



Politechnika Świętokrzyska

Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Krzysztof Kuźmicki

WDROŻENIE KONCEPCJI USTALENIA DZIEDZICZNOŚCI TECHNOLOGICZNEJ PROCESU WYTWARZANIA DRUGIEJ GENERACJI ZESPOLONYCH PIAST SAMOCHODOWYCH Z ŁOŻYSKIEM TOCZNYM Z WYKORZYSTANIEM NOWOCZESNYCH SYSTEMÓW POMIAROWYCH

Promotor:

prof. dr hab. inż. Stanisław Adamczak, dr h.c.

Kielce 2026

*Składam serdeczne podziękowania
Panu prof. dr. hab. inż. Stanisławowi Adamczakowi
za cenne wskazówki merytoryczne
oraz pomoc naukową przy pisaniu niniejszej pracy*

*Rozprawę doktorską dedykuję mojej żonie Annie,
córcie Katarzynie, synowi Łukaszowi, synowej Annie
oraz wnuczkom Emilii i Teodorowi*

SPIS TREŚCI

SPIS TREŚCI.....	5
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SKRÓTÓW I OZNACZEŃ.....	7
ROZDZIAŁ I.....	10
WPROWADZENIE	10
ROZDZIAŁ II.....	13
AKTUALNY STAN WIEDZY DOTYCZĄCY PIAST ŁOŻYSKOWYCH ORAZ DZIEDZICZNOŚCI TECHNOLOGICZNEJ	13
2.1. Piasty łożyskowe.....	13
2.2. Dziedziczność technologiczna	18
2.3. Podsumowanie	30
ROZDZIAŁ III.....	32
CEL I SPOSÓB REALIZACJI PRACY	32
3.1. Cel pracy	32
3.2. Teza pracy.....	33
3.3. Sposób realizacji pracy	33
ROZDZIAŁ IV.....	35
ANALIZA KONSTRUKCJI PIASTY ŁOŻYSKOWEJ I MODEL MATEMATYCZNY DLA LUZU OSIOWEGO.....	35
4.1. Analiza konstrukcji, równanie łańcucha wymiarowego i tolerancji	35
4.2. Weryfikacja modelu matematycznego równania tolerancji	39
4.2.1. Analiza łańcucha wymiarowego	40
4.2.2. Synteza łańcucha wymiarowego.....	43
4.3 Podsumowanie	46
ROZDZIAŁ V	47
PROCES TECHNOLOGICZNY – METODA BADANIA	47
5.1. Badanie zdolności maszyn technologicznych pod kątem zapewnienia wymaganych wartości ogniw łańcucha wymiarowego.....	55
5.2. Podsumowanie	57
ROZDZIAŁ VI.....	58
OCENA WYNIKÓW PRZEPROWADZONYCH BADAŃ.....	58
6.1. Analiza opisowa i badanie normalności średnicy bieżni pierścienia wewnętrznego lewego.....	61
6.2. Analiza opisowa i badanie normalności średnicy bieżni pierścienia wewnętrznego prawego	68
6.3. Analiza opisowa i badanie normalności średnicy obu bieżni pierścienia zewnętrznego	75

6.3.1. Analiza opisowa i badanie normalności średnicy bieżni lewej pierścienia zewnętrznego	75
6.3.2. Analiza opisowa i badanie normalności średnicy bieżni prawej pierścienia zewnętrznego	81
6.4. Badanie korelacji pomiędzy zmiennymi zależnymi a niezależnymi	89
6.5. Analiza jednorodności wariancji przy użyciu testu Levene'a.....	91
6.6. Analiza korelacji średnic bieżni po operacjach toczenia, obróbki cieplnej i szlifowania	95
6.7. Badanie regresji liniowej pomiędzy średnicą bieżni po toczeniu i średnicą bieżni po obróbce cieplnej	100
6.8 Podsumowanie oceny wyników przeprowadzonych badań.....	114
ROZDZIAŁ VII	117
PODSUMOWANIE I WNIOSKI	117
7.1. Podsumowanie	117
7.2. Wnioski końcowe dotyczące dziedziczności technologicznej w procesie wytwarzania piast łożyskowych drugiej generacji.....	124
LITERATURA	126
NORMY.....	135
STRONY INTERNETOWE	136
SPIS RYSUNKÓW	137
SPIS TABEL.....	142
STRESZCZENIE.....	144
SUMMARY	146
ZAŁĄCZNIKI	148
Załącznik A.....	148
Załącznik B	152
Załącznik C	157

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SKRÓTÓW I OZNACZEŃ

a_i	współczynniki wygenerowane na podstawie teoretycznego rozkładu normalnego
A	poziom istotności
B	współczynnik regresji
b^*	standaryzowany współczynnik regresji - wskaźnik siły wpływu predyktora na zmienną zależną
H_0	hipoteza zerowa
σ	odchylenie standardowe
σ_x	odchylenie standardowe zmiennej x
σ_y	odchylenie standardowe zmiennej y
Dw	statystyka Durbin Watsona
Λ	wartość Lambda Wilksa
Dwlt	średnica bieżni pierścienia wewnętrznego lewego po toczeniu
Dwlc	średnica bieżni pierścienia wewnętrznego lewego po obr. cieplnej
Dwls	średnica bieżni pierścienia wewnętrznego lewego po szlifowaniu
Dwpt	średnica bieżni pierścienia wewnętrznego prawego po toczeniu
Dwpc	średnica bieżni pierścienia wewnętrznego prawego po obr. cieplnej
Dwps	średnica bieżni pierścienia wewnętrznego prawego po szlifowaniu
Dzlt	średnica bieżni lewej pierścienia zewnętrznego po toczeniu
Dzlc	średnica bieżni lewej pierścienia zewnętrznego po obr. cieplnej
Dzls	średnica bieżni lewej pierścienia zewnętrznego po szlifowaniu
Dzpt	średnica bieżni prawej pierścienia zewnętrznego po toczeniu
Dzpc	średnica bieżni prawej pierścienia zewnętrznego po obr. cieplnej
Dzps	średnica bieżni prawej pierścienia zewnętrznego po szlifowaniu
E	macierz błędów (wariancji wewnątrzgrupowej)
e_t	reszta modelu regresji dla obserwacji
F	statystyka F zwana też testem F lub ilorazem wariancji

GPS	Geometrical Product Specifications
H	macierz efektów (wariancji międzygrupowej)
L	luz osiowy
L	liczba danych w próbce
M_j	mediana lub średnia grupy j
M	odległość osiowa między środkami bieżni pierścienia zewnętrznego
Mc	odległość osiowa między środkami bieżni pierścienia zewnętrznego po obróbce cieplnej
Ms	odległość osiowa między środkami bieżni pierścienia zewnętrznego po szlifowaniu
Mt	odległość osiowa między środkami bieżni pierścienia zewnętrznego po toczeniu
N	odległość osiowa między środkami bieżni pierścieni wewnętrznych
Nl	odległość osiowa między środkiem bieżni lewego pierścienia wewnętrznego a jego wąskim czołem
Nlc	odległość osiowa między środkiem bieżni lewego pierścienia wewnętrznego a jego wąskim czołem po obróbce cieplnej
Nls	odległość osiowa między środkiem bieżni lewego pierścienia wewnętrznego a jego wąskim czołem po szlifowaniu
Nlt	odległość osiowa między środkiem bieżni lewego pierścienia wewnętrznego a jego wąskim czołem po toczeniu
$Np.$	odległość osiowa między środkiem bieżni prawego pierścienia wewnętrznego a jego wąskim czołem
Npc	odległość osiowa między środkiem bieżni prawego pierścienia wewnętrznego a jego wąskim czołem po obróbce cieplnej
Nps	odległość osiowa między środkiem bieżni prawego pierścienia wewnętrznego a jego wąskim czołem po szlifowaniu
Npt	odległość osiowa między środkiem bieżni prawego pierścienia wewnętrznego a jego wąskim czołem po toczeniu
P	próg istotności
R	współczynnik liniowej korelacji (Pearsona)
r^2	współczynnik determinacji
r_{pb}	współczynnik korelacji punktowo-dwuseryjnej Pearsona

r_w	promień bieżni pierścieni wewnętrznych
r_z	promień bieżni pierścienia zewnętrznego
R	suma promieni bieżni pierścienia zewnętrznego i wewnętrznego
R^2	współczynnik determinacji - miara dopasowania modelu regresji liniowej do danych
S	średnia arytmetyczna różnicy średnic bieżni pierścienia zewnętrznego i wewnętrznego
SSE	suma kwadratów reszt
SSR	suma kwadratów regresji
SST	suma kwadratów całkowita - łączna zmienność zmiennej zależnej
T_{Ai}	tolerancja ogniwa składowego łańcucha wymiarowego
T_L	tolerancja luzu osiowego
T_d	tolerancja średnicy kulki
T_n	tolerancja wymiaru n
T_m	tolerancja wymiaru m
T_R	tolerancja sumy promieni bieżni pierścienia zewnętrznego i wewnętrznego
T_S	tolerancja średniej arytmetycznej różnicy średnic bieżni pierścienia zewnętrznego i wewnętrznego
W	liczba obserwacji
$\bar{x}$	średnia arytmetyczna zmiennej x
$\bar{X}_0$	średnia zmiennej ciągłej dla grupy, w której zmienna dychotomiczna = 0
$\bar{X}_1$	średnia zmiennej ciągłej dla grupy, w której zmienna dychotomiczna = 1
x_i	poszczególne obserwacje zmiennej x
x_{ij}	i -ta obserwacja w j -tej grupie
$\bar{y}$	średnia arytmetyczna zmiennej y
y_i	poszczególne obserwacje zmiennej y
Z	liczba predyktorów
z_{ij}	odległość absolutna od mediany/średniej

ROZDZIAŁ I

WPROWADZENIE

Termin dziedziczność technologiczna w inżynierii mechanicznej określa proces, w którym właściwości materiałowe i geometryczne elementów zmieniają się pod wpływem wcześniejszych operacji technologicznych, takich jak obróbka cieplna, plastyczna czy mechaniczna. W trakcie realizacji tych operacji technologicznych dochodzi do odkształceń materiałowych i zmian właściwości mechanicznych. Pod wpływem toczenia, frezowania, obróbki cieplnej powstają naprężenia wewnętrzne oraz pojawiają się zmiany właściwości fizycznych i mechanicznych materiału [1,2]. Mają one przełożenie na dokładność ostatecznego kształtu i topografii powierzchni tworzonego wyrobu. Szczególną uwagę należy tu poświęcić naprężeniom wewnętrznym, które są naprężeniami pozostającymi w materiale po zakończeniu operacji obróbczej [3]. Powstają one w wyniku różnic w odkształceniach, termicznych gradientów oraz lokalnych plastycznych deformacji podczas procesów technologicznych. W trakcie toczenia, frezowania, wiercenia czy szlifowania powstają naprężenia w wyniku nagrzewania strefy skrawania, a także w wyniku nieregularnego usuwania materiału, co powoduje lokalne deformacje i powstanie asymetrycznych sił w materiale [4].

Z kolei w czasie procesów obróbki cieplnej, podczas których dochodzi do zmian struktury materiału powstają naprężenia, szczególnie gdy chłodzenie nie jest równomierne w całym detalu i twardość nie jest jednakowa w całej objętości elementu. Inne procesy takie jak kucie, walcowanie czy przeróbka plastyczna na zimno, w wyniku których materiał ulega trwałej deformacji, prowadzą do nagromadzenia wewnętrznych naprężeń w miejscach, gdzie występują największe odkształcenia. Naprężenia wewnętrzne mogą wywołać nieprzewidziane zmiany wymiarowe podczas dalszych operacji technologicznych. Ich relaksacja prowadzi do deformacji geometrycznych, takich jak owalizacja, wichrowatość czy innych zmian wymiarowych. Klasycznym przykładem są tu pierścienie łożyskowe, które po hartowaniu ulegają odkształceniu, zmieniają swoją średnicę zewnętrzną i wewnętrzną. Detale o nieregularnym kształcie są szczególnie podatne na występowanie naprężeń, prowadzących do ich skręcenia lub wybożenia podczas dalszych operacji. Nagromadzone naprężenia wewnętrzne w wyniku wcześniejszych obróbek plastycznej, skrawaniem lub powstałe w wyniku przemian fazowych podczas hartowania i odpuszczania mogą powodować pęknięcia i mikropęknięcia w materiale. Mają one skłonność do powiększania się podczas obróbki ścierniej.

Aby zminimalizować wpływ naprężeń wewnętrznych na zmiany wymiarowe, stosuje się różnorodne techniki, takie jak wyżarzanie odpuszczające czy też wieloetapowe zbieranie nadadtku podczas operacji szlifierskich.

Projektowanie procesu technologicznego musi uwzględniać minimalizację negatywnego wpływu pierwszych operacji na następujące po nich kolejne etapy produkcji. Tym bardziej, że podczas ich realizacji dochodzi do efektu stopniowego kumulowania się drobnych błędów wymiarowych i deformacji. Inaczej mówiąc, błąd popełniony na wcześniejszym etapie, mimo że sam w sobie nie stanowi problemu i może być tolerowany, to przenoszony i potęgowany w dalszych operacjach może stać się przyczyną komplikacji. Zjawisko to jest szczególnie istotne w procesach produkcyjnych wyrobów precyzyjnych, gdzie kumulacja nawet minimalnych odchyłek wymiarowych może prowadzić do poważnych błędów w końcowym produkcie. Dlatego w każdym etapie procesu technologicznego należy uwzględniać tolerancje wymiarowe i geometryczne, które określają dopuszczalne odchyłki od wymiarów nominalnych. Istotne jest tu rozważenie całkowitej dopuszczalnej odchyłki, która może zostać podzielona pomiędzy poszczególne etapy procesu. Każdy etap powinien być zaplanowany tak, aby błąd w jednej operacji nie przekraczał wartości, które mogłyby negatywnie wpłynąć na późniejsze etapy i ostateczne wymiary detalu.

Zarządzanie dziedzicznością tolerancji jest bardzo ważne w projektowaniu procesów technologicznych. Wymaga od technologa nie tylko optymalnego doboru narzędzi oraz maszyn, ale także stosowania strategii kompensacji odchyłek w kolejnych operacjach. Jego celem jest minimalizowanie wpływu błędów powstałych na wcześniejszych etapach obróbki poprzez świadome wprowadzanie korekt (kompensacji) w operacjach następujących po sobie. Proces kompensacji odchyłek opiera się na pomiarze wymiarów detalu po każdej operacji technologicznej i wprowadzeniu odpowiednich zmian. Ma to kluczowe znaczenie dla zapewnienia wysokiej dokładności wymiarowej i jakości wyrobu końcowego w przypadku produkcji złożonych detali, gdzie dopuszczalne odchyłki wymiarowe są minimalne. Pozwala to na redukcję kosztów wynikających z wadliwych produktów, a także zwiększa efektywność procesów produkcyjnych eliminując konieczność przeprowadzania dodatkowych operacji naprawczych i zmniejszając liczbę wyrobów niezgodnych. W nowoczesnych procesach produkcyjnych stosowane jest oprogramowanie komputerowe umożliwiające wprowadzanie poprawek kompensujących na podstawie wyników pomiarów uzyskanych w czasie rzeczywistym. Obrabiarki CNC mogą na bieżąco monitorować wymiary detalu oraz obliczać odchyłki i wprowadzać korekty parametrów procesu. W nielicznych przypadkach możliwe jest

również obliczanie kompensacji z wykorzystaniem modeli matematycznych opisujących zachowanie elementu pod wpływem operacji technologicznych. Jednak stosowane metody modelowania procesów obróbki metali są obarczone niedoskonałościami. Pomimo stosowania modeli analitycznych, MES oraz podejść hybrydowych z użyciem symulacji wieloetapowych i wielkoskalowych, które pozwalają śledzić wpływ wcześniejszych operacji na końcowe cechy wyrobu, nie można w stu procentach ocenić i zoptymalizować parametrów technologicznych w pełnym cyklu wytwarzania [5]. Niniejsza praca doktorska jest próbą zbudowania modeli matematycznych opisujących zmiany wymiarowe zachodzące podczas realizacji procesu wytwórczego pierścieni zespolonej piasty łożyskowej drugiej generacji.

ROZDZIAŁ II

AKTUALNY STAN WIEDZY DOTYCZĄCY PIAST ŁOŻYSKOWYCH ORAZ DZIEDZICZNOŚCI TECHNOLOGICZNEJ

2.1. Piasty łożyskowe

Oczekiwania rynku, a w tym konieczność obniżania kosztów, zmuszają producentów do poszukiwania nowych, innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych wyrobów, w tym łożysk i węzłów łożyskowych. Producenci prowadzą prace badawczo-rozwojowe nad rozwiązaniami, które ograniczają wystąpienie awarii będących często następstwem błędów popełnianych w procesie projektowania, wytwarzania łożysk lub ich zabudowy. Błędy te mogą wynikać z niewystarczającej wiedzy projektanta, niewłaściwej interpretacji rysunków, z braku technologiczności konstrukcji, niskiego stopnia mechanizacji i automatyzacji prac montażowych [6,7]. Klasyycznym przykładem występowania tych problemów są układy łożyskowania kół jezdnych w samochodach [8].

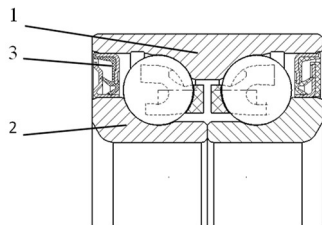
Ich projektowanie wymaga od konstruktora uwzględnienia faktu, że ich wykonanie nie pozwala na uzyskanie kształtów i wymiarów idealnych. W praktyce odbiegają one od teoretycznych wymiarów i nie są geometrycznie doskonałe. Konstruktor musi rozpatrzyć kwestię wymogu tolerowania każdego wymiaru uwzględniając niepewność projektową i metrologiczną [9]. Przyporządkowane tolerancje do wymiarów nominalnych, oparte na doświadczeniu, analizie zbieranych danych pomiarowych oraz symulacji nie w każdym przypadku jednoznacznie opisują oczekiwania konstruktora [10]. Nie bez znaczenia są tu także techniki pomiarowe umożliwiające szybkie i dokładne pomiary wytworzonych części [11–16]. Dlatego zaczęto stosować dodatkowe tolerancje geometryczne lepiej opisujące wymagania konstruktora [17]. Znalazły one odzwierciedlenie w specyfikacji geometrii wyrobu o skrócie GPS, której definiowanie inicjuje norma EN ISO 8015:2012 [N1]. GPS dotyczy tolerancji wymiarów liniowych i kątowych, tolerancji geometrycznych (kształtu) oraz tolerancji struktury powierzchni [18–21]. Przytoczona norma i jej towarzyszące takie jak EN ISO 14405-1:2016, EN ISO 1101:2017, ISO 492:2014 i PN ISO 286-1:2011 [N2–N5] są obecnie wykorzystywane do projektowania zespolonych piast kół pojazdów mechanicznych [22,23]. Piasty te to produkty precyzyjne, w których odpowiednie wymiarowanie z tolerowaniem jest krytycznym aspektem projektowania inżynierskiego.

Najprostsza konfiguracja zespołu piasty koła, przedstawiona na rysunku 1, składa się z dwóch łożysk stożkowych w regulowanym układzie wstępnego napięcia czołowego [24].

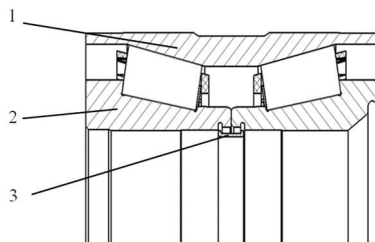


Rys. 1. Przykład rozwiązania konstrukcyjnego łożyskowania piasty koła jezdnej za pomocą dwóch łożysk stożkowych [24]

Innym rozwiązaniem konstrukcyjnym jest piasta koła pierwszej generacji, wyposażona w dwurzędowe łożysko kulkowe skośne (rys. 2) lub dwurzędowe łożysko stożkowe (rys. 3).

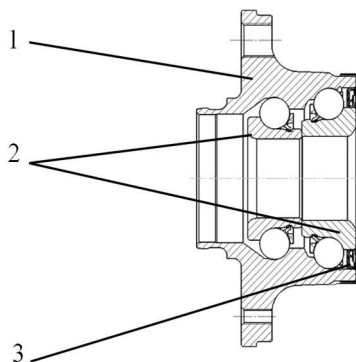


Rys. 2. Łożysko kulkowe skośne dwurzędowe, jako łożysko piasty pierwszej generacji:
1 - pierścień zewnętrzny, 2 - pierścień wewnętrzny, 3 - uszczelka [24]

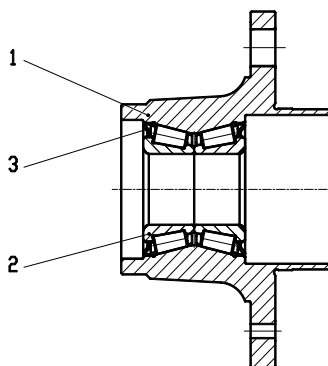


Rys. 3. Łożysko stożkowe dwurzędowe, jako łożysko piasty pierwszej generacji:
1 - pierścień zewnętrzny, 2 - pierścień wewnętrzny, 3 - zapinka [24]

Druga generacja zintegrowanej piasty łożyskowej pokazana na rysunkach 4 i 5 to rozwiązanie, w którym obudowa łożyska jest zastąpiona pierścieniem zewnętrznym z kołnierzem, do którego przymocowane są obracające się części układu hamulcowego i koła jezdne. Występuje w dwóch wariantach opartych na konstrukcji łożyska kulkowego lub łożyska stożkowego [24,25].



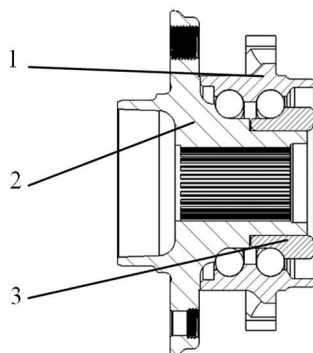
Rys. 4. Łożysko piasty drugiej generacji z wykorzystaniem konstrukcji łożyska kulkowego:
1 - pierścień zewnętrzny z kołnierzem, 2 - pierścienie wewnętrzne, 3 - uszczelka



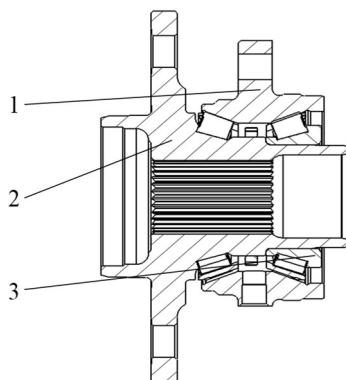
Rys. 5. Łożysko piasty drugiej generacji z wykorzystaniem łożyska stożkowego:
1 - pierścień zewnętrzny kołnierzowy, 2 - pierścienie wewnętrzne, 3 - uszczelka

Bardziej zaawansowanym technologicznie rozwiązaniem jest zespół piasty koła trzeciej generacji z łożyskami kulkowymi lub stożkowymi (rys. 6 i rys. 7). W tej konstrukcji zewnętrzny pierścień kołnierzowy (1) przejmuje funkcję obudowy,

a wewnętrzny pierścień kołnierzowy (2) umożliwia zamocowanie tarczy hamulcowej i koła jezdnego. Tego rodzaju zespół jest nierozbieralny, nasmarowany, i praktycznie bezobsługowy [24,25].



Rys. 6. Łożysko piasta trzeciej generacji z wykorzystaniem konstrukcji łożyska kulowego: 1— pierścień zewnętrzny kołnierzowy, 2— pierścień wewnętrzny kołnierzowy, 3— typowy łożyskowy pierścień wewnętrzny



Rys. 7. Łożysko piasty trzeciej generacji z wykorzystaniem konstrukcji łożyska stożkowego: 1 – pierścień zewnętrzny kołnierzowy, 2 – pierścień wewnętrzny kołnierzowy, 3 – typowy łożyskowy pierścień wewnętrzny

Oprócz powyżej opisanych konstrukcji produkowane są na świecie ich wersje z różnymi modyfikacjami, dostosowanymi do specyficznych wymagań klienta.

Dla przykładu na rysunku 8 pokazano zespoloną piastę łożyskową z uzębieniem do przenoszenia momentu obrotowego wykonanym na czole kołnierзовego pierścienia wewnętrznego 2. Na czole kielicha półosi jest wykonany zębaty wieniec współpracujący 3 [24].



Rys. 8. Łożysko piasty trzeciej generacji z wykonanym uzębieniem na czole kołnierзовego pierścienia wewnętrznego. Zdjęcie po prawej przedstawia kielich półosi. 1 – kołnierзовy pierścień zewnętrzny, 2 – kołnierзовy pierścień wewnętrzny z wieniem zębatym, 3 – kielich półosi z wieniem zębatym [24]

Konstruktorzy na tym nie poprzestają idąc w kierunku zmniejszania liczby elementów stanowiących cały zespół. Przykładem takiego rozwiązania jest innowacyjny projekt japońskiej firmy NTN (rys. 9). Polega ono na połączeniu konstrukcji łożyska piasty trzeciej generacji z przegubem homokinetycznym tworząc łożysko piastę czwartej generacji [26]. W tym rozwiązaniu bieżnia wewnętrzna prawa jest wykonana na elemencie przegubu homokinetycznego [27]. Dzięki temu rozwiązaniu wyeliminowano typowy pierścień wewnętrzny oraz zmniejszono masę całego zespołu.



Rys. 9. Łożysko piasty czwartej generacji - kombinacja łożyska piasty trzeciej generacji z przegubem homokinetycznym [26,27]

Łożyska piasty mają coraz szersze zastosowanie w pojazdach samochodowych. Ich zalety zostały również wykorzystane do projektowania zespolonych piast łożyskowych pojazdów szynowych, gdzie w nowo wytwarzanych szynobusach, lokomotywach i wagonach stosowane są obecnie piasty skonstruowane na bazie łożyska stożkowego o symbolu TBU.

2.2. Dziedziczność technologiczna

Bardzo ważnym zagadnieniem w inżynierii produkcji precyzyjnych wyrobów, takich jak łożyska, jest wpływ wcześniejszych operacji technologicznych na kształtowanie się parametrów liniowych, geometrycznych i chropowatości po kolejnych operacjach [28,29]. Już w połowie ubiegłego wieku wzmianki na temat tego zjawiska pojawiają się w pracach Sololovskiego, Yashcheritsyna czy Matalina [30–34]. Od lat prowadzone są prace badawcze nad opisaniem zależności między etapami procesu technologicznego. Wykonywane operacje wprowadzają zmiany w strukturze materiału, w naprężeniach wewnętrznych, wymiarach oraz stanu powierzchni. Wpływa to na wyniki kolejnych operacji poprzez niechciane zmiany kształtu oraz wymiarów, np. pierścieni łożyskowych [9]. Mają one wpływ na jakość produktu końcowego, która może być ograniczona przez odziedziczone właściwości. Dlatego też kluczowe jest ograniczenie wpływu wszystkich istotnych czynników na jakość produktu w całym przebiegu procesu produkcyjnego. Prowadzone są badania, które wykazują, że wiele parametrów jakości powierzchni części maszyn powstaje nie tylko podczas operacji wykończania powierzchni w procesie produkcyjnym. Już podczas wytwarzania stali można zaobserwować przekazywanie cech mikrostrukturalnych, np. makrosegregacja pierwotnego wlewka wpływa na rozkład segregacji we wlewku wtórnym [35]. Operacje początkowe i po nich następujące tworzą i modyfikują właściwości wyrobu przez cały czas realizacji procesu technologicznego. Pożądane parametry jakości przedmiotu obrabianego, np. twardość materiału, wytrzymałość, mikrostruktura, niektóre cechy geometryczne, które powstają na wczesnym etapie procesu, muszą być utrzymane do ostatecznego jego wytworzenia. Wady i naprężenia są eliminowane w trakcie procesu poprzez wprowadzanie strategii usuwania niepożądanych cech przez kontrolę parametrów obróbki i sekwencji procesów technologicznych. Kolejne operacje przenoszą parametry jakości z jednej operacji produkcyjnej do drugiej w taki sposób, że niepożądane cechy, takie jak naprężenia, są eliminowane, a pozytywne cechy są utrzymywane w celu osiągnięcia maksymalnej jakości i niezawodności [36]. Proces transferu cech oczekiwanych oraz eliminacja szkodliwych (wad/naprężeń) jest możliwy dzięki zastosowaniu dziedziczenia technologicznego [37].

W artykule [2] autorzy przedstawili podejście do zarządzania dziedzicznością parametrów jakościowych w procesach wytwarzania i regeneracji części maszyn. Dziedziczność technologiczna została opisana z wykorzystaniem teorii grafu, gdzie wierzchołki to stany części (od półfabrykatu do wyrobu gotowego),

a krawędzie reprezentują współczynniki przenoszenia cech jakościowych takich jak twardość, dokładność wymiarowa, chropowatość. Autorzy wprowadzają również współczynniki wzajemnego oddziaływania parametrów, np. wpływ twardości na odchyłkę kształtu, pokazując że parametry takie jak naprężenia czy struktura mogą przetrwać aż do etapu zużycia, natomiast inne jak chropowatość, falistość szybko się zmieniają już w początkowym okresie eksploatacji. Ponadto wykazali, że operacje, takie jak napawanie czy prostowanie stanowią bariery technologiczne przerywające ciągłość dziedziczenia. Stwierdzili również, że dziedziczność nie jest monotoniczna. Cecha taka jak twardość może się początkowo zmniejszać, np. po napawaniu, by następnie wzrosnąć po hartowaniu. Reasumując, autorzy wykazali silne powiązania między parametrami fizykomechanicznymi a geometrycznymi, co jest kluczowe przy analizie zmienności wymiarowej w procesach toczenia, obróbki cieplnej i szlifierskiej. Teoria grafów została też zastosowana do opisu procesu dziedziczenia przez autorów pracy [38]. Konoplina i współautorzy proponują strukturę graficzną do opisu dziedziczenia technologicznego, jako narzędzia ułatwiającego zidentyfikowanie kluczowych operacji w procesie wytwórczym ze wskazaniem jakie cechy są najczęściej przekazywane i w jakim stopniu, oraz śledzenie wpływu modyfikacji w technologii na uzyskanie najlepszych efektów końcowych.

Interesujące podejście do analizy dziedziczności technologicznej zostało zaprezentowane w artykule [39]. Autor proponuje zastosowanie modeli rozmytych do opisu transferu cech procesowych pomiędzy etapami produkcji. Modele rozmyte umożliwiają elastyczne i adaptacyjne modelowanie dziedziczności, lepiej odzwierciedlając rzeczywiste, nieliniowe zależności technologiczne. Proponowany sposób modelowania może być stosowany do prognozowania jakości wyrobów końcowych, uwzględniając niepewność wynikającą ze zmienności parametrów początkowych procesu.

Wielu badaczy prowadziło badania mające na celu przewidywanie jakości geometrycznej na wczesnych etapach realizacji produktu. Budowali modele zastępcze, np. wirtualnego montażu jako elementy cyfrowych bliźniaków, które odzwierciedlają rzeczywiste procesy produkcyjne [40]. Kluczowym aspektem jest możliwość przenoszenia cech geometrycznych, deformacji i błędów montażowych między kolejnymi etapami procesu technologicznego, co odzwierciedla dziedziczenie technologicznej informacji. Modele te umożliwiają śledzenie wpływu wcześniejszych operacji na końcową jakość produktu (precyzyjne zarządzanie tolerancją), co jest zgodne z ideą dziedziczności technologicznej w cyfrowym odwzorowaniu cyklu życia wyrobu.

W innej pracy [41] autorzy opisują stan warstwy wierzchniej i podpowierzchniowej po obróbce skrawaniem i ściernej, obejmujący m.in. chropowatość, naprężenia resztkowe, twardość, mikrostrukturalne zmiany. Wykazują, że właściwości

powierzchniowe są dziedziczone w kolejnych operacjach obróbkowych. Ich stan po toczeniu czy frezowaniu wpływa na wyniki obróbki wykończającej, np. szlifowania lub honowania. Zrozumienie i pomiary cech warstwy wierzchniej pozwalają przewidzieć, jak wcześniejsze operacje wpływają na końcową jakość części. Zaproponowane modele predykcyjne pozwalają na wstępny, ilościowy opis dziedziczności, co może stanowić punkt wyjścia do dalszych ulepszeń oraz do opracowania własnych modeli matematycznych dziedziczenia technologicznego.

Obrabiane przedmioty przenoszą zawartą w sobie informację (stan naprężeń) z operacji poprzedzających na kolejne operacje procesu technologicznego. Oczekiwany efekt końcowy uzyskanego kształtu i stanu powierzchni przedmiotu jest wynikiem przenoszenia informacji dziedzicznej przez cienką warstwę powierzchniową przez cały proces wytwórczy. Blumenstein i inni w artykułach [42,43] piszą o stworzonych podstawach naukowych mechaniki dziedziczenia technologicznego. Jest ona oparta na bazie odkształceń i zjawiska pęknięcia. Podczas realizacji procesu technologicznego dochodzi do ciągłych procesów akumulacji odkształceń i wyczerpywania się zapasu plastyczności w powierzchniowej warstwie detalu [37]. W ten sposób tworzy się warstwa wierzchnia o właściwościach uzależnionych od poprzedzających stanów. Warstwa wierzchnia jest więc nośnikiem informacji dziedzicznej. Jej struktura geometryczna, wymiary i zachowanie są zdeterminowane przez właściwości zgromadzone (odziedziczone) wcześniej. Dlatego rozpatrując to zagadnienie nieodzownym staje się umiejętność dogłębnej i precyzyjnej oceny warstwy wierzchniej. Do tego celu wykorzystuje się najnowsze metody i sprzęt pomiarowy pozwalający na pomiary struktury geometrycznej warstwy wierzchniej, badania jej mikrostruktury, pomiary mikrotwardości i naprężeń własnych [11, 44–46].

Oprócz metod obróbki na stan naprężeń w obrabianym przedmiocie mają wpływ inne czynniki, takie jak odkształcenia od mocowania [47,48] jakość narzędzi i chłodziw, gatunek materiału oraz zmienność jego właściwości wynikająca z niejednorodności, liczby i rodzaju wtrąceń oraz hartowności. Znaczenie ma orientacja ziarna i jego wielkość, początkowa mikrostruktura, różnica twardości przed i po obróbce cieplnej i wiele innych czynników [49,50], [S1]. To z kolei przekłada się na architekturę procesu technologicznego i związanych z nią wielkością naddatków [8]. Dlatego od lat trwają prace nad znalezieniem reguł opisujących relacje otrzymywania pożądaných wymiarów podczas wykonywania procesu technologicznego bez konieczności stosowania zwiększonych naddatków i dodatkowych operacji.

Paweł Zmarzły w swoim artykule [51] dokonał analizy wpływu zmiany posuwu i prędkości skrawania w procesie toczenia wzdłużnego na parametry chropowatości, okrągłości i walcowości. Analiza oparta na wynikach toczenia wałków walcowych wykonanych z różnych gatunków stali ze zmiennymi prędkościami i posuwami wykazała, że wymienione parametry procesu toczenia wzdłużnego mają wpływ na chropowatość powierzchni obrabianej. Analiza ta, ograniczona do procesu toczenia wzdłużnego, nie obejmowała jednak analizy dziedziczności pomiędzy różnymi operacjami technologicznymi. Ten sam autor analizował zjawiska dziedziczenia technologicznego w produkcji pierścieni łożyskowych ze stali AISI 52100 (100Cr6) koncentrując się na pomiarze falistości powierzchni bieżni łożyskowych. Jego badania wykazały, że poszczególne operacje technologiczne, takie jak toczenie, obróbka cieplna i szlifowanie, wpływają na zmiany falistości powierzchni bieżni pierścieni, co ma istotne znaczenie dla poziomu drgań i trwałości łożysk [52].

Z kolei w badaniach przeprowadzonych przez Surm i Hoffmana [53] przeanalizowano wpływ warunków mocowania podczas toczenia na odkształcenia geometryczne pierścieni łożyskowych po obróbce cieplnej. Badania wykazały, że wybór sposobu mocowania ma bezpośredni wpływ na przebieg relaksacji naprężeń i tym samym na późniejsze odkształcenia pierścieni. Z punktu widzenia dziedziczności technologicznej, badania te potwierdzają, że cechy i efekty geometryczne powstałe w wyniku mocowania są przenoszone i modyfikowane przez kolejne etapy procesu technologicznego, zwłaszcza obróbki cieplnej. Natomiast badania Umbrello i Filice [54] wykazały wpływ posuwu i prędkości skrawania procesu toczenia na powstające warstwy białe i czarne. Mają one bezpośrednie przełożenie na właściwości warstwy wierzchniej, w której powstają naprężenia, odkształcenia, dochodzi do rozszerzalności objętościowej i plastycznych transformacji, co ma wpływ na późniejsze etapy produkcji [55].

Inni badacze [56] analizowali wpływ stanu stali C45 po różnych obróbkach cieplnych (wyżarzanie zmiękczające, hartowanie i odpuszczanie) na parametry uzyskane po toczeniu, takie jak chropowatość, walcowość i kołowość. Ich badania wykazały, że utwardzanie negatywnie wpływa na jakość powierzchni i geometrię. Im materiał twardszy, tym uzyskiwano gorszą chropowatość i większe odchyłki walcowości i kołowości. Z kolei badania wpływu toczenia wzdłużnego pierścieni łożyskowych na ich naprężenia i na zmiany wymiarowe po obróbce cieplnej (hartowanie z odpuszczaniem) wykazały największy wpływ głębokości skrawania na zmiany wymiarowe otoczek. Ponadto wiele badań wykazuje korelację dodatnią

między naprężeniami szczątkowymi a wymiarami pierścieni po obróbce cieplnej [57].

W innych pracach badawczych prowadzonych pod kątem wpływu parametrów skrawania na dokładność wymiarową stali stopowej SKD11 o twardości 55 HRc opracowano model regresji zależności pomiędzy parametrami skrawania a dokładnością wymiarową. Do tego celu wykorzystano algorytm genetyczny, czyli metodę optymalizacji i wyszukiwania rozwiązań wzorowanych na mechanizmach ewolucji biologicznej, takich jak dobór najlepszego, łączenie cech dwóch rozwiązań i wprowadzanie losowych zmian. Badania wykazały niewielki wpływ posuwu i prędkości skrawania na dokładność wymiarową [58]. Ci sami autorzy zajmowali się również optymalizacją wielokryterialną procesu frezowania stali. Tym razem użyli ANOVA do analizy danych, która pozwoliła na opracowanie metody doboru parametrów skrawania do uzyskania jak najlepszej dokładności wymiarowej i chropowatości powierzchni [59]. W obu tych przypadkach badano tylko bezpośrednią zależność pomiędzy parametrami skrawania a uzyskiwanymi wymiarami po obróbce.

