako tabele (86–90). Wykorzystano wzór (84).



$$\Delta_{ij} = 1 - \frac{\max(y_{ij}) - y_{ij}}{\max(y_{ij}) - \min(y_{ij})} \quad (84)$$

Tabela 86. Sekwencje odchyłeń dla stali C45

Sekwencje odchyłeń									
Kod	CYL <sub>t</sub>	STR <sub>t</sub>	RON <sub>t</sub>	DE	Rz	Rt	Ra	h <sub>0</sub>	b <sub>f</sub>
TiI1S	0,189	0,229	1,000	0,368	0,154	0,077	0,188	0,570	1,000
TiII1S	0,116	0,067	0,667	0,294	0,265	0,247	0,313	0,884	0,244
TiIII1S	0,187	0,020	0,533	0,147	0,239	0,032	0,463	0,849	0,537
TiI2S	0,045	0,154	0,444	0,191	0,489	0,340	0,488	0,291	0,293
TiII2S	0,000	0,053	0,467	0,235	0,456	0,160	0,550	0,419	0,000
TiIII2S	0,028	0,000	0,067	0,382	0,719	0,358	0,966	0,581	0,244
TiI3S	0,061	0,047	0,600	0,000	0,254	0,368	0,228	0,174	0,382
TiII3S	0,054	0,162	0,444	0,191	0,000	0,000	0,200	0,779	0,130
TiIII3S	0,241	0,156	0,267	0,397	0,220	0,281	0,463	0,349	0,203
TiI4S	0,045	0,059	0,289	0,382	0,897	0,351	0,256	0,419	0,480
TiII4S	0,045	0,084	0,356	0,338	0,845	0,930	0,678	0,291	0,862
TiIII4S	0,165	0,123	0,133	0,529	0,722	0,578	0,831	0,326	0,593
TiI5S	0,161	0,179	0,311	0,250	1,000	0,526	0,506	0,221	0,618
TiII5S	0,239	0,198	0,000	0,515	0,866	0,551	0,575	0,186	0,480
TiIII5S	0,173	0,168	0,044	0,441	0,754	0,556	0,750	0,395	0,545
TiI6S	0,338	0,327	0,378	0,088	0,478	0,517	0,238	0,000	0,862
TiII6S	0,095	0,243	0,289	0,324	0,445	0,355	0,484	0,116	0,561
TiIII6S	0,215	0,321	0,333	0,529	0,349	0,450	0,400	0,407	0,837
TiI7S	0,189	0,232	0,867	1,000	0,456	0,183	0,438	1,000	0,057
TiII7S	0,258	0,277	0,467	0,632	0,808	1,000	0,366	0,512	0,764
TiIII7S	0,366	0,355	0,356	0,500	0,922	0,502	1,000	0,663	0,569
TiI8S	0,286	0,260	0,467	0,529	0,934	0,205	0,297	0,256	0,415
TiII8S	0,298	0,324	0,489	0,632	0,891	0,504	0,647	0,581	0,862
TiIII8S	0,418	0,564	0,289	0,838	0,743	0,388	0,691	0,430	0,724
TiI9S	0,624	0,511	0,600	0,088	0,392	0,077	0,000	0,988	0,561
TiII9S	0,641	0,595	0,644	0,882	0,134	0,024	0,250	0,802	0,618
TiIII9S	1,000	1,000	0,733	0,971	0,214	0,008	0,322	0,628	0,797

Tabela 87. Sekwencje odchyień dla stali ulepszonej cieplnie 40HM + QT

Kod	Sekwencje odchyień								
	CYL <sub>t</sub>	STR <sub>t</sub>	RON <sub>t</sub>	DE	Rz	Rt	Ra	h <sub>0</sub>	b <sub>f</sub>
TiI1Q	0,129	0,210	0,500	0,472	0,586	0,000	0,838	0,511	0,935
TiII1Q	0,304	0,308	0,389	0,694	0,132	0,628	0,500	0,915	0,748
TiIII1Q	0,304	0,308	0,222	0,611	0,277	0,673	0,469	0,702	0,495
TiI2Q	0,404	0,580	0,833	0,194	0,706	0,686	0,706	0,298	0,383
TiII2Q	0,269	0,357	0,722	0,278	0,169	0,815	0,250	0,426	0,140
TiIII2Q	0,474	0,483	1,000	0,333	0,332	0,899	0,638	0,638	0,215
TiI3Q	0,515	0,294	0,556	0,278	0,181	0,633	0,563	0,468	0,776
TiII3Q	0,333	0,483	0,833	0,111	0,255	0,680	0,406	0,787	0,187
TiIII3Q	0,187	0,266	0,889	0,528	0,457	0,864	0,413	0,745	0,280
TiI4Q	0,000	0,000	0,667	0,306	0,817	0,583	0,969	0,340	0,841
TiII4Q	0,135	0,154	0,667	0,278	0,591	0,918	0,188	0,596	0,570
TiIII4Q	0,409	0,503	0,278	0,611	0,550	0,757	0,588	0,383	0,121
TiI5Q	0,135	0,147	0,500	0,167	1,000	0,750	1,000	0,043	0,449
TiII5Q	0,304	0,322	0,778	0,222	0,560	0,864	0,519	0,298	0,738
TiIII5Q	0,275	0,252	0,556	0,361	0,947	1,000	0,506	0,489	0,000
TiI6Q	0,164	0,371	0,333	0,139	0,774	0,779	0,738	0,000	0,598
TiII6Q	0,316	0,434	0,778	0,000	0,777	0,801	0,281	0,128	0,280
TiIII6Q	0,357	0,713	0,611	0,389	0,686	0,733	0,356	0,277	0,243
TiI7Q	0,292	0,224	0,389	0,500	0,548	0,724	0,206	0,745	0,589
TiII7Q	0,427	0,406	0,444	0,361	0,053	0,847	0,119	0,851	0,869
TiIII7Q	0,649	0,273	0,389	0,778	0,528	0,845	0,238	1,000	0,215
TiI8Q	0,363	0,266	0,111	0,333	0,409	0,874	0,663	0,021	0,907
TiII8Q	0,374	0,392	0,444	0,361	0,299	0,805	0,056	0,809	0,589
TiIII8Q	0,304	0,168	0,500	0,361	0,377	0,856	0,525	0,149	0,402
TiI9Q	0,544	0,657	0,000	0,222	0,234	0,821	0,356	0,362	1,000
TiII9Q	0,977	0,993	0,611	0,806	0,000	0,914	0,031	0,277	0,374
TiIII9Q	1,000	1,000	0,500	1,000	0,026	0,759	0,000	0,085	0,542

Tabela 88. Sekwencje odchyłeń dla stopu aluminium PA6

Kod	Sekwencje odchyłeń						
	CYL <sub>t</sub>	STR <sub>t</sub>	RON <sub>t</sub>	DE	Rz	Rt	Ra
TiI1A	0,000	0,054	0,268	0,016	0,552	0,688	0,762
TiII1A	0,018	0,000	0,439	0,000	0,670	0,480	0,699
TiIII1A	0,333	0,527	0,748	0,357	1,000	0,930	1,000
TiI2A	0,600	0,442	0,911	0,558	0,814	0,628	0,775
TiII2A	0,548	0,408	0,829	0,325	0,629	0,532	0,490
TiIII2A	0,270	0,116	0,951	0,352	0,865	0,720	0,778
TiI3A	0,636	0,561	0,707	0,553	0,439	0,110	0,181
TiII3A	0,461	0,388	0,821	0,497	0,332	0,300	0,258
TiIII3A	0,409	0,350	0,854	0,513	0,379	0,243	0,392
TiI4A	0,352	0,405	0,512	0,611	0,497	0,499	0,670
TiII4A	0,352	0,463	0,854	0,484	0,912	0,429	0,697
TiIII4A	0,594	0,575	0,748	0,426	0,619	0,792	0,686
TiI5A	0,858	0,922	1,000	0,849	0,549	0,374	0,560
TiII5A	0,742	0,476	0,789	0,720	0,726	0,354	0,376
TiIII5A	1,000	1,000	0,992	1,000	0,694	0,743	0,795
TiI6A	0,606	0,718	0,740	0,780	0,281	0,226	0,027
TiII6A	0,727	0,779	0,886	0,574	0,251	0,216	0,216
TiIII6A	0,694	0,643	1,000	0,854	0,221	0,000	0,149
TiI7A	0,288	0,296	0,423	0,566	0,356	0,741	0,567
TiII7A	0,482	0,357	0,423	0,516	0,514	0,528	0,627
TiIII7A	0,342	0,551	0,715	0,844	0,847	1,000	0,821
TiI8A	0,655	0,531	0,553	0,894	0,581	0,881	0,364
TiII8A	0,645	0,476	0,496	0,767	0,465	0,840	0,340
TiIII8A	0,633	0,765	0,545	0,929	0,623	0,810	0,477
TiI9A	0,606	0,721	0,577	0,619	0,245	0,356	0,000
TiII9A	0,767	0,837	0,000	0,757	0,000	0,162	0,103
TiIII9A	0,527	0,793	0,008	0,778	0,073	0,157	0,108