Podobnie autorzy artykułu [60] badali wpływ parametrów toczenia, takich jak posuw, prędkość wrzeciona oraz głębokość skrawania na chropowatość, naprężenia wewnętrzne. Zbadano rozkład naprężeń własnych w przekroju pierścienia dla wybranych parametrów obróbki i położeń na jego obwodzie. Analiza wyników wykazała, że wraz ze wzrostem prędkości posuwu rosną naprężenia szczątkowe rozciągające na powierzchni. Zmniejszają się one nieznacznie wraz ze wzrostem głębokości skrawania. Rozkład i wartości naprężeń szczątkowych w różnych pozycjach obwodowych pierścienia wykazują znaczącą różnicę tylko na powierzchni. Rozkłady naprężeń szczątkowych można wyjaśnić za pomocą prostego jednowymiarowego modelu warstwowego, uwzględniającego termomechaniczny wpływ procesu obróbki. Badania wykazały, że dobór optymalnych parametrów obróbkowych pozwala redukować ryzyko zaawansowanych problemów technologicznych, co przekłada się na większą powtarzalność procesu oraz trwałość gotowego produktu.

W kolejnym artykule [61] traktującym o odkształceniach pierścieni łożyskowych spowodowanych relaksacją naprężeń wewnętrznych A. Thuvander wykazał wpływ dziedziczonych naprężeń wewnętrznych, spowodowanych procesem wytwarzania rur, z których pierścienie zostały wyprodukowane. Eksperymenty i symulacje obejmowały etapy, takie jak: walcowanie rury, toczenie pierścienia i wyżarzanie zmiękczające. W wyniku pomiarów odkształceń pierścieni mierzonych po

toczeniu i po wyżarzaniu zmiękczającym stwierdzono znaczną nieokrągłość po obu etapach, szczególnie uwidoczniającą się po odcięciu otoczki od rury.

Artykuł [62] przedstawia nowatorskie podejście do oceny dziedziczności technologicznej w procesach produkcji materiałów konstrukcyjnych. Autorzy zwracają uwagę, że właściwości strukturalne materiałów, ukształtowane na wcześniejszych etapach technologicznych, takich jak odkształcanie plastyczne czy obróbka cieplna, mogą być przekazywane dalej i wpływać na końcową jakość oraz trwałość wyrobu. Cechy te są reprezentowane jako nieliniowy układ dynamiczny, w którym relacje dziedziczności zmieniają się w zależności od procesu produkcji i warunków eksploatacji. Aby sformalizować czynniki dziedziczenia technologicznego, autorzy proponują użycie funkcji logicznych do utworzenia modeli pozwalających przewidywać zmiany jakości w całym cyklu życia produktu. Kluczowym aspektem pracy jest zastosowanie teorii katastrof jako narzędzia matematycznego do opisu nieciągłych zmian właściwości materiału wynikających z pozornie niewielkich zaburzeń parametrów technologicznych. Teoria ta pozwala modelować krytyczne punkty procesu, w których następuje gwałtowna zmiana struktury lub właściwości, co może prowadzić do pojawienia się defektów lub utraty funkcjonalności. Dzięki takiemu podejściu możliwe jest przewidywanie momentów, w których dziedziczenie negatywnych cech technologicznych może zagrozić stabilności procesu lub jakości wyrobu. Artykuł wnosi istotny wkład w rozwój metod identyfikacji i analizy dziedziczności technologicznej, wskazując że nie jest to wyłącznie zjawisko fizykochemiczne, ale także dynamiczny proces o charakterze nieliniowym, który może być opisany przy użyciu modeli matematycznych.

W artykule [63] autorzy analizują wpływ warunków kucia (temperatura kucia, wartość odkształcenia i szybkość chłodzenia) na mikrostrukturę niskowęglowej stali ferrytyczno-bainitycznej w zakresie zawartości bainitu, wielkości ziaren, rozmieszczenia ferrytu oraz występowania węglików. W pracy przedstawiono relacje ilościowe pomiędzy temperaturą kucia, wielkością odkształcenia a frakcjami mikrostrukturalnymi. Takie dane mogą być wykorzystane jako baza do budowy modeli predykcyjnych w kontekście dziedziczenia mikrostrukturalnego, co pozwala na lepsze sterowanie strukturą i właściwościami materiału już na wczesnym etapie procesu technologicznego. Praca stanowi przykład dokumentujący mikrostrukturalne dziedziczenie skutków operacji kucia w dalszych etapach technologicznych. Autorzy wykazali, że zastosowane parametry kucia mają trwały wpływ na strukturę materiału, co znajduje odzwierciedlenie we właściwościach końcowych. Jest to szczególnie istotne przy analizie procesów technologicznych dla wyrobów, w których występują po sobie operacje kucia, obróbki cieplnej i skrawania.

Współcześni technolodzy koncentrują się na projektowaniu procesów technologicznych, które są dedykowane do wytworzenia konkretnego wyrobu w środowisku Computer Integrated Manufacturing, uwzględniając zjawisko dziedziczenia technologicznego. Analizowane są mechanizmy powstawania naprężeń szczątkowych oraz ich wpływ na jakość końcową i właściwości mechaniczne obrabianych elementów. Opracowywane są metodyki projektowania procesu technologicznego łączące wpływ wcześniejszych operacji, ich kolejności i parametrów obróbkowych na stan warstwy wierzchniej oraz minimalizowanie negatywnych efektów, takich jak deformacje strukturalne w obrabianych materiałach [64,65]. Te technologiczne czynniki dziedziczności mają istotny wpływ na parametry niezawodności i bezawaryjnej pracy. Niektórzy badacze opracowują wręcz modele matematyczne do przewidywania prawdopodobieństwa bezawaryjnej pracy, łącząc cechy materiałowe i procesowe z niezawodnością produktu [66].

W artykule [65] Fyodorov i inni opisują metody programowego sterowania jako sposób na optymalizację parametrów jakości elementów maszyn podczas obróbki skrawaniem. Autorzy koncentrują się na sterowaniu naprężeniami szczątkowymi w obrabianych materiałach i analizują, jak te naprężenia wpływają na ostateczną jakość i trwałość elementów. Proponują zaawansowaną metodologię projektowania procesów technologicznych, która uwzględnia wcześniejsze operacje i ich wpływ na właściwości powierzchniowe. Ponadto omawiają wpływ sekwencji operacji obróbkowych na minimalizowanie negatywnych efektów, takich jak deformacje strukturalne w obrabianych materiałach. Z kolei w artykule [67] autorzy analizując zjawisko dziedziczności technologicznej porównują jego wpływ na elementy wykonane z metali oraz kompozytów polimerowych. Identyfikują główne czynniki wpływające na dziedziczność technologiczną, takie jak mikrostruktura materiału, naprężenia wewnętrzne czy właściwości powierzchniowe. Wskazują, że czynniki takie jak metoda obróbki, kolejność operacji czy warunki technologiczne mają kluczowe znaczenie dla zachowania lub modyfikacji właściwości materiału w kolejnych etapach procesu produkcyjnego. Wskazali również, w których etapach procesu produkcyjnego najczęściej dochodzi do przenoszenia właściwości materiału, co ma kluczowe znaczenie dla planowania i optymalizacji procesów technologicznych.

Badacze analizując zjawisko dziedziczności technologicznej w procesach różnych części maszyn wykazują jak błędy geometryczne powstałe w trakcie pierwszych operacji wpływają na dokładność końcową. Opracowują różne wskaźniki, jak współczynnik dziedziczności technologicznej, określający udział błędu z danej operacji na błąd końcowy. Wykazują, że niektóre operacje mogą zmniejszać

wcześniejsze błędy, a inne mogą je potęgować [68]. Prowadzone są też badania modelowania dziedziczności mikrostrukturalnej i jej wpływu na jakość i właściwości złączy zgrzewanych stopów, np. tytanu. Okazuje się, że pomimo wysokiej temperatury, deformacji plastycznej i rekrytalizacji, w strefie zgrzewu zachowują się cechy strukturalne charakterystyczne dla materiału wyjściowego wpływające na zjawisko pęknięcia i wytrzymałość. Ma to duże znaczenie w tworzeniu mikrostruktur wytrzymałych materiałów poddawanych procesom zgrzewania [69].

Znaczenie czynników dziedziczności technologicznej jako istotnych determinantów jakości wyrobów finalnych jest przedmiotem badań naukowych. Przykładem jest praca Baurovej i Konoplinej [70], w której przeanalizowano wpływ dziedziczności technologicznej na jakość złączy klejonych oraz klejowo-spawanych wykonywanych w różnych temperaturach. Autorzy proponują schematy transferu dziedziczonej informacji z wykorzystaniem deterministycznych modeli matematycznych w temperaturach pokojowych. Dla temperatur ujemnych rekomendują stosowanie systemów probabilistycznych, ze względu na wyższy poziom niepewności i zmienności czynników wpływających na proces. Narzędzia te służą do identyfikacji zależności pomiędzy parametrami procesowymi a właściwościami fizycznymi, mechanicznymi i eksploatacyjnymi wyrobu. Ponadto umożliwiają matematyczny opis oraz prognozowanie przebiegu zjawisk związanych z dziedzicznością technologiczną, zarówno w procesach produkcyjnych, jak i podczas naprawy części maszyn. Wyniki pracy Baurovej i Konoplinej potwierdzają konieczność identyfikacji i ilościowego opisu zjawisk dziedziczności technologicznej, jako kluczowych czynników wpływających na stabilność i powtarzalność cech geometrycznych oraz strukturalnych elementów konstrukcyjnych.

Operacje szlifierskie przeprowadza się dla uzyskiwania wymiarów ostatecznych z minimalizacją błędów wymiarowych. Natomiast obróbka cieplna, np. hartowanie z odpuszczaniem, wywołuje zmiany strukturalne. Przemiana fazowa nie zachodzi w tym samym czasie w całej objętości materiału. Z tego powodu dochodzi do powstawania naprężeń strukturalnych. W wyniku ich uwalniania generują się niechciane zmiany wymiarowe. Zjawisko to było przedmiotem badań wykonanych na pierścieniach łożyskowych, których wymiary porównywano przed i po obróbce cieplnej. Efektem tych badań było wykazanie, że dochodzi do przyrostu wymiarów po obróbce cieplnej oraz obliczono wielkość tego przyrostu [71]. Niemniej wyniki tych badań nie są adekwatne do różnych przypadków zmian wymiarowych, jakie zachodzą w pierścieniach łożyskowych. Warunki badań przedstawione w artykule dalece odbiegają od rzeczywistych warunków hartowania. Chciałoby się sposób ułożenia pierścieni w agregacie do obróbki cieplnej.

Autorzy kolejnego artykułu [72] badali wpływ różnych parametrów obróbki na naprężenia szczątkowe obrabianych pierścieni łożyskowych, wykonanych ze stali GKZ wyżarzanej cieplnie 100Cr6. Parametry obróbki mają trwały wpływ na mikrostrukturę i naprężenia resztkowe, które warunkują stabilność wymiarową, odporność na zmęczenie i trwałość łożyska. W efekcie, nieoptymalne ustawienia parametrów toczenia może skutkować negatywnymi skutkami, jak np. niekorzystne naprężenia, ryzyko odkształceń czy mikropęknięć.

Ciekawe podejście do zagadnienia dziedziczności technologicznej zaprezentowali autorzy artykułu [73], którzy opracowali model opisujący wpływ wcześniejszych operacji na kolejne etapy procesu technologicznego cylindrów i korbowodów silników lotniczych. Model ten ma strukturę macierzy relacyjnej pozwalającej na symulację wpływu zmian parametrów w jednej operacji na efekt końcowy procesu. Jego budowa oparta jest na relacjach przyczynowo-skutkowych między etapami procesu. Umożliwia on analizę błędów, optymalizację naddatków oraz projektowanie stabilnych ciągów technologicznych produkcji silników lotniczych.

Kolejne interesujące zagadnienie w ramach dziedziczności technologicznej to podatność materiału na degradację pod wpływem technologii jego obróbki. Autorzy artykułu [74] wprowadzają termin *technological damageability* do oszacowania osłabienia materiału będącego skutkiem wcześniejszych operacji. Mogą one inicjować pęknięcia, odkształcenia czy nadmierne zużycie na dalszych etapach procesu. Zaproponowany model dziedziczności oparty na mikrotwardości, naprężeniach i ocenie mikrostruktury, umożliwia klasyfikację materiałów według ich reakcji na wcześniejsze operacje technologiczne oraz wspiera podejmowanie decyzji co do kolejności operacji, parametrów technologicznych i minimalizacji ryzyka wystąpienia wady. W literaturze przedmiotu pojawiają się także przykłady ujęcia dziedziczności technologicznej w szerszym, interdyscyplinarnym kontekście. Lachmayer i współautorzy proponują koncepcję „dziedziczności technicznej” (ang. *technical inheritance*) jako analogię do mechanizmów ewolucji biologicznej. W ich ujęciu części maszyn mogą gromadzić i przekazywać informacje z poprzednich faz cyklu życia, od projektowania, przez produkcję i eksploatację, aż po wycofanie z użycia [75]. Takie ujęcie tematu umożliwia świadome kształtowanie kolejnych generacji produktów na podstawie doświadczeń i danych z użytkowania wcześniejszych wersji. Pomimo, że autorzy koncentrują się głównie na aspekcie informacyjnym i cyfrowym komponentów (tzw. *gentelligent components*), to koncepcja ta może być odniesiona również do procesów produkcyjnych, gdzie kolejne operacje technologiczne „dziedziczą” cechy geometryczne, topografii powierzchni i strukturalne po wcześniejszych operacjach.

Z kolei autorzy artykułu [76] analizują zjawisko technologicznej dziedziczności w systemach ciernych pojazdów w odniesieniu do zużycia tarcowego. Wskazują, jak wcześniejsze etapy wytwarzania i eksploatacji elementów współpracujących determinują długoterminowe parametry działania, takie jak: tempo zużycia, współczynnik tarcia czy skuteczność hamowania. Utrzymanie jakości ciernej powierzchni zależy od początkowych etapów technologicznych, których niekontrolowane parametry obróbki mogą znacząco zmienić charakterystyki układu ciernego. Artykuł stanowi studium przypadku ukazujące dziedziczenie cech technologicznych nie tylko w kontekście wymiarów czy mikrostruktury, ale również gdy chodzi o funkcjonalność eksploatacyjną ciernych części maszyn.

W przeglądowej pracy Grzesika [77] uwypuklono znaczenie dokładnego opisu topografii powierzchni z użyciem zaawansowanych parametrów 3D oraz metod analizy statystycznej i funkcjonalnej. Szczególną uwagę poświęcono związkom pomiędzy parametrami procesu technologicznego (np. warunkami skrawania, zużyciem narzędzia, systemem chłodzenia) a ostatecznym stanem warstwy wierzchniej. W kontekście dziedziczności technologicznej, istotnym elementem pracy jest ukazanie ciągu przyczynowo-skutkowego, od parametrów procesowych, poprzez kształtowanie topografii powierzchni, aż do funkcjonalnych właściwości elementów końcowych. Autor podkreśla, że każdy etap procesu technologicznego wpływa na właściwości geometryczne i strukturalne warstwy wierzchniej, a następnie na jej zachowanie w eksploatacji. Uwzględnienie tego faktu jest niezbędne dla prawidłowego modelowania i prognozowania funkcjonalnych właściwości wyrobu. Tak więc analiza topografii powierzchni powinna być traktowana jako bezpośrednia konsekwencja historii technologicznej elementu. W artykule przedstawiono również metody numerycznego modelowania oddziaływania procesu skrawania na topografię powierzchni oraz podejścia empiryczne i statystyczne do przewidywania właściwości funkcjonalnych, co wpisuje się w założenia modelowania dziedziczności technologicznej.

W innej pracy [78] autorzy przeprowadzili analizę procesu wytwarzania wyrobów ze stopów Al–Mg–Si metodą wyciskania, która objęła cały ciąg technologiczny, od stanu wyjściowego materiału (odlewnia i homogenizacji), przez wyciskanie, aż po końcowe operacje starzenia cieplnego. Zidentyfikowano wpływ poszczególnych zmiennych technologicznych (temperatura, czas trwania operacji, prędkość deformacji) na końcową wytrzymałość materiału. Zastosowana przez autorów metodologia opiera się na ciągłej analizie wpływu wcześniejszych etapów technologicznych na wynikowe właściwości produktu. Takie podejście jest bezpośrednio zbieżne z ideą dziedziczności technologicznej, zgodnie z którą operacje

wykonane na wcześniejszych etapach mają mierzalny i przewidywalny wpływ na cechy końcowe wyrobu, zarówno w ujęciu geometrycznym, jak i strukturalnym czy wytrzymałościowym. Wnioski zawarte w publikacji podkreślają konieczność holistycznego podejścia do projektowania procesów technologicznych, gdzie każda operacja jest traktowana nie jako etap niezależny, lecz jako element wpływający na dziedziczenie parametrów w kolejnych fazach produkcji. Jest to szczególnie istotne w przypadku produkcji wysoko precyzyjnych elementów, takich jak zespolone piasty łożyskowe, gdzie błędy geometryczne mogą być amplifikowane w kolejnych etapach obróbki.

Z kolei autorzy artykułów [79–81] przeprowadzili kompleksową analizę interakcji parametrów szlifowania na właściwości warstwy wierzchniej oraz trwałość zmęczeniową wyrobów. Dokonali oceny oddziaływania skumulowanych efektów mechanicznych i cieplnych powstających w procesie szlifowania na mikrostrukturę, twardość, chropowatość, naprężenia szczątkowe oraz właściwości mechaniczne warstwy przypowierzchniowej. W kontekście dziedziczności technologicznej istotnym wnioskiem płynącym z przedstawionych badań jest potwierdzenie tezy, że warunki technologiczne panujące podczas obróbki wykończającej, w tym przypadku szlifowania, mają bezpośredni wpływ na właściwości eksploatacyjne wyrobu końcowego, w szczególności na jego odporność na zmęczenie. Wzrost sił skrawania wraz z rosnącą temperaturą prowadzą do powstawania niekorzystnych efektów, takich jak: plastyczne odkształcenia w strefie podpowierzchniowej, zwiększone nagromadzenie naprężeń rozciągających, mikropęknięcia i uszkodzenia mikrostrukturalne oraz obniżenie twardości warstwy przypowierzchniowej. Jednocześnie wykazano, że odpowiednie sterowanie parametrami procesu może ograniczyć negatywne skutki cieplno-mechaniczne i sprzyjać wytworzeniu naprężeń ściskających w warstwie wierzchniej, co istotnie wydłuża trwałość zmęczeniową wyrobu. Uzyskane wyniki potwierdzają, że końcowe właściwości użytkowe produktu, takie jak trwałość zmęczeniowa, są bezpośrednio uzależnione od wcześniejszych warunków obróbki wykończającej. Determinują one stan warstwy wierzchniej, która stanowi na etapie eksploatacji „nośnik” efektów procesowych dziedziczonych przez produkt.

Autorzy artykułu [82] przeprowadzili badania eksperymentalne dotyczące wpływu zastosowanej technologii obróbki wykończającej na trwałość zmęczeniową pierścieni łożyskowych. Porównano dwie technologie obróbki: precyzyjne toczenie twarde oraz szlifowanie. Dokonano oceny parametrów takich jak: chropowatość powierzchni, rozkład naprężeń własnych, twardość warstwy wierzchniej, głębokość strefy wpływu cieplnego i mechanicznego, mikrostruktura warstwy

przypowierzchniowej. Badania wykazały, że proces precyzyjnego toczenia twardego generuje korzystniejsze naprężenia ściskające w warstwie wierzchniej oraz lepszą klasę chropowatości powierzchni w porównaniu do szlifowania, co z kolei przekłada się na zwiększenie trwałości zmęczeniowej pierścieni łożyskowych poddanych tej technologii. Autorzy wykazali również, że rozkład naprężeń własnych i charakterystyka mikrostrukturalna warstwy wierzchniej, determinują sposób inicjacji i propagacji pęknięć zmęczeniowych w pierścieniach łożyskowych. Warto podkreślić, że uzyskana charakterystyka warstwy wierzchniej jest rezultatem nie tylko samego procesu wykończającego, ale także wcześniejszych operacji technologicznych, takich jak hartowanie czy poprzedzające je skrawanie. Oznacza to, że właściwości warstwy wierzchniej są wynikiem kumulacji oddziaływań operacji technologicznych całego procesu. Wnioski zawarte w tej pracy potwierdzają, że dla zapewnienia wysokiej trwałości zmęczeniowej elementów toczone, kluczowe jest nie tylko optymalizowanie procesu wykończania, ale również uwzględnianie wpływu wcześniejszych etapów produkcji na stan końcowy warstwy wierzchniej.

W ramach badania dziedziczności technologicznej prowadzone są też prace nad wpływem mikrogeometrii narzędzi na technologiczne dziedziczenie cech jakościowych, takich jak: dokładność wymiarowa, chropowatość i kształt. W artykułach [83,84] wykazano, na przykładzie hybrydowego wygładzania otworów, że mikrogeometria narzędzia jako elementu technologicznego istotnie wpływa na parametry końcowe jakości obrabianej powierzchni. Jest to przykład potwierdzający konieczność uwzględniania w modelowaniu procesu technologicznego, zwłaszcza operacji precyzyjnych, cech narzędzia dziedziczonych przez przedmiot obrabiany.

Innowacyjne podejście do analizy dziedziczności technologicznej, oparte na koncepcie energetycznym materiału zostało przedstawione w artykule [85]. Autorzy, przez pomiar minimalnej energii potrzebnej do oderwania elektronu z powierzchni metalu do próżni oraz różnicy potencjałów kontaktowych (metoda Kelvin probe), analizują w jaki sposób operacje technologiczne, eksploatacja i naprawy wpływają na energetyczny stan powierzchni części samolotowych. Pokazują, że zmiany w stanie energetycznym mają trwałe skutki, które mogą być przekazywane jako skumulowane efekty technologiczne. Praca dostarcza ilościową podstawę do integracji parametrów energetycznych w modelach dziedziczności technologicznej, co pozwala uzupełnić tradycyjne podejścia o aspekty energetyczne oraz śledzić ich wpływ na mikrostrukturę i wytrzymałość powierzchni determinujących jakość i trwałość wyrobu.

2.3. Podsumowanie

Przegląd literatury podkreśla kluczowe znaczenie zjawiska dziedziczności technologicznej w inżynierii produkcji precyzyjnych elementów, takich jak pierścienie łożyskowe. Badania wskazują, że wcześniejsze operacje technologiczne wpływają na kształtowanie parametrów wymiarowych, geometrycznych oraz chropowatości powierzchni, a także na stan naprężeń i mikrostrukturę warstwy wierzchniej detali. Warstwa ta stanowi nośnik informacji dziedzicznej, przekazując zmiany i odkształcenia z jednej operacji na kolejną, co ma bezpośredni wpływ na jakość i trwałość wyrobu końcowego. Prace naukowe zwracają uwagę na konieczność precyzyjnej oceny warstwy wierzchniej przy użyciu nowoczesnych metod pomiarowych, takich jak badania mikrostruktury, mikrotwardości i naprężeń szczątkowych. Równocześnie podkreśla się wpływ wielu czynników dodatkowych od parametrów skrawania, poprzez właściwości materiału i obróbkę cieplną, aż po warunki mocowania i jakość narzędzi, które warunkują ostateczny efekt technologiczny oraz optymalizację procesu produkcji.

Znaczące są też modele matematyczne i symulacyjne, które pozwalają na analizę i prognozowanie dziedziczonych błędów wymiarowych oraz deformacji, co umożliwia projektowanie stabilnych, zoptymalizowanych ciągów technologicznych i minimalizację naddatków. Nowoczesne podejścia, takie jak sterowanie programowe procesu czy zastosowanie algorytmów genetycznych i metody ANOVA wspierają precyzyjne dobieranie parametrów obróbki dla uzyskania wysokiej jakości powierzchni i dokładności wymiarowej. Dodatkowo rośnie znaczenie oceny podatności materiałów na uszkodzenia technologiczne, która pomaga w planowaniu kolejności operacji i jej parametrów, minimalizując ryzyko powstawania wad. W kontekście łożysk ważna jest kontrola wymiarów na każdym etapie wykończania, ponieważ zmiany po obróbce cieplnej i mechanicznej wpływają na końcową precyzję i trwałość elementów.

Uwzględniając powyżej przedstawione problemy wynikające z aktualnej wiedzy sformułowano cel pracy i tezę pracy oraz sposoby realizacji zmierzające do rozwiązania postawionego problemów naukowych, eksperymentalnych i praktycznych.

Literatura wskazuje na konieczność całościowego podejścia do projektowania procesów technologicznych uwzględniającego dziedziczność technologiczną. Łączy ono wiedzę o mikrostrukturze, naprężeniach, parametrach obróbki oraz matematyczne modelowanie, co stanowi fundament służący poprawie jakości i efektywności produkcji precyzyjnych wyrobów maszynowych. Opracowywane modele matematyczne oparte na rachunkach macierzowych i różniczkowych

w większości przypadków nie są możliwe do zastosowania w warunkach przemysłowych. Dlatego istnieje potrzeba opracowywania prostych modeli matematycznych pozwalających na planowanie procesów produkcyjnych z uwzględnieniem dziedziczności technologicznej.

ROZDZIAŁ III

CEL I SPOSÓB REALIZACJI PRACY

3.1. Cel pracy

Dokonana powyżej analiza stanu wiedzy na temat dziedziczności technologicznej jest podstawą do sformułowania głównego celu rozprawy doktorskiej. Jest nim ustalenie relacji zachodzących między wymiarami, czyli dziedziczności technologicznej w ramach realizowanego procesu wytwarzania poszczególnych elementów składowych zespolonej piasty łożyskowej drugiej generacji. W tym celu przeprowadzono analizę wymiarów pierścieni składowych po zakończeniu kolejnych operacji procesu technologicznego z wykorzystaniem matematycznych metod opisu i nowoczesnych systemów pomiarowych.

Realizacja celu głównego pracy wymagała określenia i zrealizowania celów pomocniczych wymienionych poniżej:

- opracowanie stanu wiedzy o zespolonych piastach łożyskowych,
- analiza literatury z zakresu dziedziczności technologicznej,
- analiza konstrukcji piasty łożyskowej drugiej generacji opartej na łożysku kulowym skośnym wraz ze zbudowaniem modelu matematycznego łańcuchów wymiarowych potrzebnych do weryfikacji tolerancji przyjętych przez konstruktora,
- opis zaplanowanych operacji technologicznych oraz badanie zdolności maszyn pod kątem wymaganych wskaźników i parametrów jakości wyrobu,
- prace przygotowawcze, w ramach których dokonano wyboru elementów składowych piasty poddawanych badaniom i ich liczności wraz z wyborem operacji technologicznych, po których przeprowadzono pomiary wymiarów służących do określenia dziedziczności technologicznej,
- ocena przeprowadzonych badań eksperymentalnych obejmująca opracowanie wyników pomiarów z uwzględnieniem statystyki matematycznej oraz zbudowanie modeli matematycznych ustalenia dziedziczności technologicznej wraz z wnioskami końcowymi.

3.2. Teza pracy

Na podstawie analizy literatury z zakresu dziedziczności technologicznej, jak również własnego doświadczenia, sformułowano następującą tezę badawczą:

W procesie wytwarzania części maszyn występuje dziedziczność technologiczna wymiarów, której identyfikacja i wykorzystanie umożliwia optymalizację naddatków prowadzącą do poprawy jakości wyrobu i obniżenia kosztów produkcji.

3.3. Sposób realizacji pracy

Zasygnalizowanie pojęcia dziedziczności technologicznej i potrzeby zbudowania modeli matematycznych uwzględniających zagadnienie przenoszenie się cech geometrycznych, materiałowych i stanu naprężeń z operacji na operację, umożliwiających optymalizację procesów technologicznych i obniżkę kosztów wytwarzania pierścieni zespolonej piasty łożyskowej drugiej generacji opisano w rozdziale pierwszym.

W niniejszej pracy badanie zależności zmian wymiarowych przeprowadzono na przykładzie produkcji piasty łożyskowej drugiej generacji opartej na konstrukcji kulkowego łożyska skośnego. Dokonano przeglądu rozwiązań konstrukcyjnych piast łożyskowych oraz przeprowadzono analizę aktualnego stanu wiedzy na temat dziedziczności technologicznej w rozdziale drugim.

Cel główny pracy, cele pomocnicze, tezę badawczą i sposób realizacji pracy doktorskiej opisano w rozdziale trzecim.

W ramach przeprowadzonych prac badawczych dokonano analizy konstrukcji piasty łożyskowej drugiej generacji opartej na konstrukcji łożyska kulkowego skośnego. W tym celu zbudowano model matematyczny równania łańcucha wymiarowego dla luzu osiowego oraz jego równania tolerancji. Wykonano weryfikację modelu matematycznego poprzez analizę i syntezę łańcucha wymiarowego oraz przeprowadzono weryfikację tolerancji przyjętych przez konstruktora, co zademonstrowano w rozdziale czwartym.

Sposób prowadzenia badań w trakcie realizacji procesu technologicznego oraz wyniki badań zdatności maszyn pod kątem zapewnienia wymaganych wskaźników dla kluczowych charakterystyk przedstawiono w rozdziale piątym. Dokonano wyboru elementów składowych piasty (pierścienie wewnętrzne i pierścień zewnętrzny) do wykonania eksperymentów. Dla nich przyjęto liczności próbek,

wytypowano obserwowane zmienne ilościowe i określono parametry technologiczne jako zmienne niezależne dla operacji toczenia.

Po każdej zrealizowanej operacji procesu technologicznego dokonywano pomiarów parametrów obserwowanych dotyczących bieżni: średnice, kołowość, położenie, promień. Uzyskane wyniki zostały poddane analizie z uwzględnieniem statystyki matematycznej. Zbudowano modele regresji służące do ustalenia dziedziczności technologicznej, które zostały zaprezentowane w rozdziale szóstym. Wyniki i zaproponowane modele matematyczne – równania regresji liniowej dziedziczności technologicznej posłużyły do opracowania wniosków końcowych, które zostały przedstawione w rozdziale siódmym niniejszej pracy.

Na końcu pracy zamieszczono spis literatury wykorzystanej do jej opracowania oraz trzy załączniki z wynikami pomiarów.

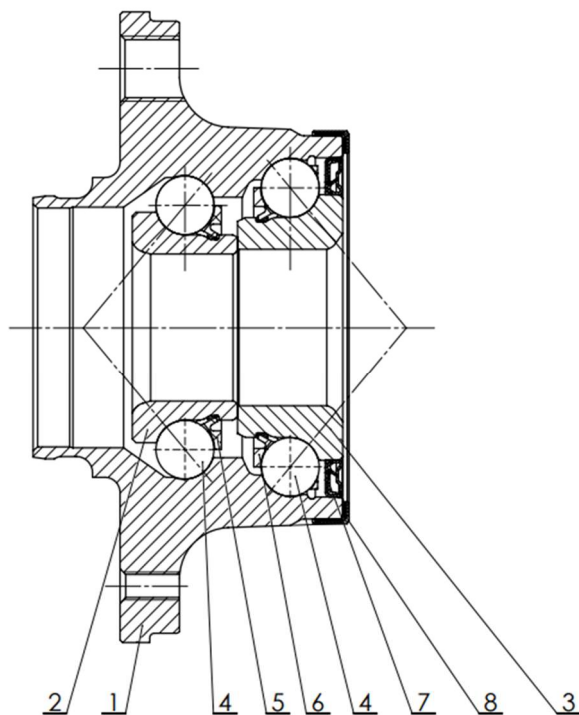
ROZDZIAŁ IV

ANALIZA KONSTRUKCJI PIASTY ŁOŻYSKOWEJ I MODEL MATEMATYCZNY DLA LUZU OSIOWEGO

W dotychczasowej praktyce projektowania konstruktorzy rzadko budowali modele matematyczne łańcuchów wymiarowych projektowanych wyrobów. Tolerancje dobierano intuicyjnie na podstawie wiedzy i doświadczenia projektanta. Często były one nieoptymalne i ekonomicznie nieuzasadnione. Dlatego, w procesach rozwoju produktu i produkcji, projektowanie tolerancji jest bardzo ważne, zapewnia bowiem minimalizację kosztów produkcji przy maksymalnej jakości produktu [86]. W licznych artykułach można znaleźć treści dotyczące kwestii tolerowania wymiarów niezależnych wskazując na problemy w budowaniu modeli łańcuchów tolerancji [87]. Singh i inni [88,89] opisują różne teorie dotyczące tradycyjnych i zaawansowanych analiz i syntezy tolerancji. W tradycyjnym podejściu do projektowania tolerancji nie uwzględnia się ich wpływu na koszty produkcji w przeciwieństwie do zaawansowanych, w których wykorzystuje się specjalistyczne oprogramowanie, jak np. w opisanej przez Tsunga [90] optymalizacji tolerancji dla łożyska kulowego wbudowanego w suport roweru. Oprogramowanie komputerowe jest stale rozwijane, a uzyskane wyniki są wykorzystywane do analizy i optymalnego projektowania wyrobów [91,92]. Niemniej, w niniejszej pracy użyto metody manualnej do określenia modelu łańcucha wymiarowego, wykonania jego analizy i syntezy dla luzu osiowego piasty łożyskowej drugiej generacji [24].

4.1. Analiza konstrukcji, równanie łańcucha wymiarowego i tolerancji

Analiza konstrukcji piasty łożyskowej drugiej generacji z wykorzystaniem konstrukcji łożyska kulowego została przeprowadzona w oparciu o analizę matematyczną łańcuchów wymiarowych. Na rysunku 10 przedstawiono jej konstrukcję.



Rys. 10. Zespólona piasta łożyskowa drugiej generacji z wykorzystaniem konstrukcji łożyska kulkowego skośnego. 1 – pierścień zewnętrzny kołnierzowy, 2 – pierścień wewnętrzny lewy, 3 – pierścień wewnętrzny prawy, 4 – kulka, 5 – koszyk lewy, 6 – koszyk prawy, 7 – uszczelka, 8 – encoder

Elementy piasty łożyskowej, takie jak pierścienie wewnętrzne, pierścienie zewnętrzne i kulki, muszą być starannie dobrane, aby zapewnić prawidłowy luz osiowy i promieniowy. W praktyce jednak w przypadku tego typu rozwiązania mierzony jest tylko luz osiowy pod obciążeniem wywieranym w kierunku osiowym na pierścień zewnętrzny naprzemiennie na obie powierzchnie boczne zewnętrzne, przy czym pierścienie wewnętrzne są utrzymywane nieruchomo. Dla zerowego obciążenia osiowego łańcuch wymiarowy będzie składał się z 14. składników wyspecyfikowanych poniżej:

- m - odległość osiowa między środkami bieżni pierścienia zewnętrznego,
- nl - odległość osiowa między środkiem bieżni lewego pierścienia wewnętrznego a jego wąskim czołem,

- np - odległość osiowa między środkiem bieźni prawego pierścienia wewnętrznego a jego wąskim czołem,
 rwl - promień bieźni lewego pierścienia wewnętrznego,
 rwp - promień bieźni prawego pierścienia wewnętrznego,
 rzl - promień bieźni lewego pierścienia zewnętrznego,
 rzp - promień bieźni prawego pierścienia zewnętrznego,
 dwl - średnica bieźni lewego pierścienia wewnętrznego,
 dwp - średnica bieźni prawego pierścienia wewnętrznego,
 dzl - średnica bieźni lewego pierścienia zewnętrznego,
 dzp - średnica bieźni prawego pierścienia zewnętrznego,
 α - kąt styku,
 dl - średnica kulki bieźni lewej,
 dp - średnica kulki bieźni prawej.

Zatem równanie łańcucha wymiarowego dla luzu osiowego jest funkcją – źródło [24,93]:

$$L = f(m, pl, pp, rwl, rwp, rzl, rzp, dwl, dwp, dzl, dzp, \alpha, dl, dp)$$

W analizie uwzględniono uproszczoną konstrukcję zespołu piasty koła (rys. 11), której symetria pozwoliła znacznie zredukować liczbę składników i łańcuch wymiarowy do ośmiu elementów [24]. Luz osiowy można wyrazić wówczas funkcją postaci:

$$L = f(m, n, r_w, r_z, d_w, d_z, \alpha, d)$$

gdzie:

- m - odległość osiowa między środkami bieźni pierścienia zewnętrznego,
 n - odległość osiowa między środkami bieźni pierścieni wewnętrznych,
 r_w - promień bieźni pierścienia wewnętrznego,
 r_z - promień bieźni pierścienia zewnętrznego,
 d_w - średnica bieźni pierścienia wewnętrznego,
 d_z - średnica bieźni pierścienia zewnętrznego,
 α - kąt styku,
 d - średnica kulki.

Równanie łańcucha wymiarowego dla luzu osiowego przyjmuje postać [24]:

$$L = n - m + 2\sqrt{(d - S)(d + S - 2R)} \quad (4.10)$$

Równanie tolerancji utworzono przy użyciu metody częściowej zamienności. Przyjęto, że współczynnik zmienności dla wszystkich komponentów łańcucha wymiarowego wynosi 1. Wzór na tolerancję dla tego złożonego łańcucha wyznaczono z równania (4.11) - źródło [94].

$$T_L^2 = \sum_{i=1}^{k-1} \left(\frac{\partial L}{\partial A_i} \right)^2 T_{Ai}^2 \quad (4.11)$$

gdzie:

T_{Ai} – tolerancja ogniwa składowego łańcucha wymiarowego.

Pochodne cząstkowe:

$$\frac{\partial L}{\partial n} = 1, \quad \frac{\partial L}{\partial m} = -1 \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial L}{\partial d} = \frac{2(d-R)}{\sqrt{(d-S)(d+S-2R)}} \quad (4.13)$$

$$\frac{\partial L}{\partial S} = \frac{2(R-S)}{\sqrt{(d-S)(d+S-2R)}} \quad (4.14)$$

$$\frac{\partial L}{\partial R} = \frac{2(S-d)}{\sqrt{(d-S)(d+S-2R)}} \quad (4.15)$$

Dla $\beta = \sqrt{(d - S)(d + S - 2R)}$ równanie tolerancji przyjmuje postać - źródło [24]:

$$T_L = \sqrt{T_n^2 + T_m^2 + \frac{4}{\beta^2} [(d - R)^2 T_d^2 + (R - S)^2 T_S^2 + (S - d)^2 T_R^2]} \quad (4.16)$$

4.2. Weryfikacja modelu matematycznego równania tolerancji

Weryfikację modelu matematycznego łańcucha wymiarowego luzu osiowego wykonano w celu potwierdzenia, że równanie jest matematycznie i fizycznie poprawne oraz spełnia określone wymagania funkcjonalne. Przeprowadzono jego analizę i syntezę. Nominalna wartość luzu osiowego analizowanego zespołu piasty

koła została obliczona przy użyciu równania (4.16), wyprowadzonego przy założeniu częściowej zamienności. Założenie to zostało przyjęte, ponieważ łańcuch wymiarowy składa się z ośmiu składowych, a doświadczenie projektanta w projektowaniu i produkcji podobnych produktów wskazywało, że takie podejście jest prawidłowe. Dodatkowo ze względu na złożoność ośmioelementowego łańcucha wymiarowego, małe tolerancje i trudności pomiarowe przyjęto, że tolerancja kąta styku α wynosi zero [24].

Tabela 1 przedstawia wartości nominalne wymiarów wraz z ich tolerancjami, określone przez konstruktora i pokazane na rysunku 11

Tabela 1. Wartości nominalne i tolerancje określone dla wymiarów podanych na rys. 11
- źródło [24]

Wymiar	Wartość nominalna	Tolerancja
$n=nl+np$ [mm]	22,772	$\pm 0,020$
m [mm]	23,488	$\pm 0,010$
r_z [mm]	6,730	$\pm 0,025$
r_w [mm]	6,540	$\pm 0,025$
d [mm]	12,700	$\pm 0,00975$
α [°]	40	-
d_z [mm]	65,878	$\pm 0,02$
d_w [mm]	40,211	$\pm 0,02$
L [mm]	0,015	$\pm 0,010$

4.2.1. Analiza łańcucha wymiarowego

Analiza łańcucha wymiarowego polega na wyznaczeniu wartości granicznych jego niewiadomego ogniwa. Gdy wymiar nominalny ogniwa jest znany, analiza sprowadza się do obliczenia odchyłek wymiarowych [95]. W niniejszej pracy przeprowadzono analizę łańcucha wymiarowego dla luzu osiowego, którą przedstawiono poniżej.

$$R = r_w + r_z = 6,54^{\pm 0.025} + 6,73^{\pm 0.025} = 13,27^{\pm 0.05} \text{ mm}$$

$$S = 0,5(d_z - d_w) = 0,5(65,878^{\pm 0.02} - 40,211^{\pm 0.02}) = 12,834^{\pm 0.02} \text{ mm}$$

Obliczone wartości R i S i dane liczbowe z tabeli 1 zostały podstawione do równania łańcucha wymiarowego dla luzu osiowego (10) i obliczono wartość nominalną tego luzu [24].

$$L = 22,772 - 23,488 + 2 * \sqrt{(12,7-12,834)(12,7 + 12,834 -26,54)}$$

$$L = 0,0183 \text{ mm}$$

Do obliczenia odchyłek granicznych zastosowano metodę rachunku różniczkowego – wzory (4.17) i (4.18) [18,24]:

$$x_2 = \sum_{i=1}^k \frac{\partial L}{\partial A_i} a_{2i} + \sum_{i=1}^n \frac{\partial L}{\partial B_i} b_{1i} \quad (4.17)$$

$$x_1 = \sum_{i=1}^k \frac{\partial L}{\partial A_i} a_{1i} + \sum_{i=1}^n \frac{\partial L}{\partial B_i} b_{2i} \quad (4.18)$$

gdzie:

x_1, x_2 – odchyłki dolna i górna wymiaru zależnego,

a_{1i}, b_{1i} , – odchyłki graniczne dolne i -tych wymiarów odpowiednio zwiększających i zmniejszających,

a_{2i}, b_{2i} – odchyłki graniczne górne i -tych wymiarów zwiększających i zmniejszających.

Wykorzystując równania (4.12–4.15) wyznaczono wartości pochodnych cząstkowych w celu obliczenia β :

$$\beta = \sqrt{(d - S)(d + S - 2R)} = \sqrt{(12,7-12,834)(12,7 + 12,834-26,54)}$$

$$\beta = 0,3672$$

$$\frac{\partial L}{\partial d} = \frac{2(d - R)}{\beta} = \frac{2(12,7 - 13,27)}{0,3672} = -3,105$$

$$\frac{\partial L}{\partial S} = \frac{2(R - S)}{\beta} = \frac{2(13,27 - 12,834)}{0,3672} = 2,375$$

$$\frac{\partial L}{\partial R} = \frac{2(S - d)}{\beta} = \frac{2(12,834 - 12,7)}{0,3672} = 0,73$$

Zatem odchylenia graniczne x_2 i x_1 wyniosły:

$$x_2 = 0,02 + 2,375 \cdot 0,02 + 0,73 \cdot 0,05 + 0,01 + (-3,105) \cdot (-0,00975)$$

$$x_2 = 0,144 \text{ mm}$$

$$x_1 = -0,02 + 2,375 \cdot (-0,02) + 0,73 \cdot (-0,05) - 0,01 + (-3,105) \cdot 0,00975$$

$$x_1 = -0,144 \text{ mm}$$

Luz osiowy wyliczony z uwzględnieniem wymiarów granicznych składowych łańcucha wymiarowego wyniósł:

$$L = 0,0183 \pm 0,144 \text{ mm}$$

Dla porównania wartość tego luzu określona przez projektanta to [24]:

$$L = 0,015 \pm 0,010 \text{ mm}$$

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że wartość nominalna luzu osiowego w zespolonej piaście łożyskowej drugiej generacji wynosi 0,0183 mm, co oznacza, że jest o 0,0033 mm większa od wartości przyjętej przez projektanta, wynoszącej 0,015 mm. Różnica ta, chociaż jest relatywnie niewielka, to może być istotna w kontekście wysokich wymagań jakościowych stawianych piastom łożyskowym pracującym przy zmiennych prędkościach i obciążeniach dynamicznych. Powiększony luz to większe drgania, szумы oraz potencjalne skrócenie trwałości.

Znacznie poważniejszą niezgodność stwierdzono w zakresie tolerancji luzu osiowego, gdzie obliczona wartość tolerancji wynosi $\pm 0,144$ mm, co przekłada się na pole tolerancji równe 0,288 mm. Jest to ponad czternastokrotnie więcej niż dopuszczalne przez konstruktora pole tolerancji, wynoszące 0,020 mm ($\pm 0,010$ mm). Tak znaczna różnica wskazuje na występowanie kumulacji odchylek wymiarowych elementów składowych, wchodzących do równania łańcucha wymiarowego luzu osiowego, której nie uwzględniono wystarczająco na etapie projektowania, ściśle powiązanego z możliwościami procesu technologicznego. Niewłaściwie dobrane tolerancje wymiarów części składowych przekładają się na dużą zmienność całkowitą, co sugeruje konieczność ich zawężenia. Jednak z punktu widzenia technologii i kosztów wytwarzania jest to często niewykonalne. Alternatywnym, realnym rozwiązaniem tego problemu może być kompensacja selektywna.

4.2.2. Synteza łańcucha wymiarowego

Syntezę łańcucha wymiarowego wykonano dla częściowej zamienności metodą jednakowej tolerancji, jednakowej klasy tolerancji i jednakowego wpływu obliczając tolerancje wymiarów składowych. Wieloletnie doświadczenie producentów łożysk wskazuje, że obliczenia metodą całkowitej zamienności prowadzą do bardzo małych tolerancji niezależnych wymiarów. Ich spełnienie w obecnych warunkach produkcyjnych jest niemożliwe [24, 95–97].

Metoda jednakowej tolerancji

Podstawiając dane liczbowe do równania (4.16) i przyjmując

$$T_n = T_m = T_d = T_S = T_R = T \text{ uzyskano:}$$

$$T_L = T \sqrt{2 + \frac{4}{0,135} [0,325 + 0,19 + 0,018]}$$

$$T = \frac{0,02}{4,218} = 0,005 \text{ mm}$$

Metoda jednakowej klasy tolerancji

Do obliczenia tolerancji metodą jednakowej klasy tolerancji dla złożonego łańcucha wykorzystano wzory (4.19) i (4.20) [24,94].

$$k_L^2 T_L^2 = a^2 \sum_{i=1}^{n-1} k_{Ai}^2 \left(\frac{\partial L}{\partial A_i} \right)^2 (\sqrt[3]{A_i})^2 \quad (4.19)$$

$$T_{Ai} = a \sqrt[3]{A_i} \quad (4.20)$$

Po podstawieniu danych z tabeli 1 do równania (4.20) otrzymano następujące wyniki:

$$T_n = a \sqrt[3]{n} = a \sqrt[3]{22,772} = 2,834a$$

$$T_m = a \sqrt[3]{m} = a \sqrt[3]{23,448} = 2,862a$$

$$T_d = a \sqrt[3]{d} = a \sqrt[3]{12,7} = 2,333a$$

$$T_S = a \sqrt[3]{S} = a \sqrt[3]{12,834} = 2,341a$$

$$T_R = a \sqrt[3]{R} = a \sqrt[3]{13,27} = 2,368a$$

Po podstawieniu do równania (4.19) otrzymano:

$$T_L^2 = a^2(1 \cdot 2,834^2 + 1 \cdot 2,862^2 + 9,641 \cdot 2,333^2 + 5,641 \cdot 2,341^2 + 0,533 \cdot 2,368^2)$$

$$T_L^2 = a^2 \cdot 102,6, \text{ więc}$$

$$a = \frac{T_L}{\sqrt{102,6}} = \frac{0,02}{10,13} = 0,00197 \text{ mm}$$

Tolerancje wymiarów składowych wynoszą:

$$T_n = 0,006 \text{ mm}; T_m = 0,006 \text{ mm}; T_d = 0,005 \text{ mm}; T_s = 0,005 \text{ mm}; T_R = 0,005 \text{ mm}$$

Metoda jednakowego wpływu

Na podstawie równania (4.21) dla łańcucha złożonego [24,94], i zakładając, że składniki łańcucha mają rozkład normalny, tj. $k = 1$, otrzymano wynik:

$$k_{A_1}^2 \left(\frac{\partial L}{\partial A_1} \right)^2 T_{A_1}^2 = k_{A_2}^2 \left(\frac{\partial L}{\partial A_2} \right)^2 T_{A_2}^2 \dots = k_{A_n}^2 \left(\frac{\partial L}{\partial A_n} \right)^2 T_{A_n}^2 m^2 \quad (4.21)$$

$$m^2 = \left(\frac{\partial L}{\partial A_n} \right)^2 * T_{A_n}^2, \text{ więc } T_{A_n} = \sqrt{\frac{m^2}{\left(\frac{\partial L}{\partial A_n} \right)^2}} = \frac{m}{\left| \frac{\partial L}{\partial A_n} \right|}$$

Dla pięciu wymiarów łańcucha

$$T_L^2 = 5 \cdot m^2, \text{ więc } m = \frac{T_L}{\sqrt{5}} = \frac{0,02}{2,236} = 0,009 \text{ mm}$$

Tolerancje poszczególnych wymiarów wynoszą zatem:

$$T_n = \frac{m}{\frac{\partial L}{\partial n}} = \frac{0,009}{1} = 0,009 \text{ mm}$$

$$T_m = \frac{m}{\frac{\partial L}{\partial m}} = \frac{0,009}{1} = 0,009 \text{ mm}$$

$$T_d = \frac{m}{\frac{\partial L}{\partial d}} = \frac{0,009}{3,105} = 0,003 \text{ mm}$$

$$T_s = \frac{m}{\frac{\partial L}{\partial s}} = \frac{0,009}{2,375} = 0,004 \text{ mm}$$

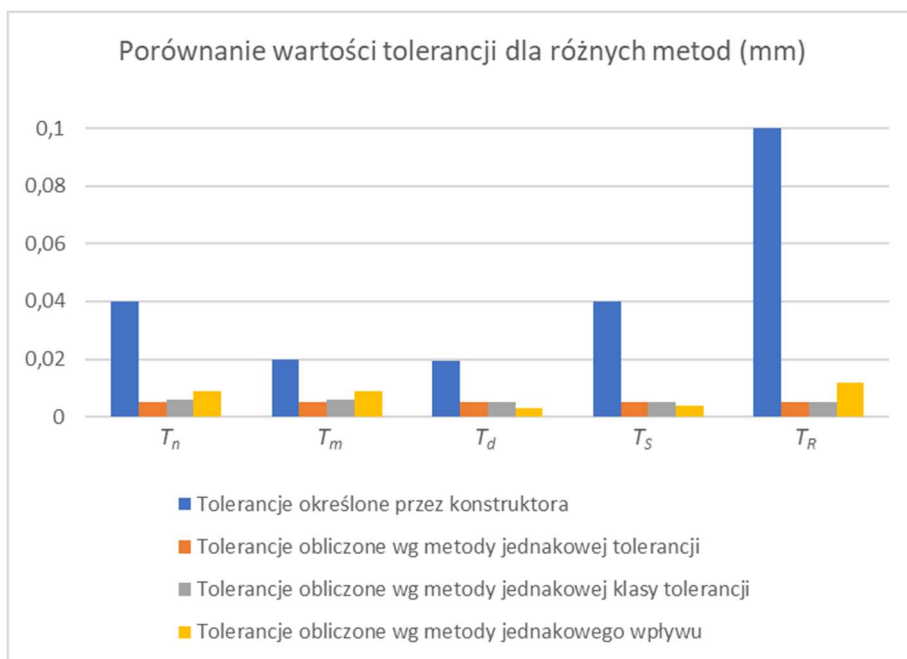
$$T_R = \frac{m}{\frac{\partial L}{\partial R}} = \frac{0,009}{0,73} = 0,012 \text{ mm}$$

W tabeli 2 podsumowano wyniki dla trzech wyżej wymienionych metod w zestawieniu do wartości przyjętych przez projektanta. Nie użyto metody minimalnego kosztu, ponieważ koszty wykonania pierścieni jako funkcje zmian wartości łańcucha wymiarowego nie są znane [24].

Tabela 2. Podsumowanie wyników dla trzech metod obliczania tolerancji dla zamienności częściowej [24]

Tolerancje określone przez konstruktora		Tolerancje obliczone wg metody jednakowej tolerancji	Tolerancje obliczone wg metody jednakowej klasy tolerancji	Tolerancje obliczone wg metody jednakowego wpływu
T_n [mm]	0,04	0,005	0,006	0,009
T_m [mm]	0,02		0,006	0,009
T_d [mm]	0,0195		0,005	0,003
T_S [mm]	0,04		0,005	0,004
T_R [mm]	0,10		0,005	0,012

Na rysunku 12 przedstawiono uzyskane wyniki wartości tolerancji wymiarów składowych w układzie graficznym.



Rys. 12. Porównanie wartości tolerancji wyliczonych przy zastosowaniu różnych metod

4.3 Podsumowanie

Tolerancje określone przez konstruktora są znacznie większe niż tolerancje obliczone metodami analitycznymi. Dla przykładu, wartość tolerancji T_R (0,10 mm) zapisana przez konstruktora jest około 20 razy większa niż wartość obliczona metodą jednakowej tolerancji (0,005 mm). Metoda jednakowej tolerancji dała najmniejsze wyniki wartości tolerancji niezależnie od roli danego wymiaru w funkcji wyrobu. Może to skutkować nadmiernym zaostrzeniem wymagań technologicznych i wzrostem kosztów produkcji. Niewielkie zróżnicowanie tolerancji uzyskano stosując metodę jednakowej klasy tolerancji, ale nadal są znacznie mniejsze niż wartości zaproponowane przez konstruktora. Na przykład, dla T_n wynosi 0,006 mm, co jest bardzo niskie w porównaniu do wartości projektowej 0,04 mm. Stosując metodę jednakowego wpływu uzyskano największe zróżnicowanie tolerancji z wartościami 0,009 mm dla T_n i 0,012 mm dla T_R , co wskazuje na uwzględnienie wpływu każdego wymiaru na jakość końcowego wyrobu. Wartości tolerancji uzyskane tą metodą są bardziej zróżnicowane, z większymi tolerancjami przypisanymi do wymiarów, które mają mniejszy wpływ na jakość, jak T_R . Metoda jednakowego wpływu prowadzi do największego zróżnicowania tolerancji, z wartościami 0,003 mm dla T_d i 0,012 mm dla T_R . Wskazuje to na uwzględnienie wpływu każdego wymiaru na jakość końcową wyrobu. Wartości tolerancji uzyskane tą metodą są bardziej zróżnicowane, z większymi tolerancjami przypisanymi do wymiarów, które mają mniejszy rzeczywisty wpływ na jakość wyrobu, jak T_R .

Zastosowanie tolerancji projektowych, które są wyższe niż obliczone wartości, może prowadzić do powstania nieakceptowalnego poziomu braków w montażu, co ma bezpośredni wpływ na jakość gotowego wyrobu. Natomiast zbyt małe tolerancje wymagają stosowania precyzyjnych maszyn i narzędzi, co zwiększa koszty produkcji i w skrajnych przypadkach może prowadzić do niemożności realizacji produkcji w wymaganych warunkach. Wszystko to razem powoduje wzrost jednostkowego kosztu produkcji, a w skrajnych przypadkach brak w ogóle możliwości pokonania barier technologicznych i prowadzenia produkcji. Dlatego w takich przypadkach najbardziej racjonalnym rozwiązaniem jest wykonywanie poszczególnych części w tolerancjach możliwych do osiągnięcia w posiadanych warunkach produkcyjnych i zastosowanie kompensacji [98]. W przypadku łożyska piasty możliwa do zastosowania jest tzw. kompensacja selekcyjna polegająca na pomiarze wymiarów składowych łańcucha wymiarowego wszystkich wykonanych części i podziale ich na kilka grup wymiarowych, a następnie odpowiednim ich skojarzeniu wraz z elementami tocznymi podczas montażu.

Zbudowany model matematyczny łańcucha wymiarowego piasty łożyskowej drugiej generacji może być użyty w projektowaniu jako alternatywa dla często stosowanej metody projektowania produktu i procesu opartej na doświadczeniu projektanta, licznych testach i znacznych kosztach. Jego zastosowanie może skrócić czas oraz koszty związane z projektowaniem i wdrożeniem piasty łożyskowej do produkcji.

ROZDZIAŁ V

PROCES TECHNOLOGICZNY – METODA BADANIA

Główne elementy składowe piasty łożyskowej drugiej generacji opartej na konstrukcji łożyska kulowego skośnego stanowią dwa pierścienie wewnętrzne i kołnierzowy pierścień zewnętrzny. Dla tych elementów składowych piasty łożyskowej, w ramach prac badawczych, wykonano operacje procesu technologicznego dokonując pomiarów wybranych parametrów geometrycznych. Pierścienie wewnętrzne wykonano ze stali łożyskowej 100Cr6 wg PN-EN ISO 683-17 [N6], natomiast pierścień zewnętrzny wykonano ze stali C55E wg EN ISO 683-1 [N7]. Ich procesy technologiczne obejmowały operacje kucia na gorąco, toczenia, obróbki cieplnej i szlifowania. Proces technologiczny pierścienia zewnętrznego składał się z kucia na gorąco, toczenia z wierceniem i gwintowaniem otworów, obróbki cieplnej oraz operacji szlifierskich. Po wykonaniu pierścieni oraz koszy z poliamidu PA 6.6 z 25% włókien szklanych przeprowadzono montaż piast.

Główne etapy procesów technologicznych pokazano w tabeli 3.

Tabela 3. Główne etapy procesu technologicznego

Główne etapy procesu technologicznego pierścieni	Stanowisko
Pierścień zewnętrzny	
Kuć pierścień	Młot M-133A
Toczyć pierścień	Automat QTS 350
Wiercić, gwintować i gratować otwory	Centrum frez. Variaxis i-500
Hartować indukcyjnie i odpuszczać	SAET, WODC
Szlifować średnicę zewnętrzną	Szlifierka PGE-150R/M
Szlifować bieżnię wstępnie i wykończająco	Szlifierka SIW-4E/M
Szlifować średnicę wewnętrzną	Szlifierka SIW-4CBD
Pierścień wewnętrzny lewy	
Kuć pierścień	Młot M-133A
Toczyć pierścień	Automat Multiplex MP 6200
Hartować i odpuszczać	Linia WIENSTROTH
Szlifować czoła przekładając	Szlifierka RVC-500
Szlifować bieżnię	Szlifierka PGE-150R/M
Szlifować średnicę wewnętrzną - otwór	Szlifierka SIW-3B/M

cd. tabeli 3

Dogładzać bieżnię	Dogładzarka KM-85Z2A
Pierścień wewnętrzny prawy	
Kuć pierścień	Młot M-133A
Toczyć pierścień	Automat Multiplex MP 6200
Hartować i odpuszczać	Linia WIENSTROTH
Szlifować czoła przekładając	Szlifierka RVC-500
Szlifować średnicę zewnętrzną	MC-50
Szlifować bieżnię	Szlifierka PGE-150R/M
Szlifować średnicę wewnętrzną - otwór	Szlifierka SIW-3B/M
Dogładzać bieżnię	Dogładzarka KM-85Z2A

Odkuwki wykonano na młocie M-133A z prętów ϕ 100 mm, 45 mm i 40 mm wygrzanych do temperatury 1050 – 1120°C w ilościach gwarantujących otrzymanie próbek 50 elementowych do fazy montażu. Ich wygląd przedstawia rysunek 13.



a)



b)

Rys. 13. Odkuwki pierścieni: a) zewnętrznego i b) pierścieni wewnętrznych

Operację toczenia pierścieni wewnętrznych i zewnętrznego wykonano w trzech grupach parametrów technologicznych pokazanych w tabeli 4, dla każdego z nich, na automatach tokarskich CNC Mazak Multiplex 6200 – II i QTS 350 (rys. 14). Zaplanowano badania wpływu parametrów obróbczych, takich jak posuw i wartość promienia naroża płytki skrawającej na uzyskiwane wartości średnic bieżni po kłuczowych operacjach procesu technologicznego.

Tabela 4. Parametry technologiczne obróbki tokarskiej

Parametr technologiczny	Grupa I	Grupa II	Grupa III
Naddatek	0,6 mm	0,6 mm	0,6 mm
Posuw	0,25 mm/obr	0,1 mm/obr	0,25 mm/obr
Prędkość	300 m/min	300 m/min	300 m/min
Narzędzie (płytki)	DNMG110412	DNMG110412	DNMG110404



a)



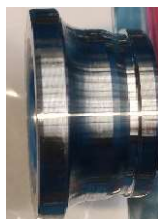
b)

Rys. 14. Automat tokarski Mazak: a) Multiplex - 6200 – II, b) QTS - 350

Wygląd pierścieni po toczeniu przedstawiono na rysunku 15.



a)



b)

Rys. 15. Pierścienie po toczeniu: a) wewnętrzne, b) zewnętrzny

Pierścienie zewnętrzne po toczeniu poddano operacji wiercenia i gwintowania otworów na centrum frezarskim Mazak Variaxis i-500. Na rysunku 16

przedstawiono w uchwycie pierścień zewnętrzny z wykonanymi otworami i centrum frezarskie.



a)



b)

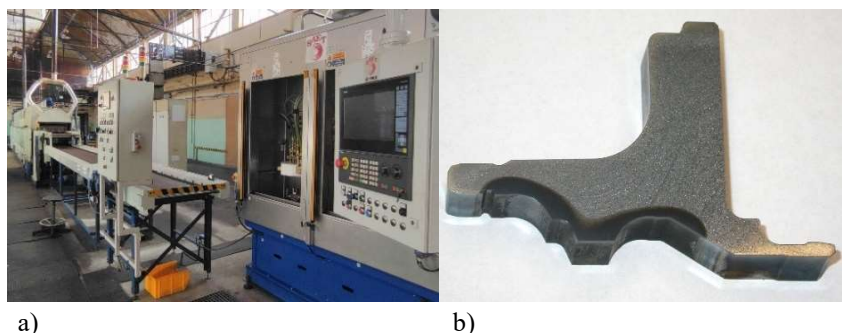
Rys. 16. a) pierścień zewnętrzny z otworami w uchwycie, b) centrum frezarskie Mazak Variaxis i-500

Kolejną operacją technologiczną, jaka została wykonana była obróbka cieplna składająca się z hartowania i odpuszczania. Pierścienie wewnętrzne były utwardzane na wskroś na linii firmy WIENSTROTH (rys. 17) do twardości 63 HRC. Temperatura wygrzewania 850°C, czas 36 minut, środek chłodzący olej Mar-temp H340 o temperaturze 110°C, odpuszczanie w temperaturze 210°C w czasie 100 minut.



Rys. 17. Linia do hartowania i odpuszczania firmy Wienstroth

Pierścienie zewnętrzne ze względu na użyty do ich produkcji gatunek materiału zostały zahartowane indukcyjnie z użyciem polimeru AQUA QUENCH 222 i następnie odpuszczone na linii zbudowanej z urządzeń SAET i agregatu do odpuszczania WODC. Na rysunku 18 pokazano wygląd warstwy zahartowanej indukcyjnie i odpuszczonej w temperaturze 160°C w czasie 90 minut – ciemniejszy obszar. Rozkład twardości dla obu bieżni zawarto w tabeli 5.



Rys. 18. a) linia do hartowania indukcyjnego, b) wygląd warstwy zahartowanej

Tabela 5. Zestawienie wyników rozkładu twardości

Odległość od powierzchni	Bieżnia lewa mniejsza średnica	Bieżnia prawa większa średnica
(mm)	HV 1	
0,5	733	721
1,0	714	728
1,5	681	720
2,0	605	712
2,5	456	658
3,0	250	379
3,5	242	234

Następnie wykonano operacje szlifierskie pierścieni obrobionych cieplnie zgodnie z zaplanowanym procesem technologicznym. Dla pierścieni wewnętrznych lewych i prawych wykonano szlifowanie czół przekładając, szlifowanie profilu bieżni łożyskowych, szlifowanie średnicy wewnętrznej – otworu i dogładzanie bieżni. Dla pierścienia wewnętrznego prawego wykonano dodatkowo szlifowanie średnicy zewnętrznej, współpracującej z uszczelką. Szlifowanie czół pierścieni

wewnętrznych przeprowadzono na obrabiarce RVC-500, natomiast szlifowanie średnicy współpracującej z uszczelką wykonano na szlifierce MC-50. Na rysunku 19 pokazano wygląd tych szlifierek.



a)



b)

Rys. 19. Szlifierek: a) RVC 500, b) MC-50

Kolejne operacje, tj. szlifowanie profilu bieżni pierścieni wewnętrznych wykonano na obrabiarce PGE-150R/M. Szlifierkę wraz z pierścieniem po wykonaniu operacji przedstawiono na rysunku 20.



a)



b)

Rys. 20. a) szlifierka PGE-150R/M, b) pierścień lewy po szlifowaniu profilu bieżni

Szlifowanie otworu pierścieni wewnętrznych wykonano na szlifierce RTFO-140CM, dogładzanie bieżni na dogładzarce KM-85Z2A (rys. 21).



a)



b)

Rys. 21. a) szlifierka RTFO-140CM, b) dogładzarka KM-85Z2A

Z kolei operacje szlifierskie dla pierścienia zewnętrznego realizowano według następującej kolejności: szlifowanie średnicy zewnętrznej, profilu bieżni wstępnie, profilu bieżni wykończająco i średnicy wewnętrznej. Szlifowanie średnicy zewnętrznej pierścienia zewnętrznego wykonano na szlifierce PGE-150R/M pokazanej już wcześniej na rysunku 20 a.

Szlifowanie bieżni wstępnie i wykończająco wykonano na szlifierce SIW-4E/M, a szlifowanie średnicy wewnętrznej na szlifierce SIW-4CBD (rys. 22).



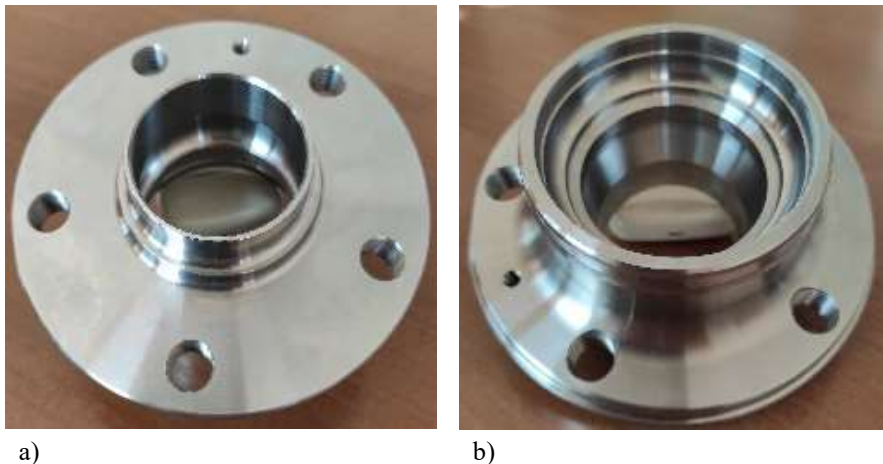
a)



b)

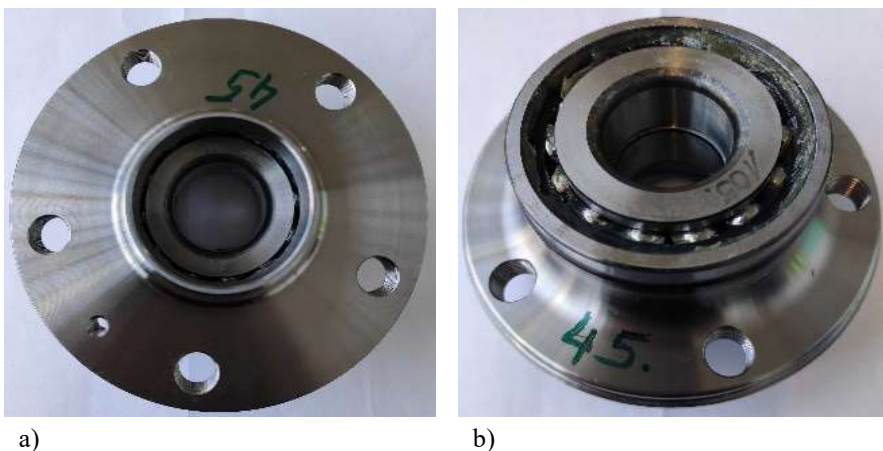
Rys. 22. a) szlifierka SIW-4EM, b) szlifierka SIW-4CBD

Wygląd pierścienia zewnętrznego po obróbce szlifierskiej pokazano na rysunku 23.



Rys. 23. Widok pierścienia zewnętrznego po obróbce szlifierskiej: a) od strony pierścienia lewego wewnętrznego, b) od strony pierścienia wewnętrznego prawego

Następnie dokonano montażu piasty zwracając uwagę na otrzymanie luzu osiowego określonego przez konstruktora. Wygląd piasty bez uszczelek pokazano na rysunku 24.



Rys. 24. Zmontowana piasta: a) widok od strony lewego pierścienia wewnętrznego, b) widok od strony prawego pierścienia wewnętrznego

Podczas realizacji obróbki cieplnej i szlifierskiej stosowano parametry obróbkowe (naddatek, posuwy, prędkość skrawania) nie dokonując ich modyfikacji dla trzech grup próbek. Tak więc dla każdego rodzaju pierścienia badania były prowadzone na trzech próbkach 50-elementowych uformowanych podczas obróbki towarzyskiej. Po każdej wykonanej operacji technologicznej dokonano pomiarów za pomocą środków pomiarowych przewidzianych procesem technologicznym. Do obserwacji były wytypowane parametry, które bezpośrednio wynikały z modelu matematycznego łańcucha wymiarowego i równania tolerancji. Do nich zaliczono średnicę bieżni pierścienia wewnętrznego lewego i prawego oraz średnicę obu bieżni pierścienia zewnętrznego. Dodatkowo obserwowano odchyłki kołowości bieżni i położenie osiowe promienia bieżni. Otrzymane wyniki poddano statystycznej analizie dla tych wymiarów, które wykazywały istotną zmienność.

5.1. Badanie zdolności maszyn technologicznych pod kątem zapewnienia wymaganych wartości ogniwa łańcucha wymiarowego

Badanie zdolności maszyny C_m i C_{mk} jest niezwykle ważne w przemyśle produkcyjnym, zwłaszcza w kontekście jakości i niezawodności produkcji. Poniżej przedstawiono definicje i znaczenie tych wskaźników:

- C_m to miara zdolności maszyny do utrzymywania wymiarów wyrobu w określonych granicach tolerancji. Określa stosunek przedziału pola tolerancji do szerokości rozrzutu uzyskiwanych wymiarów.

$$C_m = (USL - LSL) / 6\sigma \quad (5.1)$$

gdzie:

USL to górna granica tolerancji,

LSL to dolna granica tolerancji,

σ to odchylenie standardowe.

- C_{mk} to wskaźnik zdolności maszyny do utrzymywania rozrzutu wymiarów i położenia środka tego rozrzutu w środku pola tolerancji. Mówi o wycentrowaniu procesu. Określa ile razy połowa szerokości rozrzutu mieści się w przedziale od średniej do bliższej granicy tolerancji [99,100].

$$C_{mk} = \min[(\bar{X} - LSL) / 3\sigma, (USL - \bar{X}) / 3\sigma] \quad (5.2)$$

gdzie:

$\bar{X}$ to średnia wartość z próbki.

Cm i Cmk pozwalają ocenić czy maszyna spełnia wymagania jakościowe ustalone przez specyfikację produktu. Według wymagań branży samochodowej wartość referencyjna dla Cm i Cmk powinna wynosić co najmniej 1,67.

Badanie Cm i Cmk pozwala na zidentyfikowanie ewentualnych problemów w procesie produkcyjnym, a także na podjęcie odpowiednich działań korygujących. Wysoka wartość Cm i Cmk sugeruje, że proces jest stabilny i mało podatny na zmienność, co przekłada się na wysoką jakość wyprodukowanych elementów. Niskie wartości mogą wskazywać na potrzebę optymalizacji procesu, wprowadzenia zmian w narzędziach lub maszynach, aby poprawić jakość produkcji. Regularne monitorowanie i analiza tych wskaźników pozwalają utrzymać proces w stabilnym i optymalnym stanie, przyczyniając się do minimalizacji wadliwych wyrobów. Badanie zdolności maszyny Cm i Cmk jest kluczowym narzędziem w zapewnianiu jakości produkcji, zwiększeniu konkurencyjności firmy i spełnianiu wymagań klientów [99].

Badanie zdolności maszyn przeprowadzono dla obrabiarek biorących udział w realizacji procesu technologicznego i z uwzględnieniem kluczowych charakterystyk będących ogniwami składowymi łańcucha wymiarowego luzu wzdłużnego. Z zakresu fazy obróbki tokarskiej wykonano badanie dla tokarek numerycznie sterowanych Multiplex-6200 i Mazak QTS-350, a dla obróbki szlifierskiej dla szlifierek NC produkcji FŁT Kraśnik S.A. PGE-150R/M, SIW-4E/M. Wyniki zestawiono w tabeli 6.

Tabela 6. Wartości Cm i Cmk dla obrabiarek kształtujących kluczowe charakterystyki

Detal	Maszyna	Parametr	Cm	Cmk
Pierścień wewnętrzny	Multiplex-6200	Promień bieżni	1,81	1,73
		Średnica bieżni	1,74	1,70
		Położenie bieżni	2,19	2,12
	PGE-150R/M	Promień bieżni	2,21	2,11
		Średnica bieżni	2,18	2,21
		Położenie bieżni	2,22	2,17
Pierścień zewnętrzny	QTS-350	Promień bieżni	1,94	1,84
		Średnica bieżni	1,76	1,73
		Położenie bieżni	1,87	1,70
	SIW-4E/M	Promień bieżni	2,21	2,11
		Średnica bieżni	2,18	2,17
		Położenie bieżni	2,22	2,21

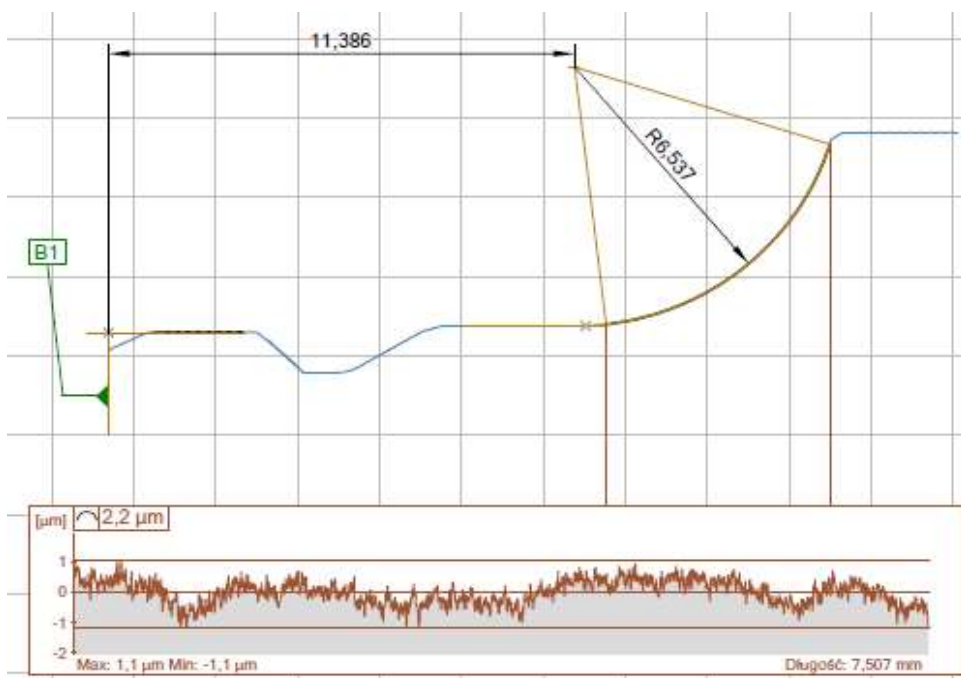
5.2. Podsumowanie

Zgodnie z procesem technologicznym wykonano pierścienie łożyskowe i montaż piasty łożyskowej. Proces realizowano przy użyciu obrabiarek o zdolnościach C_m i C_{mk} powyżej 1,67 gwarantujących jego stabilność i uzyskanie wymiarów o wymaganych tolerancjach. Wyniki pomiarów wybranych parametrów geometrycznych zebrane podczas realizacji poszczególnych operacji technologicznych zostały poddane analizie statystycznej. Na ich podstawie zostały zbudowane modele matematyczne dziedziczności technologicznej.

ROZDZIAŁ VI

OCENA WYNIKÓW PRZEPROWADZONYCH BADAŃ

Uzyskane wyniki pomiarów wszystkich typów pierścieni zestawiono w załącznikach A, B i C. Ze względu na niewielką różnicę wymiarową pomiędzy wynikami po toczeniu a po obróbce cieplnej dla wymiaru położenia osiowego środka bieżni od czoła wąskiego (maksymalnie 0,015 mm) oraz niewielki rozrzut wartości promieni bieżni wszystkich typów pierścieni (nieprzekraczający 0,006 mm), a także znikomy wpływ tych parametrów na wartość luzu osiowego odstąpiono od ich dalszej analizy statystycznej. Na rysunku 25 pokazano przykładowy wynik z pomiaru wartości i profilu promienia bieżni pierścienia wewnętrznego lewego. Pomiaru profilu bieżni dokonano na stanowisku pomiarowym Hommel-Etamic T8000 z wersją oprogramowania EVOVIS 2.02.3.00.