Tabela 89. Sekwencje odchyień dla stopu mosiądzu MO58

Kod	Sekwencje odchyień								
	CYL <sub>t</sub>	STR <sub>t</sub>	RON <sub>t</sub>	DE	Rz	Rt	Ra	h <sub>0</sub>	b <sub>f</sub>
TiI1M	0,612	0,715	0,378	0,436	0,257	0,202	0,333	0,449	0,794
TiII1M	0,671	0,760	0,489	0,567	0,357	0,246	0,469	0,990	1,000
TiIII1M	0,000	0,260	0,333	0,412	0,635	0,370	0,735	0,176	0,528
TiI2M	0,671	1,000	0,400	0,357	0,429	0,452	0,505	0,205	0,655
TiII2M	0,631	0,769	0,811	0,640	0,639	1,000	0,678	0,556	0,940
TiIII2M	0,631	0,170	1,000	0,790	0,847	0,839	0,835	0,054	0,425
TiI3M	0,790	0,798	0,189	0,740	0,312	0,384	0,520	0,210	0,563
TiII3M	1,000	0,413	0,200	0,857	0,532	0,666	0,713	0,468	0,393
TiIII3M	0,937	0,359	0,722	0,969	0,703	0,656	0,782	0,000	0,563
TiI4M	0,378	0,415	0,122	0,707	0,275	0,097	0,262	0,766	0,655
TiII4M	0,565	0,491	0,000	0,729	0,117	0,000	0,175	0,893	0,988
TiIII4M	0,388	0,150	0,167	0,969	0,613	0,568	0,592	0,444	0,563
TiI5M	0,905	0,720	0,356	0,550	0,515	0,233	0,531	0,493	0,774
TiII5M	0,644	0,780	0,211	0,540	0,404	0,284	0,429	0,444	0,893
TiIII5M	0,601	0,410	0,644	0,774	0,762	0,560	0,895	0,244	0,575
TiI6M	0,614	0,556	0,500	0,579	0,439	0,224	0,929	0,976	0,972
TiII6M	0,682	0,650	0,256	0,821	0,551	0,548	0,527	1,000	0,762
TiIII6M	0,786	0,444	0,444	1,000	0,601	0,706	0,527	0,556	0,603
TiI7M	0,587	0,101	0,167	0,579	0,308	0,371	0,246	0,429	0,619
TiII7M	0,669	0,280	0,000	0,664	0,000	0,069	0,000	0,727	0,417
TiIII7M	0,400	0,000	0,189	0,886	1,000	0,690	0,624	0,132	0,000
TiI8M	0,614	0,417	0,733	0,000	0,659	0,747	0,930	0,693	0,393
TiII8M	0,358	0,442	0,544	0,790	0,586	0,355	0,547	0,698	0,187
TiIII8M	0,456	0,325	0,589	0,724	0,879	0,791	0,725	0,224	0,234
TiI9M	0,196	0,175	0,289	0,214	0,364	0,366	0,873	0,546	0,341
TiII9M	0,416	0,469	0,289	0,605	0,443	0,374	0,627	0,527	0,194
TiIII9M	0,309	0,278	0,689	0,729	0,779	0,559	1,000	0,673	0,190

Tabela 90. Sekwencje odchyłeń dla Inconelu 718

Kod	Sekwencje odchyłeń								
	CYL <sub>t</sub>	STR <sub>t</sub>	RON <sub>t</sub>	DE	Rz	Rt	Ra	h <sub>0</sub>	b <sub>f</sub>
TiI1	0,422	0,670	0,971	0,358	0,415	0,541	0,605	0,436	0,027
TiII1	0,699	0,892	0,771	0,420	0,000	0,000	0,000	0,030	0,020
TiIII1	0,695	0,528	0,886	0,452	0,172	0,323	0,122	0,069	0,000
TiI2	0,985	0,790	0,571	0,265	0,262	0,513	0,616	1,000	0,101
TiII2	0,360	0,519	0,714	0,173	0,235	0,097	0,371	0,069	0,236
TiIII2	0,064	0,052	0,600	0,000	0,195	0,354	0,276	0,634	0,095
TiI3	0,452	0,664	1,000	0,238	0,088	0,256	0,361	0,406	0,108
TiII3	0,296	0,253	0,257	0,083	0,166	0,099	0,299	0,010	0,257
TiIII3	0,000	0,093	0,400	0,020	0,200	0,276	0,316	0,129	0,115
TiI4	0,149	0,003	0,800	0,183	0,756	0,725	0,651	0,000	0,142
TiII4	0,198	0,059	0,629	0,161	0,565	0,574	0,502	0,465	0,196
TiIII4	0,237	0,201	0,514	0,123	0,696	0,777	0,544	0,139	0,277
TiI5	0,169	0,077	0,429	0,189	0,544	0,804	0,655	0,198	0,351
TiII5	0,066	0,000	0,371	0,232	0,630	0,730	0,638	0,594	0,385
TiIII5	0,179	0,049	0,343	0,108	0,543	0,772	0,506	0,188	0,486
TiI6	0,245	0,123	0,543	0,250	0,404	0,594	0,505	0,416	0,439
TiII6	0,298	0,231	0,000	0,292	0,505	0,552	0,648	0,010	0,500
TiIII6	0,209	0,062	0,343	0,212	0,531	0,673	0,552	0,406	0,399
TiI7	0,842	0,410	0,371	0,861	0,770	0,958	0,891	0,545	0,304
TiII7	0,680	0,336	0,571	0,539	1,000	0,764	0,907	0,545	0,270
TiIII7	0,642	0,435	0,514	0,632	0,670	0,826	0,805	0,554	0,277
TiI8	0,776	0,972	0,171	1,000	0,597	0,705	0,717	0,733	0,372
TiII8	0,836	0,580	0,457	0,608	0,842	0,980	1,000	0,881	0,351
TiIII8	0,889	0,877	0,571	0,695	0,777	1,000	0,719	0,634	1,000
TiI9	1,000	0,731	0,629	0,821	0,382	0,523	0,405	0,980	0,514
TiII9	0,915	1,000	0,114	0,548	0,715	0,598	0,719	0,752	0,412
TiIII9	0,755	0,642	0,486	0,661	0,573	0,722	0,558	0,297	0,277

Następnie aby obliczyć współczynniki oraz stopień szarej relacji dobrano współczynnik rozróżniający wynoszący 0,5 dla równania (85). Jeśli eksperyment uzyskuje najwyższą wartość szarej oceny relacji z sekwencją referencyjną, oznacza to, że sekwencja porównawcza jest najbardziej podobna do sekwencji referencyjnej

i ten eksperyment byłby najlepszym wyborem. Tabele 91–95 przedstawiają obliczone współczynniki oraz ocenę szarości dla każdego eksperymentu. Najwyższa ocena relacyjna to 1.

$$y_{ij} = \frac{\Delta_{min} + \xi \cdot \Delta_{max}}{\Delta_{ij} + \xi \cdot \Delta_{max}} \quad (85)$$

Tabela 91. Szare współczynniki relacyjne i szara ocena relacyjna dla stali C45

Kod	CYL <sub>t</sub>	STR <sub>t</sub>	RON <sub>t</sub>	DE	Rz	Rt	Ra	h <sub>0</sub>	b <sub>f</sub>	Ocena	Nr
TiI1S	0,726	0,686	0,333	0,576	0,765	0,867	0,727	0,467	0,333	0,609	12
TiII1S	0,812	0,882	0,429	0,630	0,654	0,669	0,615	0,361	0,672	0,636	8
TiIII1S	0,728	0,962	0,484	0,773	0,677	0,940	0,519	0,371	0,482	0,660	4
TiI2S	0,918	0,765	0,529	0,723	0,506	0,595	0,506	0,632	0,631	0,645	6
TiII2S	1,000	0,904	0,517	0,680	0,523	0,758	0,476	0,544	1,000	0,711	3
TiIII2S	0,946	1,000	0,882	0,567	0,410	0,583	0,341	0,462	0,672	0,652	5
TiI3S	0,891	0,913	0,455	1,000	0,663	0,576	0,687	0,741	0,567	0,721	2
TiII3S	0,902	0,755	0,529	0,723	1,000	1,000	0,714	0,391	0,794	0,757	1
TiIII3S	0,675	0,762	0,652	0,557	0,694	0,640	0,519	0,589	0,711	0,644	7
TiI4S	0,918	0,895	0,634	0,567	0,358	0,587	0,661	0,544	0,510	0,630	9
TiII4S	0,918	0,856	0,584	0,596	0,372	0,350	0,424	0,632	0,367	0,567	20
TiIII4S	0,751	0,803	0,789	0,486	0,409	0,464	0,376	0,606	0,457	0,571	18
TiI5S	0,757	0,737	0,616	0,667	0,333	0,487	0,497	0,694	0,447	0,582	16
TiII5S	0,677	0,716	1,000	0,493	0,366	0,476	0,465	0,729	0,510	0,603	14
TiIII5S	0,743	0,749	0,918	0,531	0,399	0,473	0,400	0,558	0,479	0,583	15
TiI6S	0,597	0,605	0,570	0,850	0,511	0,492	0,678	1,000	0,367	0,630	10
TiII6S	0,841	0,673	0,634	0,607	0,529	0,585	0,508	0,811	0,471	0,629	11
TiIII6S	0,699	0,609	0,600	0,486	0,589	0,526	0,556	0,551	0,374	0,554	21
TiI7S	0,726	0,683	0,366	0,333	0,523	0,732	0,533	0,333	0,898	0,570	19
TiII7S	0,660	0,644	0,517	0,442	0,382	0,333	0,578	0,494	0,395	0,494	24
TiIII7S	0,577	0,585	0,584	0,500	0,352	0,499	0,333	0,430	0,468	0,481	26
TiI8S	0,636	0,658	0,517	0,486	0,349	0,709	0,627	0,662	0,547	0,577	17
TiII8S	0,627	0,607	0,506	0,442	0,360	0,498	0,436	0,462	0,367	0,478	27
TiIII8S	0,544	0,470	0,634	0,374	0,402	0,563	0,420	0,538	0,409	0,484	25
TiI9S	0,445	0,494	0,455	0,850	0,561	0,867	1,000	0,336	0,471	0,609	13
TiII9S	0,438	0,457	0,437	0,362	0,788	0,954	0,667	0,384	0,447	0,548	22
TiIII9S	0,333	0,333	0,405	0,340	0,700	0,984	0,608	0,443	0,386	0,504	23

Z tabeli 91 wynika, że dla stali C45 stosując eksperyment 8 (TiII3S;  $n = 3183$  obr/min,  $f_n = 0,14$  mm/obr oraz drugi układ kinematyczny) uzyskamy wszystkie parametry wyjściowe najkorzystniejsze (o najmniejszych wartościach).

Tabela 92. Szare współczynniki relacyjne i szara ocena relacyjna dla stali ulepszonej cieplnie 40HM + QT

Kod	CYL <sub>t</sub>	STR <sub>t</sub>	RON <sub>t</sub>	DE	Rz	Rt	Ra	h <sub>0</sub>	b <sub>r</sub>	Ocena	Nr
TiI1Q	0,795	0,704	0,500	0,514	0,460	1,000	0,374	0,495	0,349	0,577	8
TiII1Q	0,622	0,619	0,563	0,419	0,792	0,443	0,500	0,353	0,401	0,523	22
TiIII1Q	0,622	0,619	0,692	0,450	0,643	0,426	0,516	0,416	0,502	0,543	17
TiI2Q	0,553	0,463	0,375	0,720	0,414	0,422	0,415	0,627	0,566	0,506	26
TiII2Q	0,650	0,584	0,409	0,643	0,747	0,380	0,667	0,540	0,781	0,600	1
TiIII2Q	0,514	0,509	0,333	0,600	0,601	0,357	0,440	0,439	0,699	0,499	27
TiI3Q	0,493	0,630	0,474	0,643	0,734	0,441	0,471	0,516	0,392	0,533	20
TiII3Q	0,600	0,509	0,375	0,818	0,662	0,424	0,552	0,388	0,728	0,562	12
TiIII3Q	0,728	0,653	0,360	0,486	0,522	0,367	0,548	0,402	0,641	0,523	23
TiI4Q	1,000	1,000	0,429	0,621	0,380	0,462	0,340	0,595	0,373	0,578	7
TiII4Q	0,788	0,765	0,429	0,643	0,458	0,353	0,727	0,456	0,467	0,565	11
TiIII4Q	0,550	0,498	0,643	0,450	0,476	0,398	0,460	0,566	0,805	0,538	18
TiI5Q	0,788	0,773	0,500	0,750	0,333	0,400	0,333	0,922	0,527	0,592	4
TiII5Q	0,622	0,609	0,391	0,692	0,472	0,367	0,491	0,627	0,404	0,519	24
TiIII5Q	0,645	0,665	0,474	0,581	0,345	0,333	0,497	0,505	1,000	0,561	13
TiI6Q	0,753	0,574	0,600	0,783	0,392	0,391	0,404	1,000	0,455	0,595	3
TiII6Q	0,613	0,536	0,391	1,000	0,392	0,384	0,640	0,797	0,641	0,599	2
TiIII6Q	0,584	0,412	0,450	0,563	0,422	0,406	0,584	0,644	0,673	0,526	21
TiI7Q	0,631	0,691	0,563	0,500	0,477	0,409	0,708	0,402	0,459	0,538	19
TiII7Q	0,539	0,552	0,529	0,581	0,905	0,371	0,808	0,370	0,365	0,558	14
TiIII7Q	0,435	0,647	0,563	0,391	0,487	0,372	0,678	0,333	0,699	0,512	25
TiI8Q	0,580	0,653	0,818	0,600	0,550	0,364	0,430	0,959	0,355	0,590	5
TiII8Q	0,572	0,561	0,529	0,581	0,626	0,383	0,899	0,382	0,459	0,555	16
TiIII8Q	0,622	0,749	0,500	0,581	0,570	0,369	0,488	0,770	0,554	0,578	6
TiI9Q	0,479	0,432	1,000	0,692	0,681	0,379	0,584	0,580	0,333	0,573	10
TiII9Q	0,339	0,335	0,450	0,383	1,000	0,354	0,941	0,644	0,572	0,557	15
TiIII9Q	0,333	0,333	0,500	0,333	0,950	0,397	1,000	0,855	0,480	0,576	9

Z tabeli 92 wynika, że dla stali ulepszonej cieplnie 40HM + QT stosując eksperyment 5 (TiII2Q;  $n = 3979$  obr/min,  $f_n = 0,14$  mm/obr oraz drugi układ kinematyczny) uzyskamy wszystkie parametry wyjściowe najkorzystniejsze (o najmniejszych wartościach).

Tabela 93. Szare współczynniki relacyjne i szara ocena relacyjna dla stopu aluminium PA6

Kod	CYL <sub>t</sub>	STR <sub>t</sub>	RON <sub>t</sub>	DE	Rz	Rt	Ra	Ocena	Nr
TiI1A	1,000	0,902	0,651	0,969	0,475	0,421	0,396	0,688	2
TiIII1A	0,965	1,000	0,532	1,000	0,427	0,510	0,417	0,693	1
TiIII1A	0,600	0,487	0,401	0,583	0,333	0,350	0,333	0,441	22
TiI2A	0,455	0,531	0,354	0,473	0,380	0,443	0,392	0,433	23
TiIII2A	0,477	0,551	0,376	0,606	0,443	0,484	0,505	0,492	16
TiIII2A	0,650	0,812	0,345	0,587	0,366	0,410	0,391	0,509	13
TiI3A	0,440	0,471	0,414	0,475	0,533	0,820	0,734	0,555	8
TiIII3A	0,521	0,563	0,378	0,501	0,601	0,625	0,660	0,550	9
TiIII3A	0,550	0,588	0,369	0,493	0,569	0,673	0,560	0,543	10
TiI4A	0,587	0,553	0,494	0,450	0,501	0,501	0,427	0,502	15
TiIII4A	0,587	0,519	0,369	0,508	0,354	0,538	0,418	0,471	18
TiIII4A	0,457	0,465	0,401	0,540	0,447	0,387	0,421	0,445	21
TiI5A	0,368	0,352	0,333	0,371	0,477	0,572	0,472	0,421	25
TiIII5A	0,402	0,512	0,388	0,410	0,408	0,586	0,571	0,468	19
TiIII5A	0,333	0,333	0,335	0,333	0,419	0,402	0,386	0,363	27
TiI6A	0,452	0,411	0,403	0,390	0,640	0,689	0,948	0,562	7
TiIII6A	0,407	0,391	0,361	0,466	0,666	0,698	0,698	0,527	12
TiIII6A	0,419	0,438	0,333	0,369	0,693	1,000	0,771	0,575	6
TiI7A	0,635	0,628	0,542	0,469	0,584	0,403	0,469	0,533	11
TiIII7A	0,509	0,583	0,542	0,492	0,493	0,486	0,444	0,507	14
TiIII7A	0,594	0,476	0,411	0,372	0,371	0,333	0,378	0,419	26
TiI8A	0,433	0,485	0,475	0,359	0,463	0,362	0,579	0,451	20
TiIII8A	0,437	0,512	0,502	0,395	0,518	0,373	0,596	0,476	17
TiIII8A	0,441	0,395	0,479	0,350	0,445	0,382	0,512	0,429	24
TiI9A	0,452	0,409	0,464	0,447	0,672	0,584	1,000	0,575	5
TiIII9A	0,395	0,374	1,000	0,398	1,000	0,755	0,829	0,679	3
TiIII9A	0,487	0,387	0,984	0,391	0,873	0,761	0,822	0,672	4



Z tabeli 93 wynika, że dla stopu aluminium PA6 stosując eksperyment 2 (TiIII A;  $n = 4775$  obr/min,  $f_n = 0,14$  mm/obr oraz drugi układ kinematyczny) uzyskamy wszystkie parametry wyjściowe najkorzystniejsze (o najmniejszych wartościach).

Tabela 94. Szare współczynniki relacyjne i szara ocena relacyjna dla stopu mosiądzu MO58

Kod	CYL <sub>t</sub>	STR <sub>t</sub>	RON <sub>t</sub>	DE	Rz	Rt	Ra	h <sub>0</sub>	b <sub>r</sub>	Ocena	Nr
TiI1M	0,450	0,411	0,570	0,534	0,661	0,713	0,601	0,527	0,387	0,539	9
TiII1M	0,427	0,397	0,506	0,469	0,584	0,670	0,516	0,336	0,333	0,471	22
TiIII1M	1,000	0,658	0,600	0,548	0,440	0,574	0,405	0,740	0,486	0,606	4
TiI2M	0,427	0,333	0,556	0,583	0,538	0,525	0,498	0,709	0,433	0,511	14
TiII2M	0,442	0,394	0,381	0,438	0,439	0,333	0,424	0,473	0,347	0,408	27
TiIII2M	0,442	0,746	0,333	0,387	0,371	0,373	0,375	0,903	0,541	0,497	17
TiI3M	0,388	0,385	0,726	0,403	0,616	0,566	0,490	0,704	0,470	0,528	11
TiII3M	0,333	0,548	0,714	0,368	0,484	0,429	0,412	0,516	0,560	0,485	21
TiIII3M	0,348	0,582	0,409	0,340	0,416	0,433	0,390	1,000	0,470	0,488	19
TiI4M	0,569	0,547	0,804	0,414	0,645	0,837	0,656	0,395	0,433	0,589	7
TiII4M	0,470	0,505	1,000	0,407	0,811	1,000	0,741	0,359	0,336	0,625	3
TiIII4M	0,563	0,769	0,750	0,340	0,449	0,468	0,458	0,530	0,470	0,533	10
TiI5M	0,356	0,410	0,584	0,476	0,493	0,682	0,485	0,504	0,393	0,487	20
TiII5M	0,437	0,391	0,703	0,481	0,553	0,638	0,538	0,530	0,359	0,514	13
TiIII5M	0,454	0,549	0,437	0,393	0,396	0,472	0,358	0,672	0,465	0,466	23
TiI6M	0,449	0,473	0,500	0,464	0,533	0,691	0,350	0,339	0,340	0,460	24
TiII6M	0,423	0,435	0,662	0,378	0,476	0,477	0,487	0,333	0,396	0,452	25
TiIII6M	0,389	0,530	0,529	0,333	0,454	0,415	0,487	0,473	0,453	0,452	26
TiI7M	0,460	0,832	0,750	0,464	0,619	0,574	0,670	0,538	0,447	0,595	6
TiII7M	0,428	0,641	1,000	0,429	1,000	0,879	1,000	0,408	0,545	0,703	1
TiIII7M	0,555	1,000	0,726	0,361	0,333	0,420	0,445	0,792	1,000	0,626	2
TiI8M	0,449	0,545	0,405	1,000	0,431	0,401	0,350	0,419	0,560	0,507	15
TiII8M	0,583	0,531	0,479	0,387	0,461	0,585	0,477	0,418	0,728	0,517	12
TiIII8M	0,523	0,606	0,459	0,409	0,363	0,387	0,408	0,690	0,681	0,503	16
TiI9M	0,718	0,741	0,634	0,700	0,579	0,577	0,364	0,478	0,594	0,598	5
TiII9M	0,546	0,516	0,634	0,453	0,530	0,572	0,444	0,487	0,720	0,545	8
TiIII9M	0,618	0,643	0,421	0,407	0,391	0,472	0,333	0,426	0,724	0,493	18