Rys. 25. Wynik pomiaru profilu bieżni pierścienia wewnętrznego lewego

Analogicznie, ze względu na niewielką różnicę wartości parametru kołowości po obróbce cieplnej względem wartości uzyskanych po toczeniu (tylko 0,02 mm), również ten parametr pominięto w dalszych analizach statystycznych. Wyniki pomiarów zmiennych, takich jak średnice bieżni pierścieni po toczeniu, po obróbce cieplnej oraz szlifowaniu wykończającym poddano analizie statystycznej z wykorzystaniem programu STATISTICA v.10. Zmienne te określono jako zmienne zależne badając ich zachowanie w korelacji od zmiennych niezależnych, takich jak posuw i promień naroża płytki skrawającej. Postawiono przy tym hipotezę zerową H_0 zakładającą, że rozkład zmiennej zależnej ma cechy rozkładu normalnego. Przyjęto poziom istotności $\alpha=0,05$, dla którego $p>0,05$ oznacza, że rozkład jest zgodny z normalnym. Rozkład normalny zmiennej zależnej jest podstawowym założeniem wielu testów statystycznych parametrycznych, takich jak np. t-Studenta, ANOVA [101].

Dla pierścienia wewnętrznego lewego, prawego oraz pierścienia zewnętrznego przeprowadzono sprawdzenie normalności rozkładów średnicy bieżni po toczeniu, obróbce cieplnej oraz szlifowaniu wykończającym, z wykorzystaniem testu Shapiro-Wilka (W) [102].

Wartość statystyki W testu Shapiro–Wilka oblicza się zgodnie ze wzorem (6.1).

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1}^w a_i x_{(i)}\right)^2}{\sum_{i=1}^w (x_i - \bar{x})^2} \quad (6.1)$$

gdzie:

w – liczba elementów w próbie

$x_{(i)}$ – i -ta wartość uporządkowana rosnąco

x_i – i -ta surowa wartość w próbie,

$\bar{x}$ – średnia arytmetyczna próby,

a_i – współczynniki obliczane na podstawie oczekiwanych wartości z rozkładu normalnego.

Nie przeprowadzono testów normalności dla zmiennych niezależnych (predyktorów), ponieważ są to zmienne dychotomiczne, przyjmujące jedynie dwie wartości, a zatem nie posiadają one rozkładu ciągłego, co czyni testy normalności niezasadnymi.

Badanie normalności zostało wykonane na próbkach 50-elementowych w grupach opisanych w tabeli 7.

Tabela 7. Grupy próbek

Grupa	Posuw mm/obr	Promień naroża płytki, mm
1	0,25	1,2
2	0,10	1,2
3	0,25	0,4

W analizie statystycznej zastosowano następujące symbole zmiennych:

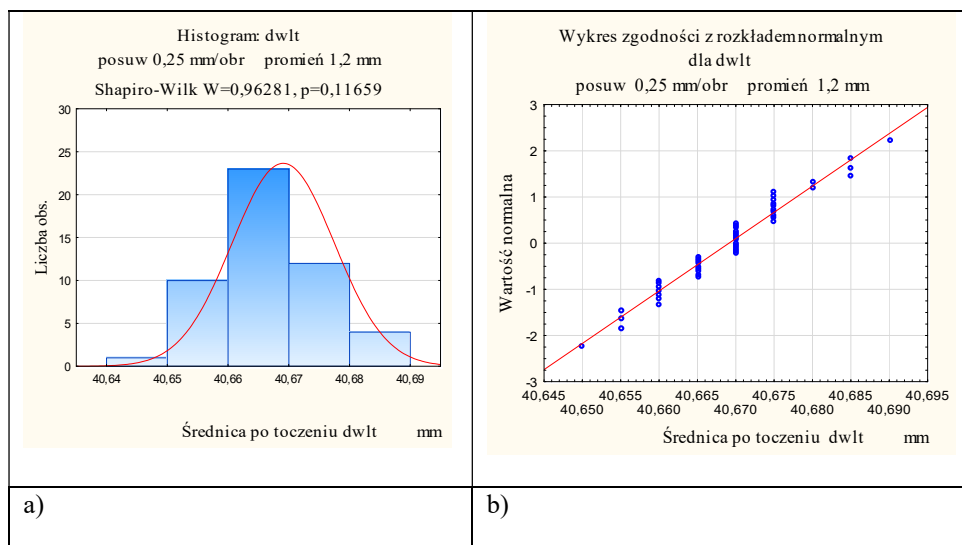
- dwlt - średnica bieżni pierścienia wewnętrznego lewego po toczeniu
- dwlc - średnica bieżni pierścienia wewnętrznego lewego po obr. cieplnej
- dwls - średnica bieżni pierścienia wewnętrznego lewego po szlifowaniu
- dwpt - średnica bieżni pierścienia wewnętrznego prawego po toczeniu
- dwpc - średnica bieżni pierścienia wewnętrznego prawego po obr. cieplnej
- dwps - średnica bieżni pierścienia wewnętrznego prawego po szlifowaniu
- dzlt - średnica bieżni lewej pierścienia zewnętrznego po toczeniu
- dzlc - średnica bieżni lewej pierścienia zewnętrznego po obr. cieplnej
- dzls - średnica bieżni lewej pierścienia zewnętrznego po szlifowaniu
- dzpt - średnica bieżni prawej pierścienia zewnętrznego po toczeniu
- dzpc - średnica bieżni prawej pierścienia zewnętrznego po obr. cieplnej
- dzps - średnica bieżni prawej pierścienia zewnętrznego po szlifowaniu
- vdwlt - kołowość średnicy bieżni pierścienia wewnętrznego lewego po toczeniu
- vdwlc - kołowość średnicy bieżni pierścienia wewnętrznego lewego po obr. cieplnej
- vdwpt - kołowość średnicy bieżni pierścienia wewnętrznego prawego po toczeniu
- vdwpc - kołowość średnicy bieżni pierścienia wewnętrznego prawego po obr. cieplnej
- vdzlt - kołowość średnicy bieżni lewej pierścienia zewnętrznego po toczeniu
- vdzlc - kołowość średnicy bieżni lewej pierścienia zewnętrznego po obr. cieplnej
- vdzpt - kołowość średnicy bieżni prawej pierścienia zewnętrznego po toczeniu
- vdzpc - kołowość średnicy bieżni prawej pierścienia zewnętrznego po obr. cieplnej

6.1. Analiza opisowa i badanie normalności średnicy bieżni pierścienia wewnętrznego lewego

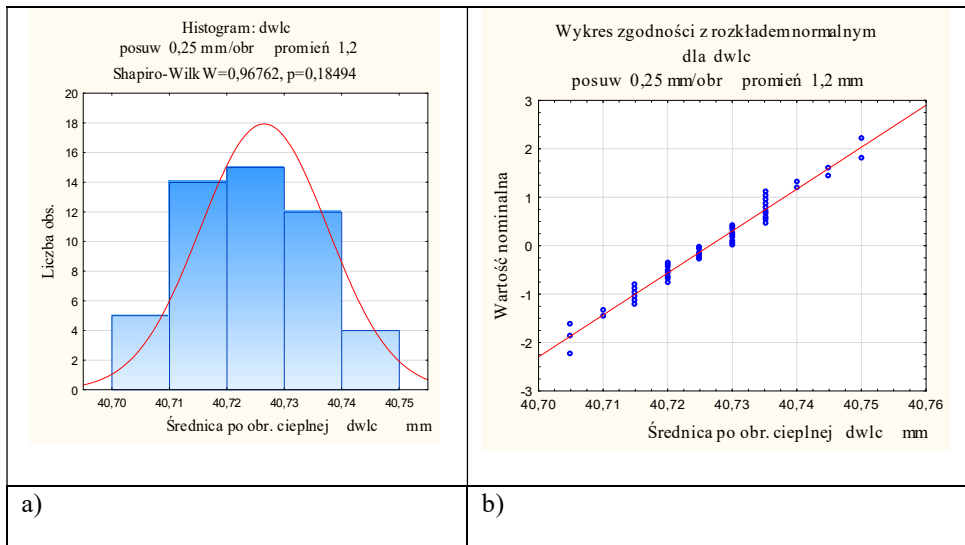
W tabelach 8 ÷ 10 zestawiono podstawowe parametry statystyczne analizy opisowej rozkładu wartości średnic bieżni pierścienia wewnętrznego lewego. Rysunki 26 ÷ 34 przedstawiają odpowiednio ich histogramy i wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym.

Tabela 8. Analiza opisowa dla wyników średnicy bieżni pierścienia wewnętrznego lewego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm

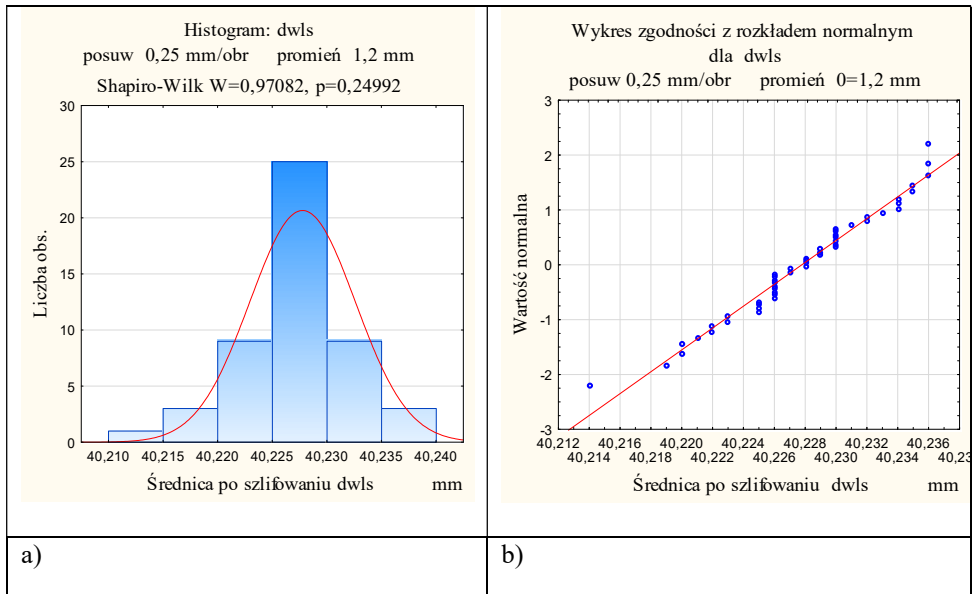
Zmienna	Średnia	Mediana	Min	Max	Dolny kwartyl	Górny kwartyl	σ
dwlt	40,6691	40,6700	40,6500	40,6900	40,6650	40,6750	0,00843
dwlc	40,7265	40,7275	40,7050	40,7500	40,7200	40,7350	0,01112
dwls	40,2277	40,2280	40,2140	40,2360	40,2250	40,2300	0,00482



Rys. 26. Wizualizacja wyników średnicy po toczeniu pierścienia wewnętrznego lewego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym



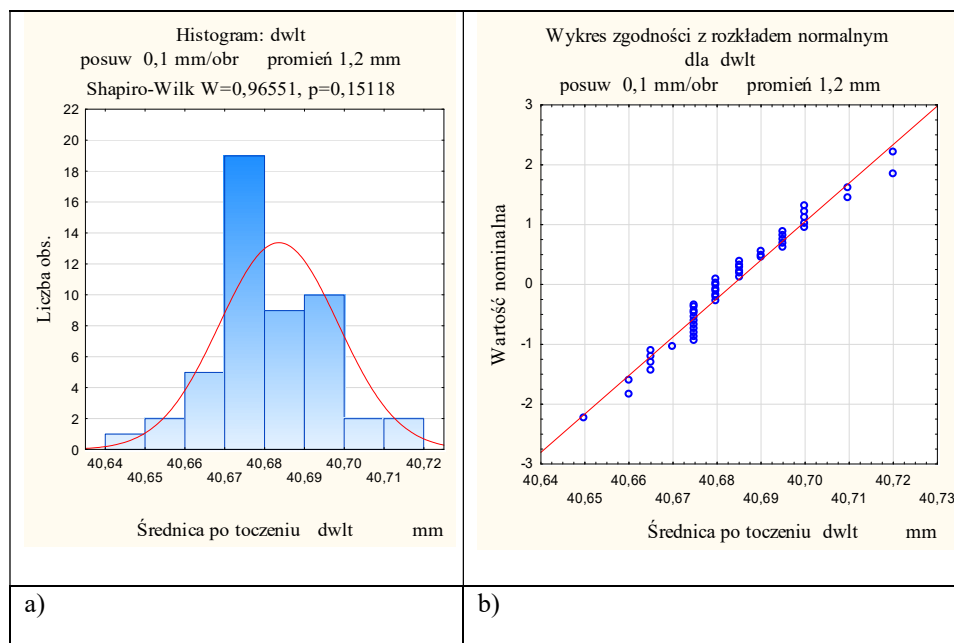
Rys. 27. Wizualizacja wyników średnicy po obróbce cieplnej pierścienia wewnętrznego lewego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym



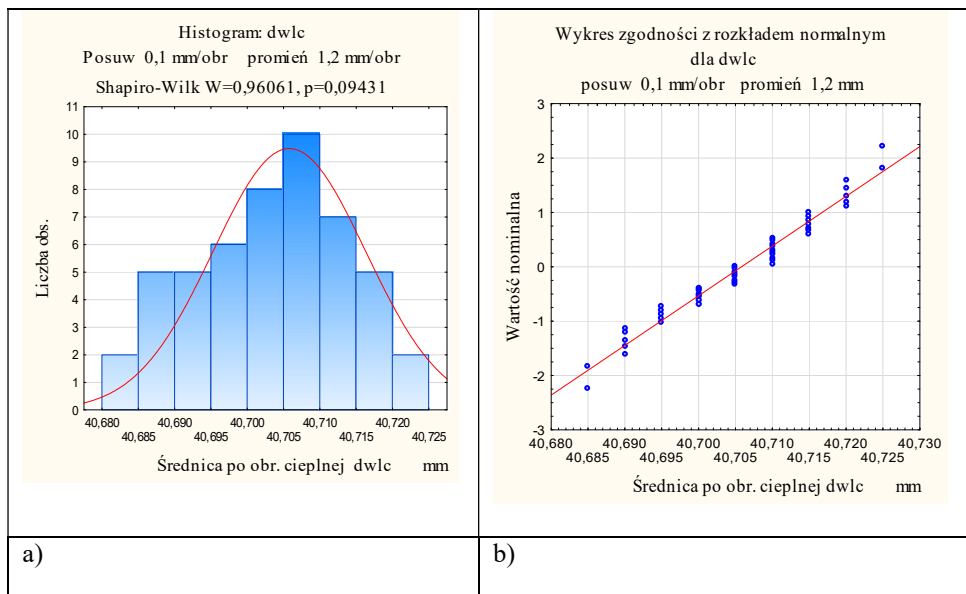
Rys. 28. Wizualizacja wyników średnicy po szlifowaniu pierścienia wewnętrznego lewego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym

Tabela 9. Analiza opisowa dla wyników średnicy bieżni pierścienia wewnętrznego lewego, posuw = 0,1 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm

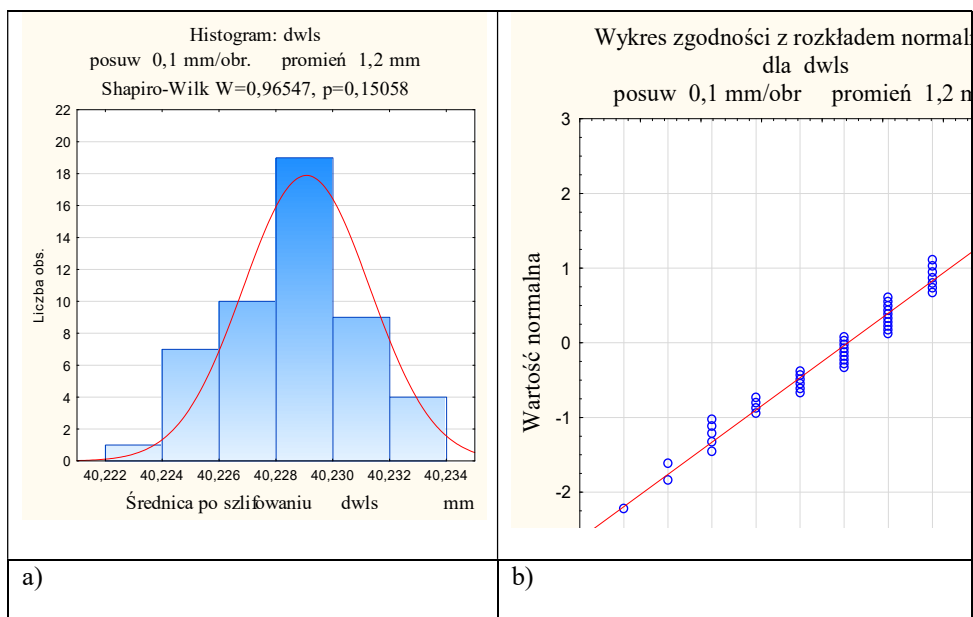
Zmienna	Średnia	Mediana	Min	Max	Dolny kwartyl	Górny kwartyl	σ
dwlt	40,6836	40,6800	40,6500	40,7200	40,6750	40,6950	0,01492
dwlc	40,7058	40,7050	40,6850	40,7250	40,7000	40,7150	0,01052
dwls	40,2291	40,2290	40,2240	40,2330	40,2280	40,2310	0,00223



Rys. 29. Wizualizacja wyników średnicy po toczeniu pierścienia wewnętrznego lewego, posuw = 0,1 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym



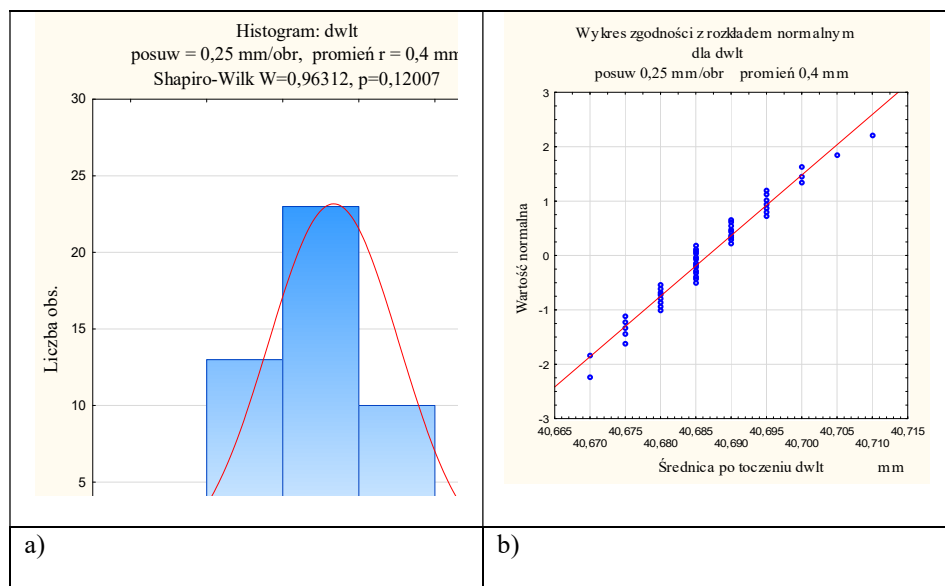
Rys. 30. Wizualizacja wyników średnicy po obróbce cieplnej pierścienia wewnętrznego lewego, posuw = 0,1 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym



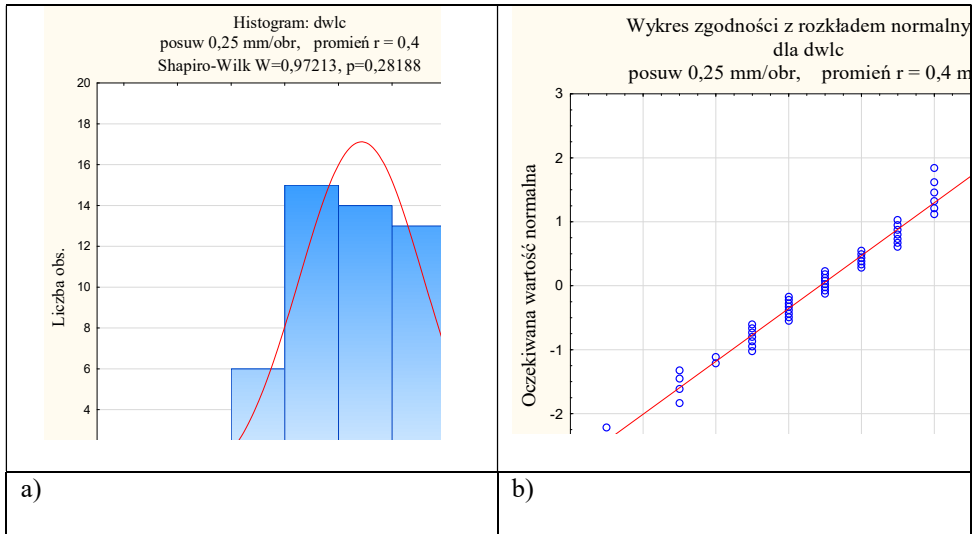
Rys. 31. Wizualizacja wyników średnicy po szlifowaniu pierścienia wewnętrznego lewego, posuw = 0,1 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym

Tabela 10. Analiza opisowa dla wyników średnicy bieżni pierścienia wewnętrznego lewego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 0,4$ mm

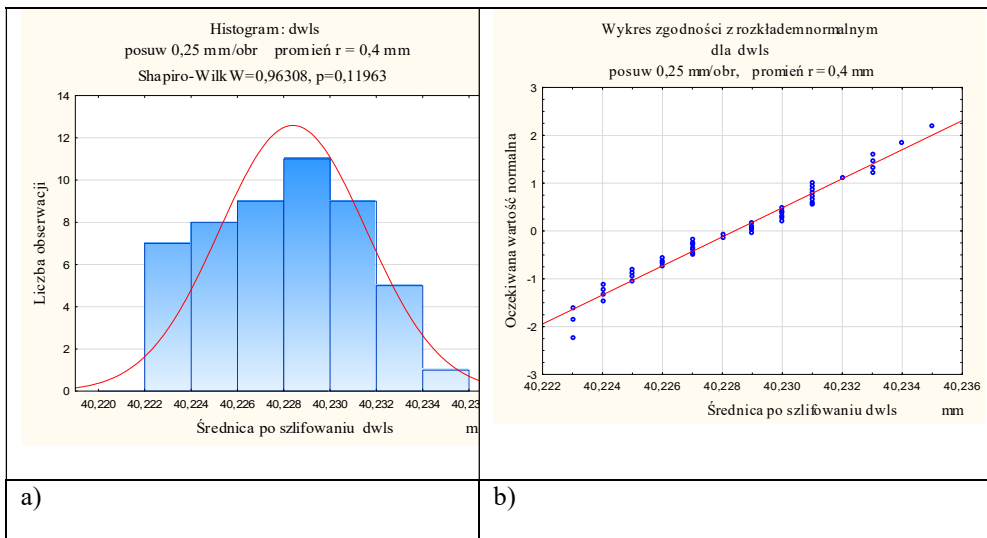
Zmienna	Średnia	Mediana	Min	Max	Dolny kwartył	Górny kwartył	σ
dwlt	40,6867	40,6850	40,6700	40,7100	40,6800	40,6900	0,00861
dwlc	40,7343	40,7350	40,7050	40,7600	40,7250	40,7450	0,01165
dwls	40,2284	40,2290	40,2230	40,2350	40,2260	40,2310	0,00317



Rys. 32. Wizualizacja wyników średnicy po toczeniu pierścienia wewnętrznego lewego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 0,4$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym



Rys. 33. Wizualizacja wyników średnicy po obróbce cieplnej pierścienia wewnętrznego lewego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 0,4$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym



Rys. 34. Wizualizacja wyników średnicy po szlifowaniu pierścienia wewnętrznego lewego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 0,4$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym

Na podstawie testu zgodności z rozkładem normalnym uzyskanych wartości średnicy bieżni pierścienia wewnętrznego lewego, przeprowadzonego metodą Shapiro-Wilka dla każdej z grup, stwierdzono brak podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej o istnieniu zgodności z rozkładem normalnym.

Przeprowadzono również analizę porównawczą tolerancji uzyskanych wyników w stosunku do projektowych i procesowych wartości. Wyniki zestawiono w tabeli 11.

Tabela 11. Analiza porównawcza tolerancji uzyskanych wyników dla pierścienia lewego

Wymiar	Wymiar min	Wymiar max	Tolerancja uzyskana	Tolerancja procesowa	Tolerancja projektowa
	mm	mm	mm	mm	mm
dwlt	40,650	40,720	0,070	0,150	-
dwlc	40,685	40,760	0,075	0,150	-
dwls	40,214	40,236	0,022	0,030	0,040
vdwlt	0,010	0,020	0,010	0,050	-
vdwlc	0,010	0,030	0,020	0,050	-
nlt	11,685	11,775	0,090	0,100	-
nlc	11,700	11,780	0,080	0,100	-
nls	11,376	11,389	0,013	0,020	0,020

Zgodność z tolerancją projektową

- wymiar dwls (40,214 – 40,236 mm): tolerancja uzyskana 0,022 mm mieści się w projektowej 0,040 mm,
- wymiar nls (11,376 – 11,389 mm): tolerancja uzyskana 0,013 mm mieści się w projektowej 0,020 mm.

Porównanie tolerancji uzyskanych do procesowych

Wszystkie wymiary spełniają wymagania tolerancji procesowych.

Przykładowo

- dwlt: uzyskano 0,070 mm vs procesowa 0,150 mm
- dwlc: uzyskano 0,075 mm vs procesowa 0,150 mm
- vdwl: uzyskano 0,020 mm vs procesowa 0,050 mm

Jakość i powtarzalność procesu

Wartości uzyskanych tolerancji są znacząco niższe od tolerancji procesowych i tolerancji projektowych. Umożliwia to rozważenie modyfikacji parametrów procesu w kierunku zmniejszenia naddatków, skrócenia czasu obróbki oraz racjonalizacji

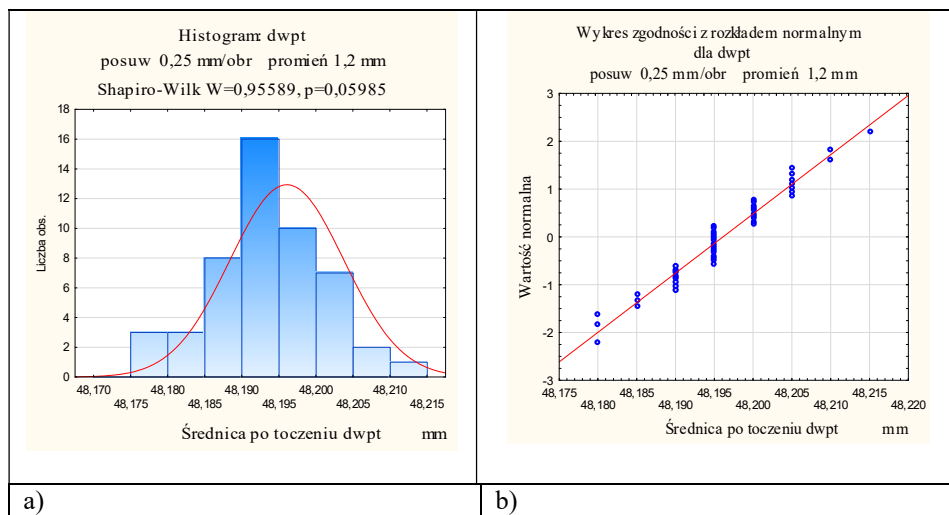
zużycia zasobów produkcyjnych, prowadząc tym samym do wzrostu efektywności ekonomicznej.

6.2. Analiza opisowa i badanie normalności średnicy bieżni pierścienia wewnętrznego prawego

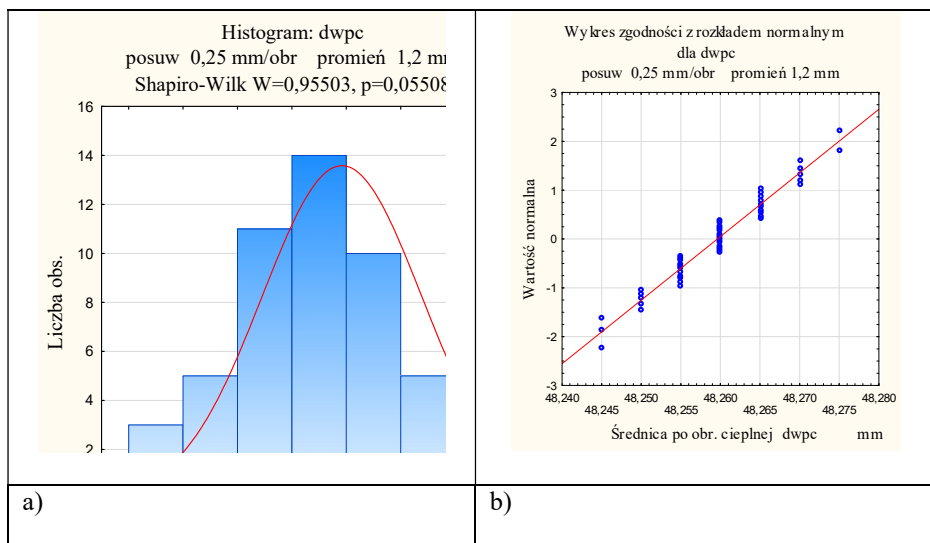
W tabelach 12 ÷ 14 zestawiono podstawowe parametry statystyczne analizy opisowej rozkładu wartości średnic bieżni pierścienia wewnętrznego prawego. Rysunki 35 ÷ 43 przedstawiają odpowiednio ich histogramy i wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym.

Tabela 12. Analiza opisowa dla wyników średnicy bieżni pierścienia wewnętrznego prawego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm

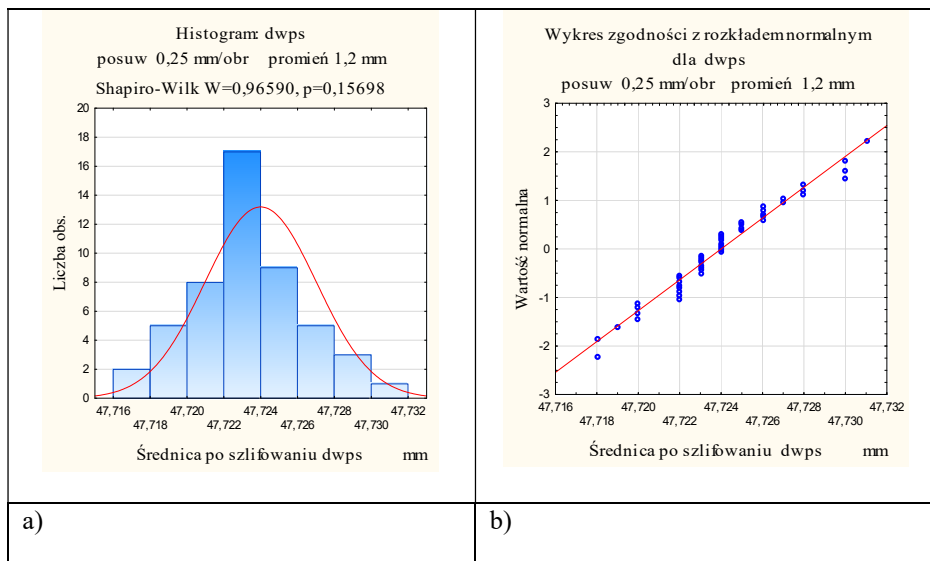
Zmienna	Średnia	Mediana	Min	Max	Dolny kwartyl	Górny kwartyl	σ
dwpt	48,1961	48,1950	48,1800	48,2150	48,1900	48,2000	0,00771
dwpc	48,2596	48,2600	48,2450	48,2750	48,2550	48,2650	0,00734
dwps	47,7240	47,7240	47,7180	47,7310	47,7220	47,7260	0,00302



Rys. 35. Wizualizacja wyników średnicy po toczeniu pierścienia wewnętrznego prawego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym



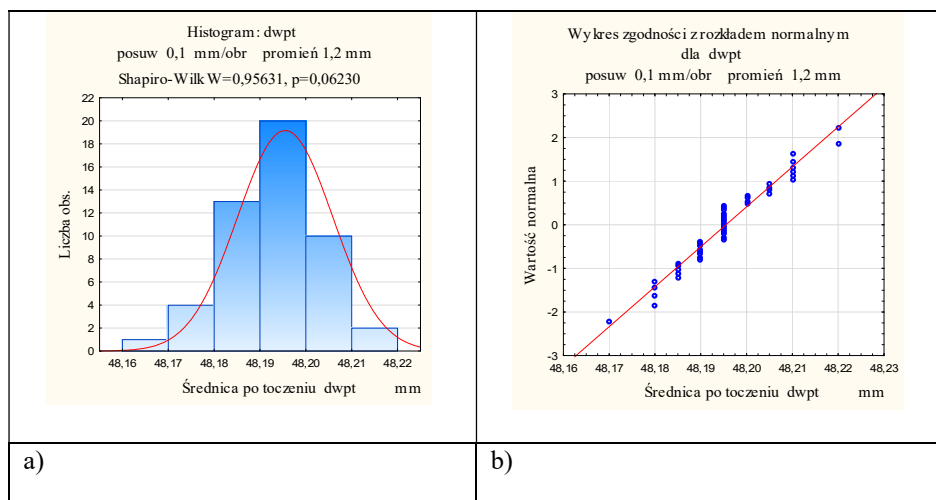
Rys. 36. Wizualizacja wyników średnicy po obróbce cieplnej pierścienia wewnętrznego prawego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym



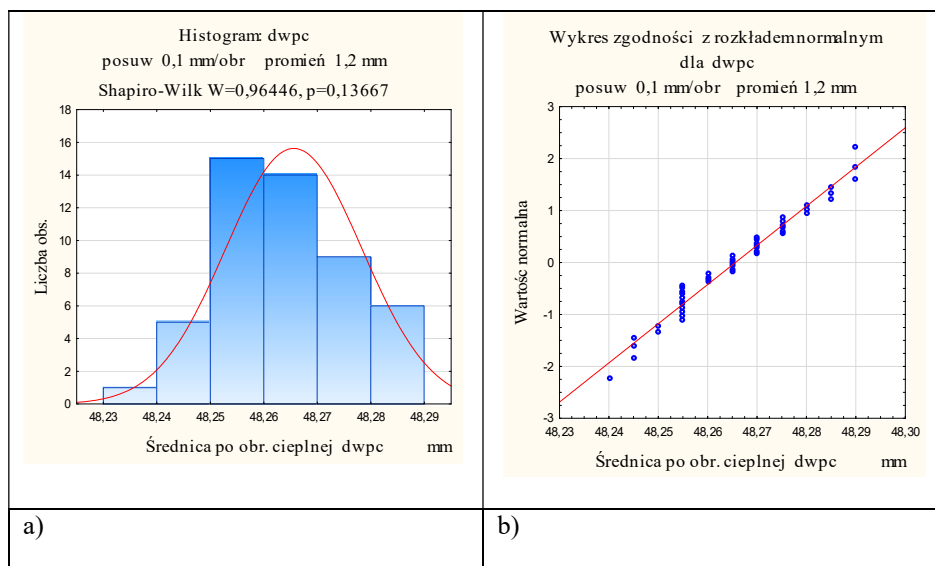
Rys. 37. Wizualizacja wyników średnicy po szlifowaniu pierścienia wewnętrznego prawego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym

Tabela 13. Analiza opisowa dla wyników średnicy bieżni pierścienia wewnętrznego prawego, posuw = 0,1 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm

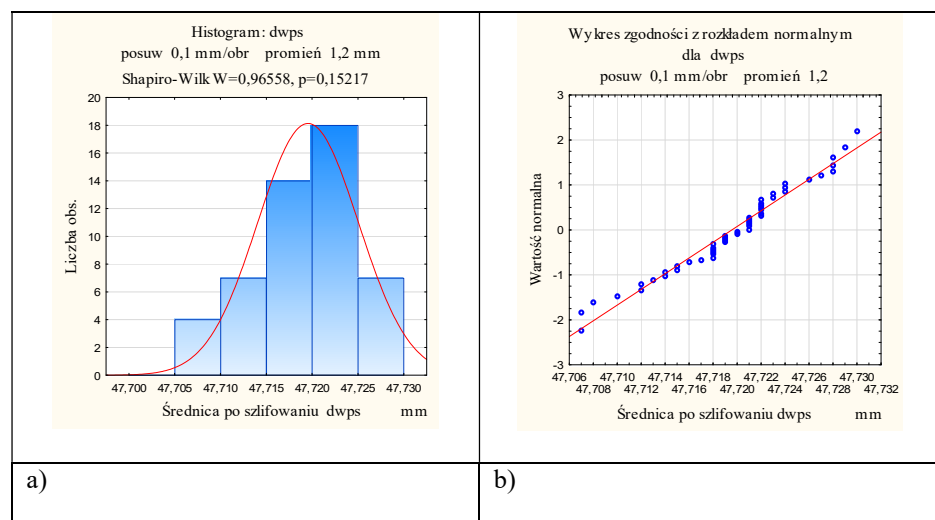
Zmienna	Średnia	Mediana	Min	Max	Dolny kwartył	Górny kwartył	σ
dwpt	48,1955	48,1950	48,1700	48,2200	48,1900	48,2000	0,01041
dwpc	48,2656	48,2650	48,2400	48,2900	48,2550	48,2750	0,01276
dwps	47,7196	47,7205	47,7070	47,7300	47,7170	47,7220	0,00550



Rys. 38. Wizualizacja wyników średnicy po toczeniu pierścienia wewnętrznego prawego, posuw = 0,1 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym



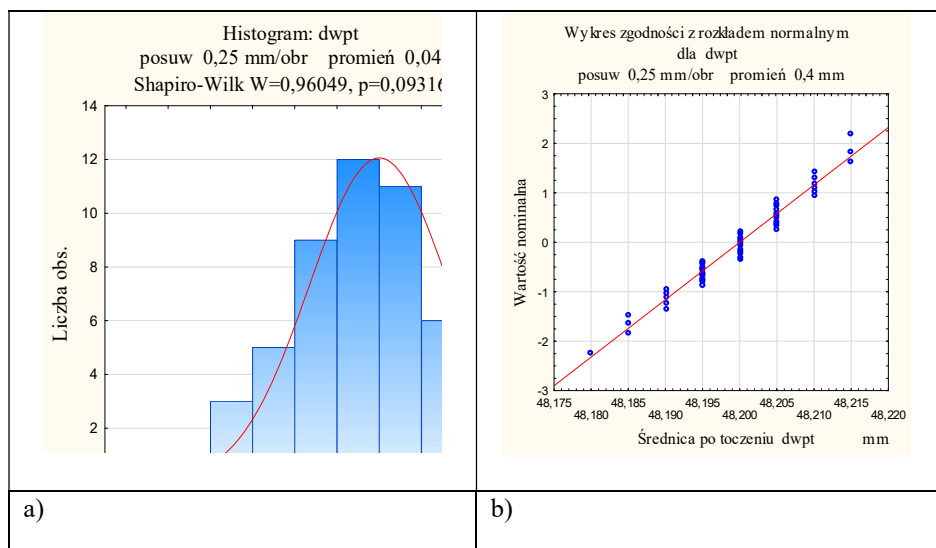
Rys. 39. Wizualizacja wyników średnicy po obróbce cieplnej pierścienia wewnętrznego prawego, posuw = 0,1 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym



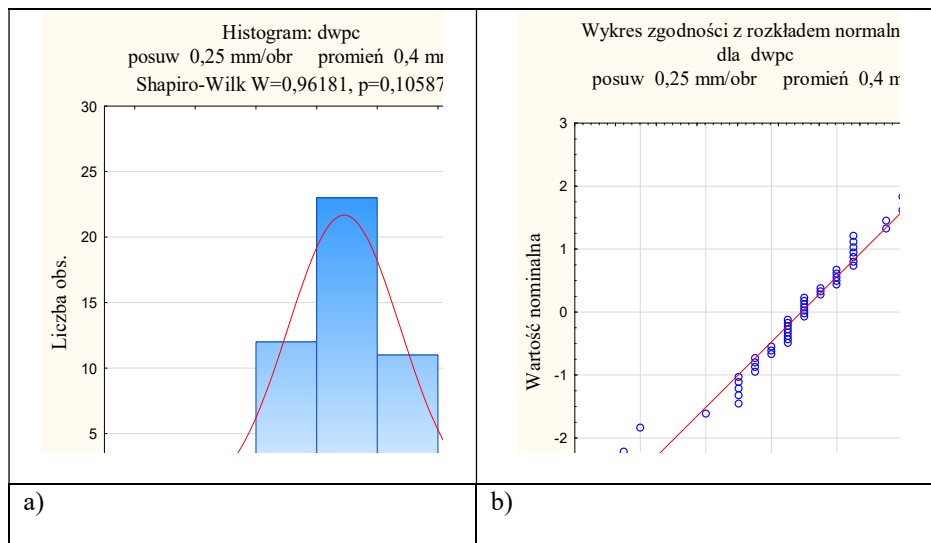
Rys. 40. Wizualizacja wyników średnicy po szlifowaniu pierścienia wewnętrznego prawego, posuw = 0,1 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym

Tabela 14. Analiza opisowa dla wyników średnicy bieżni pierścienia wewnętrznego prawego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 0,4$ mm

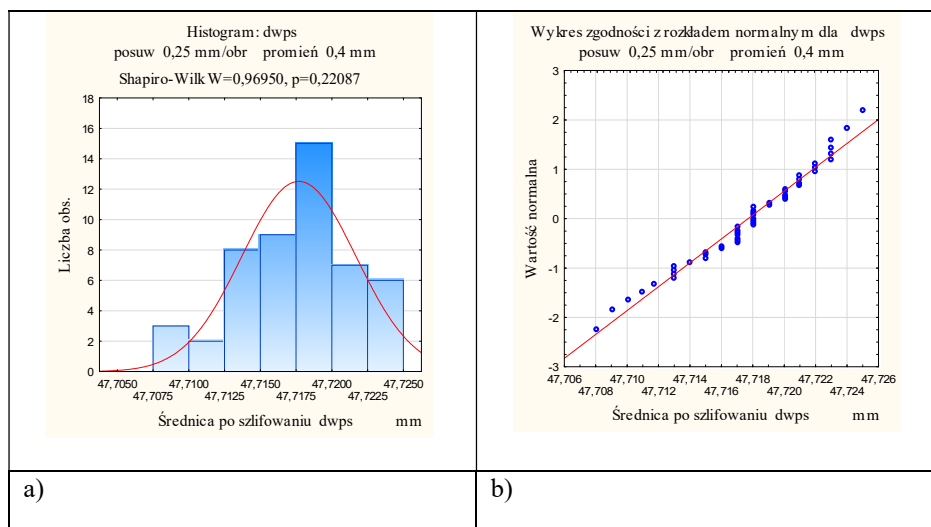
Zmienna	Średnia	Mediana	Min	Max	Dolny kwartyl	Górny kwartyl	σ
dwpt	48,2000	48,2000	48,1800	48,2150	48,1950	48,2050	0,00827
dwpc	48,2491	48,2500	48,1950	48,2900	48,2400	48,2600	0,01840
dwps	47,7177	47,7180	47,7080	47,7250	47,7150	47,7210	0,00399



Rys. 41. Wizualizacja wyników średnicy po toczeniu pierścienia wewnętrznego prawego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 0,4$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym



Rys. 42. Wizualizacja wyników średnicy po obróbce cieplnej pierścienia wewnętrznego prawego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 0,4$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym



Rys. 43. Wizualizacja wyników średnicy po szlifowaniu pierścienia wewnętrznego prawego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 0,4$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym

Na podstawie testu zgodności z rozkładem normalnym uzyskanych wartości średnicy bieżni pierścienia wewnętrznego prawego, przeprowadzonego metodą Shapiro-Wilka dla każdej z grup, stwierdzono brak podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej o istnieniu zgodności z rozkładem normalnym.