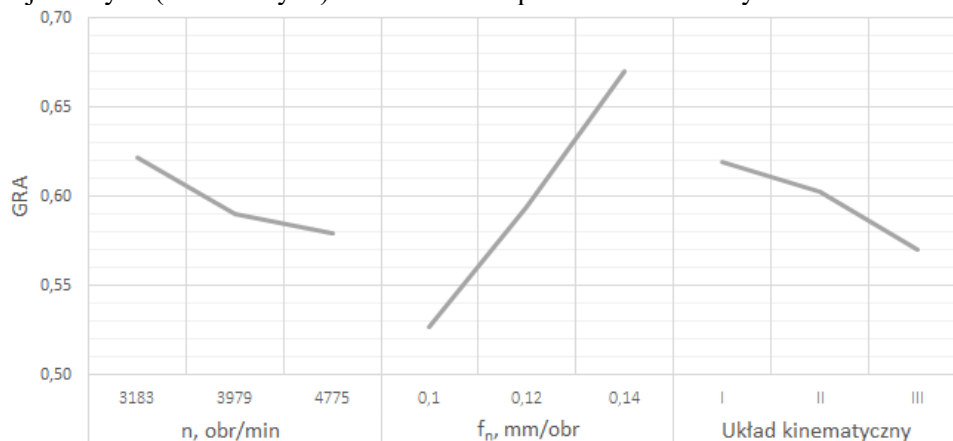
Z tabeli 94 wynika, że dla stopu mosiądzu MO58 stosując eksperyment 20 (TiII7M;  $n = 4775$  obr/min,  $f_n = 0,1$  mm/obr oraz drugi układ kinematyczny) uzyskamy wszystkie parametry wyjściowe najkorzystniejsze (o najmniejszych wartościach).

Tabela 95. Szare współczynniki relacyjne i szara ocena relacyjna dla Inconelu 718

Kod	CYL <sub>t</sub>	STR <sub>t</sub>	RON <sub>t</sub>	DE	Rz	Rt	Ra	h <sub>0</sub>	b <sub>r</sub>	Ocena	Nr
TiI1I	0,542	0,427	0,340	0,583	0,546	0,480	0,453	0,534	0,949	0,539	17
TiII1I	0,417	0,359	0,393	0,544	1,000	1,000	1,000	0,944	0,961	0,735	3
TiIII1I	0,418	0,486	0,361	0,525	0,744	0,608	0,804	0,878	1,000	0,647	8
TiI2I	0,337	0,388	0,467	0,653	0,656	0,494	0,448	0,333	0,831	0,512	18
TiII2I	0,582	0,491	0,412	0,743	0,680	0,838	0,574	0,878	0,679	0,653	6
TiIII2I	0,886	0,905	0,455	1,000	0,719	0,585	0,644	0,441	0,841	0,720	4
TiI3I	0,525	0,430	0,333	0,678	0,850	0,662	0,581	0,552	0,822	0,604	13
TiII3I	0,628	0,664	0,660	0,857	0,750	0,835	0,626	0,981	0,661	0,740	2
TiIII3I	1,000	0,844	0,556	0,962	0,714	0,645	0,613	0,795	0,813	0,771	1
TiI4I	0,771	0,994	0,385	0,732	0,398	0,408	0,434	1,000	0,779	0,656	5
TiII4I	0,717	0,895	0,443	0,757	0,469	0,466	0,499	0,518	0,718	0,609	10
TiIII4I	0,678	0,714	0,493	0,803	0,418	0,391	0,479	0,783	0,643	0,600	14
TiI5I	0,747	0,866	0,538	0,725	0,479	0,383	0,433	0,716	0,587	0,608	11
TiII5I	0,884	1,000	0,574	0,683	0,443	0,407	0,439	0,457	0,565	0,606	12
TiIII5I	0,736	0,910	0,593	0,823	0,479	0,393	0,497	0,727	0,507	0,630	9
TiI6I	0,671	0,802	0,479	0,667	0,553	0,457	0,498	0,546	0,532	0,578	16
TiII6I	0,627	0,684	1,000	0,631	0,497	0,475	0,435	0,981	0,500	0,648	7
TiIII6I	0,705	0,890	0,593	0,702	0,485	0,426	0,475	0,552	0,556	0,598	15
TiI7I	0,373	0,549	0,574	0,367	0,394	0,343	0,359	0,479	0,622	0,451	24
TiII7I	0,424	0,598	0,467	0,481	0,333	0,396	0,355	0,479	0,649	0,465	22
TiIII7I	0,438	0,535	0,493	0,442	0,427	0,377	0,383	0,474	0,643	0,468	20
TiI8I	0,392	0,340	0,745	0,333	0,456	0,415	0,411	0,406	0,574	0,452	23
TiII8I	0,374	0,463	0,522	0,451	0,373	0,338	0,333	0,362	0,587	0,423	26
TiIII8I	0,360	0,363	0,467	0,418	0,392	0,333	0,410	0,441	0,333	0,391	27
TiI9I	0,333	0,406	0,443	0,378	0,567	0,489	0,552	0,338	0,493	0,444	25
TiII9I	0,353	0,333	0,814	0,477	0,411	0,455	0,410	0,399	0,548	0,467	21
TiIII9I	0,398	0,438	0,507	0,431	0,466	0,409	0,472	0,627	0,643	0,488	19

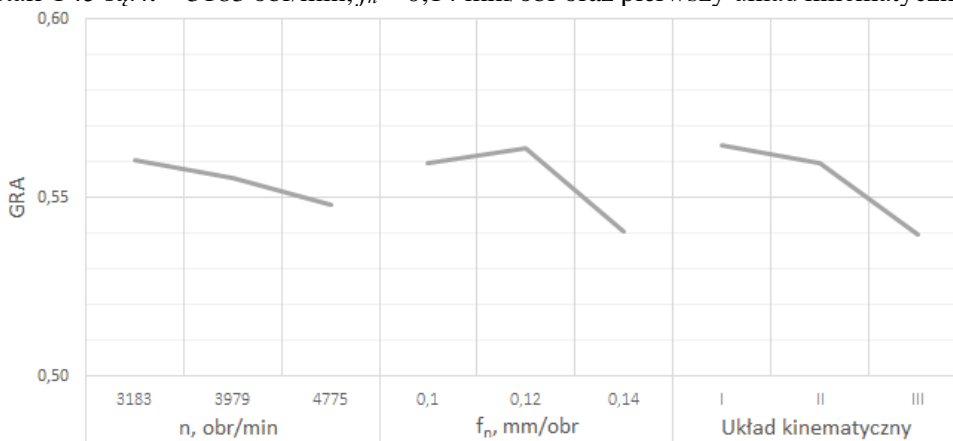
Z tabeli 95 wynika, że dla Inconelu 718 stosując eksperyment 9 (TiIII3I;  $n = 955$  obr/min,  $f_n = 0,075$  mm/obr oraz trzeci układ kinematyczny) uzyskamy wszystkie parametry wyjściowe najkorzystniejsze (o najmniejszych wartościach).

Średnie ocen relacyjnych w skali szarości dla każdego poziomu parametrów wejściowych (sterowalnych) obliczono oraz przedstawiono na rys. 137–141.



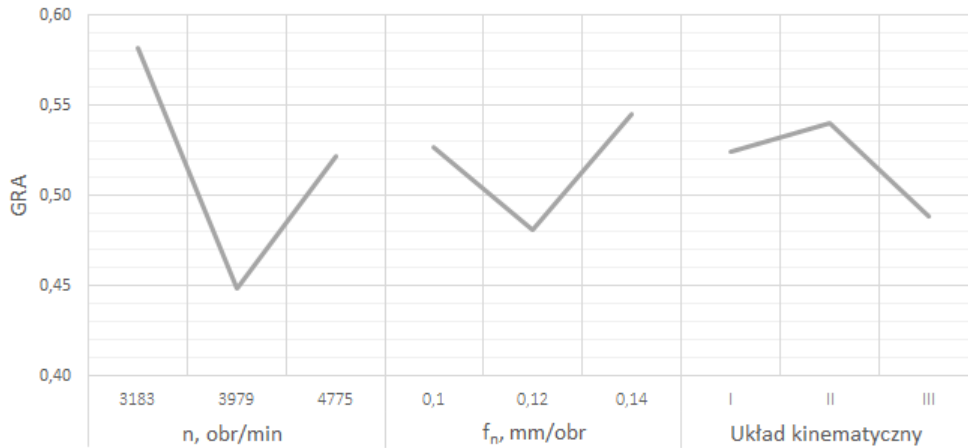
Rys. 137. Wykres odpowiedzi dla średniej oceny w skali szarości dla stali C45

Z rys. 137 wynika, że najbardziej optymalnymi parametrami wejściowymi dla stali C45 są:  $n = 3183$  obr/min,  $f_n = 0,14$  mm/obr oraz pierwszy układ kinematyczny.

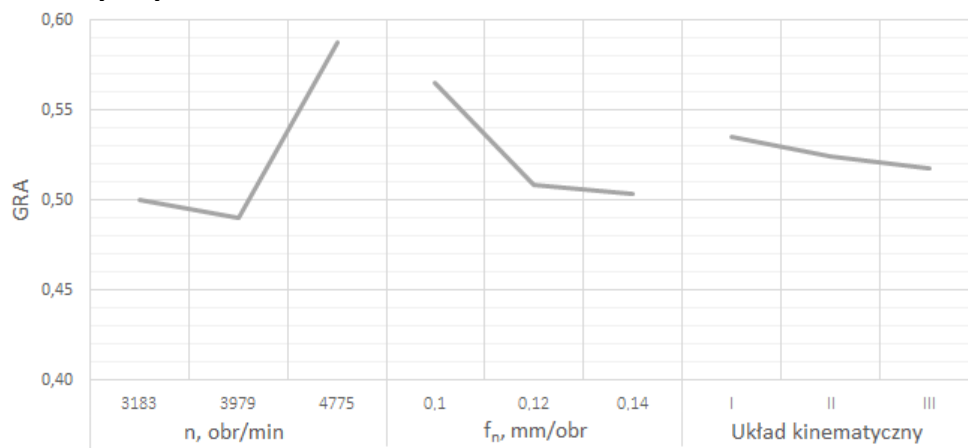


Rys. 138. Wykres odpowiedzi dla średniej oceny w skali szarości dla stali ulepszonej cieplnie 40HM + QT

Z rys. 138 wynika, że najbardziej optymalnymi parametrami wejściowymi dla stali ulepszonej cieplnie 40HM + QT są:  $n = 3183$  obr/min,  $f_n = 0,12$  mm/obr oraz pierwszy układ kinematyczny.

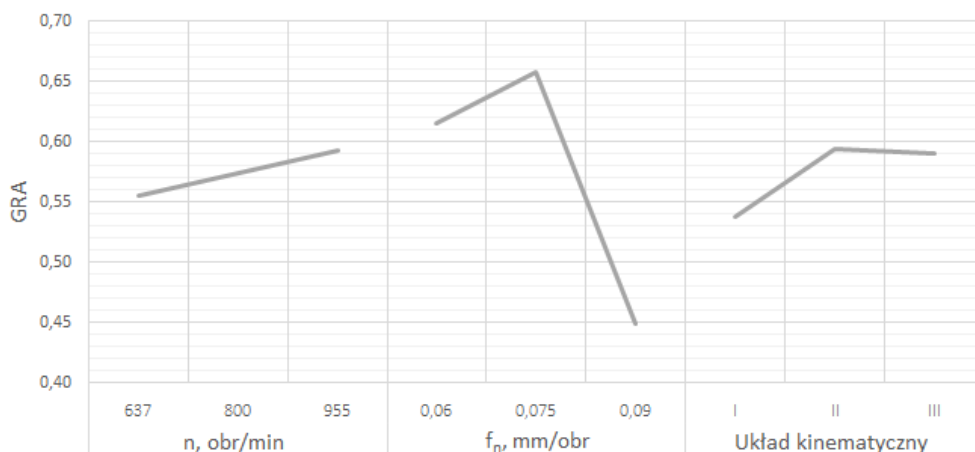


Rys. 139. Wykres odpowiedzi dla średniej oceny w skali szarości dla stopu aluminium PA6  
 Z rys. 139 wynika, że najbardziej optymalnymi parametrami wejściowymi dla stopu aluminium PA6 są:  $n = 3183$  obr/min,  $f_n = 0,14$  mm/obr oraz drugi układ kinematyczny.



Rys. 140. Wykres odpowiedzi dla średniej oceny w skali szarości dla stopu mosiądzu MO58

Z rys. 140 wynika, że najbardziej optymalnymi parametrami wejściowymi dla stopu mosiądzu MO58 są:  $n = 4775$  obr/min,  $f_n = 0,1$  mm/obr oraz pierwszy układ kinematyczny.



Rys. 141. Wykres odpowiedzi dla średniej oceny w skali szarości dla Inconelu 718

Z rys. 141 wynika, że najbardziej optymalnymi parametrami wejściowymi dla Inconelu 718 są:  $n = 955$  obr/min,  $f_n = 0,075$  mm/obr oraz drugi układ kinematyczny.

#### Wnioski:

1. Stosując optymalizację wielokryterialną GRA można określić najkorzystniejsze parametry wejściowego dla których to uzyskano najmniejsze bądź największe wartości parametrów wyjściowych.
2. Dla stali C45, najmniejsze wartości parametrów wyjściowych, uzyskano stosując eksperyment 8 ( $n = 3183$  obr/min,  $f_n = 0,14$  mm/obr oraz drugi układ kinematyczny).
3. Dla stali ulepszonej cieplnie 40HM + QT, najmniejsze wartości parametrów wyjściowych, uzyskano stosując eksperyment 5 ( $n = 3979$  obr/min,  $f_n = 0,14$  mm/obr oraz drugi układ kinematyczny).
4. Dla stopu aluminium PA6, najmniejsze wartości parametrów wyjściowych, uzyskano stosując eksperyment 2 ( $n = 4775$  obr/min,  $f_n = 0,14$  mm/obr oraz drugi układ kinematyczny).
5. Dla stopu mosiądzu MO58, najmniejsze wartości parametrów wyjściowych, uzyskano stosując eksperyment 20 ( $n = 4775$  obr/min,  $f_n = 0,1$  mm/obr oraz drugi układ kinematyczny).
6. Dla Inconelu 718, najmniejsze wartości parametrów wyjściowych, uzyskano stosując eksperyment 9 ( $n = 955$  obr/min,  $f_n = 0,075$  mm/obr oraz trzeci układ kinematyczny).

## 6. WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

Analiza bieżącego stanu wiedzy z zakresu podjętego tematu oraz badania własne głównie eksperymentalne, pozwalają na sformułowanie wniosków o charakterze poznawczym i utylitarnym, a także wytycznych dotyczących dalszych prac.

### 6.1. Wnioski poznawcze i utylitarne

1. Optymalne zestawy parametrów wejściowych z analizy dokładności wymiarowo kształtowej otworów to: TiIII2S, TiIII3S, TiI4S, TiIII4S, TiII5S, TiIII5S, TiII6S, TiIIQ, TiIIA, TiI9M, TiII2I, TiII3I, TiIII3I, TiIII5I oraz TiII6I.
2. Analiza statystyczna ANOVA umożliwia określenie wpływu każdego badanego parametru wejściowego ( $f_n$ ,  $n$  oraz  $KIN$ ) na parametry wyjściowe ( $CYL_t$ ,  $STR_t$ ,  $RON_t$ ,  $DE$ ,  $Ra$ ,  $Rt$ ,  $Rz$ ,  $b_f$  oraz  $h_0$ ).
3. Model hybrydowy umożliwia najdokładniejsze dopasowanie wartości eksperymentalnych z przewidywanymi. Umożliwił on uzyskanie najwyższej korelacji wyników.
4. Wartości eksperymentalne z przewidywanymi dla większości wyników są bardzo zbliżone do siebie.
5. Wysokie wartości współczynników determinacji wskazują na odpowiednie dopasowanie przewidywanych wartości badanych z eksperymentalnymi wynikami.
6. Opracowane równania można zastosować do przewidywania błędów kształtu, położenia, chropowatości, wysokości oraz szerokości zadzioru otworu w badanych materiałach.
7. Opracowane na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych modele matematyczne są istotne ponieważ poziomy istotności  $p$  są mniejsze niż 0,05.
8. Układ kinematyczny w ocenie dokładności wymiarowo kształtowej otworów miał największe znaczenie dla stali C45 w błędzie średnicy, stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT w odchyłce okrągłości, stopie mosiądzu MO58 w odchyłce prostoliniowości oraz w błędzie średnicy, w Inconelu 718 w odchyłce walcowości.
9. Układ kinematyczny należy dobrać z zależności od obrabianego materiału. W ocenie dokładności wymiarowo kształtowej dla stali C45 nie ma jednoznacznego wskazania najkorzystniejszego układu kinematycznego. Stosując pierwszy układ kinematyczny, w stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT, uzyskano najmniejsze wartości dla parametrów wyjściowych. W stopie aluminium PA6 należy stosować drugi układ kinematyczny (3 z 4 parametrów  $STR_t$ ,  $RON_t$ ,  $DE$  osiągną najmniejsze wartości). Dla stopu mosiądzu oraz Inconelu 718 wiercenie według układu kinematycznego trzeciego spowodowało uzyskanie najmniejszych wartości parametrów wyjściowych co jest optymalne ze względu na jakość wykonanego otworu.

10. Badania symulacyjne pozwoliły zobrazować odpowiednie zakresy parametrów technologicznych dla których to uzyskano najkorzystniejsze parametry wyjściowe w każdym badanym układzie kinematycznym.
11. Szeroki zakres badań umożliwił na ustalenie odpowiedniej kombinacji parametrów wejściowych ( $f_n$ ,  $n$  oraz KIN) na parametry wyjściowe (CYL, STR, RON, DE, Ra, Rt, Rz,  $b_f$  oraz  $h_0$ ).
12. Analiza chropowatości powierzchni pozwoliła na wybór następujących najkorzystniejszych zestawów parametrów wejściowych: TiI1S, TiII9S, TiIII9Q, TiI6A, TiII6A, TiIII6A, TiII9A, TiIII9A, TiI4M, TiII4M, TiII7M, TiIII1 oraz TiII3I.
13. Wpływ układu kinematycznego na chropowatość powierzchni miał kluczowe znaczenie dla stali C45 opisaną parametrem Ra, dla stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT opisaną parametrem Rt, dla stopu aluminium PA6 opisaną parametrem Ra, dla stopu mosiądzu MO58 reprezentowaną parametrami Rz, Rt oraz Ra.
14. Najkorzystniejszym układem kinematycznym zastosowanym do obróbki otworów dla których określono chropowatość powierzchni opisaną parametrami Rz, Rt, Ra dla stali C45, stopu mosiądzu MO58 oraz Inconelu 718 był pierwszy układ kinematyczny. Natomiast dla stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT oraz stopu aluminium PA6 był to układ kinematyczny drugi.
15. Analiza zadziorów na wyjściu otworu pozwoliła ustalić następujące najkorzystniejsze zestawy parametrów wejściowych: TiI2S, TiII6Q, TiIII6Q, TiIII7M, TiIII8M, TiIII1I, TiIII1I, TiII2I, TiII3I, TiIII3I, TiI4I oraz TiIII9I.
16. Układ kinematyczny w wysokości oraz szerokości zadziorów na wyjściu otworu miał bardzo duży wpływ dla stali C45 opisaną parametrem  $b_f$ , dla stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT opisaną parametrem  $b_f$ , dla stopu mosiądzu MO58 opisaną parametrami  $h_0$  oraz  $b_f$ .
17. Najkorzystniejszym układem kinematycznym względem dwóch parametrów zadziorów dla stopu mosiądzu MO58 był układ kinematyczny III.
18. Analizę Fouriera można stosować do przejrzystej oceny przypadków odchyłek okrągłości w każdym badanym materiale.
19. Odchyłkę walcowości (baryłkowość otworu), w stopie aluminium PA6, uzyskano taką samą niezależnie od wybranego układu kinematycznego.
20. Baryłkowość otworu dominowała w stopie mosiądzu MO58 niezależnie od wybranego układu kinematycznego.
21. W stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT niezależnie od wybranego układu kinematycznego dominował zarys podwójnego zniekształcenia linii środka.
22. Po wykonaniu otworów w stali C45 oraz stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT w ocenie odchyłki okrągłości wszędzie dominowała trójgraniastość.
23. W stopie aluminium PA6 oraz w stopie mosiądzu MO58 na końcu otworu stwierdzono sześciograniastość w drugim oraz trzecim układzie kinematycznym.