Przeprowadzono również analizę porównawczą tolerancji uzyskanych wyników w stosunku do projektowych i procesowych wartości. Wyniki zestawiono w tabeli nr 15.

Tabela 15. Analiza porównawcza tolerancji uzyskanych wyników dla pierścienia prawego

Wymiar	Wymiar min	Wymiar max	Tolerancja uzyskana	Tolerancja procesowa	Tolerancja projektowa
	mm	mm	mm	mm	mm
dwpt	48,170	48,220	0,050	0,150	-
dwpc	48,195	48,290	0,095	0,150	-
dwps	47,707	47,731	0,024	0,030	0,040
vdwpt	0,010	0,020	0,010	0,050	-
vdwpc	0,010	0,030	0,020	0,050	-
npt	11,710	11,745	0,035	0,100	-
npc	11,720	11,765	0,045	0,100	-
nps	11,377	11,386	0,009	0,020	0,020

Zgodność z tolerancją projektową

- wymiar dwps (47,707–47,731 mm): tolerancja uzyskana 0,024 mm mieści się w projektowej 0,040 mm,
- wymiar nps (11,377–11,386 mm): tolerancja uzyskana 0,009 mm mieści się w projektowej 0,020 mm.

Porównanie tolerancji uzyskanych do procesowych

Wszystkie wymiary spełniają wymagania tolerancji procesowych.

Przykładowo:

- dwpt: uzyskano 0,050 mm vs procesowa 0,150 mm,
- dwpc: uzyskano 0,095 mm vs procesowa 0,150 mm,
- vdwpc: uzyskano 0,020 mm vs procesowa 0,050 mm.

Jakość i powtarzalność procesu

Uzyskane wartości tolerancji są istotnie mniejsze od dopuszczalnych granic tolerancji procesowej i projektowej. Może to stanowić podstawę do optymalizacji procesu technologicznego poprzez redukcję naddatków obróbkowych, skrócenie

czasu cyklu oraz ograniczenie zużycia energii i narzędzi, co w efekcie może prowadzić do obniżenia kosztów jednostkowych produkcji.

6.3. Analiza opisowa i badanie normalności średnicy obu bieżni pierścienia zewnętrznego

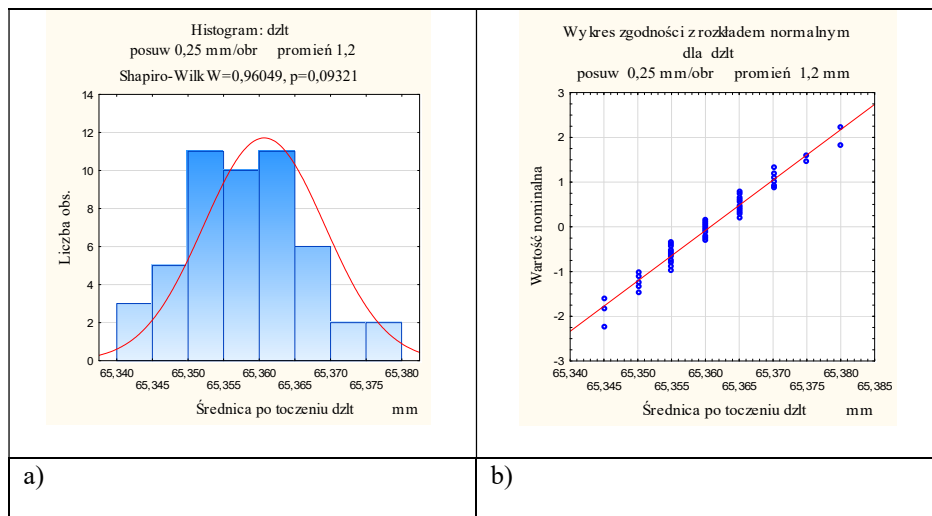
Test zgodności z rozkładem normalnym wartości średnic obu bieżni pierścienia zewnętrznego przeprowadzono dla każdej z nich osobno. Wynika to z technologii ich wykonania. Obie bieżnie były toczone w oddzielnych operacjach. Szlifowanie wykończające bieżni również przeprowadzono oddzielnie dla każdej z nich. Przyszłościowo obie bieżnie można będzie szlifować za pomocą ściernicy o dwubieżniowym zarysie tworzącej kondycjonowanej rolką diamentową.

6.3.1. Analiza opisowa i badanie normalności średnicy bieżni lewej pierścienia zewnętrznego

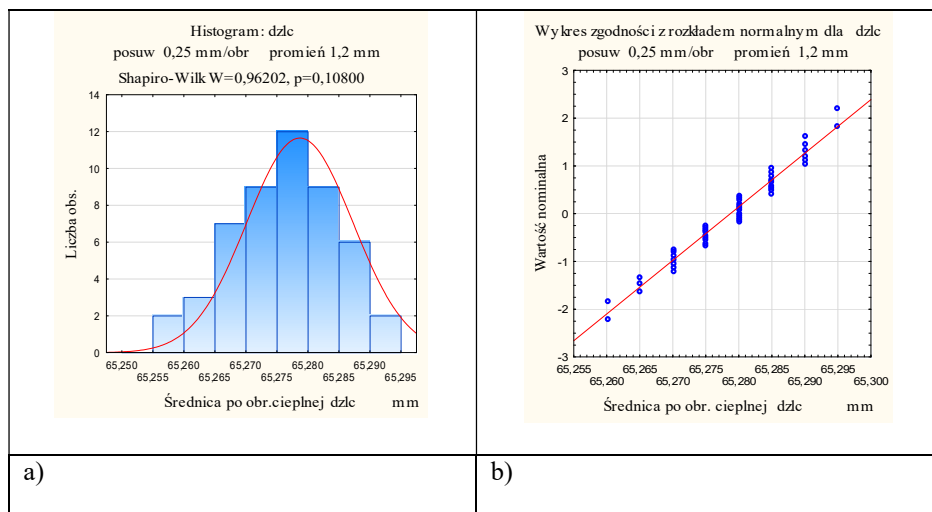
W tabelach 16 ÷ 18 zestawiono podstawowe parametry statystyczne rozkładu wartości średnic bieżni lewej pierścienia zewnętrznego. Rysunki 44 ÷ 52 przedstawiają odpowiednio ich histogramy i wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym.

Tabela 16. Analiza opisowa dla wyników średnicy bieżni lewej pierścienia zewnętrznego
posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm

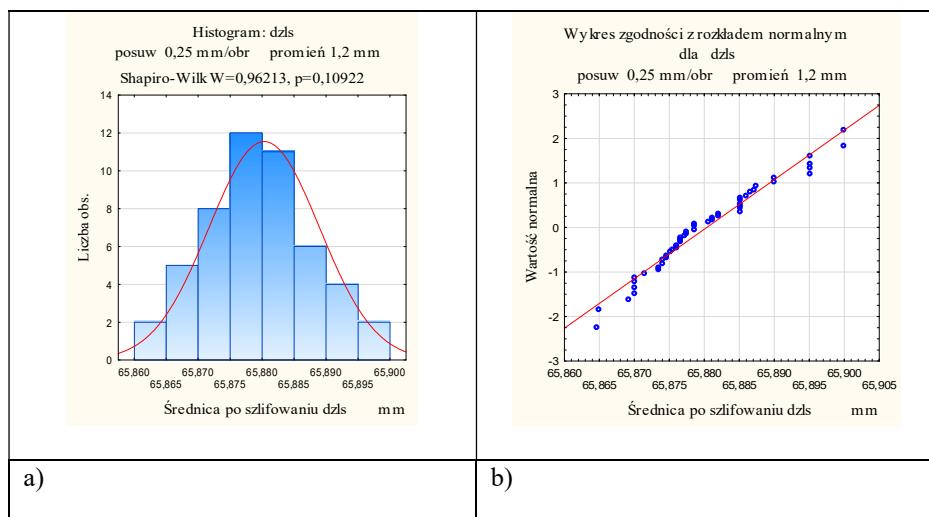
Zmienna	Średnia	Mediana	Min	Max	Dolny kwartył	Górny kwartył	σ
dzlt	65,3607	65,3600	65,3450	65,3800	65,3550	65,3650	0,00851
dzlc	65,2787	65,2800	65,2600	65,2950	65,2750	65,2850	0,00856
dzls	65,8803	65,8785	65,8645	65,9000	65,8745	65,8850	0,00864



Rys. 44. Wizualizacja wyników średnicy bieżni lewej pierścienia zewnętrznego po toczeniu, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym



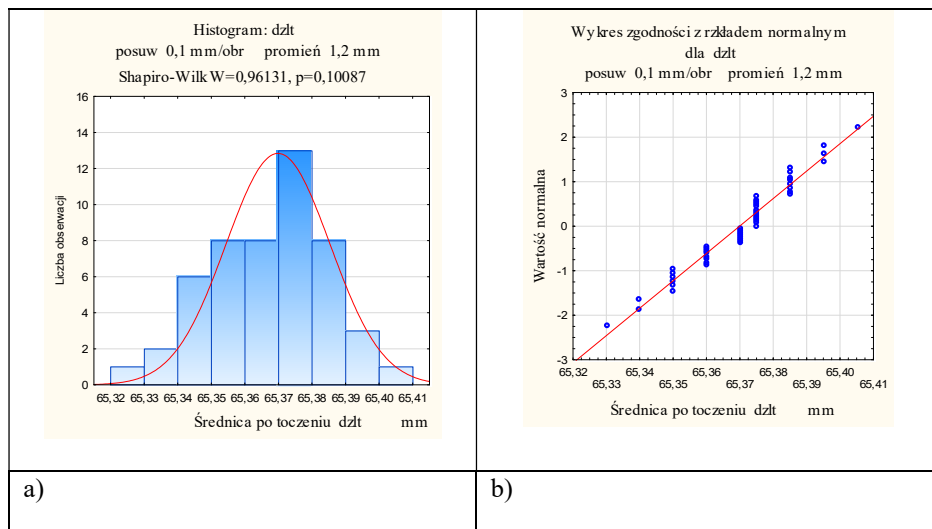
Rys. 45. Wizualizacja wyników średnicy bieżni lewej pierścienia zewnętrznego po obróbce cieplnej, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym



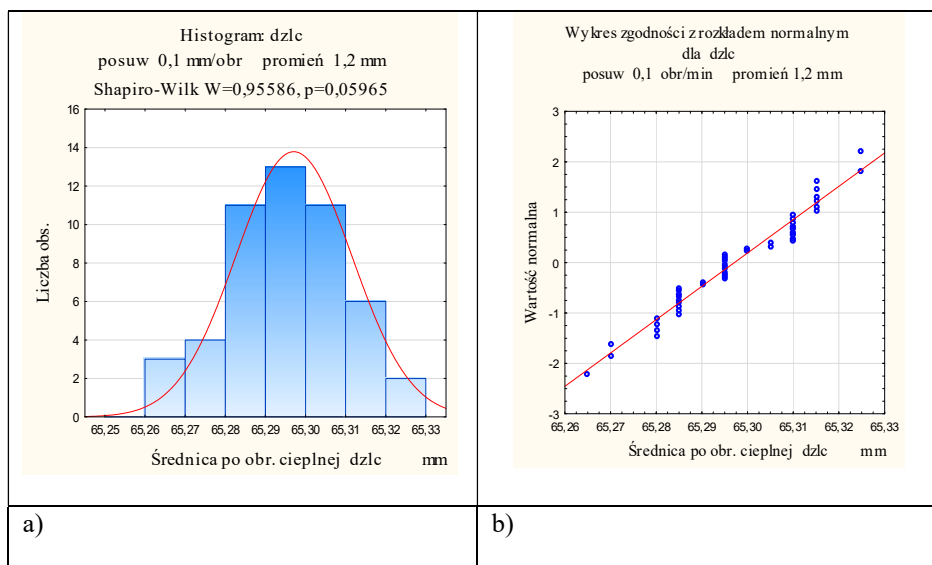
Rys. 46. Wizualizacja wyników średnicy bieżni lewej pierścienia zewnętrznego po szlifowaniu, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym

Tabela 17. Analiza opisowa dla wyników średnicy bieżni lewej pierścienia zewnętrznego, posuw = 0,1 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm

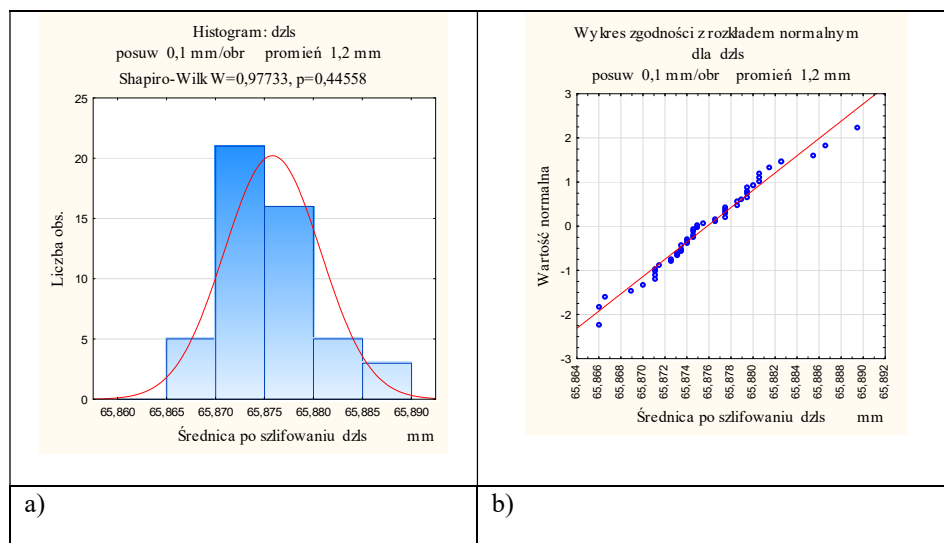
Zmienna	Średnia	Mediana	Min	Max	Dolny kwartył	Górny kwartył	σ
dzlt	65,3699	65,3725	65,3300	65,4050	65,3600	65,3750	0,01553
dzlc	65,2942	65,2950	65,2650	65,3250	65,2850	65,3100	0,01299
dzls	65,8758	65,8750	65,8660	65,8895	65,8730	65,8795	0,00493



Rys. 47. Wizualizacja wyników średnicy bieżni lewej pierścienia zewnętrznego po toczeniu, posuw = 0,1 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym



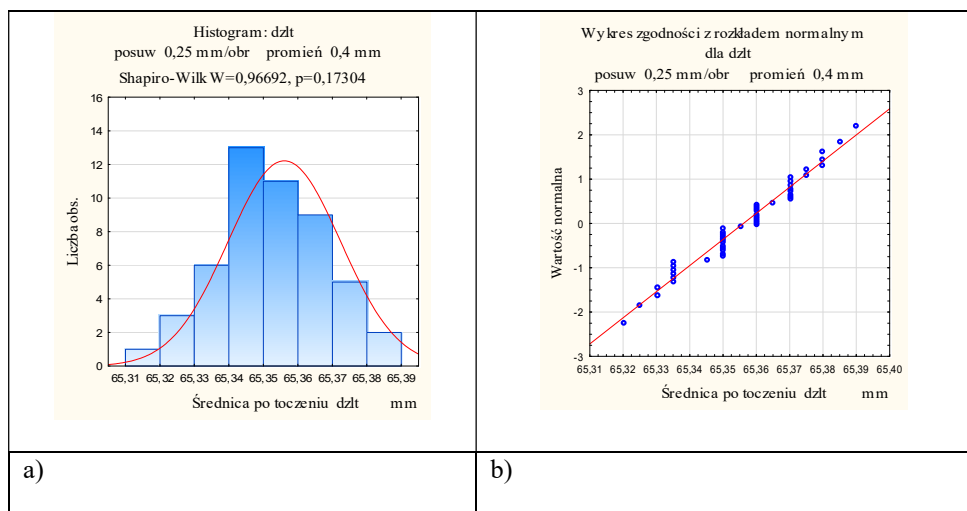
Rys. 48. Wizualizacja wyników średnicy bieżni lewej pierścienia zewnętrznego po obróbce cieplnej, posuw = 0,1 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym



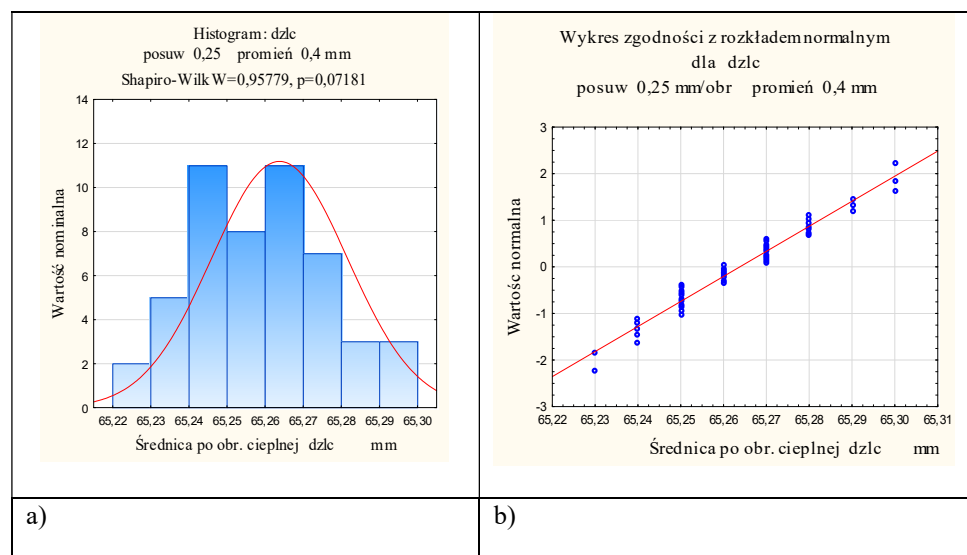
Rys. 49. Wizualizacja wyników średnicy bieżni lewej pierścienia zewnętrznego po szlifowaniu, posuw = 0,1 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym

Tabela 18. Analiza opisowa dla wyników średnicy bieżni lewej pierścienia zewnętrznego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 0,4$ mm

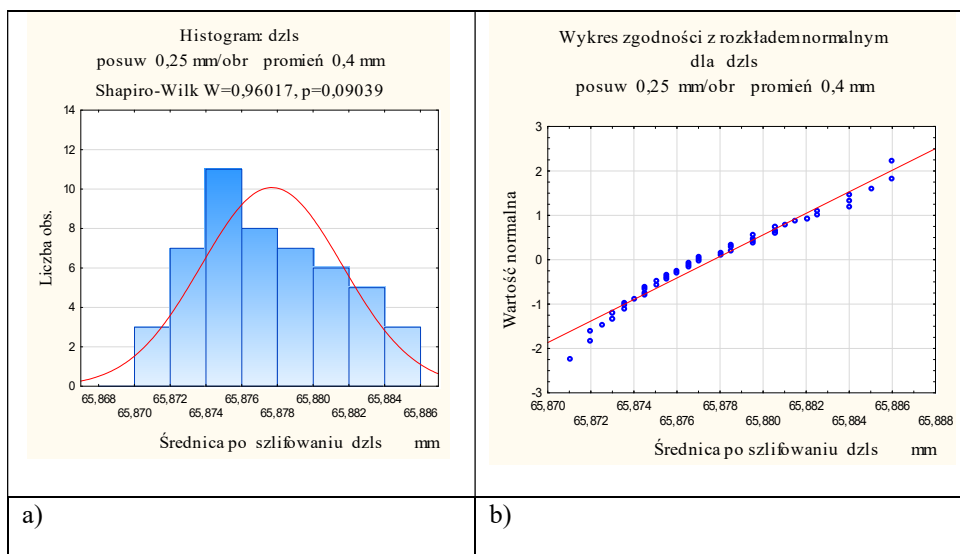
Zmienna	Średnia	Mediana	Min	Max	Dolny kwartył	Górny kwartył	σ
dzlt	65,3561	65,3600	65,3200	65,3900	65,3500	65,3700	0,01633
dzlc	65,2638	65,2600	65,2300	65,3000	65,2500	65,2800	0,01783
dzls	65,8777	65,8770	65,8710	65,8860	65,8745	65,8805	0,00396



Rys. 50. Wizualizacja wyników średnicy bieżni lewej pierścienia zewnętrznego po toczeniu, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 0,4$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym



Rys. 51. Wizualizacja wyników średnicy bieżni lewej pierścienia zewnętrznego po obróbce cieplnej, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 0,4$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym



Rys. 52. Wizualizacja wyników średnicy bieżni lewej pierścienia zewnętrznego po szlifowaniu, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 0,4$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym

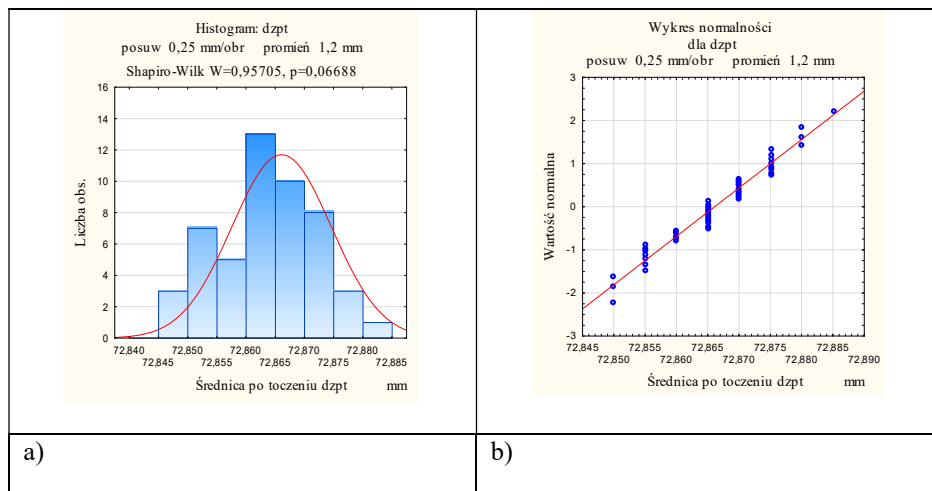
Na podstawie testu Shapiro-Wilka przeprowadzonego dla każdej z grup, nie stwierdzono podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej o zgodności rozkładu wartości średnicy bieżni lewej pierścienia zewnętrznego z rozkładem normalnym.

6.3.2. Analiza opisowa i badanie normalności średnicy bieżni prawej pierścienia zewnętrznego

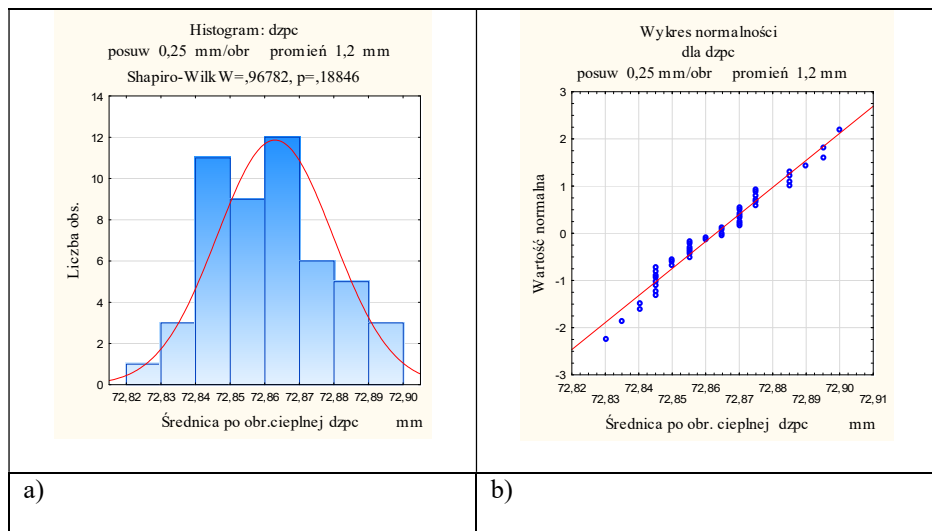
W tabelach 19 ÷ 21 zestawiono podstawowe parametry statystyczne analizy opisowej rozkładu wartości średnic bieżni prawej pierścienia zewnętrznego. Rysunki 53 ÷ 61 przedstawiają odpowiednio ich histogramy i wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym.

Tabela 19. Analiza opisowa dla wyników średnicy bieżni prawej pierścienia zewnętrznego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm

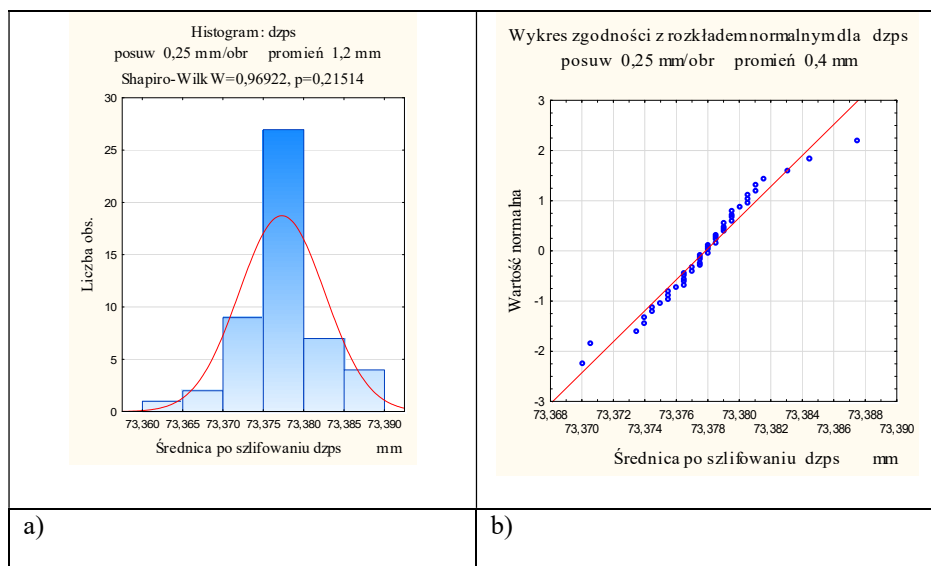
Zmienna	Średnia	Mediana	Min	Max	Dolny kwartył	Górny kwartył	σ
dzpt	72,8661	72,8650	72,8500	72,8850	72,8600	72,8700	0,00853
dzpc	72,8630	72,8650	72,8300	72,9000	72,8500	72,8750	0,01681
dzps	73,3773	73,3765	73,3633	73,3898	73,3753	73,3795	0,00533



Rys. 53. Wizualizacja wyników średnicy bieżni prawej pierścienia zewnętrznego po toczeniu, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym



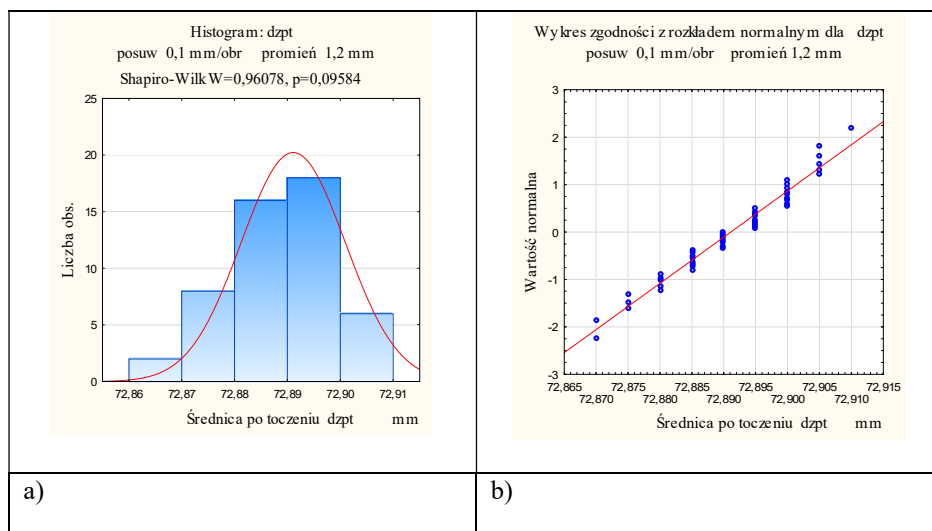
Rys. 54. Wizualizacja wyników średnicy bieżni prawej pierścienia zewnętrznego po obróbce cieplnej, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym



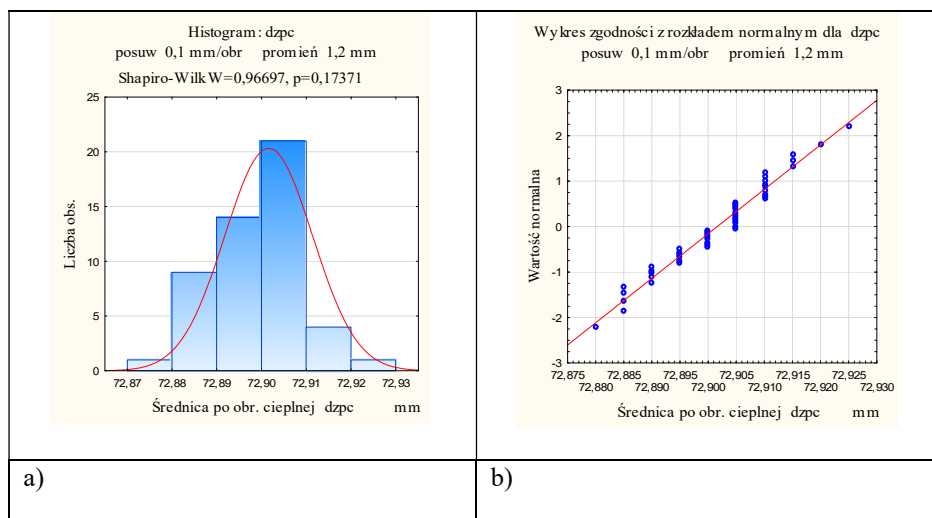
Rys. 55. Wizualizacja wyników średnicy bieżni prawej pierścienia zewnętrznego po szlifowaniu, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym

Tabela 20. Analiza opisowa dla wyników średnicy bieżni prawej pierścienia zewnętrznego, posuw = 0,1 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm

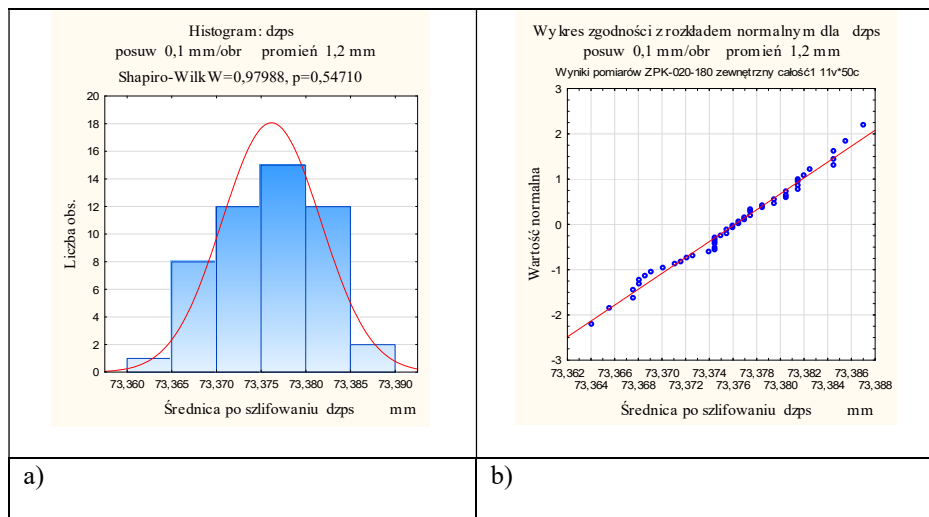
Zmienna	Średnia	Mediana	Min	Max	Dolny kwartył	Górny kwartył	σ
dzpt	72,8911	72,8900	72,8700	72,9100	72,8850	72,9000	0,00986
dzpc	72,9016	72,9050	72,8800	72,9250	72,8950	72,9100	0,00982
dzps	73,3762	73,3763	73,3640	73,3870	73,3725	73,3805	0,00552



Rys. 56. Wizualizacja wyników średnicy bieżni prawej pierścienia zewnętrznego po toczeniu, posuw = 0,1 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym



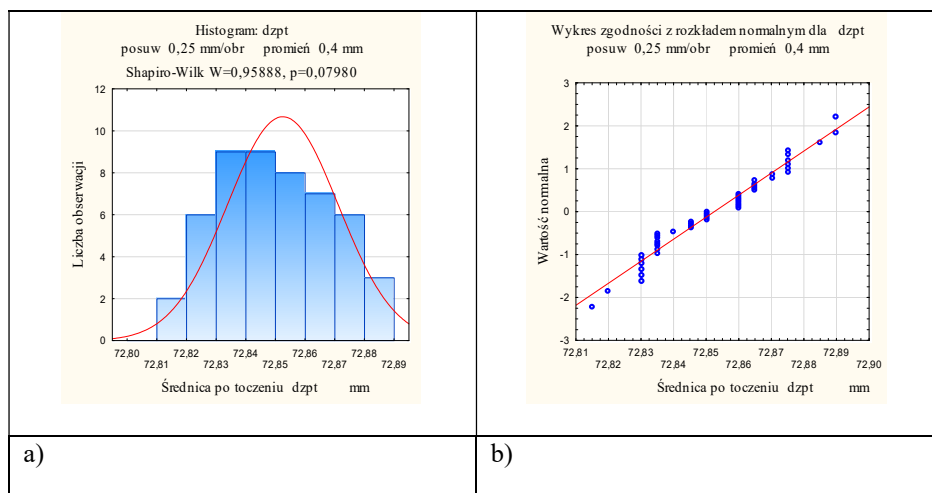
Rys. 57. Wizualizacja wyników średnicy bieżni prawej pierścienia zewnętrznego po obróbce cieplnej, posuw = 0,1 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym



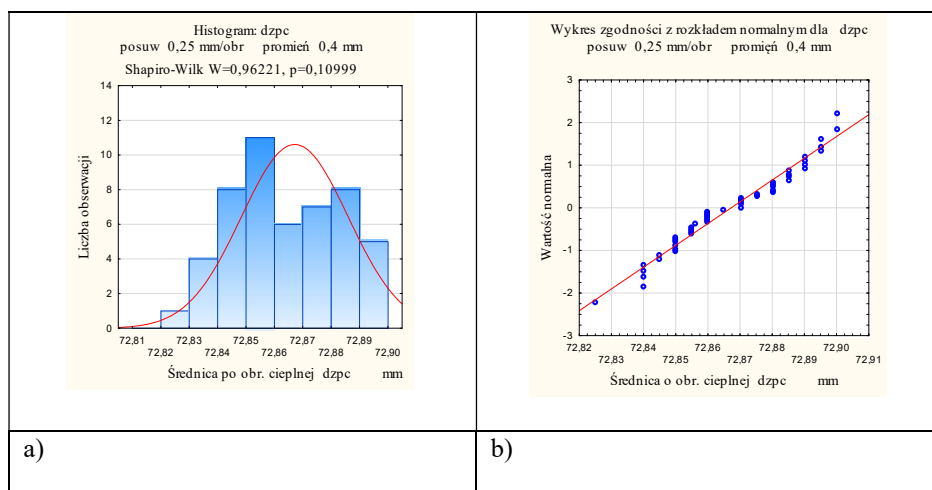
Rys. 58. Wizualizacja wyników średnicy bieżni prawej pierścienia zewnętrznego po szlifowaniu, posuw = 0,1 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym

Tabela 21. Analiza opisowa dla wyników średnicy bieżni prawej pierścienia zewnętrznego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 0,4$ mm

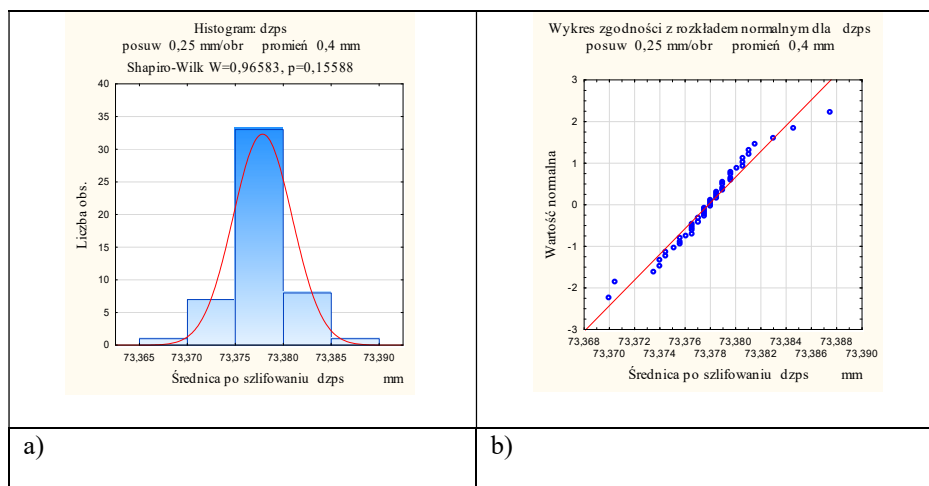
Zmienna	Średnia	Mediana	Min	Max	Dolny kwartył	Górny kwartył	σ
dzpt	72,8525	72,8500	72,8150	72,8900	72,8350	72,8650	0,01869
dzpc	72,8672	72,8675	72,8250	72,9000	72,8500	72,8850	0,01881
dzps	73,3779	73,3780	73,3700	73,3875	73,3765	73,3795	0,00309



Rys. 59. Wizualizacja wyników średnicy bieżni prawej pierścienia zewnętrznego po toczeniu, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 0,4$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym



Rys. 60. Wizualizacja wyników średnicy bieżni prawej pierścienia zewnętrznego po obróbce cieplnej, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 0,4$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym



Rys. 61. Wizualizacja wyników średnicy bieżni prawej pierścienia zewnętrznego po szlifowaniu, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 0,4$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym

Na podstawie testu Shapiro-Wilka przeprowadzonego dla każdej z grup, nie stwierdzono podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej o zgodności rozkładu wartości średnicy bieżni prawej pierścienia zewnętrznego z rozkładem normalnym. Dla tego typu pierścienia przeprowadzono również analizę porównawczą tolerancji uzyskanych wyników w stosunku do projektowych i procesowych wartości. Wyniki zestawiono w tabeli 22.

Tabela 22. Analiza porównawcza tolerancji uzyskanych wyników dla pierścienia zewnętrznego

Wymiar	Wymiar min	Wymiar max	Tolerancja uzyskana	Tolerancja procesowa	Tolerancja projektowa
	mm	mm	mm	mm	mm
dzlt	65,320	65,360	0,040	0,150	-
dzlc	65,230	65,280	0,050	0,150	-
dzls	65,865	65,877	0,012	0,020	0,040
vdzlt	0,002	0,010	0,008	0,070	-
vdzlc	0,007	0,010	0,003	0,070	-
dzpt	72,815	72,870	0,055	0,150	-
dzpc	72,825	72,880	0,055	0,150	-
dzps	73,363	73,378	0,014	0,020	0,040

cd. tabeli 22

vdzpt	0,000	0,010	0,010	0,070	-
vdzpc	0,000	0,010	0,010	0,070	-
mt	23,470	23,490	0,020	0,100	-
mc	23,480	23,510	0,030	0,100	-
ms	23,478	23,488	0,010	0,020	0,020

Zgodność z tolerancją projektową

Wymiar dzls: tolerancja uzyskana 0,012 mm mieści się w projektowej 0,040 mm.

Wymiar dzps: tolerancja uzyskana 0,014 mm mieści się w projektowej 0,040 mm.

Wymiar ms: tolerancja uzyskana 0,010 mm mieści się w projektowej 0,028 mm.

Porównanie tolerancji uzyskanych do procesowych

Wszystkie wymiary spełniają wymagania tolerancji procesowych.

Przykładowo:

- dzlt: uzyskano 0,040 mm vs, dopuszczalna 0,150 mm,
- vdzlt: uzyskano 0,008 mm vs, dopuszczalna 0,070 mm,
- mt: uzyskano 0,020 mm vs, dopuszczalna 0,100 mm.

Jakość i powtarzalność procesu

W tym przypadku również uzyskane w trakcie obróbki wartości tolerancji są istotnie mniejsze zarówno od dopuszczalnych tolerancji procesowych, jak i od wymaganych tolerancji projektowych. Wskazuje to na możliwość dostosowania parametrów procesu w celu osiągnięcia większej efektywności produkcyjnej, bez ryzyka pogorszenia jakości wyrobu. Potencjalne zmiany mogą obejmować redukcję naddatków, skrócenie czasu cyklu oraz ograniczenie zużycia zasobów technologicznych, co powinno przyczynić się do obniżenia kosztów produkcji przy zachowaniu wymaganych parametrów jakościowych.

W tabeli 23 zestawiono wartości p uzyskane w wyniku przeprowadzonego testu Shapiro–Wilka dla poziomu istotności 0,05 dla wszystkich opisanych w tym rozdziale przypadków. Ponieważ we wszystkich przypadkach wartości p przekraczają przyjęty próg istotności, nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o normalności rozkładu zmiennych zależnych, zarówno w poszczególnych grupach, jak i dla wszystkich typów pierścieni.

Tabela 23. Wartości p badania rozkładu normalnego dla zmiennych zależnych

grupa	dwlt	dwlc	dwls	dwpt	dwpc	dwps
	p					
1	0,1166	0,1949	0,2499	0,0599	0,0551	0,1570
2	0,1512	0,0943	0,1506	0,0623	0,1367	0,1522
3	0,1201	0,2819	0,1196	0,0932	0,1059	0,2209
grupa	dzlt	dzlc	dzls	dzpt	dzpc	dzps
	p					
1	0,0932	0,1080	0,1092	0,0669	0,1885	0,2151
2	0,1009	0,0597	0,4456	0,0956	0,1737	0,5471
3	0,1730	0,0718	0,0904	0,0798	0,1100	0,1559

6.4. Badanie korelacji pomiędzy zmiennymi zależnymi a niezależnymi

Rozkład normalny zmiennych zależnych umożliwia przeprowadzenie dalszych analiz mających na celu określenie, czy oraz w jakim stopniu zmienne niezależne wpływają na zmienne zależne. Zmienne niezależne – posuw oraz promień naroża płytki skrawającej – przyjmują tylko dwie wartości, co czyni je zmiennymi dychotomicznymi. Ze względu na brak ciągłości tych zmiennych nie przeprowadzono między nimi klasycznego testu korelacji Pearsona. Zamiast tego, dla oceny zależności pomiędzy predyktorami a zmiennymi zależnymi (średnice bieżni pierścieni po toczeniu, obróbce cieplnej i szlifowaniu wykończającym), zastosowano współczynnik korelacji punktowo-dwuseryjnej (r_{pb}). Jest to specjalna odmiana korelacji Pearsona, stosowana w sytuacjach, gdy jedna zmienna jest dychotomiczna, a druga ciągła. Wzór (6.2) na współczynnik r_{pb} przedstawiono poniżej, zgodnie z literaturą [103].

$$r_{pb} = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_0}{\sigma_X} \cdot \sqrt{\frac{w_1 w_0}{w(w-1)}} \quad (6.2)$$

gdzie:

- $\bar{X}_1$ – średnia zmiennej ciągłej dla grupy, w której zmienna dychotomiczna = 1,
- $\bar{X}_0$ – średnia zmiennej ciągłej dla grupy, w której zmienna dychotomiczna = 0,
- σ_X – odchylenie standardowe całej populacji dla zmiennej ciągłej,

w_1 – liczba obserwacji w grupie 1,
 w_0 – liczba obserwacji w grupie 0,
 w – całkowita liczba obserwacji: $w = w_1 + w_0$.

Wartości uzyskanych współczynników korelacji punktowo-dwuseryjnej r_{pb} oraz odpowiadające im poziomy istotności p zestawiono w tabeli 24. Interpretacja współczynników korelacji różni się istotnie w obszarach badań naukowych [104]. W rozpatrywanym przypadku do interpretacji wartości r_{pb} przyjęto następującą klasyfikację [105]:

od 0,0 do 0,2 – brak korelacji,
 powyżej 0,2 do 0,4 – słaba korelacja,
 powyżej 0,4 do 0,6 – umiarkowana korelacja,
 powyżej 0,6 do 0,8 – silna korelacja ,
 powyżej 0,8 do 1,0 – bardzo silna korelacja.

Tabela 24. Zestawienie współczynników korelacji punktowo dwuseryjnej Pearsona

Typ pierścienia	Zmienna	r_{pb} - dwłt	r_{pb} - dwlc	r_{pb} - dwls
Pierścień wewnętrzny lewy	posuw	-0,2009	0,7117	-0,1304
	p	0,014	0,000	0,112
	promień	-0,3579	0,5034	0,0095
	p	0,000	0,000	0,908
Pierścień wewnętrzny prawy	posuw	-0,0863	0,0703	0,5060
	p	0,293	0,393	0,000
	promień	-0,2231	0,3944	0,3785
	p	0,006	0,000	0,000
Pierścień zewnętrzny - bieźnia lewa	posuw	-0,3634	-0,6238	0,2349
	p	0,000	0,000	0,004
	promień	0,3197	0,5894	0,0256
	p	0,000	0,000	0,756
Pierścień zewnętrzny - bieźnia prawa	posuw	-0,7270	-0,7414	0,1411
	p	0,000	0,000	0,085
	promień	0,5801	0,2972	0,1229
	p	0,000	0,000	0,134

Poziomy istotności $p > 0,05$ oznaczają brak podstaw do uznania zależności za istotne statystycznie. Korelacje pomiędzy zmiennymi zależnymi a predyktorami różnią się w zależności od typu pierścienia, co sugeruje, że konstrukcja pierścienia wpływa na sposób oddziaływania zmiennych technologicznych. Wyniki wskazują,

że posuw wywiera wpływ, od słabego do silnego na średnicę bieżni, zwłaszcza po obróbce cieplnej. Jeszcze lepiej wyglądają korelacje między promieniem naroża płytki skrawającej a średnicami bieżni. Najsłabsze korelacje odnotowano dla zależności między predyktorami a średnicą bieżni po szlifowaniu. Mimo, że niektóre współczynniki r_{pb} są istotne statystycznie ($p < 0,05$), to ich wartości wskazują jedynie na słabą lub umiarkowaną siłę związku. Zarówno posuw, jak i promień naroża płytki skrawającej nie mają istotnego wpływu na średnicę bieżni po szlifowaniu. Nieliczne statystycznie istotne korelacje w tym przypadku mogą wynikać z oddziaływania innych, nieuwzględnionych w tej analizie czynników.

Podsumowując, wartości p dla większości analizowanych zależności potwierdzają istotność statystyczną wpływu posuwu i promienia naroża płytki na średnicę bieżni po toczeniu i obróbce cieplnej. Wskazuje to na ich potencjalnie istotną rolę w sterowaniu procesem technologicznym i w jego dalszej optymalizacji.

6.5. Analiza jednorodności wariancji przy użyciu testu Levene’a

W procesie analizy regresji liniowej istotne jest sprawdzenie, czy spełnione są założenia leżące u podstaw tego modelu. Jednym z kluczowych etapów jest ocena rozkładu reszt, czyli różnic pomiędzy wartościami obserwowanymi a przewidywanymi przez model regresji. Założenie normalności rozkładu reszt jest ważne dla poprawności wnioskowania statystycznego, w tym testowania istotności współczynników regresji oraz konstruowania przedziałów ufności.

Równie istotnym aspektem jest ocena stałości wariancji reszt, czyli homoskedastyczności. Oznacza ona, że rozproszenie reszt powinno być zbliżone niezależnie od wartości zmiennych niezależnych (predyktorów). Innymi słowy, rozrzut reszt powinien być równomierny w całym zakresie analizowanych danych. W sytuacji, gdy wariancja reszt zmienia się w zależności od wartości predyktorów (np. rośnie wraz ze wzrostem wartości zmiennej niezależnej), mamy do czynienia z heteroskedastycznością. Jej występowanie może prowadzić do zniekształcenia wyników analizy i błędnych wniosków statystycznych.

W celu oceny jednorodności wariancji (homoskedastyczności) w grupach przeprowadzono test Levene’a dla średnic bieżni pierścieni po operacjach technologicznych toczenia, obróbki cieplnej i szlifowania wykończającego. W tym celu dla każdej obserwacji obliczono wartość z_{ij} zgodnie ze wzorem (6.3) [S1]:

$$z_{ij} = |x_{ij} - M_j| \quad (6.3)$$

gdzie:

- x_{ij} – wartość i-tej obserwacji w grupie j
- M_j – mediana lub średnia wartości w grupie j
- z_{ij} – bezwzględna różnica (odchylenie) danej obserwacji od mediany lub średniej w swojej grupie.

Następnie wykonano jednoczynnikową analizę wariancji (ANOVA) dla wartości z_{ij} , aby sprawdzić czy średnie tych odchyleń różnią się istotnie pomiędzy grupami. Interpretacja wartości poziomu istotności (p) w teście Levene’a jest następująca:

- $p \leq 0,05$ – różnice w wariancjach są statystycznie istotne; odrzucamy hipotezę zerową, która zakłada równość wariancji między grupami (występuje heteroskedastyczność),
- $p > 0,05$ – brak podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej; wariancje są równe (założenie homoskedastyczności jest spełnione).

Dodatkowo zastosowano test lambda Wilksa (Wilks’ Lambda), który pozwala ocenić czy istnieją statystycznie istotne różnice pomiędzy grupami, gdy analizowanych jest więcej niż jedna zmienna zależna. Współczynnik lambda Wilksa mierzy jaką część całkowitej wariancji nie została wyjaśniona przez różnice między grupami. Przyjmuje on wartości z przedziału od 0 do 1, gdzie wartość bliska zeru świadczy o istotnych różnicach między grupami, co oznacza dobre dopasowanie modelu. W analizowanym przypadku zmiennymi niezależnymi są: posuw oraz promień naroża płytki skrawającej. Hipoteza zerowa (H_0) zakłada brak istotnych różnic między grupami w odniesieniu do kombinacji zmiennych zależnych. Z kolei hipoteza alternatywna (H_1) wskazuje, że przynajmniej jedna taka kombinacja różni się istotnie między grupami. Wartość współczynnika lambda Wilksa (Λ) jest obliczana według wzoru (6.4) [106].

$$\Lambda = \frac{|\mathbf{E}|}{|\mathbf{E} + \mathbf{H}|} \quad (6.4)$$

gdzie:

- $\mathbf{E}$ – macierz błędów (wariancji wewnątrzgrupowej),
- $\mathbf{H}$ – macierz efektów (wariancji międzygrupowej).

Otrzymana wartość Λ jest następnie przekształcana w statystykę Fishera - Snedecora (F) – wzór (6.5), która pozwala ocenić, czy obserwowane różnice między grupami są na tyle duże, że nie mogły powstać przypadkowo. Na tej podstawie wyznaczany jest poziom istotności p . Jeżeli wartość p przekracza poziom 0,05, nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej, co oznacza brak statystycznie istotnego wpływu predyktorów na analizowane zmienne zależne [107].

$$F = \frac{(1 - \Lambda^{1/s})}{\Lambda^{1/s}} \cdot \frac{d_2}{d_1} \quad (6.5)$$

gdzie:

$$s = \sqrt{\frac{z^2 d_1^2 - 4}{z^2 + d_1^2 - 5}},$$

$$d_1 = z \cdot (g-1)$$

$$d_2 = w - \frac{1}{2} \cdot (z+g+1)$$

z – liczba zmiennych niezależnych,

g – liczba grup,

w – całkowita liczba obserwacji.

Wyniki analizy Wilks' Lambda z testem Levene'a zestawiono w tabeli 25.

Tabela 25. Zestawienie wyników dla testów Wilks' Lambda i Levene'a

Pierścień wewnętrzny lewy							
Wilks' Lambda = 0,15565 $F(6, 290) = 74,176$ $p = 0,0000$							
Grupa	dwlt - średnia	dwlt - błąd std.	dwlc - średnia	dwlc - błąd std.	dwls - średnia	dwls - błąd std.	Levene p
1	40,6691	0,0012	40,7265	0,0016	40,2277	0,0007	0,0000
2	40,6836	0,0021	40,7058	0,0015	40,2291	0,0003	0,0000
3	40,6867	0,0012	40,7343	0,0016	40,2284	0,0004	0,0000
Pierścień wewnętrzny prawy							
Wilks' Lambda = 0,44782 $F(6, 290) = 23,893$ $p = 0,0000$							
Grupa	dwpt - średnia	dwpt - błąd std.	dwpc - średnia	dwpc - błąd std.	dwps - średnia	dwps - błąd std.	Levene p
1	48,1961	0,0011	48,2596	0,0010	47,7240	0,0004	0,0000
2	48,1955	0,0015	48,2656	0,0018	47,7196	0,0008	0,0000
3	48,2000	0,0012	48,2491	0,0026	47,7177	0,0006	0,0000
Pierścień zewnętrzny - bieżnia lewa							
Wilks' Lambda = 0,4449 $F(6, 290) = 24,126$ $p = 0,0000$							
Grupa	dzlt - średnia	dzlt - błąd std.	dzlc - średnia	dzlc - błąd std.	dzls - średnia	dzls - błąd std.	Levene p
1	65,3607	0,0012	65,2787	0,0012	65,8803	0,0012	0,0000
2	65,3699	0,0022	65,2971	0,0020	65,8758	0,0007	0,0000
3	65,3561	0,0023	65,2638	0,0025	65,8777	0,0006	0,0000
Pierścień zewnętrzny - bieżnia prawa							
Wilks' Lambda = 0,2501 $F(6, 290) = 48,314$ $p = 0,0000$							
Grupa	dzpt - średnia	dzpt - błąd std.	dzpc - średnia	dzpc - błąd std.	dzps - średnia	dzps - błąd std.	Levene p
1	72,8661	0,0012	72,8630	0,0024	73,3773	0,0008	0,0000
2	72,8911	0,0014	72,9016	0,0014	73,3762	0,0009	0,0000
3	72,8525	0,0026	72,8672	0,0027	73,3779	0,0005	0,0000

Test Levene'a pokazał brak jednorodności wariancji pomiędzy grupami. Niemniej test Wilks' Lambda wykazał statystycznie istotne różnice pomiędzy grupami

($p = 0,000$), co teoretycznie sugerowałoby wpływ predyktorów (posuw oraz promień naroża płytki skrawającej) na zmienne zależne, tj. średnice bieżni pierścieni po operacjach technologicznych. Jednakże analiza praktyczna oraz ocena wielkości zaobserwowanych różnic wskazują, że wpływ ten jest marginalny i nieistotny z punktu widzenia wymagań technologicznych i produkcyjnych. Różnice te, mimo że statystycznie wykrywalne, nie przekraczają tolerancji dopuszczalnych w badanych procesach technologicznych. W związku z tym, choć statystycznie wykazano istotność różnic, ich znaczenie praktyczne jest pomijalne.

6.6. Analiza korelacji średnic bieżni po operacjach toczenia, obróbki cieplnej i szlifowania

Ponieważ reszty wykazują heteroskedastyczność oraz predyktory nie wykazały praktycznego wpływu na zmienne zależne, przeanalizowano potencjalne zależności kaskadowe, czyli wpływ zmian jednej zmiennej zależnej na kolejne zmienne zależne w ramach realizowanego procesu technologicznego. Zbadano korelacje pomiędzy średnicą bieżni po toczeniu a średnicą bieżni po obróbce cieplnej, średnicą bieżni po obróbce cieplnej a średnicą bieżni po szlifowaniu wykończającym oraz średnicą bieżni po toczeniu a średnicą bieżni po szlifowaniu wykończającym.

W tym celu skorzystano z testu Pearsona wyznaczając współczynniki korelacji r wg wzoru (6.6). Może on przyjmować wartości z przedziału -1 do 1. Służy do oceny siły i kierunku związku pomiędzy dwiema zmiennymi. Wartości bliskie skrajnym przedziału zmienności oznaczają silniejszą korelację [108].

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6.6)$$

gdzie:

x_i, y_i – kolejne obserwacje zmiennych x i y

$\bar{x}, \bar{y}$ – średnie arytmetyczne zmiennych x i y

Uzyskane współczynniki korelacji dla zmiennych pierścienia wewnętrznego lewego pokazano w tabeli 26.

Tabela 26. Zestawienie współczynników korelacji Pearsona dla pierścienia wewnętrznego lewego

Średnica	Grupa	dwlc	dwls
dwlt	1	$r = 0,8687$	$r = -0,0801$
		$p = 0,000$	$p = 0,580$
	2	$r = 0,7717$	$r = -0,0978$
		$p = 0,000$	$p = 0,499$
	3	$r = 0,7295$	$r = -0,1003$
		$p = 0,000$	$p = 0,488$
dwlc	1	-	$r = -0,1336$
		-	$p = 0,103$
	2	-	$r = -0,1725$
		-	$p = 0,231$
	3	-	$r = 0,0741$
		-	$p = 0,609$

Uzyskane wartości współczynników korelacji Pearsona wskazują na silną korelację w grupie 1 pomiędzy średnicą bieżni po toczeniu (dwlt) a średnicą bieżni po obróbce cieplnej (dwlc) ($r = 0,8687$, $p = 0,000$), co sugeruje, że zmiany w jednej z tych średnic mają wyraźny wpływ na drugą. W grupach 2 ($r = 0,7717$, $p = 0,000$) oraz 3 ($r = 0,7295$, $p = 0,000$) korelacje są również silne i nadal istotne statystycznie. Związek między tymi zmiennymi jest wyraźny, choć nieco słabszy niż w grupie pierwszej.

Uzyskane wartości współczynnika korelacji Pearsona pomiędzy średnicą bieżni po toczeniu (dwlt) a średnicą bieżni po szlifowaniu wykończającym (dwls) oraz średnicą bieżni po obróbce cieplnej (dwlc) a średnicą po szlifowaniu wykończającym (dwls) są bliskie zeru, a wartości p są znacznie większe niż 0,05, co wskazuje na brak istotnych statystycznie korelacji między nimi.

Współczynniki korelacji Pearsona dla zmiennych pierścienia wewnętrznego prawego pokazano w tabeli 27.

Tabela 27. Zestawienie współczynników korelacji Pearsona dla pierścienia wewnętrznego prawego

Średnica	Grupa	dwpc	dwps
dwpt	1	$r = 0,8007$	$r = 0,1488$
		$p = 0,000$	$p = 0,302$
	2	$r = 0,5889$	$r = 0,0805$
		$p = 0,000$	$p = 0,578$
	3	$r = 0,6037$	$r = -0,2465$
		$p = 0,000$	$p = 0,084$
dwpc	1	-	$r = 0,1333$
		-	$p = 0,356$
	2	-	$r = 0,3105$
		-	$p = 0,028$
	3	-	$r = -0,1220$
		-	$p = 0,399$

W tym przypadku podobnie jak dla pierścienia wewnętrznego lewego wystąpiła silna korelacja w grupie 1 pomiędzy średnicą bieżni po toczeniu (dwpt) a średnicą bieżni po obróbce cieplnej (dwpc) ($r = 0,8007$, $p = 0,000$), co sugeruje, że zmiany w jednej z tych średnic mają wyraźny wpływ na drugą. W grupach 2 ($r = 0,5889$, $p = 0,000$) oraz 3 ($r = 0,6037$, $p = 0,000$) korelacje są umiarkowane, silne i istotne statystycznie. Związek między tymi zmiennymi jest wyraźny, choć nieco słabszy niż w grupie 1.

Uzyskane wartości współczynnika korelacji Pearsona pomiędzy średnicą bieżni po toczeniu (dwpt) a średnicą bieżni po szlifowaniu wykończającym (dwps) są bliskie zeru, a wartości p są znacznie większe niż 0,05, co wskazuje na brak istotnych statystycznie korelacji między nimi. Podobnie jest w relacjach zachodzących pomiędzy średnicą bieżni po obróbce cieplnej (dwpc) a średnicą bieżni po szlifowaniu wykańczającym (dwps) z wyłączeniem grupy drugiej, gdzie wystąpiła statystycznie istotna słaba korelacja ($r = 0,3105$, $p = 0,028$).

Uzyskane współczynniki korelacji Pearsona dla zmiennych pierścienia zewnętrznego pokazano w tabeli nr 28.

Tabela 28. Zestawienie współczynników korelacji Pearsona dla pierścienia zewnętrznego

Średnica	Grupa	dzlc	dzls	dzpc	dzps
dzlt	1	$r = 0,6779$	$r = 0,0911$	$r = 0,2952$	$r = -0,1771$
		$p = 0,000$	$p = 0,529$	$p = 0,037$	$p = 0,219$
dzlc		-	$r = 0,1752$	$r = 0,2581$	$r = -0,0503$
		-	$p = 0,224$	$p = 0,070$	$p = 0,729$
dzpt		$r = 0,4183$	$r = 0,0253$	$r = 0,5102$	$r = -0,0307$
		$p = 0,003$	$p = 0,862$	$p = 0,000$	$p = 0,832$
dzpc		$r = 0,2581$	$r = 0,0747$	-	$r = -0,1101$
		$p = 0,070$	$p = 0,606$	-	$p = 0,447$
dzlt	2	$r = 0,6707$	$r = -0,1766$	$r = 0,1851$	$r = -0,3086$
		$p = 0,000$	$p = 0,220$	$p = 0,198$	$p = 0,029$
dzlc		-	$r = -0,1086$	$r = -0,0349$	$r = -0,1177$
		-	$p = 0,453$	$p = 0,810$	$p = 0,415$
dzpt		$r = -0,0308$	$r = -0,1765$	$r = 0,8775$	$r = -0,3002$
		$p = 0,832$	$p = 0,220$	$p = 0,000$	$p = 0,034$
dzpc		$r = -0,0349$	$r = -0,1712$	-	$r = -0,2634$
		$p = 0,810$	$p = 0,234$	-	$p = 0,065$
dzlt	3	$r = 0,7038$	$r = -0,2322$	$r = -0,3291$	$r = -0,0473$
		$p = 0,000$	$p = 0,105$	$p = 0,020$	$p = 0,744$
dzlc		-	$r = -0,1391$	$r = -0,1693$	$r = -0,0580$
		-	$p = 0,335$	$p = 0,240$	$p = 0,689$
dzpt		$r = -0,1638$	$r = 0,0486$	$r = 0,9018$	$r = -0,0889$
		$p = 0,256$	$p = 0,737$	$p = 0,000$	$p = 0,539$
dzpc		$r = -0,1693$	$r = 0,0311$	-	$r = 0,0020$
		$p = 0,240$	$p = 0,830$	-	$p = 0,989$

W tabeli 29 zestawiono siły korelacji pomiędzy średnicami bieżni po poszczególnych operacjach dla pierścienia zewnętrznego, które są istotne statystycznie.

Tabela 29. Zestawienie sił korelacji istotnych statystycznie dla pierścienia zewnętrznego

Średnica	Grupa	dzlc	dzpc	dzps
dzlt	1	umiarkowana	słaba	-
dzpt		umiarkowana	umiarkowana	-
dzlt	2	umiarkowana	-	słaba ujemna
dzpt		-	bardzo silna	słaba ujemna
dzlt	3	bardzo silna	umiarkowana ujemna	-
dzpt		-	bardzo silna	-

Korelacje pomiędzy średnicami po toczeniu a średnicami po obróbce cieplnej

Zaobserwowano bardzo silne korelacje pomiędzy:

- średnicą bieżni lewej po toczeniu (dzlt) a średnicą bieżni lewej po obróbce cieplnej (dzlc) w grupie 3 ($r = 0,7038$, $p = 0,000$),
- średnicą bieżni prawej po toczeniu (dzpt) a średnicą bieżni prawej po obróbce cieplnej (dzpc) w grupie 2 ($r = 0,8775$, $p = 0,000$) oraz grupie 3 ($r = 0,9018$, $p = 0,000$).

Wskazuje to na silne powiązania wymiarowe pomiędzy stanem po toczeniu a stanem po obróbce cieplnej w tych grupach.

Dla grupy 1 zaobserwowano umiarkowaną korelację pomiędzy:

- średnicą bieżni lewej po toczeniu (dzlt) a średnicą bieżni lewej po obróbce cieplnej (dzlc) ($r = 0,6779$, $p = 0,000$),
- średnicą bieżni prawej po toczeniu (dzpt) a średnicą bieżni prawej po obróbce cieplnej (dzpc) ($r = 0,5102$, $p = 0,000$).

Dla grupy 2 zaobserwowano umiarkowaną korelację pomiędzy średnicą bieżni lewej po toczeniu (dzlt) a średnicą bieżni lewej po obróbce cieplnej (dzlc) ($r = 0,6707$, $p = 0,000$). Wszystkie te korelacje były istotne statystycznie ($p < 0,05$).

Korelacje pomiędzy średnicami po toczeniu a średnicami po szlifowaniu wykończającym

Uzyskane wartości współczynnika korelacji Pearsona dla zależności dzlt a dzls oraz dzpt a dzps w grupie 1 i 3 były bardzo bliskie zeru, a wartości p znacznie przekraczały poziom 0,05. Oznacza to brak istotnych statystycznie zależności pomiędzy średnicami po toczeniu a średnicami po szlifowaniu wykończającym w tych grupach. Jedynie w grupie 2 odnotowano słabą ujemną korelację istotną statystycznie dla dzpt a dzps ($r = -0,3002$, $p = 0,034$).

Korelacje krzyżowe (lewa–prawa)

W grupie 3 zaobserwowano umiarkowaną ujemną korelację pomiędzy $dzlt$ a $dzpc$ ($r = -0,3291$, $p = 0,020$).

W grupie 1 zaobserwowano umiarkowaną dodatnią korelację pomiędzy $dzpt$ a $dzlc$ ($r = 0,4183$, $p = 0,003$).

W grupie 2 odnotowano słabą ujemną korelację istotną statystycznie dla $dzlt$ a $dzps$ ($r = -0,3086$, $p = 0,029$).

Pomimo istotności statystycznej tych korelacji, ich praktyczna interpretacja jest ograniczona. Rzeczywiste warunki technologiczne nie potwierdzają, aby wymiar bieżni lewej miał wpływ na bieżnię prawą i odwrotnie.

Przeprowadzona analiza dla pierścienia zewnętrznego wykazała:

- silne zależności pomiędzy średnicami po toczeniu a odpowiadającymi im średnicami po obróbce cieplnej,
- brak istotnych korelacji pomiędzy średnicami po toczeniu a średnicami po szlifowaniu (z wyjątkiem słabych zależności w grupie 2),
- nieistotną wartość praktyczną korelacji krzyżowych pomiędzy bieżniami lewą i prawą.

Zaobserwowane silne i umiarkowane korelacje pomiędzy średnicami bieżni po toczeniu a średnicami po obróbce cieplnej dla wszystkich typów pierścieni uzasadniają kontynuację badań z wykorzystaniem regresji liniowej. Opracowanie takich modeli umożliwi dokładniejsze prognozowanie wymiarów po obróbce cieplnej na podstawie stanu po toczeniu.

6.7. Badanie regresji liniowej pomiędzy średnicą bieżni po toczeniu i średnicą bieżni po obróbce cieplnej

Badanie wpływu średnicy bieżni po toczeniu na średnicę bieżni po obróbce cieplnej przeprowadzono z wykorzystaniem regresji liniowej, przy użyciu programów STATISTICA v.10 oraz MS Excel. Obliczono współczynnik determinacji R^2 , który określa jaki procent zmienności zmiennej zależnej jest wyjaśniany przez zmienność predyktora w modelu regresji. Jego wartość oblicza się ze wzoru (6.7) [109].

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^w (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^w (y_i - \bar{y})^2} \quad (6.7)$$

w - liczba obserwacji,

y_i - wartość rzeczywista i -tej obserwacji,

$\hat{y}_i$ - wartość przewidywana przez model,

$\bar{y}$ - średnia z wartości rzeczywistych.

Jeśli R^2 przyjmuje wartość 0, to model nic nie wyjaśnia. Mamy wtedy do czynienia z dopasowaniem zerowym. Jeżeli zaś osiąga wartość 1, to model wyjaśnia 100% zmienności – dopasowanie idealne.

Dodatkowo wyznaczono statystykę Fishera-Snedecora (F) w celu oceny ogólnej istotności modelu regresji, czyli porównania wariancji wyjaśnionej przez model do wariancji niewyjaśnionej (reszt). Wyższe wartości statystyki F wskazują na silniejszy wpływ zmiennych niezależnych na zmienną zależną, pod warunkiem spełnienia kryterium istotności testu [110].

W celu weryfikacji założenia o nieskorelowaniu reszt obliczono także statystykę Durbin-Watsona (DW), którą oblicza się według wzoru (6.8):

$$DW = \frac{\sum_{i=2}^w (e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^w e_i^2} \quad (6.8)$$

gdzie:

e_i – reszta modelu regresji dla obserwacji i ,

w – liczba obserwacji.

Autokorelacja reszt może prowadzić do błędnych wniosków statystycznych, dlatego w praktyce zakres 1,5 – 2,5 jest często uznawany za akceptowalny brak autokorelacji. Jeśli $DW < 1,5$ sugeruje to, że błędy są skorelowane i model może być źle dopasowany [109]. Ponadto wykonano wykresy normalności reszt (Q-Q), aby sprawdzić zgodność ich rozkładu z rozkładem normalnym, co stanowi jedno z podstawowych założeń klasycznej regresji liniowej. Im większe odchylenie reszt od rozkładu normalnego, tym słabsze dopasowanie modelu.

W celu opracowania równania regresji liniowej wyznaczono punkt przecięcia (intercept), współczynnik regresji b , standaryzowany współczynnik regresji b^* , który umożliwia ocenę względnej siły wpływu predyktorów, oraz poziomy istotności p dla oceny statystycznej istotności poszczególnych parametrów.

Współczynnik regresji b w modelu regresji liniowej opisuje, o ile jednostek zmienia się zmienna zależna, gdy zmienna niezależna wzrośnie o jedną jednostkę i oblicza się go korzystając ze wzoru (6.9):

$$b = \frac{\sum_{i=1}^w (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^w (x_i - \bar{x})^2} \quad (6.9)$$

gdzie:

x_i, y_i – poszczególne obserwacje
 $\bar{x}, \bar{y}$ – średnie wartości odpowiednio x i y ,
 w – liczba obserwacji.

Natomiast b^* umożliwia porównywanie siły wpływu zmiennych niezależnych na zmienną zależną w modelu regresji, niezależnie od ich jednostek miary. Informuje o ile odchylen standardowych zmiennej zależnej zmieni się jej wartość, gdy zmienna niezależna wzrośnie o jedno odchylenie standardowe. Współczynnik ten obliczany jest według wzoru (6.10):

$$b^* = b \cdot \left(\frac{\sigma_x}{\sigma_y} \right) \quad (6.10)$$

gdzie:

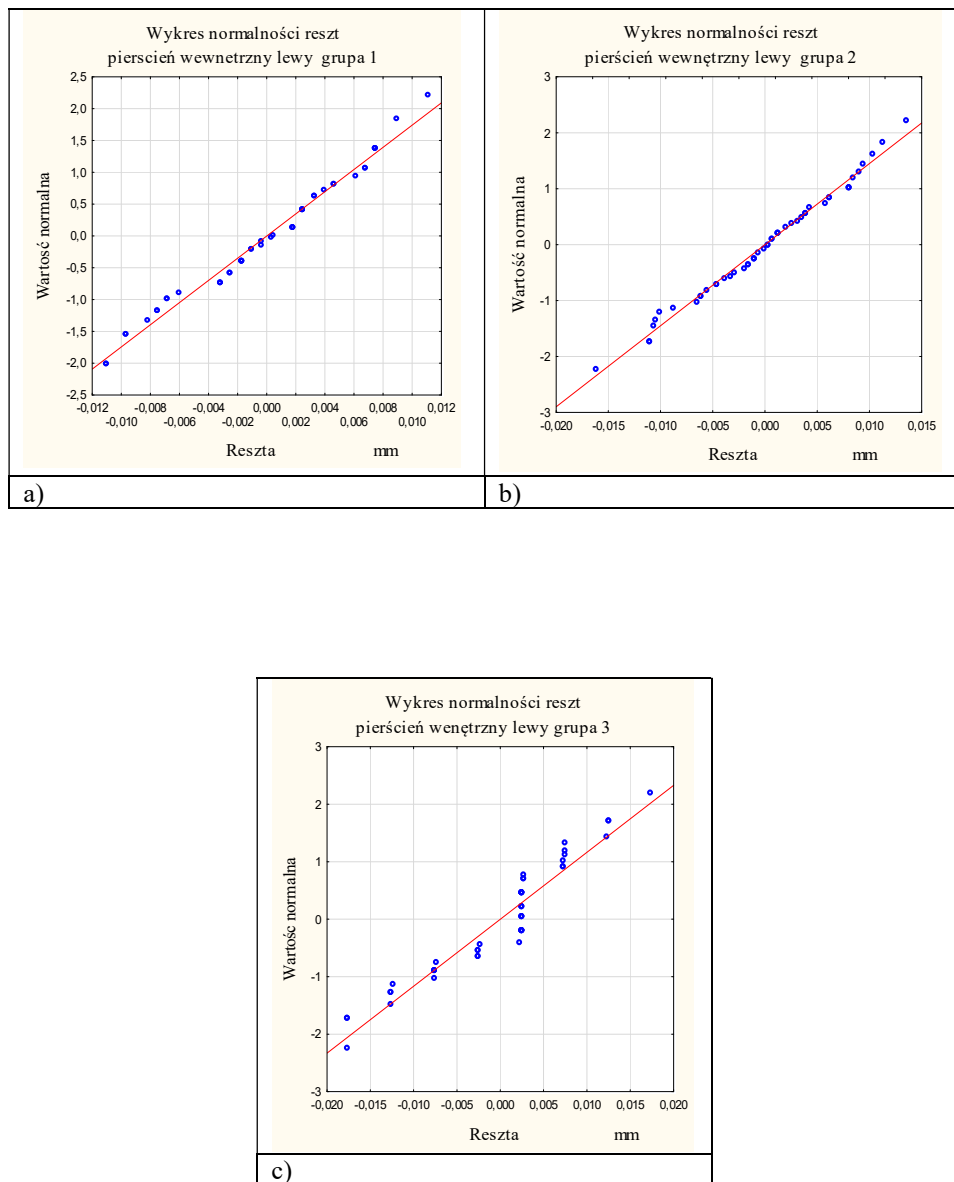
b – współczynnik regresji,
 σ_x – odchylenie standardowe zmiennej niezależnej x ,
 σ_y – odchylenie standardowe zmiennej zależnej y .