24. Na wyjściu otworów wykonanych w stopie mosiądzu MO58 oraz Inconelu 718 dominowały owalność wraz z trójgraniastością niezależnie od wybranego układu kinematycznego.
25. Z optymalizacji wielokryterialnej GRA określono najkorzystniejsze parametry wejściowe procesu wiercenia dla których to uzyskano najmniejsze wartości wyjściowe. Dla stali C45:  $n = 3183$  obr/min,  $f_n = 0,14$  mm/obr oraz drugi układ kinematyczny. Dla stali ulepszonej cieplnie 40HM + QT:  $n = 3979$  obr/min,  $f_n = 0,14$  mm/obr oraz drugi układ kinematyczny. Dla stopu aluminium PA6:  $n = 4775$  obr/min,  $f_n = 0,14$  mm/obr oraz drugi układ kinematyczny. Dla stopu mosiądzu MO58:  $n = 4775$  obr/min,  $f_n = 0,1$  mm/obr oraz drugi układ kinematyczny. Dla Inconelu 718:  $n = 955$  obr/min,  $f_n = 0,075$  mm/obr oraz trzeci układ kinematyczny.

## 6.2. Kierunki dalszych badań

Wykonane prace w niniejszej rozprawie objęły tylko pewien zakres dotyczący badań wpływu układu kinematycznego procesu wiercenia na jakość otworu. W związku z tym przedstawiono poniżej spis zagadnień na które powinno się zwrócić uwagę w przyszłych badaniach:

1. Przeprowadzenie badań jakości wykonanych otworów w różnych operacjach np. powiercania, pogłębiania i rozwiercania. Przeprowadzenie podobnych badań na innych obrabiarkach np. centrach wytaczarskich i frezarskich.
2. Przeprowadzenie badań dokładności wymiarowo kształtowej wykonanych otworów wg IV kinematyki: przedmiot obrabiany wykonuje ruch obrotowy, natomiast narzędzie wykonuje ruch obrotowy w tym samym kierunku do ruchu przedmiotu oraz ruch posuwowy prostoliniowy.
3. Określenie zużycia wiertła w każdym układzie kinematycznym.
4. Przeprowadzenie pomiaru sił i momentów w każdym układzie kinematycznym.
5. Opracowanie stanowiska pozwalającego sprawdzać wpływ sposobu i dokładności zamocowania wiertła na jakość wierconego otworu.
6. Opracowanie nowych innowacyjnych konstrukcji wiertła, które pozwolą na zwiększenie produktywności procesu wiercenia.
7. Wpływ rodzaju chłodzenia na jakość otworu w każdym układzie kinematycznym.
8. Opracowanie rozwiązań konstrukcyjno-technologicznych zwiększających dokładności wymiarowo kształtowe wykonanych otworów. Poprawi to jakość technologiczną tych otworów.



## LITERATURA

1. Grzesik W., *Podstawy skrawania materiałów metalowych*, Warszawa: WNT, **1998**.
2. Zębała W., *Modelowanie procesu skrawania*, Kraków: WPK, **2011**.
3. Streubel A., *Obróbka długich otworów*, Wrocław: WPW, **1993**.
4. Levchenko A. I., Taranenko V. A.: *Matematicheskaya model processa glubokogo sverleniya*, Mechanics '98: Proceedings of the International Scientific Conference. Rzeszów **1998**, p. 75-82.
5. Levchenko A., Taranenko W., *Identification and automation of deep-hole drilling*, Proc.2<sup>nd</sup> Int. Conf. "Measuring and machining of sculptured surfaces". Kraków **2000**. p. 149-155.
6. Li S. J., Zhang P. K., *Optimization of the small and deep hole drilling parameters*, Progress of Machining Technology: With Some Topics in Advanced Manufacturing Technology **2000**, p. 673-677.
7. Troickiy N. D., *Glubokiye sverleniye*, Mashinostroyeniye **1971**. 176 p.
8. Ulitin G. M., *The longitudinal vibrations of an elastic rod simulating a drilling rig*, International Applied Mechanics **2000**, vol. 36, nr 10, p. 1380-1384.
9. Zhilis V. I., Vasenis G. A., *Vliyaniye dliny i sposoba izgotovleniya sverl na ih stoykost' I tochnost' otverstiy*, Stanki I instrument **1995**, nr 1, p. 11-14.
10. Gavrish A. O., Nikitenko M. F., *Opredefleniye ustoychivosti vibrosverleniya*, Tekhnologiya avtomatizatsiya mashinostroyeniya. – Kiyev Tehnika **1984**. Vup. 33. p. 19-21.
11. Zubrzycki J., *Zwiększenie dokładności wiercenia wibracyjnego głębokich otworów*, Lublin WLTN, **2014**.
12. Storch B., *Podstawy obróbki skrawaniem*, Koszalin: WPK, **2001**.
13. Kaczmarek J., *Podstawy obróbki wiórowej, ścierniej i erozyjnej*, WNT, Warszawa, **1970**.
14. Hulboj S., *Obróbka ubytkowa*, Częstochowa: WPC, **1997**.
15. Kudinov V. A.: *Dinamika stankov*, Mashinostroyeniye **1985**, p. 224.
16. Skrodziewicz J., Marchelek K., Tomokov J., *Doświadczalne badania i estymacja empirycznych charakterystyk dynamicznych procesu skrawania*, Prace Naukowe ITBM Politechniki Wrocławskiej **1985**, 30, s. 298.
17. Zhang P., Mei Ch., Guo X., *Vibration Drilling the 0Cr18Ni9Ti Stainless Steel Micro-hole*, Advanced Materials and Process Technology, PTS 1 – 3 Book Series, Applied Mechanics and Materials **2012**, vol. 217-219, p. 1592-1595, Part: 1-3.
18. Aamir M., Giasin K., Tolouei-Rad M., Vafadar A., *A review: drilling performance and hole quality of aluminium alloys for aerospace applications*, Journal of materials research and technology **2020**, p. 12484-12500.
19. Feld M., *Podstawy projektowania procesów technologicznych typowych części maszyn*, Warszawa: WNT, **2003**.
20. Aized T., Amjad M., *Quality improvement of deep-hole drilling process of AISI*

- D2, Int J Adv Manuf Technol **2013**, p. 2493-2503.
21. Sz wajka K., Zielińska-Sz wajka J., *Wpływ wybranych parametrów skrawania na dokładność obróbki w procesie wiercenia stopu Ti6Al4V*, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej 299 **2019**, s. 79-92.
  22. Vipin, Kant S., Jawalkar CS., *Parametric Modeling in Drilling of Die Steels using Taguchi Method based Response Surface Analysis*, Materials Today: Proceedings 5 **2018**, p. 4531-4540.
  23. Prasanna J., Karunamoorthy L., Venkat Raman M. , Prashanth S., Raj Chordia D., *Optimization of process parameters of small hole dry drilling in Ti-6Al-4V using Taguchi and grey relational analysis*, Measurement **2014**, p. 346-354.
  24. Kurt M., Bagci E., Kaynak Y., *Application of Taguchi methods in the optimization of cutting parameters for surface finish and hole diameter accuracy in dry drilling processes*, Int J Adv Manuf Technol **2009**, p. 458-469.
  25. Dheeraj N., Sanjay S., Kiran Bhargav K., Jagadesh T., *Investigations into solid lubricant filled textured tools on hole geometry and surface integrity during drilling of aluminium alloy*, Materials Today: Proceedings **2020**, p. 991-997.
  26. Singh K. P., Kumar K., Saini P., *Optimization of surface roughness and hole diameter accuracy in drilling of EN-31 alloy steel – A TGRA based analysis*, Materials Today: Proceedings **2020**, p. 2961-2971.
  27. Angelone R., Caggiano A., Improta I., Nele L., Teti R., *Characterization of hole quality and temperature in drilling of Al/CFRP stacks under different process condition, 12<sup>th</sup> CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, 2018 Italy*, p. 319-324.
  28. Yoon Par S., Jong Choi W., Hoon Choi C., Soap Choi H., *Effect of drilling parameters on hole quality and delamination of hybrid GLARE laminate*, Composite Structures **2018**, p. 684-698.
  29. Beuscart T., Arrazola P-J., Riviere-Lorphevre E., Flores P., Ducobu F., *Hole quality analysis of AISI 304-GFRP stacks using robotic drilling*, Procedia CIRP **2022**, p. 436-441.
  30. Cicek A., Ucak N., *The effects of cutting conditions on cutting remperature and hole quality in drilling of Inconel 718 using solid carbide drills*, Journal of Manufacturing Processes **2018**, p. 662-673.
  31. Giasin K., Hodzic A., Phadnis V., Ayvar-Soberanis S., *Assessment of cutting forces and hole quality in drilling Al2024 aluminium alloy: experimental and finite element study*, Int J Adv Manuf Technol **2016**, p. 2041-2061.
  32. Giasin K., Ayvar-Soberanis S., *An Investigation of burrs, chip formation, hole size, circularity and delamination during drilling operation of GLARE using ANOVA*, Composite Structures **2017**, p. 745-760.
  33. Nouari M., List G., Girot F., Gehin D., *Effect of machining parameters and coating on wear mechanisms in dry drilling of aluminium alloys*, International Journal of Machine Tools & Manufacture **2005**, p. 1436-1442.
  34. Kurt M., Kaynak Y., Bagci E., *Evaluation of drilled hole quality in Al 2024 alloy*, Int J Adv Manuf Technol **2008**, p. 1051-1060.