Dzięki temu przekształceniu można ocenić względną siłę predyktorów w modelu, niezależnie od skali ich wartości liczbowych [110].

Wyniki przeprowadzonych testów oraz zbudowanych modeli regresji liniowej, dotyczących wpływu średnicy bieżni po toczeniu na średnicę bieżni po obróbce cieplnej, zestawiono w tabelach 30, 31, 32, 33, a wykresy Q-Q przedstawiono na rysunkach 62, 63, 64, 65.

Tabela 30. Zestawienie statystyk analizy regresji liniowej dla pierścienia wewnętrznego lewego – wpływ dwłt na dwlc

Analiza regresji dla pierścienia wewnętrznego lewego			
wpływ dwłt na dwlc			
Statystyki regresji	Grupa 1	Analiza wariancji	
Wielokrotność R	0,87	F	147,5725
R^2	0,75	p	0,0000
Dopasowany R^2	0,75	Sta. Durbin-Watson	1,72
Błąd standardowy	0,0056		
Intercept	-5,872	$p = 0,1324$	$b^* = 0,87$
Współczynnik b	1,146	$p = 0,0000$	
Równanie regresji	dwlc = 1,146 dwłt – 5,872		
Statystyki regresji	Grupa 2	Analiza wariancji	
Wielokrotność R	0,77	F	70,6767
R^2	0,60	p	0,0000
Dopasowany R^2	0,59	Sta. Durbin-Watson	1,68
Błąd standardowy	0,0068		
Intercept	18,573	$p = 0,0000$	$b^* = 0,77$
Współczynnik b	0,544	$p = 0,0000$	
Równanie regresji	dwlc = 0,544 dwłt + 18,537		
Statystyki regresji	Grupa 3	Analiza wariancji	
Wielokrotność R	0,73	F	54,5976
R^2	0,53	p	0,0000
Dopasowany R^2	0,52	Sta. Durbin-Watson	1,73
Błąd standardowy	0,0081		
Intercept	0,563	$p = 0,9179$	$b^* = 0,73$
Współczynnik b	0,987	$p = 0,0000$	
Równanie regresji	dwlc = 0,987 dwłt +0,563		



Rys. 62. Wykresy oceny rozkładu reszt uzyskanych w analizie wpływu parametru d_{w1t} na wartość d_{w1c} lewego pierścienia wewnętrznego w podziale na grupy: a) grupa 1, b) grupa 2, c) grupa 3

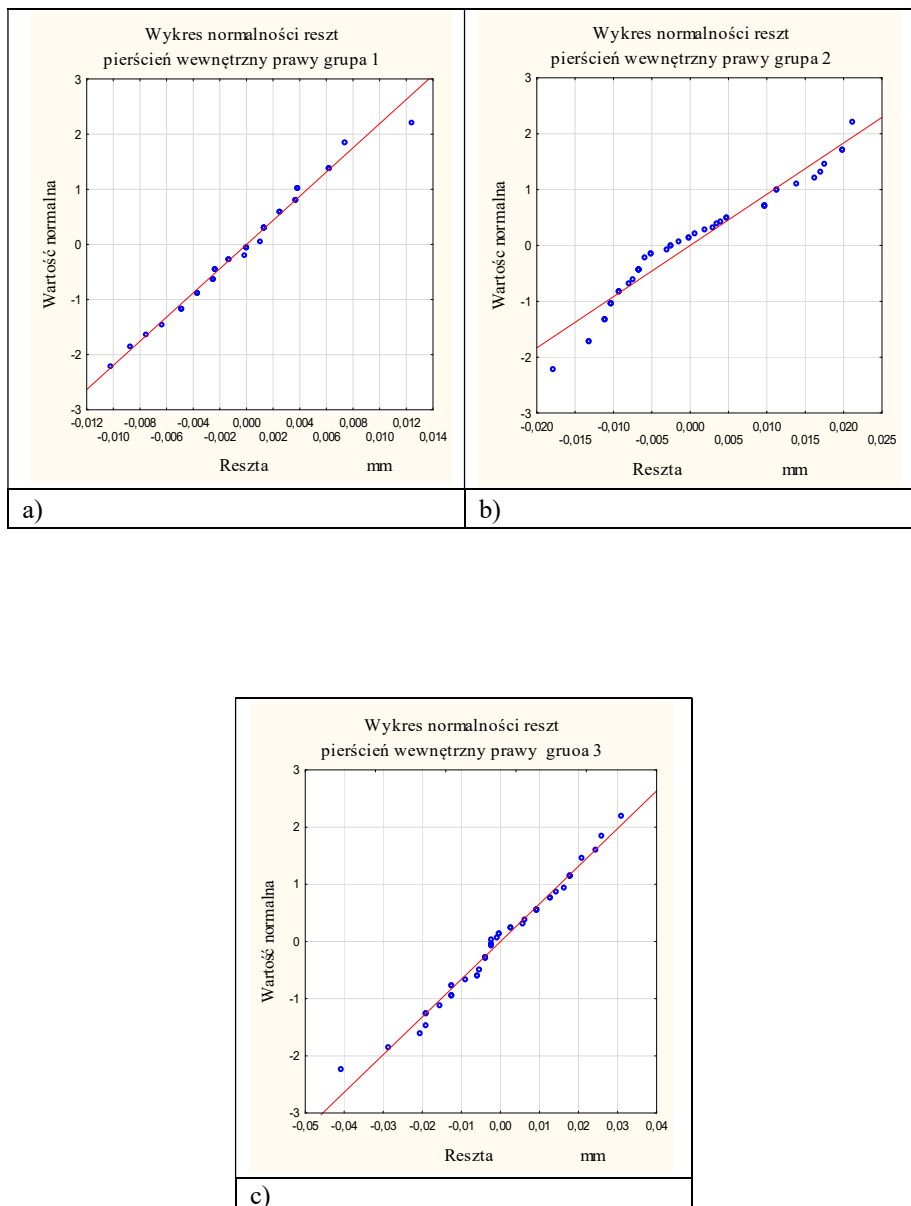
Najlepszym poziomem dopasowania charakteryzuje się model regresji dla grupy 1, który w 75% wyjaśnia zmienność zmiennej zależnej. W pozostałych grupach dopasowany R^2 osiągnął wartości 59% dla grupy 2 i 52% dla grupy 3. Ocena wariancji reszt uzyskała największą wartość w grupie 1, równą $F = 147,5725$. W pozostałych grupach również była wysoka 70,6767 w grupie 2 i 54,5976 w grupie 3. Statystyka Durbin-Watson kształtowała się w przedziale 1,68 do 1,73, co wskazuje na brak korelacji pomiędzy zmiennymi (cecha pozytywna) i była podobna dla każdej z grup. Standaryzowany współczynnik regresji b^* osiągnął najwyższą wartość w grupie 1, równą 0,87. Świadczy to o silnym oddziaływaniu $dwlt$ na $dwlc$. Dla pozostałych grup osiągnął wartości 0,77 w grupie 2 i 0,73 w grupie 3. Rozkład reszt nie wskazuje na odstępstwa od rozkładu normalnego. Z kolei intercepty w grupie 1 i 3 uzyskały poziomy istotności $p > 0,05$. Niemniej muszą być one uwzględnione w równaniach regresji. Ich obecność ma istotne znaczenie w poprawnym odwzorowaniu relacji między zmiennymi i pozwala na lepsze dopasowanie modelu do danych. Zbudowano trzy modele regresji, po jednym dla każdej z grup, które są istotne statystycznie. Jednak tylko jeden model

$$dwlc = 1,1458 dwlt - 5,872$$

może być rekomendowany do stosowania w warunkach produkcyjnych. Uzasadnia to najlepsza ocena statystyczna modelu jak i użycie do wykonania 50-elementowej próbki parametrów technologicznych ($posuw = 0,25$ mm/obr i promień naroża płytki skrawającej = 1,2 mm) zgodnych z wieloletnim doświadczeniem producenta łożysk.

Tabela 31. Zestawienie statystyk analizy regresji liniowej dla pierścienia wewnętrznego prawego – wpływ dwpt na dwpc

Analiza regresji liniowej dla pierścienia wewnętrznego prawego - wpływ dwpt na dwpc			
Statystyki regresji	Grupa 1	Analiza wariancji	
Wielokrotność R	0,80	F	85,778
R^2	0,64	p	0,0000
Dopasowany R^2	0,63	Sta. Durbin-Watson	1,72
Błąd standardowy	0,0044		
Intercept	11,515	$p = 0,0056$	$b^* = 0,801$
Współczynnik b	0,7624	$p = 0,0000$	
Równanie regresji	dwpc = 0,7624 dwpt + 11,515		
Statystyki regresji	Grupa 2	Analiza wariancji	
Wielokrotność R	0,59	F	25,4881
R^2	0,35	p	0,0000
Dopasowany R^2	0,33	Sta. Durbin-Watson	1,86
Błąd standardowy	0,0104		
Intercept	13,474	$p = 0,0564$	$b^* = 0,589$
Współczynnik b	0,7219	$p = 0,0000$	
Równanie regresji	dwpc = 0,7219 dwpt + 13,474		
Statystyki regresji	Grupa 3	Analiza wariancji	
Wielokrotność R	0,60	F	27,5291
R^2	0,36	p	0,0000
Dopasowany R^2	0,35	Sta. Durbin-Watson	1,177
Błąd standardowy	0,0148		
Intercept	-16,497	$p = 0,1876$	$b^* = 0,604$
Współczynnik b	1,3433	$p = 0,0000$	
Równanie regresji	dwpc = 1,3433 dwpt – 16,497		



Rys. 63. Wykresy oceny rozkładu reszt uzyskanych w analizie wpływu parametru dwpt na wartość dwpc prawego pierścienia wewnętrznego w podziale na grupy:
a) grupa 1, b) grupa 2, c) grupa 3

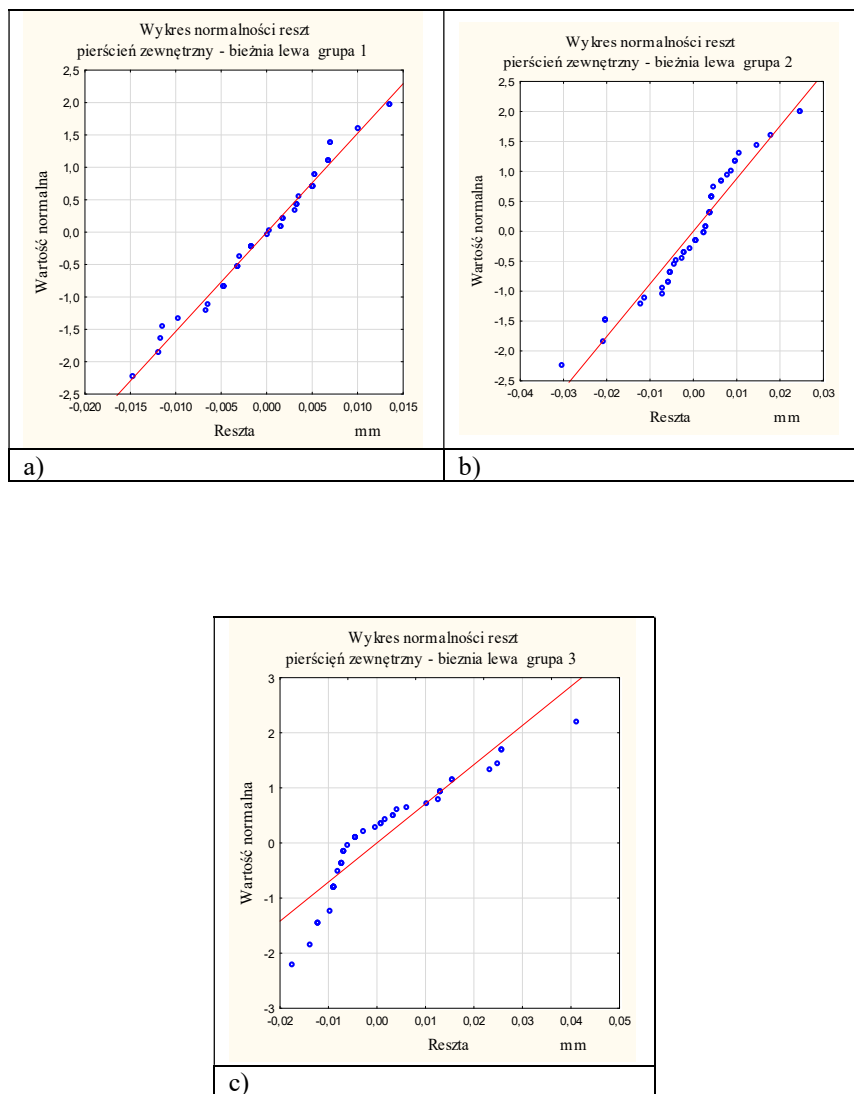
Najlepszym poziomem dopasowania w przypadku pierścienia wewnętrznego prawego charakteryzuje się model regresji dla grupy 1, który w 63% wyjaśnia zmienność zmiennej zależnej. W pozostałych grupach dopasowany R^2 osiągnął wartości 33% dla grupy 2 i 35% dla grupy 3. Ocena wariancji reszt uzyskała największą wartość w grupie 1, równą $F = 85,778$, a w grupie 2 $F = 25,4881$ i trzeciej $F = 27,5291$. Statystyka Durbin-Watson kształtowała się w przedziale 1,72 do 1,86 dla grup 1 i 2 co wskazuje na brak korelacji pomiędzy zmiennymi (cecha pozytywna). Dla grupy 3 wyniosła 1,177 i może sugerować złe dopasowanie modelu regresji. Standaryzowany współczynnik regresji b^* osiągnął najwyższą wartość w grupie 1, równą 0,801. Świadczy to o silnym oddziaływaniu dwpt na dwpc. Dla pozostałych grup osiągnął wartości 0,589 w grupie 2 i 0,604 w grupie 3. Rozkład reszt nie wskazuje na odstępstwa od rozkładu normalnego. Z kolei intercepty w grupie 2 i 3 uzyskały poziomy istotności $p > 0,05$. Nie mniej muszą być one uwzględnione w równaniach regresji. Ich obecność ma istotne znaczenie w poprawnym odwzorowaniu relacji między zmiennymi i pozwala na lepsze dopasowanie modelu do danych. Zbudowano trzy modele regresji, po jednym dla każdej z grup, które są istotne statystycznie. Niemniej tylko jeden model

$$\text{dwpc} = 0,7624 \text{ dwpt} + 11,515$$

może być rekomendowany do stosowania w warunkach produkcyjnych. Wynika to z najlepszej oceny statystycznej modelu, jak i użycia do wykonania 50- elementowej próbki parametrów technologicznych (posuw = 0,25 mm/obr i promień naroża płytki skrawającej = 1,2 mm) zgodnych z wieloletnim doświadczeniem producenta łożysk.

Tabela 32. Zestawienie statystyk analizy regresji liniowej dla pierścienia zewnętrznego – bieżnia lewa – wpływ dzłt na dzlc

Analiza regresji dla pierścienia zewnętrznego - bieżnia lewa			
wpływ dzłt na dzlc			
Statystyki regresji	Grupa 1	Analiza wariancji	
Wielokrotność R	0,68	F	40,821
R^2	0,46	p	0,0000
Dopasowany R^2	0,45	Sta. Durbin-Watson	1,313
Błąd standardowy	0,0064		
Intercept	20,72	$p = 0,0046$	$b^* = 0,678$
Współczynnik b	0,682	$p = 0,0000$	
Równanie regresji	dzlc = 0,682 dzłt + 20,72		
Statystyki regresji	Grupa 2	Analiza wariancji	
Wielokrotność R	0,67	F	39,248
R^2	0,45	p	0,0000
Dopasowany R^2	0,44	Sta. Durbin-Watson	1,989
Błąd standardowy	0,0108		
Intercept	24,4675	$p = 0,0005$	$b^* = 0,671$
Współczynnik b	0,6246	$p = 0,0000$	
Równanie regresji	dzlc = 0,6246 dzłt + 24,4675		
Statystyki regresji	Grupa 3	Analiza wariancji	
Wielokrotność R	0,70	F	47,123
R^2	0,56	p	0,0000
Dopasowany R^2	0,485	Sta. Durbin-Watson	1,386
Błąd standardowy	0,0128		
Intercept	15,033	$p = 0,0454$	$b^* = 0,704$
Współczynnik b	0,7686	$p = 0,0000$	
Równanie regresji	dzlc = 0,7686 dzłt + 15,033		



Rys. 64. Wykresy oceny rozkładu reszt uzyskanych w analizie wpływu parametru dzłt na wartość dzlc bieżni lewej pierścienia zewnętrznego w grupach: a) grupa 1, b) grupa 2, c) grupa 3

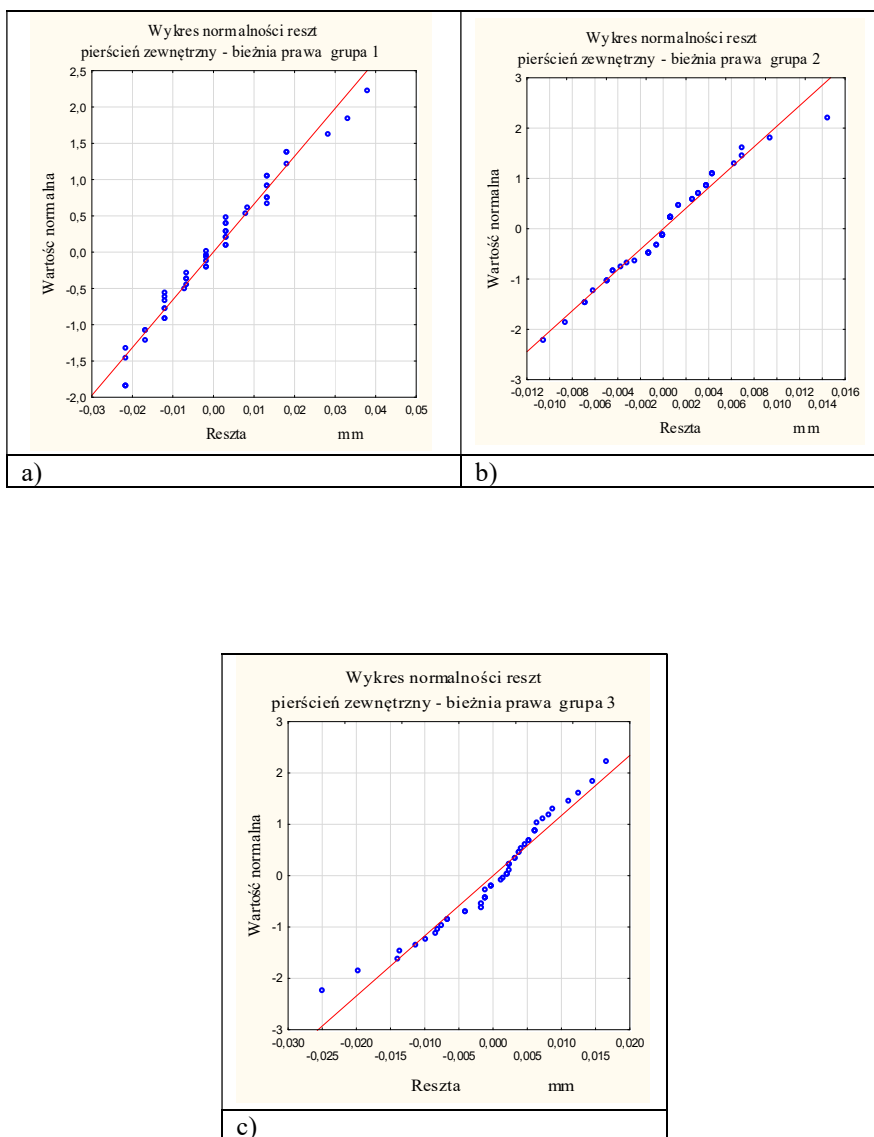
Najlepszym poziomem dopasowania w przypadku bieżni lewej pierścienia zewnętrznego charakteryzuje się model regresji dla grupy 3, który w 56% wyjaśnia zmienność zmiennej zależnej. W pozostałych grupach dopasowany R^2 osiągnął wartości 45% dla grupy 1 i 44% dla grupy 2. Ocena wariancji reszt uzyskała największą wartość w grupie 3 i równą $F = 47,123$. W pozostałych grupach 40,821 w grupie 1 i 39,248 w grupie 2. Statystyka Durbin-Watson kształtowała się w przedziale 1,313 do 1,989, co wskazuje na brak korelacji pomiędzy zmiennymi (cecha pozytywna). Standaryzowany współczynnik regresji b^* osiągnął najwyższą wartość w grupie 3 i równą 0,704. Świadczy to o silnym oddziaływaniu dzłt na dzlc. Dla pozostałych grup osiągnął wartości 0,678 w grupie 1 i 0,671 w grupie 2. Rozkład reszt nie wskazuje na odstępstwa od rozkładu normalnego. Z kolei intercepty w każdej grupie uzyskały poziomy istotności $p < 0,05$. Zbudowano trzy modele regresji, po jednym dla każdej z grup, które są istotne statystycznie. Niemniej tylko jeden model

$$\text{dzlc} = 0,7686 \text{ dzłt} + 15,033$$

może być polecany do stosowania w warunkach produkcyjnych. Wynika to z najlepszej oceny statystycznej modelu, dodatkowo popartej faktem użycia do wykonania 50-elementowej próbki parametru technologicznego, jakim jest posuw 0,25 mm/obr stosowany od wielu lat przez producenta łożysk. Jedynym parametrem odbiegającym od stosowanej praktyki jest wielkość promienia naroża płytki skrawającej, która wynosiła 0,4 mm zamiast 1,2 mm.

Tabela 33. Zestawienie statystyk analizy regresji liniowej dla pierścienia zewnętrznego – bieżnia prawa – wpływ dzpt na dzpc

Analiza regresji dla pierścienia zewnętrznego - bieżnia prawa			
wpływ dzpt na dzpc			
Statystyki regresji	Grupa 1	Analiza wariancji	
Wielokrotność R	0,51	F	16,8941
R^2	0,26	p	0,00015
Dopasowany R^2	0,255	Sta. Durbin-Watson	1,602
Błąd standardowy	0,0146		
Intercept	- 0,422	$p = 0,9812$	$b^* = 0,510$
Współczynnik b	1,0058	$p = 0,0058$	
Równanie regresji	dzpc = 1,0058 dzpt – 0,422		
Statystyki regresji	Grupa 2	Analiza wariancji	
Wielokrotność R	0,88	F	160,6476
R^2	0,77	p	0,0000
Dopasowany R^2	0,765	Sta. Durbin-Watson	1,962
Błąd standardowy	0,0048		
Intercept	9,228	$p = 0,0724$	$b^* = 0,877$
Współczynnik b	0,8735	$p = 0,0000$	
Równanie regresji	dzpc = 0,8735 dzpt + 9,228		
Statystyki regresji	Grupa 3	Analiza wariancji	
Wielokrotność R	0,90	F	209,1103
R^2	0,81	p	0,0000
Dopasowany R^2	0,809	Sta. Durbin-Watson	2,45
Błąd standardowy	0,0082		
Intercept	6,7412	$p = 0,147$	$b^* = 0,902$
Współczynnik b	0,9077	$p = 0,0000$	
Równanie regresji	dzpc = 0,9077 dzpt + 6,741		



Rys. 65. Wykresy oceny rozkładu reszt uzyskanych w analizie wpływu parametru dzpt na wartość dzpc bieżni prawej pierścienia zewnętrznego w grupach: a) grupa 1, b) grupa 2, c) grupa 3

Najlepszym poziomem dopasowania w przypadku bieżni prawej pierścienia zewnętrznego charakteryzuje się model regresji dla grupy 3, który w 81% wyjaśnia zmienność zmiennej zależnej. W pozostałych grupach dopasowany R^2 osiągnął wartości 26% dla grupy 1 i 77% dla grupy 2. Ocena wariancji reszt uzyskała największą wartość w grupie 3 i równą $F = 209,1103$. W pozostałych grupach 16,8941 w grupie 1 i 160,6476 w grupie 2. Statystyka Durbin-Watson kształtowała się w przedziale 1,602 do 2,45, co wskazuje na brak korelacji pomiędzy zmiennymi (cecha pozytywna). Standaryzowany współczynnik regresji b^* osiągnął najwyższą wartość w grupie 3 i równą 0,902. Świadczy to o silnym oddziaływaniu $dzpt$ na $dzpc$. Dla pozostałych grup osiągnął wartości 0,51 w grupie 1 i 0,877 w grupie 2. Rozkład reszt nie wskazuje na odstępstwa od rozkładu normalnego. Z kolei intercepty w każdej grupie uzyskały poziomy istotności $p > 0,05$. Zbudowano trzy modele regresji, po jednym dla każdej z grup, które są istotne statystycznie. Niemniej tylko jeden model

$$dzpc = 0,9077 dzpt + 6,741$$

może być rekomendowany do stosowania w warunkach produkcyjnych. Wynika to z najlepszej oceny statystycznej modelu oraz z faktu wykonania 50-elementowej próbki z posuwem 0,25 mm/obr od wielu lat stosowanym przez producenta łożysk. Jedynym parametrem odbiegającym od praktyki jest wielkość promienia naroża płytki skrawającej, która miała wartość 0,4 mm zamiast 1,2 mm.

6.8 Podsumowanie oceny wyników przeprowadzonych badań

Sprawdzenie normalności rozkładów średnicy bieżni pierścieni po toczeniu, obróbce cieplnej oraz szlifowaniu wykończającym, z wykorzystaniem testu Shapiro-Wilka wykazało, dla każdej z grup, brak podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej o istnieniu zgodności z rozkładem normalnym.

Analiza porównawcza tolerancji wyników w stosunku do projektowych i procesowych wartości wykazała, że wartości uzyskanych tolerancji są znacząco niższe od tolerancji procesowych i projektowych co jest podstawą do rozważenia modyfikacji parametrów procesu w kierunku zmniejszenia naddatków i skrócenia czasu obróbki.

Ocena zależności pomiędzy predyktorami dychotomicznymi a zmiennymi zależnymi (średnice bieżni pierścieni po toczeniu, obróbce cieplnej i szlifowaniu

wykończającym) z wykorzystaniem specjalnej odmiany korelacji Pearsona (korelacji punktowo-dwuseryjnej) uwidoczniła wpływ zmiennych technologicznych na korelacje. Wartości p dla większości analizowanych zależności potwierdzają istotność statystyczną wpływu posuwu i promienia naroża płytki skrawającej na średnice bieżni po toczeniu i obróbce cieplnej.

Ocena jednorodności wariancji (homoskedastyczności) w grupach przeprowadzona za pomocą test Levene'a dla średnic bieżni pierścieni po toczeniu, obróbce cieplnej i szlifowaniu wykończającym pokazała brak jednorodności wariancji pomiędzy grupami. Niemniej test Wilks' Lambda wykazał statystycznie istotne różnice pomiędzy grupami, co teoretycznie sugeruje wpływ posuwu oraz promienia naroża płytki skrawającej na zmienne zależne. Jednak analiza praktyczna oraz ocena wielkości zaobserwowanych różnic wskazują, że wpływ ten jest marginalny i nieistotny z punktu widzenia wymagań technologicznych i produkcyjnych. W związku z tym, choć statystycznie różnice są istotne, ich znaczenie praktyczne jest pomijalne.

Z analizy zależności kaskadowych, czyli wpływu zmian jednej zmiennej zależnej na kolejne zmienne zależne w ramach realizowanego procesu technologicznego, wynika występowanie zależności między nimi. Uzyskane wartości współczynników korelacji Pearsona wskazują:

- dla pierścienia wewnętrznego lewego, w każdej grupie, na silne zależności pomiędzy średnicą po toczeniu a odpowiadającą jej średnicą po obróbce cieplnej oraz na brak istotnych korelacji pomiędzy średnicą po toczeniu a średnicą po szlifowaniu i pomiędzy średnicą po obróbce cieplnej a średnicą po szlifowaniu.

- dla pierścienia wewnętrznego prawego na silną korelację pomiędzy średnicą bieżni po toczeniu a średnicą bieżni po obróbce cieplnej w grupie 1 i 3 oraz umiarkowaną w grupie 2. Pomędzy średnicą bieżni po toczeniu a średnicą bieżni po szlifowaniu wykończającym oraz pomiędzy średnicą bieżni po obróbce cieplnej a średnicą bieżni po szlifowaniu wykańczającym brak jest istotnych statystycznie korelacji. Jedynie w grupie 2, pomiędzy średnicą bieżni po obróbce cieplnej a średnicą bieżni po szlifowaniu wykańczającym wystąpiła statystycznie słaba korelacja.

- dla pierścienia zewnętrznego na istotne i silne zależności pomiędzy średnicami po toczeniu a odpowiadającymi im średnicami po obróbce cieplnej. Brak istotnych korelacji pomiędzy średnicami po toczeniu a średnicami po szlifowaniu z wyjątkiem słabych zależności w grupie 2 oraz pomiędzy średnicami po obróbce cieplnej a średnicami po szlifowaniu.

Stwierdzono również nieistotną wartość praktyczną korelacji krzyżowych pomiędzy bieżniami lewą i prawą.

Badania wpływu średnicy bieżni po toczeniu na średnicę bieżni po obróbce cieplnej, przeprowadzone z wykorzystaniem regresji liniowej, wykazały, że w przypadku pierścienia zewnętrznego najlepsze dopasowanie równań regresji uzyskano dla średnicy bieżni lewej i prawej w grupie 3, natomiast dla pierścieni wewnętrznych dla średnicy bieżni w grupie 1. Odpowiadające im modele regresji są rekomendowane do stosowania w warunkach produkcyjnych:

- | | |
|--------------------------------------|-------------------------------|
| - pierścień wewnętrzny lewy | $dwlc = 1,1458 dwlt - 5,872$ |
| - pierścień wewnętrzny prawy | $dwpc = 0,7624 dwpt + 11,515$ |
| - pierścień zewnętrzny bieżnia lewa | $dzlc = 0,7686 dzlt + 15,033$ |
| - pierścień zewnętrzny bieżnia prawa | $dzpc = 0,9077 dzpt + 6,741$ |

ROZDZIAŁ VII

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

7.1. Podsumowanie

W rozprawie doktorskiej zrealizowano założone (w rozdziale 3.1) cele szczegółowe pracy:

- dokonano analizy literatury pod kątem dziedziczności technologicznej i opracowano stan wiedzy o zespolonych piastach łożyskowych,
- przeprowadzono analizę konstrukcji piasty łożyskowej drugiej generacji opartej na konstrukcji łożyska kulkowego skośnego. Zbudowano model matematyczny łańcuchów wymiarowych potrzebnych do weryfikacji przyjętych przez konstruktora tolerancji,
- wykonano przegląd poszczególnych operacji technologicznych w celu ustalenia ich poprawności (badanie maszyn technologicznych) pod kątem zapewnienia wymaganych wskaźników i parametrów,
- wytypowano elementy składowe piasty, określono ich licznosc oraz wybrano operacje technologiczne, po których przeprowadzono badania na zaplanowanych wymiarach służących do określenia dziedziczności technologicznej,
- przeanalizowano wyniki pomiarów z uwzględnieniem statystyki matematycznej oraz zbudowano modele matematyczne ustalania dziedziczności technologicznej wraz z wnioskami końcowymi.

Osiągnięcie celów szczegółowych pracy pozwoliło na zrealizowanie jej głównego celu, czyli ustalenia dla wytypowanych elementów składowych zespolonej piasty łożyskowej drugiej generacji relacji (dziedziczności technologicznej) wymiarów w ramach realizowanego procesu wytwarzania.

Rozstrzygnięto problemy dotyczące wymiarowania elementów składowych piasty łożyskowej. Zbudowano model matematyczny łańcucha wymiarowego dla luzu osiowego oraz równanie tolerancji. Przeprowadzono analizę i syntezę tego łańcucha wymiarowego, która wykazała mniejszą wartość nominalną (o 0,0033 mm) luzu osiowego przyjętą przez konstruktora niż wyliczona. Natomiast wyliczone pole tolerancji tego wymiaru okazało się czternastokrotnie większe niż dopuszczone przez konstruktora. Synteza tego łańcucha wykazała mniejsze wartości wyliczonych tolerancji wymiarów składowych niż przyjęte przez konstruktora. Niemniej ograniczenia technologiczne, względy ekonomiczne oraz wieloletnie doświadczenie produkcyjne spowodowały przyjęcie wartości wymiaru nominalnego z tolerancją luzu osiowego i tolerancji wymiarów składowych, określonych przez

konstruktora do realizacji procesu technologicznego, w którym montaż piasty łożyskowej będzie wykonywany z wykorzystaniem kompensacji selekcyjnej.

Przeprowadzona analiza literatury potwierdza występowanie zjawiska zmian wymiarowych produkowanego wyrobu po kolejnych operacjach technologicznych. Jest to wynikiem złożonej interakcji wielu czynników, takich jak: naprężenia wewnętrzne powstałe podczas obróbki, parametry procesów skrawania, obróbki cieplnej, obróbki ścierniej, a także cech materiałowych. Operacje wykonywane w ramach obróbki skrawaniem wprowadzają mikronowe deformacje powierzchni materiału. W miarę jak operacja postępuje, odkształcenia cieplne wywołane przez tarcie narzędzia mogą powodować chwilowe miejscowe wzrosty objętości materiału, które zanikają po ochłodzeniu. Dodatkowo dochodzą deformacje pochodzące od mocowania pod wpływem niewłaściwej konstrukcji uchwytu lub od zbyt dużej siły zacisku. Zmiany wymiarowe są także ściśle powiązane z naprężeniami wewnętrznymi generowanymi przez operacje technologiczne. Mają one cechę kumulacji lub wzajemnego znoszenia się. Na przykład, operacja toczenia zgrubnego wprowadza naprężenia, które następnie obróbka cieplna (hartowanie z odpuszczaniem) eliminuje, ale jednocześnie generuje nowy stan naprężenia, a co za tym idzie zmiany wymiarowe, które są istotne w kolejnych etapach procesu. Szczególnie zjawisko to można zaobserwować podczas szlifowania cienkościennych pierścieni kołowo symetrycznych. Podczas usuwania cienkich warstw materiału dochodzi do zmiany stanu naprężenia w warstwie wierzchniej. To z kolei wywołuje deformacje w postaci owalizacji i wichrowatości pierścieni. W związku z tym projektowanie procesów technologicznych musi uwzględniać powstawanie zmian wymiarowych pod wpływem dziedziczonych i nowo powstających cech geometrycznych i stanu naprężenia warstwy wierzchniej.

Podczas produkcji pierścieni łożyskowych, gdzie zmiany wymiarowe są niepożądane, technologowie monitorują wpływ takich operacji jak kucie z wyżarzaniem, toczenie i hartowanie z odpuszczaniem, by prognozować wymaganą kompensację wymiarową na etapie szlifowania. Dzięki matematycznemu modelowaniu i analizie statystycznej danych historycznych możliwe jest precyzyjne ustawienie parametrów kolejnych operacji, aby zminimalizować wahania wymiarowe i zapewnić odpowiednią jakość produktu końcowego. Analiza wpływu wcześniejszych operacji technologicznych na zmiany wymiarowe przyczynia się do optymalizacji procesów produkcyjnych. Kluczowym aspektem optymalizacji procesów technologicznych jest modelowanie matematyczne polegające na tworzeniu funkcji zależności między parametrami procesu a wymiarami obrabianego przedmiotu jak i pomiędzy wymiarami po poszczególnych operacjach technologicznych. Umożliwia

to przewidywanie wynikowych zmian wymiarowych i optymalizację operacji produkcyjnych. Do tego celu niezbędne jest zbudowanie modeli łańcuchów wymiarowych, które pozwalają na weryfikację przyjętych tolerancji konstrukcyjnych, ocenę wpływu tolerancji ogniów łańcucha na finalną jakość zespołu łożyskowego z podziałem ich na zmienne zależne i niezależne oraz wyspecyfikowanie takich, na których wykonano badania dziedziczności. Model ten może być wykorzystywany do wsparcia procesu projektowania i optymalizacji procesu technologicznego. W analizowanym przypadku stwierdzono istotną różnicę pomiędzy obliczonym a przyjętym przez konstruktora polem tolerancji luzu osiowego. Pole tolerancji wynikające z analizy łańcucha wymiarowego wynosi 0,288 mm, podczas gdy dopuszczalne wynosi zaledwie 0,020 mm. Źródłem tej rozbieżności jest kumulacja odchylek wymiarowych części składowych, nieuwzględniona odpowiednio w konstrukcji i procesie technologicznym. Ustalono, że dalsze zmniejszanie tolerancji wymiarów składowych jest nieopłacalne lub technologicznie niewykonalne. Dlatego rekomenduje się zastosowanie kompensacji selektywnej jako skutecznej metody zapewnienia zgodności luzu osiowego z wymaganiami konstrukcyjnymi przy zachowaniu aktualnych możliwości technologicznych.

Przeprowadzone badania eksperymentalne z wykorzystaniem nowoczesnych systemów pomiarowych umożliwiły ocenę zmian wymiarów po wybranych operacjach technologicznych: toczeniu, obróbce cieplnej oraz szlifowaniu. Na podstawie przeprowadzonych testów Shapiro-Wilka stwierdzono, że rozkłady wartości średnicy bieżni dla poszczególnych typów pierścieni, jak i dla wszystkich analizowanych wymiarów w badanych grupach, nie odbiegają istotnie od rozkładu normalnego, co potwierdzają wartości p przekraczające poziom istotności 0,05. Wyniki uzyskane dla wszystkich rodzajów pierścieni są ze sobą spójne, co dodatkowo potwierdza stabilność i przewidywalność procesu obróbkowego w kontekście spełniania wymagań konstrukcyjnych dla całej grupy pierścieni zespolonej piasty drugiej generacji. Oznacza to, że dane pomiarowe są statystycznie wiarygodne i mogą być bezpiecznie wykorzystywane zarówno w dalszych analizach porównawczych, jak i przy opracowywaniu modeli prognostycznych. Analiza porównawcza uzyskanych tolerancji wymiarowych w odniesieniu do tolerancji projektowych i procesowych wykazała, że wszystkie badane wymiary, m.in. takie jak średnice bieżni i ich położenie, mieszczą się w granicach tolerancji procesowych. Ponadto, uzyskane tolerancje są istotnie mniejsze niż dopuszczalne, co świadczy o wysokiej jakości i powtarzalności procesu produkcyjnego z możliwością jego optymalizacji przy jednoczesnym utrzymaniu wymaganego poziomu jakości.