35. Dedeakayogullari H., Kacal A., Keser K., *Modeling and prediction of surface roughness at the drilling of SLM-Ti6Al4V parts manufactured with pre-hole with optimized ANN and ANFIS*, Measurement **2022**, p. 112029.
36. Dedeakayogullari H., Kacal A., *Experimental investigation of hole quality in drilling of additive manufacturing Ti6Al4V parts produced by hole features*, Journal of Manufacturing Processes **2022**, p. 745-758.
37. Zeng K., Wu X., Jiang F., Zhang J., Kong J., Shen J., Wu H., *Experimental research on micro hole drilling of polycrystalline Nd:YAG*, Ceramics International, **2022**, p. 9658-9666.
38. Yagishita H., Fujio M., *Effect of Coolant upon Hole Making Accuracy of Ti6Al4V by Drilling - Consideration of Hole Diameter in the Depth Direction*, Manufacturing Letters, **2022**, p. 333-341.
39. Bertolini R., Savio E., Ghiotti A., Bruschi S., *The Effect of Cryogenic Cooling and Drill Bit on the Hole Quality when Drilling Magnesium-based Fiber Metal Laminates*, Procedia Manufacturing 53, **2021**, p. 118-127.
40. Humienny Z., Osanna P.H., Tamre M., Weckenmann A., Blunt L., Jakubiec W., *Specyfikacje geometrii wyrobów*, Warszawa WNT **2004**.
41. Cakur M. C., *Modern metal cutting methods*, Turkey Bursa **2015**.
42. Adamczak S., *Pomiary geometryczne powierzchni – zarysy kształtu falistość i chropowatość*, Warszawa WNT, **2008**.
43. Humienny Z., Osanna P.H., Tamre M., Weckenmann A., Blunt L., Jakubiec W., *Specyfikacje geometrii wyrobów*, Warszawa WNT **2004**.
44. Denkena B., Bergmann B., Kaiser S., Mucke M., Bolle D., *Process-parallel center deviation measurement of a BTA deep-hole drilling tool*, 4<sup>th</sup> International Conference on System-Integrated Intelligence **2018**, p. 229-234.
45. Cicek A., Kivak T., Ekici E., *Optimization of drilling parameters using Taguchi technique and response surface methodology (RSM) in drilling of AISI 304 steel with cryogenically HSS drills*, I Intell Manuf **2015**, p. 295-305.
46. Balaji M., Venkata Rao K., Mohan Rao N., Murthy B.S.N., *Optimization of drilling parameters for drilling of Ti-6Al-4V based on surface roughness, flank wear and drill vibration*, Measurement **2018** p. 332-339
47. Umesh Gowda B.M., Ravindra H.V., Naveen Prakash G.V., Ninshanth P., Urgrasen G., *Optimization of process parameters in drilling of epoxy Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composite material*, Materials Today: Proceedings 2 **2015**, p. 2852-2861.
48. Prakash S., LillyMercy J., Salugu M.K., Vineeth K.S.M., *Optimization of drilling characteristics using Grey Relational Analysis (GRA) in Medium Density Fiber Board (MDF)*, Materials Today: Proceedings 2 **2015**, p. 1541-1551.
49. Sandeep Reddy A. V., Ajay kumar S., Jagadesh T., *The Influence of graphite, MOS<sub>2</sub> and Blasocut lubricant on hole and chip geometry during peck drilling of aerospace alloy*, Materials Today: Proceedings 24 **2020**, p. 690-697.
50. Zhang X., Leong Tnay G., Liu K., Senthil Kumar A., *Effect of apex offset inconsistency on hole straightness deviation in deep hole gun drilling of Inconel*

- 718, International Journal of Machine Tools and Manufacture **2018**, p. 123-132.
51. Abdelhafeez A. M., Soo S. L., Aspinwall D. K., Dowson A., Arnold D., *Burr formation and hole quality when drilling titanium and aluminium alloys*, CIRPe **2015**, p. 230-235.
  52. Khanna N., Agrawal C., Gupta M. K., Song Q., *Tool wear and hole quality evaluation in cryogenic Drilling of Inconel 718 superalloy*, Tribology International **2020**, p.106084.
  53. Ahmed, A.; Lew, M.T.; Diwakar, P.; Kumar, A.S.; Rahman, M. *A novel approach in high performance deep hole drilling of Inconel 718*. Precis. Eng. **2019**, p. 432-437
  54. Oezkaya, E.; Beer, N.; Biermann, D. *Experimental studies and CFD simulation of the internal cooling conditions when drilling Inconel 718*. Int. J. Mach. Tools Manuf. **2016**, p. 52-65.
  55. Neo, D. W. K.; Liu, K.; Kumar, A.S. *High throughput deep-hole drilling of Inconel 718 using PCBN gun drill*. J. Manuf. Process. **2020**, p. 302-311
  56. Müller, D.; Lange, A.; Kirsch, B.; Aurich, J.C. *Tool lifetime when drilling Inconel 718 in dependence of the cooling channel design –Influence of the clearance angle, the channel diameter, number, and shape*. Procedia CIRP, **2021**, p. 278-281
  57. Al-Tameemi, H.A.; Al-Dulaimi, T.; Awe, M.O.; Sharma, S.; Pimenov, D.Y.; Koklu, U.; Giasin, K. *Evaluation of Cutting-Tool Coating on the Surface Roughness and Hole Dimensional Tolerances during Drilling of Al6061-T651 Alloy*, Materials **2021**, p. 1783.
  58. Shah P., Khanna N., Singla, A. K., Bansal A., *Tool wear, hole quality, power consumption and chip morphology analysis for drilling Ti-6Al-4V using LN<sub>2</sub> and LCO<sub>2</sub>*, Tribology International, **2021**, p. 107190.
  59. Boughdiri I., Giasin K., Mabrouki T., Zitoune R., *Effect of cutting parameters on thrust force, torque, hole quality and dust generation during drilling of GLARE 2B laminates*, Composite Structures, **2021**, p. 113562.
  60. Senthil Babu S., Dhanasekaran C., *Comparative analysis of thrust force, roughness and roundness error in drilling of aluminium composites using RSM, ANN and fuzzy logic*, Materials Today: Proceedings, **2022**, p. 908-917.
  61. Kumar D., Singh K.K., *Experimental analysis of Delamination, Thrust Force and Surface roughness on Drilling of Glass Fibre Reinforced Polymer Composites Material Using Different Drills*, Materials Today: Proceedings 4 **2017**, p. 7618-7627.
  62. Kilickap E., Huseyinoglu M., Yardimeden A., *Optimization of drilling parameters on surface roughness in drilling of AISI 1045 using response surface methodology and genetic algorithm*, Int J Adv Manuf Technol **2011**, p. 79-88.
  63. Ravindranath V.M., Shiva Shankar G.S., Basavarajappa S., Suresh R., *Optimization of Al/B<sub>4</sub>C and Al/B<sub>4</sub>C/Gr MMC Drilling Using Taguchi Approach*, Materials Today: Proceedings 4 **2017**, p. 11181-11187.
  64. Aamir M., Tolouei-Rad M., Giasin K., Vafadar A., *Machinability of Al2024*,

- Al6061, and Al5083 alloys using multi-hole simultaneous drilling approach*, Journal of Materials research and technology **2020**, p. 10991-11002.
65. Angelone R., Caggiano A., Improta I., Nele L., Teti R., *Roughness of composite materials: characterization of hole quality in drilling of Al/CFRP stacks*, 13<sup>th</sup> CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, CIRP ICME '2019, p. 473-478.
  66. Biermann D., Heilmann M., Kirschner M., *Analysis of the Influence of Tool Geometry on Surface Integrity in Single-lip Deep Hole Drilling with Small Diameters*, 1<sup>st</sup> CIRP Conference on Surface Integrity **2011**, p. 16-21.
  67. Wegert R., Guski V., Schmauder S., Mohring H.-C., *Effects on surface and peripheral zone during single lip deep hole drilling*, 5<sup>th</sup> CIRP CSI **2020**, p. 113-118.
  68. Siddiquee A.N., Khan Z.A., Goel P., Kumar M., Agarwal G., Khan N.Z., *Optimization of Deep Drilling Process Parameters of AISI 321 Steel using Taguchi Method*, 3<sup>rd</sup> International Conference on Materials Processing and Characterisation **2014**, p. 1217-1225.
  69. Sharman, A.R.C.; Amarasinghe, A.; Ridgway, K. *Tool life and surface integrity aspects when drilling and hole making in Inconel 718*. Journal of Materials Processing Technology. **2008**, p. 424-432.
  70. Karabulut, Y.; Kaynak, Y. *Drilling process and resulting surface properties of Inconel 718 alloy fabricated by Selective Laser Melting Additive Manufacturing*. Procedia CIRP. **2020**, p. 355-359.
  71. Sahoo, A. K.; Jeet, S.; Bagal, D. K.; Barua, A.; Pattanaik, A. K.; Behera, N. *Parametric optimization of CNC-drilling of Inconel 718 with cryogenically treated drill-bit using Taguchi-Whale optimization algorithm*. Mater. Today. **2022**, p. 1591-1598.
  72. Shah, P.; Bhat, P.; Khanna, N. *Life cycle assessment of drilling Inconel 718 using cryogenic cutting fluids while considering sustainability parameters*. Sustainable Energy Technologies and Assessments. **2021**, p. 100950
  73. Guba N., Schumski L., Paulsen T., Karpuschewski B., *Vibration-assisted deep hole drilling of the aluminum material AlMgSi0.5*, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, **2022**, p. 57-66.
  74. Shanmugam, V.; Marimuthu, U.; Rajendran, S.; Veerasimman, A.; Basha, A.M.; Majid, M.S.B.A.; Esmaeely Neisiany, R.; Försth, M.; Sas, G.; Javad Razavi, S.M.; Das, O. *Experimental Investigation of Thrust Force, Delamination and Surface Roughness in Drilling Hybrid Structural Composites*. Materials **2021**, p. 4468.
  75. Hassan MH, Abdullah J, Franz G. *Multi-Objective Optimization in Single-Shot Drilling of CFRP/Al Stacks Using Customized Twist Drill*. Materials **2022**, p.1981.
  76. Demirsöz R, Yaşar N, Korkmaz ME, Günay M, Giasin K, Pimenov DY, Aamir M, Unal H. *Evaluation of the Mechanical Properties and Drilling of Glass Bead/Fiber-Reinforced Polyamide 66 (PA66)-Based Hybrid Polymer*

- Composites. Materials* **2022**, p.2765.
77. Ni, J.; Zeng, X.; Al-Furjan, M.S.H.; Zhao, H.; Guan, L.; Cui, Z.; Han, L. *Effect of Drilling Parameters on Machining Performance in Drilling Polytetrafluoroethylene*. *Materials* **2022**, p. 6922.
  78. Bi S., Liang J., *Experimental studies and optimization of process parameters for burrs in dry drilling of stacked metal materials*, *Int J Adv Manuf Technol* **2011**, p. 867-876.
  79. Shetty P. K., Shetty R,m Shetty D,m Rehaman n F., Jose T. K., *Machinability Study on Dry Drilling of Titanium Alloy Ti-6Al-4V using L<sub>9</sub> orthogonal array*, *International Conference on Advances in Manufacturing and Materials Engineering, AMME* **2014**, p. 2605-2614.
  80. Bronis, M.; Miko, E.; Nowakowski, L. *Analyzing the Effects of the Kinematic System on the Quality of Holes Drilled in 42CrMo4 + QT Steel*. *Materials* **2021**, p. 4046
  81. Bronis, M.; Miko, E.; Nowakowski, L. *Influence of the Kinematic System on the Geometrical and Dimensional Accuracy of Holes in Drilling*. *Materials* **2021**, p. 4568
  82. Bronis, M.; Miko, E.; Nowakowski, L.; Bartoszek, M. *A Study of the Kinematics System in Drilling Inconel 718 for Improving of Hole Quality in the Aviation and Space Industries*. *Materials* **2022**, p. 5500
  83. Bronis, M.; Miko, E.; Nozdrzykowski, K. *Drilling Strategies to Improve the Geometrical and Dimensional Accuracy of Deep through Holes Made in PA6 Alloy*. *Materials* **2023**, p. 110.

## NORMY

- [N1] - Norma PN-EN ISO 1101:2017-05 „Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) Tolerancje geometryczne Tolerancje kształtu, kierunku, położenia i bicia”
- [N2] – Norma PN-EN ISO 12181-1:2011 „Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) Okrągłość Część 1: Terminologia i parametry okrągłości”
- [N3] – Norma PN-EN ISO 12180-1:2012 „Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) Walcowość Część 1: Terminologia i parametry kształtu walcowego”
- [N4] – Norma PN-EN ISO 12181-2:2012 „Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) Okrągłość Część 2: Operatory specyfikacji”
- [N5] – Norma PN-EN ISO 12180-1:2012 „Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) Walcowość Część 2: Operatory specyfikacji”
- [N6] – Norma PN-ENO ISO 21920-2 „ Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) Struktura geometryczna powierzchni: Profil Część 2: Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni”

## **STRONY INTERNETOWE**

[S1] <https://www.hahn-kolb.net/-/11105060.sku/pl/PL/EUR/>

[S2] <http://www.sauter-tools.com/sauterproductadvisor/details.htm?toolId=113180>

[S3] <https://pl.dmgmori.com/produkty/obrabiarki/toczenie/uniwersalna-obrobka-tokarska/ctx/ctx-alpha-500>

[S4] <https://www.zeiss.pl/metrologia/produkty/systemy/wspolrzednoscione-maszyny-pomiarowe/portalowemaszyny-pomiarowe/prismo.html>

[S5] <https://www.kronosedm.pl/>

## STRESZCZENIE

W niniejszej rozprawie doktorskiej wykonano badania eksperymentalne procesu wiercenia głębokich otworów w pięciu różnych materiałach (stali C45, stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT, stopie aluminium PA6, stopie mosiądzu MO58 oraz Inconelu 718) stosując trzy różne układy kinematyczne.

Badania poprzedzono analizą stanu wiedzy z zakresu procesu wiercenia głębokich otworów. Przedstawiono dotychczasowe osiągnięcia z tego zakresu. Opracowano metodykę badawczą procesu wiercenia. Dodatkowo w pracy badawczej opracowano dla różnych materiałów teoretyczno-doświadczalne modele do prognozowania chropowatości powierzchni, odchyłki walcowości, prostoliniowości, okrągłości, błędu średnicy, wysokości oraz szerokości zadzioru powstającego na wyjściu otworu. Modele cechowały się dużymi wartościami współczynników determinacji (ponad 70%).

Przedstawiono charakterystykę: trzech układów kinematycznych procesu wiercenia, narzędzi, oprawki, maszyn, materiałów, mocowań, kształtu oraz sposobu kodowania próbek wykorzystanych w badaniach.

Opracowano wyniki badań dotyczących analizy dokładności wymiarowo-kształtowej otworów (odchyłki walcowości, prostoliniowości, okrągłości oraz błędu średnicy otworu). Układ kinematyczny miał kluczowe znaczenie w wielu parametrach dokładności wymiarowo-kształtowej otworów (w zależności od materiału). Wykorzystano analizę statystyczną ANOVA oraz zasymulowano wybrane stworzone modele matematyczne prognozujące wartości parametrów wyjściowych. Z analiz wynika, że wybór układu kinematycznego jest zależny od zastosowanego materiału.

Analizowano chropowatość powierzchni wykonanych otworów opisanych trzema wybranymi parametrami ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_t$ ). Najmniejsze wartości wybranych parametrów chropowatości powierzchni, uzyskano stosując drugi układ kinematyczny, dla stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT. Natomiast najmniejsze wartości parametrów  $R_a$ ,  $R_z$  i  $R_t$  uzyskano stosując pierwszy układ kinematyczny dla stali C45, stopu mosiądzu MO58 oraz Inconelu 718.

W dalszej części pracy przedstawiono analizę zadziorów na wyjściu otworu względem dwóch parametrów szerokości oraz wysokości zadziorów na wyjściu otworu. W tym przypadku tylko stop mosiądzu MO58 uzyskał jeden najkorzystniejszy układ kinematyczny (trzeci).

Każdy podrozdział pracy zawiera analizę statystyczną, budowę oraz symulację modeli matematycznych. Zaprezentowano szczegółową analizę odchyłki walcowości względem zniekształcenia linii środkowej. Wykonano analizę przypadków odchyłek okrągłości za pomocą analizy Fouriera. W stali C45 oraz stali ulepszonej cieplnie 40HM+QT w każdej części otworu dominowała trójgraniastość, niezależnie od zastosowanego układu kinematycznego. Wykonano optymalizację wielokryterialną – Grey Relational Analysis. Na jej podstawie wybrano najkorzystniejszy układ kinematyczny oraz wartości parametrów technologicznych dla których uzyskano najmniejsze wartości parametrów wyjściowych.



## ABSTRACT

In this dissertation, an experimental study of the process of drilling deep holes in five different materials (C45 steel, 40HM+QT tempered steel, PA6 aluminum alloy, MO58 brass alloy and Inconel 718) was performed using three different kinematic systems.

The research was preceded by an analysis of the state of knowledge in the field of the deep hole drilling process. Previous achievements in this field were presented. A research methodology for the drilling process was developed. In addition, in the research work, theoretical and experimental models were developed for various materials to predict surface roughness, deviation of cylindricity, straightness, roundness, diameter error, height and width of the burr formed at the exit of the hole. The models were characterized by high values of determination coefficients (more than 70%).

The characteristics of: the three kinematic systems of the drilling process, the tools, the toolholder, the machines, the materials, the fixtures, the shape, and the coding of the specimens used in the study are presented.

The results of studies on the analysis of the dimensional-shape accuracy of holes (deviations of cylindricity, straightness, roundness and hole diameter error) were developed. The kinematic system was crucial in many parameters of dimensional-shape accuracy of holes (depending on the material). ANOVA statistical analysis was used, and selected created mathematical models predicting the values of the output parameters were simulated. The analyses show that the choice of kinematic system depends on the material used.

The geometric structures of the surfaces of the drilled holes described by three selected parameters (Ra, Rz, Rt) were analyzed. The smallest values of the selected surface roughness parameters were obtained using the second kinematic system for 40HM+QT tempered steel. In contrast, the smallest values of Ra, Rz and Rt parameters were obtained using the first kinematic system for C45 steel, MO58 brass alloy and Inconel 718.

The rest of the paper presents an analysis of the burrs at the hole exit against two parameters of the width and height of the burrs at the hole exit. In this case, only MO58 brass alloy obtained the single most favorable kinematic system (the third).

Each subsection of the paper includes statistical analysis, construction and simulation of mathematical models. A detailed analysis of cylindricity deviation versus centerline distortion is presented. Case analysis of roundness deviations using Fourier analysis was performed. In C45 steel and 40HM+QT tempered steel, three-roundness was dominant in every part of the hole, regardless of the kinematic system used. A multi-criteria optimization - Grey Relational Analysis - was performed. Based on it, the most favorable kinematic system and the values of technological parameters for which the smallest values of output parameters were obtained were selected.