W ramach analizy stabilności wymiarowej (poszukiwania dziedziczności technologicznej) po poszczególnych operacjach technologicznych, przeprowadzono ocenę wpływu wybranych parametrów obróbki skrawaniem (posuwu oraz promienia naroża płytki skrawającej) na średnice bieżni pierścieni przy użyciu współczynnika korelacji punktowo-dwuseryjnej. Zmienna „posuw” wykazuje zróżnicowany wpływ na średnice bieżni pierścieni w zależności od etapu procesu technologicznego. W przypadku toczenia i obróbki cieplnej odnotowano istotne statystycznie korelacje, przy czym siła związku wahała się od słabej do silnej, w zależności od typu pierścienia. Z kolei zmienna „promień naroża płytki skrawającej” wykazuje wyraźniejszy i bardziej spójny wpływ na średnice bieżni niż posuw. Korelacje są w wielu przypadkach silne lub umiarkowane, szczególnie dla pierścienia zewnętrznego po obróbce cieplnej. Etap szlifowania wykończającego cechuje się ogólnie najslabszymi zależnościami między predyktorami a średnicami bieżni. Nawet jeśli niektóre korelacje są istotne statystycznie, to ich siła jest niska, co wskazuje na dominację innych czynników wpływających na wymiar końcowy po szlifowaniu. Statystyczna istotność większości zależności ($p < 0,05$) potwierdza, że zarówno posuw, jak i promień naroża mogą odgrywać istotną rolę w procesach kształtowania wymiarów bieżni, szczególnie we wcześniejszych fazach obróbki. Natomiast brak jednoznacznej i silnej korelacji na etapie końcowym obróbki (szlifowania) sugeruje, że wpływ analizowanych parametrów ustępuje miejsca innym czynnikom, np. stabilności procesu szlifowania, właściwościom materiału po obróbce cieplnej czy deformacjom termicznym. Różnice w wartościach współczynników r_{pb} między typami pierścieni wskazują na wpływ konstrukcji pierścienia na wrażliwość wymiarów na parametry skrawania, co należy uwzględnić przy opracowywaniu technologii i doborze parametrów obróbki. Ponadto przeprowadzono testy wielowymiarowe oceny jednorodności wariancji reszt oraz istotności statystycznej różnic pomiędzy grupami wyodrębnionymi na podstawie wartości predyktorów (posuw, promień naroża płytki).

Test Levene’a wykazał brak jednorodności wariancji reszt pomiędzy analizowanymi grupami, co wskazuje na zróżnicowanie rozrzutu wartości zmiennych zależnych w poszczególnych kombinacjach wartości posuwu i promienia naroża płytki skrawającej. Pomimo niespełnienia założenia jednorodności wariancji reszt, test Wilks’ Lambda wykazał istotne statystycznie różnice pomiędzy grupami ($p = 0,000$), co sugeruje wpływ zmiennych niezależnych na średnice bieżni pierścieni po operacjach technologicznych. Analiza praktycznego znaczenia zaobserwowanych różnic wykazała jednak, że wpływ ten, mimo że statystycznie wykrywalny, nie wpływa w sposób istotny na jakość lub funkcjonalność wyrobu.

W świetle powyższego należy uznać, że oddziaływanie analizowanych parametrów skrawania (posuw, promień naroża płytki) na średnice bieżni pierścieni po poszczególnych operacjach technologicznych jest znikome, a proces technologiczny cechuje się wysoką powtarzalnością i stabilnością.

Przeprowadzona analiza korelacji Pearsona wykazała istnienie silnych i istotnych statystycznie zależności pomiędzy średnicami bieżni po toczeniu a średnicami po obróbce cieplnej zarówno w przypadku pierścieni wewnętrznych (lewego i prawego), jak i pierścienia zewnętrznego. Zaobserwowano, że siła korelacji pomiędzy średnicą po toczeniu a średnicą po obróbce cieplnej różni się pomiędzy grupami. W większości przypadków korelacja była bardzo silna ($r > 0,7$), co szczególnie uwidoczniło się w grupach 2 i 3 pierścieni zewnętrznych (np. dzpt – dzpc: $r = 0,8775$ i $r = 0,9018$). Taka zależność potwierdza, że średnice uzyskane po toczeniu mają znaczący wpływ na jej wartości po obróbce cieplnej, co potwierdza założenia o dziedziczeniu technologicznym w analizowanym ciągu operacji. W większości przypadków nie stwierdzono istotnych korelacji pomiędzy średnicami bieżni po toczeniu a średnicami po szlifowaniu wykończającym, co może wskazywać na brak zauważalnego dziedziczenia wymiarowego w dalszej części procesu. Jedynym wyjątkiem była grupa 2, gdzie zaobserwowano słabe, lecz istotne statystycznie korelacje ujemne (np. dzlt – dzps: $r = -0,3086$, $p = 0,029$).

Analiza wyników wykazała również brak istotnych korelacji pomiędzy średnicami po obróbce cieplnej a średnicami po szlifowaniu wykończającym, z wyjątkiem jednej słabej korelacji w grupie 2 pierścienia wewnętrznego prawego (dwpc – dwps: $r = 0,3105$, $p = 0,028$). Analiza korelacji krzyżowych pomiędzy średnicą bieżni lewej po toczeniu a średnicą bieżni prawej po obróbce cieplnej pierścienia zewnętrznego wskazała, iż pomimo, że niektóre zależności osiągały poziom istotności statystycznej, ich wartość praktyczna jest znikoma. Wyniki nie uzasadniają wpływu jednej bieżni na drugą. W związku z powyższym prowadzenie dalszych badań nad korelacjami krzyżowymi nie jest uzasadnione, a interpretację należy ograniczyć do stwierdzenia braku istotnego związku.

Istnienie istotnej zależności liniowej między średnicą bieżni po toczeniu a średnicą po obróbce cieplnej zostało jednoznacznie potwierdzone dla wszystkich analizowanych grup i wariantów pierścieni wewnętrznych. Modele regresji liniowej uzyskały wysoki poziom istotności statystycznej ($p < 0,0001$), co oznacza, że zmiana średnicy po toczeniu w istotny sposób wpływa na wartość średnicy po obróbce cieplnej. Najlepszą jakością dopasowania modelu regresji dla pierścienia lewego charakteryzowała się grupa 1, dla której wartość dopasowanego współczynnika determinacji wynosiła $R^2 = 0,75$, a wartość statystyki F była najwyższa

spośród analizowanych ($F = 147,57$). Oznacza to, że model ten wyjaśnia 75% zmienności zmiennej zależnej, co czyni go najbardziej użytecznym z punktu widzenia zastosowania produkcyjnego.

Model regresji dla grupy 1 pierścienia wewnętrznego lewego przyjął postać:

$$\text{dwlc} = 1,146 \cdot \text{dwlt} - 5,872$$

Może być on rekomendowany do wykorzystania w warunkach produkcyjnych, ponieważ został opracowany na podstawie przeprowadzonych badań przy technologii potwierdzonej wieloletnim doświadczeniem przemysłowym (posuw 0,25 mm/obr, promień naroża płytki 1,2 mm).

W przypadku pierścienia wewnętrznego prawego, najlepsze dopasowanie również uzyskano w grupie 1, z wartością dopasowanego $R^2 = 0,63$ i $F = 85,778$, co również wskazuje na silną zależność pomiędzy średnicą po toczeniu a po obróbce cieplnej. Model regresji dla tej grupy:

$$\text{dwpc} = 0,7624 \cdot \text{dwpt} + 11,515$$

Wartości statystyki Durbin-Watsona, mieszczące się w przedziale 1,68–1,73 dla pierścienia lewego i 1,72–1,86 dla prawego (z wyjątkiem jednej wartości 1,177), potwierdzają brak istotnej autokorelacji reszt w większości modeli, co oznacza że uzyskane modele spełniają jedno z kluczowych założeń regresji klasycznej. Wartości R^2 w grupach 2 i 3 obu typów pierścieni wewnętrznych były wyraźnie niższe (52 i 59% dla pierścienia lewego oraz 33 i 35% dla prawego) niż w ich grupach 1, co sugeruje większy poziom niepewności tych modeli i ich ograniczoną przydatność w bezpośrednim zastosowaniu produkcyjnym. Standaryzowane współczynniki regresji b^* osiągały wartości od 0,589 do 0,87, co potwierdza silne, choć zróżnicowane wpływy średnicy po toczeniu na średnicę po obróbce cieplnej w zależności od analizowanej grupy i rodzaju pierścienia. Najsilniejszy wpływ zaobserwowano w modelu dla grupy 1 pierścienia lewego ($b^* = 0,87$). Mimo, że intercept w niektórych modelach nie osiągnął poziomu istotności $p < 0,05$, jego uwzględnienie w równaniu regresji znacząco poprawia dopasowanie modelu do danych i pozwala na lepsze odwzorowanie rzeczywistej relacji między zmiennymi.

Najlepsze dopasowanie modelu regresji dla bieźni lewej pierścienia zewnętrznego uzyskano w grupie 3. Dopasowany współczynnik determinacji $R^2 = 0,485$ świadczy o umiarkowanej sile wyjaśniającej modelu, ale najwyższej z analizowanych grup. Ponadto wartość statystyki Fishera - Snedecora osiągnęła wartość $F = 47,123$, a standaryzowany współczynnik regresji $b^* = 0,704$, co wskazuje na silny wpływ zmiennej dzlt na zmienną dzlc . Dla bieźni prawej pierścienia

zewnętrznego również najlepszy wynik uzyskano w grupie 3, gdzie dopasowany współczynnik determinacji $R^2 = 0,809$ i $F = 209,1103$ osiągnęły największą wartość spośród wszystkich analizowanych przypadków. Wartość współczynnika $b^* = 0,902$ potwierdza bardzo silny związek pomiędzy $dzpt$ i $dzpc$. W każdej z grup (dla obu bieżni) uzyskano istotność statystyczną modeli regresji ($p < 0,05$ dla współczynników kierunkowych), co uprawnia do uznania modeli za statystycznie wiarygodne. Wyjątek stanowiły intercepty w modelach dla bieżni prawej, które uzyskały $p > 0,05$. Nie mają one jednak większego znaczenia dla analizy trendu. W analizie reszt dla wszystkich przypadków nie zaobserwowano istotnych odstępstw od rozkładu normalnego. Statystyki Durbin-Watson dla obu analiz mieściły się w przedziale od 1,313 do 2,45, co wskazuje na brak autokorelacji. Spośród wszystkich opracowanych modeli, do stosowania w praktyce zaproponowano modele regresji dla grupy 3 bieżni lewej, jak i prawej pierścienia zewnętrznego. Równania te mają postać:

- bieżnia lewa:

$$dzlc = 0,7686 \cdot dzlt + 15,033$$

- bieżnia prawa:

$$dzpc = 0,9077 \cdot dzpt + 6,741$$

Analiza wykresów Q-Q rozkładu reszt dla wszystkich modeli nie wykazała istotnych odchyłeń od rozkładu normalnego, co potwierdza poprawność zastosowania modelu regresji liniowej w badaniach.

Wyniki przeprowadzonych analiz wskazują, że największy wpływ na rezultaty kolejnych etapów procesu technologicznego, zwłaszcza obróbki cieplnej, ma etap toczenia. Uzyskane rezultaty stanowią podstawę do dalszego modelowania matematycznego dziedziczości wymiarowej oraz optymalizacji procesu technologicznego, szczególnie w kontekście minimalizacji naddatków i zapewnienia stabilności wymiarowej gotowego wyrobu.

7.2. Wnioski końcowe dotyczące dziedziczności technologicznej w procesie wytwarzania piast łożyskowych drugiej generacji

- Analiza literatury oraz doświadczenia przemysłowe pozwoliły na sformułowanie opisu stanu wiedzy w zakresie dziedziczności technologicznej oraz konstrukcji zespolonych piast łożyskowych. Potwierdzono, że zagadnienie dziedziczenia parametrów geometrycznych wciąż pozostaje aktualne. Jest ono opisane w sposób bardzo skomplikowany lub niewystarczający w kontekście nowoczesnych procesów produkcyjnych.
- Zrealizowano główny cel pracy polegający na ustaleniu relacji dziedziczności technologicznej wymiarów wybranych elementów składowych zespolonej piasty łożyskowej drugiej generacji. Badania wykazały, że cechy geometryczne powstałe w wyniku wcześniejszych operacji technologicznych mają istotny wpływ na jakość wyrobu, co potwierdza hipotezę o dziedziczeniu parametrów geometrycznych w ramach realizowanego procesu technologicznego. Dziedziczenie to ujawnia się przede wszystkim na operacjach toczenie – obróbka cieplna.
- Modele statystyczne i matematyczne opracowane w ramach pracy potwierdziły możliwość ilościowego opisu zjawiska dziedziczności technologicznej, a tym samym stworzenia podstaw do racjonalizacji naddatków obróbkowych i kontroli jakości międzyoperacyjnej.
- Wyniki podkreślają konieczność świadomego projektowania kolejności operacji technologicznych, z uwzględnieniem dziedziczności wymiarowej między kluczowymi etapami. W szczególności, silna korelacja pomiędzy toczeniem a obróbką cieplną wskazuje na potrzebę precyzyjnej kontroli parametrów toczenia jako elementu kształtującego końcowe wymiary. Badania wykazały również brak wyraźnych zależności między toczeniem i hartowaniem z odpuszczaniem a szlifowaniem wykończającym. Może to wskazywać na konieczność prowadzenia dalszych, bardziej szczegółowych badań w celu pełnego zrozumienia mechanizmów kształtujących końcowy wymiar wyrobów.
- Uzyskane wyniki jednoznacznie potwierdzają zasadność przyjętej koncepcji badawczej oraz stanowią dowód na postawioną w rozdziale 3.2 tezę badawczą pracy o istnieniu dziedziczności technologicznej, której znajomość i opisanie modelem matematycznym przyczyniają się do optymalizacji procesu technologicznego z jednoczesnym ograniczeniem ilości błędów wykonawczych przy produkcji zespolonych piast łożyskowych, co wpłynie na zmniejszenie kosztów wytwarzania oraz montażu i eksploatacji w pojazdach samochodowych.

- Wartość praktyczna uzyskanych wyników przejawia się w możliwości zastosowania zaproponowanej metodyki w przemyśle łożyskowym, szczególnie przy wytwarzaniu zespołów piast łożyskowych, gdzie kontrola dziedziczenia cech geometrycznych ma kluczowe znaczenie dla zapewnienia trwałości i niezawodności wyrobu.
- Przeprowadzone prace eksperymentalne uzasadniają potrzebę prowadzenia dalszych badań nad dziedzicznością technologiczną, uwzględniających dodatkowo inne czynniki wpływające na ostateczną jakość wyrobu, takie jak deformacje cieplne, naprężenia resztkowe oraz kształt i proporcje wymiarowe.

LITERATURA

- [1] Brinksmeier E., Cammett JT., König W., Leskovar P., Peters J., Tönshoff HK. Residual Stresses — Measurement and Causes in Machining Processes. *CIRP Annals* 2000;31:491–510. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60172-3](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60172-3).
- [2] Kolmakov A., Kheifetz M., Gretskiy N., Prement GB. Technological Control on the Heredity of Operational Quality Parameters. In: Thanapalan K, editor. *Engineering Failure Analysis*, IntechOpen; 2020. <https://doi.org/10.5772/intechopen.89471>.
- [3] Zawada-Michałowska M., Pieśko P., Mrówka-Nowotnik G., Nowotnik A., Legutko S. Effect of the Technological Parameters of Milling on Residual Stress in the Surface Layer of Thin-Walled Plates. *Materials* 2024;17:1193. <https://doi.org/10.3390/ma17051193>.
- [4] Brinksmeier E., Walter A., Sölter J., Nowag L.. Einfluss der Drehbearbeitung auf den Verzug von 100Cr6-Ringen. *HTM Journal of Heat Treatment and Materials* 2003;58:266–71. <https://doi.org/10.1515/htm-2003-580509>.
- [5] Leopold J. Approaches for modelling and simulation of metal machining – a critical review. *Manufacturing Review* 2014;1:7. <https://doi.org/10.1051/mfreview/2014005>.
- [6] Gawlik E., Gil S. Koncepcja systemu oceny technologiczności konstrukcji części maszyn i zespołów maszynowych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej* 201: 239–249.
- [7] Krzemiński-Freda H. Łożyska toczne. Wyd. 2 zm. Warszawa: Państw. Wydaw. Naukowe; 1989.
- [8] Wittbrodt P., Paszek A., Lipski J., Santarek K., Świć A., Stoma M., et al., editors. *Innowacyjne technologie w inżynierii produkcji*. Lublin: Politechnika Lubelska; 2016.
- [9] Kołodziej A. Studium doboru parametrów geometrycznych do oceny skuteczności połączeń w budowie maszyn. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej; 2013.
- [10] Hofmann R., Gröger S. Closed loop geometrical tolerance engineering with measuring data for reverse information processing. *Procedia CIRP* 2019;84:311–5. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.242>.
- [11] Adamczak S. *Pomiary geometryczne powierzchni. Zarysy kształtu, falistość i chropowatość*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne; 2008.

-
- [12] Jakubiec W., Malinowski J. Metrologia wielkości geometrycznych. Wyd. 5. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne; 2007.
 - [13] Adamczak S. Metrologia geometryczna powierzchni technologicznych: zarysy kształtu, falistość, mikro- i nanochropowatość. Wydanie I. Warszawa: PWN; 2023.
 - [14] Piotrowski J., Kostyrko K.. Wzorcowanie aparatury pomiarowej. Wyd. 2. zm. i uaktualnione. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN; 2012.
 - [15] Śladek J. Dokładność pomiarów współrzędnościowych. Kraków: Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki; 2011.
 - [16] Adamczak S., Michalski D., Stępień K. Computer method of profile measurement accuracy evaluation on CMM, Malenovice, Czech Republic; 2002.
 - [17] Maláková S., Sivák S. GPS Application in the Design of Gearboxes. *Acta Mechanica et Automatica* 2022;16:309–15. <https://doi.org/10.2478/ama-2022-0037>.
 - [18] Humienny Z., Kiszka K., Białas S., editors. Metrologia z podstawami specyfikacji geometrii wyrobów (GPS). Wydanie II zmienione. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej; 2021.
 - [19] Humienny Z. Language of geometrical product specifications – a mysterious and unknown whether second native language of each engineer? *Mechanik* 2020;18–23. <https://doi.org/10.17814/mechanik.2020.7.14>.
 - [20] Białas S., Humienny Z. Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS): wykład dla uczelni technicznych. Warszawa [etc.]: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej; 2001.
 - [21] Durakbasa MN.. Geometric product specifications and verification for the analytical description of technical and non-technical structures. Wien: Techn. Univ., Abt. Austauschbau und Messtechnik; 2003.
 - [22] Adamczak S., Gajur M., Kuźmicki K.. Use of geometrical product specifications in the structural design of second generation bearing hub unit. *Transportation Research Procedia* 2023;74:486–92. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.172>.
 - [23] Adamczak S., Kuźmicki K., Gajur M. Use of product geometry specifications in the design of 3rd generation combined bearing hubs. *Transportation Research Procedia* 2023;74:480–5. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.171>.
 - [24] Adamczak S., Gajur M., Kuźmicki K. A Mathematical Model of the Dimensional Chain for a Generation 2 Wheel Hub Unit. *Sv-Jme* 2025; 71:44–50. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2024.1020>.

-
- [25] Adamczak S., Gajur M., Kuźmicki K. Ewolucja rozwiązań konstrukcyjnych węzłów łożyskowych kół pojazdów samochodowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej; 2024.
 - [26] Imou A., Takano T. Tube forming simulation in a generation 4 hub joint. NTN; 2007.
 - [27] Shibata K., Nirimatsu T. Technical trends in axle bearings and the development of related products. n.d.
 - [28] Porzycki J. Modelowanie szlifowania osiowego zewnętrznych powierzchni walcowych. Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej; 2004.
 - [29] Bałamucki J., Żebrowski H., editors. Techniki wytwarzania: obróbka wiórowa, ścierna, erozyjna. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej; 2004.
 - [30] Sokolovskiy A. Научные основы технологии машиностроения. Москва: Машгиз; 1955.
 - [31] Yascheritsyn PI. Качество поверхности и точность деталей при обработке абразивными инструментами. Мінск: Госиздат БССР; 1959.
 - [32] Matalin AA. Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин. Москва: Машгиз; 1956.
 - [33] Yashcheritsyn I. Технологическая наследственность и эксплуатационные свойства шлифованных деталей. Мінск: Наука и техника; 1971.
 - [34] Yascheritsyn I., Ryzhov EV., Averchenkov VI.. Технологическая наследственность в машиностроении. Мінск: Наука и техника; 1977.
 - [35] Zhenquan J., Sun Y., Song S. Numerical simulation of macrosegregation heredity on TC4 titanium alloy ingot by vacuum arc remelting. Metall Res Technol 2023;120:116. <https://doi.org/10.1051/metal/2023012>.
 - [36] Korchunov AG. Ensuring product quality in hardware-manufacturing technologies. Metallurgist 2008;52:574–81. <https://doi.org/10.1007/s11015-009-9095-6>.
 - [37] Blumenstein V., Rakhimyanov K., Heifetz M., Kleptzov A. Problem of technological inheritance in machine engineering. vol. 1698, Tomsk, Russia: 2016. <https://doi.org/10.1063/1.4937831>.
 - [38] Konoplin AY., Baurova NI., Abrakov S. Visualization models of technological heredity in mechanical engineering. vol. 971, IOP Conference Series; 2020, p. 1–8.

-
- [39] Korchunov AG. Quality control of hardware products based on the use of fuzzy models to describe technological inheritance. *Metallurgist* 2009;53:290–5. <https://doi.org/10.1007/s11015-009-9176-6>.
- [40] Kaufmann M., Effenberger I., Huber MF. On the Development of a Surrogate Modelling Toolbox for Virtual Assembly. *Applied Sciences* 2021;11:118. <https://doi.org/10.3390/app11031181>.
- [41] Jawahir IS., Brinksmeier E., M'Saoubi R., Aspinwall DK., Outeiro JC., Meyer D., et al. Surface integrity in material removal processes: Recent advances. *CIRP Annals* 2011;60:603–26. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.05.002>.
- [42] Blumenstein VY. Mechanics of Technological Inheritance. Scientific Proceedings Scientific Technical Conference “Innovations in Engineering” 2015.
- [43] Mahalov MS., Blumenstein VY. Finite Element Surface Layer Inheritable Condition Residual Stresses Model in Surface Plastic Deformation Processes. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng* 2016;126:012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/126/1/012004>.
- [44] Zaleski K., Matuszak J., Zaleski R. *Metrologia warstw wierzchniej*. Lublin: Politechnika Lubelska; 2018.
- [45] Davim JP., editor. *Surface integrity in machining*. New York ; London: Springer; 2009.
- [46] Gawłowski G. Modelowanie wpływu dziedziczności technologicznej na właściwości powierzchni wybranego stopu tytanu. *Politechnika Krakowska*, 2022.
- [47] Malluck JA., Melkote SN. Modeling of Deformations in a Ring Shaped Workpiece Due to Chucking and Cutting Forces. *Manufacturing*, New Orleans, Louisiana, USA: ASME/EDC; 2002, p. 329–35. <https://doi.org/10.1115/IMECE2002-39112>.
- [48] Walter Mf., Stahl Je. The connection between cutting and clamping forces in turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 1994;34:991–1003.
- [49] Olszak W. *Obróbka skrawaniem*. Wydanie II-1 dodruk (PWN). Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN; 2020.
- [50] Malkin S., Guo C., editors. *Grinding technology: theory and application of machining with abrasives*. 2nd ed. Norwood Mass: Books24x7.com; 2005.
- [51] Zmarzły P. Technological Heredity of the Turning Process. *Tehnicki Vjesnik* 2020;27. <https://doi.org/10.17559/TV-20190425150325>.

-
- [52] Zmarzły P. Analysis of Technological Heredity in the Production of Rolling Bearing Rings Made of AISI 52100 Steel Based on Waviness Measurements. *Materials* 2022; 15:3959. <https://doi.org/10.3390/ma15113959>.
- [53] Surm H., Hoffmann F. Influence of clamping conditions on distortion during heating of bearing rings. *Materialwissenschaft Werkst* 2009;40:396–401. <https://doi.org/10.1002/mawe.200900466>.
- [54] Umbrello D., Filice L. Improving surface integrity in orthogonal machining of hardened AISI 52100 steel by modeling white and dark layers formation. *CIRP Annals* 2009;58:73–6. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.106>.
- [55] Ramesh A., Melkote SN. Modeling of white layer formation under thermally dominant conditions in orthogonal machining of hardened AISI 52100 steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2008;48:402–14. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.09.007>.
- [56] Moravčíková J., Moravčík R., Palcut M. Effect of Heat Treatment on the Resulting Dimensional Characteristics of the C45 Carbon Steel after Turning. *Metals* 2022;12:1899. <https://doi.org/10.3390/met12111899>.
- [57] Nowag L., Sölter J., Brinksmeier E. Influence of turning parameters on distortion of bearing rings. *Prod Eng Res Devel* 2007;1:135–9. <https://doi.org/10.1007/s11740-007-0009-9>.
- [58] Duong Van Dao., et al. Optimization of High-Speed Cutting Parameters Oriented Improves the Dimensional Accuracy of Alloy Steel SKD11. *International Journal of Engineering Research & Technology* 2021.
- [59] Bien DX., Van Duong D., Lap DT., Doan LC., Loc NT., Van Nguy D. Multi Objective Optimization of Dimension Accuracy and Surface Roughness in High-Speed Finishing Milling for the Hard Steel Alloy After Heat-Treatment. In: Khang NV., Hoang NQ., Ceccarelli M., editors. *Advances in Asian Mechanism and Machine Science*, Cham: Springer International Publishing; 2022, p. 899–909.
- [60] Sureshkumar B., Navaneethakrishnan G., Vidyasagar S., Palanisamy R., Choudhury S. Performance analysis of turning operation parameters empirically on Delrin. *Applied Surface Science Advances* 2024;24. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2024.100652>.
- [61] Thuvander A. Out of roundness distortion of bearing rings owing to internal stresses from tube bending. *Materials Science and Technology* 2002; 8:312–8. <https://doi.org/10.1179/026708301225000770>.
- [62] Rudskoi AI., Baurova NI. Technological Heredity during the Production and Operation of Structural Materials. *Russ Metall* 2019;2019:1378–83.

- <https://doi.org/10.1134/S0036029519130317>.
- [63] Silveira ACDF., Bevilaqua WL., Dias VW., De Castro PJ., Epp J., Rocha ADS. Influence of Hot Forging Parameters on a Low Carbon Continuous Cooling Bainitic Steel Microstructure. *Metals* 2020; 10:601. <https://doi.org/10.3390/met10050601>.
- [64] Hałas W., Taranen V., Swic A., Taranenko G. Designing Structure of Operations of Technological Process of Machining Shafts in CIM Considering the Technological Inheritance. *IFAC Proceedings Volumes* 2008;41:181–6. <https://doi.org/10.3182/20081205-2-CL-4009.00033>.
- [65] Fyodorov VP., Averchenkov VI., Nagorkin MN.. Controlling the Parameters of the Component Quality Using Program Means While Performing Mechanical Machining. *Procedia Engineering* 2016;150:899–905. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.047>.
- [66] Кузін ОА., Кусий ЯМ., Топільницький ВГ.. Influence of technological heredity on reliability parameters of products. *TAPR* 2015;1:15. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.37678>.
- [67] Baurova NI., Zorin VA., Prikhodko VM. Technological heredity and identification of technological processes. *Polym Sci Ser D* 2015;8:219–22. <https://doi.org/10.1134/S199542121503003X>.
- [68] Kumar Das A. Technological heredity in spur gear manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology* 1999;91:66–74. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00432-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00432-4).
- [69] Wang X., Li W., Ma T., Yang X., Vairis A., Tao J. Microstructural heredity and its effect on mechanical properties of linear friction welded Ti-6.5, Al-3.5, Mo-1.5, Zr-0.3, Si alloy joints. *Materials Characterization* 2020;168:110540. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110540>.
- [70] Baurova NI., Konoplin AYU. Effect of the Technological Heredity Factors on the Quality Indicators of Adhesive and Weld-Bonded Joints Performed under Various Temperature Conditions. *Russian Metallurgy (Metally)* 2020;2020:1585–9. <https://doi.org/10.1134/S0036029520130054>.
- [71] Vicen M., Fabian P., Bronček J., Drbúl M. How the Heat Treatment Influences Changes of Dimensions of Structural Components. *Applied Engineering Letters* 2018;3:47–51. <https://doi.org/10.18485/aeletters.2018.3.2.1>.

-
- [72] Sölter J., Nowag L., Rocha A., Walter A., Brinksmeier E., Hirsch T. Einfluss von Maschinenstellgrößen auf die Eigenspannungszustände beim Drehen von Wälzlagering. *HTM Journal of Heat Treatment and Materials* 2004;59:169–75.
<https://doi.org/10.3139/105.100286>.
- [73] Kuritsyn DN., Siluyanov MV., Kuritsyna VV. A Model of Technological Inheritance for Methods of Technological Decision - Making in Manufacturing Operations in the Engine Industry. *Russ Engin Res* 2024;44:1170–5.
<https://doi.org/10.3103/S1068798X24701715>.
- [74] Kusyi Y.. Technological Inheritability of Product Material Using the Criterion of Technological Damageability. In: Ivanov V., Trojanowska J., Pavlenko I., Zajac J., Peraković D., editors. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV*, Cham: Springer International Publishing; 2021, p. 52–61.
- [75] Lachmayer R., Mozgova I., Reimche W., Colditz F., Mroz G., Gottwald P., Technical Inheritance: A Concept to Adapt the Evolution of Nature to Product Engineering. *Procedia Technology* 2014;15:178–87.
<https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.09.070>.
- [76] Medelyaev IA. Technological inheritance in vehicles' frictional systems. *Russ Engin Res* 2013;33:185–7.
<https://doi.org/10.3103/S1068798X13040138>.
- [77] Grzesik W. Prediction of the Functional Performance of Machined Components Based on Surface Topography: State of the Art. *Journal of Materials Engineering and Performance* 2016;25:4460–8.
<https://doi.org/10.1007/s11665-016-2293-z>.
- [78] Fjeldbo SK., Li Y., Marthinsen K., Furu T. Through-process sensitivity analysis on the effect of process variables on strength in extruded Al–Mg–Si alloys. *Journal of Materials Processing Technology* 2012;212:171–80.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.08.020>.
- [79] Hu L., Zha J., Zhang H., Chen Y. Surface integrity and fatigue life test of products under coupling grinding force and temperature. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2023;129:1035–52.
<https://doi.org/10.1007/s00170-023-12243-x>.
- [80] Ren Z., Li B., Zhou Q., Hou R., Zhang Y. Optimization of high-speed grinding parameters for anti-fatigue performance of 20CrMnTi steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2022; 122:3565–81.
<https://doi.org/10.1007/s00170-022-10041-5>.

-
- [81] Jermolajev S., Epp J., Heinzel C., Brinksmeier E. Material Modifications Caused by Thermal and Mechanical Load During Grinding. *Procedia CIRP* 2016;45:43–6. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.159>.
- [82] Jouini N., Revel P., Thoquenne G. Influence of surface integrity on fatigue life of bearing rings finished by precision hard turning and grinding. *Journal of Manufacturing Processes* 2020;57:444–51. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.07.006>.
- [83] Shchedrin AV., Minyazeva LKh., Bekaev AA., Chikhacheva NYu., Burlakova TA. Influence of Tool Microgeometry on Technological Inheritance in Hybrid Hole Burnishing. *Russ Engin Res* 2023;43:1234–9. <https://doi.org/10.3103/S1068798X23100271>.
- [84] Chikhacheva NYu., Shchedrin AV., Bekaev AA., Burlakova TA. Influence of the Tool's Surface Microgeometry and the Lubricant Composition on Hole Precision in Hybrid Burnishing. *Russ Engin Res* 2022;42:781–6. <https://doi.org/10.3103/S1068798X2208010X>.
- [85] Goncharenko VI., Oleshko VS. Energy Aspects of Technological Inheritance of Aircraft Metal Parts. *Russ Aeronaut* 2020;63:323–9. <https://doi.org/10.3103/s1068799820020191>.
- [86] Biren Prasad. *Concurrent Engineering Fundamentals, Vol I: Integrated Product and Process Organization*. Prentice-Hall international series in industrial and systems engineering.; 1996. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2613.0005>.
- [87] Delchambre A., Trabelsi A. Assessment on Tolerance Representation and Tolerance Analysis in Assemblies. *Concurrent Engineering: Research and Applications* 2000;8:244–62. <https://doi.org/10.1106/HN8W-XEJD-TGMD-VAFD>.
- [88] Singh PK., Jain PK., Jain SC. Important issues in tolerance design of mechanical assemblies. Part 1: Tolerance analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 2009;223:1225–47. <https://doi.org/10.1243/09544054JEM1304A>.
- [89] Singh PK., Jain PK., Jain SC. Important issues in tolerance design of mechanical assemblies. Part 2: Tolerance synthesis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 2009;223:1249–87. <https://doi.org/10.1243/09544054JEM1304B>.
- [90] Tsung C-K. Optimizing the Tolerance for the Products with Multi-Dimensional Chains via Simulated Annealing. *Symmetry* 2021;13:1780. <https://doi.org/10.3390/sym13101780>.

-
- [91] Ramnath S., Haghighi P., Chitale A., Davidson JK., Shah JJ. Comparative Study of Tolerance Analysis Methods Applied to a Complex Assembly. *Procedia CIRP* 2018;75:208–13. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.04.073>.
- [92] Haghighi P., Ramnath S., Chitale A., Davidson J., Shah J. Automated Tolerance Analysis of Mechanical Assemblies from a CAD Model with PMI. *CAD&A* 2019;17:249–73. <https://doi.org/10.14733/cadaps.2020.249-273>.
- [93] Sukiennik E., Arendarski J. Zagadnienia doboru tolerancji Grup Selekcyjnych przy kompletowaniu łożysk kulkowych skośnych dwurzędowych, Kielce: OW NOT; 1985.
- [94] Jezierski J. Analiza tolerancji i niedokładności pomiarów w budowie maszyn. Wyd. 3 zm. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne; 1994.
- [95] Białas S. Metrologia techniczna z podstawami tolerowania wielkości geometrycznych dla mechaników. Wyd. 2 popr. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej; 1999.
- [96] Jezierski J. Analiza tolerancji i zamienności części maszyn. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo Techniczne; 1973.
- [97] Humienny Z., Osanna PH., Weckenmann A., Blunt L., Jakubiec W. Specyfikacje Geometrii Wyrobów (GPS)- podręcznik europejski. Wyd. I. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne; 2004.
- [98] Meller E., Preihs J. Ćwiczenia z analizy tolerancji maszyn. Gdańsk: Politechnika Gdańska; 2006.
- [99] Sałaciński T. SPC - statystyczne sterowanie procesami produkcji. Wydanie I. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej; 2009.
- [100] Kowalski MS., Rączka M., Tabor A., editors. Metody i narzędzia jakości, normalizacja, akredytacja, certyfikacja: praca zbiorowa. Kraków: Centrum Szkolenia i Organizacji Systemów Jakości Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki; 2004.
- [101] Kutner MH., editor. Applied linear statistical models. 5. ed. Boston, Mass.: McGraw-Hill Irwin; 2005.
- [102] Shapiro SS., Wilk MB. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* 1965;52:591–611. <https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>.
- [103] Sheskin DJ. Handbook of parametric and nonparametric statistical procedures. Fifth edition. Boca Raton London New York: CRC Press, Taylor & Francis Group; 2011. <https://doi.org/10.1201/9780429186196>.

- [104] Akoglu H. User's guide to correlation coefficients. *Turkish Journal of Emergency Medicine* 2018;18:91–3.
<https://doi.org/10.1016/j.tjem.2018.08.001>.
- [105] Ręklewski M. *Statystyka opisowa: teoria i przykłady*. Włocławek: Wydawnictwo Państwowej Uczelni Zawodowej we Włocławku; 2020.
- [106] Rencher AC. *Methods of multivariate analysis*. 2nd ed. New York: Wiley; 2002.
- [107] Liu C., Bathke AC., Harrar SW. A nonparametric version of Wilks' Lambda — Asymptotic results and small sample approximations. *Statistics & Probability Letters* 2011;81:1502–6.
<https://doi.org/10.1016/j.spl.2011.04.012>.
- [108] Kot SM., Jakubowski J., Sokołowski A. *Statystyka*. Wyd. 2. popr. Warszawa: Difin; 2007.
- [109] Józwiak J., Podgórski J. *Statystyka od podstaw*. Wyd. 7. Warszawa: Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne; 2012.
- [110] Łuszniewicz A., Słaby T. *Statystyka z pakietem komputerowym Statistica PL: teoria i zastosowania*. Wyd. 3 zm. Warszawa: Wydawnictwo C. H. Beck; 2008.

NORMY

- [N1] EN ISO 8015:2012 Specyfikacja geometrii wyrobów (GPS). Podstawy. Pojęcia, zasady i reguły.
- [N2] PN – EN ISO 14405-1:2016 Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Tolerowanie wymiarów. Część 1: Wymiary liniowe wewnętrzne i zewnętrzne.
- [N3] EN ISO 1101:2017 Geometrical product specification (GPS) – Geometrical tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out.
- [N4] ISO 492:2014 Rolling bearings-Radial bearings-Dimensional and geometrical tolerances.
- [N5] PN-EN ISO 286-1: 2011. Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Układ kodowania ISO tolerancji wymiarów liniowych. Część 1: Podstawy tolerancji, odchylek i pasowań.
- [N6] PN-EN ISO 683-17:2024-04 Stale do obróbki cieplnej, stale stopowe i stale automatowe - Część 17: Stale na łożyska kulkowe i wałeczkowe
- [N7] EN ISO 683-1: 2018 Heat-treatable steels, alloy steels and free - cutting steels - Part 1: Non - alloy steels for quenching and tempering

STRONY INTERNETOWE

- [S1] https://sztos-it.com/wzory_statystyczne_analiza_testem_levenea, (dostęp 5.05.2025)

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 1. Przykład rozwiązania konstrukcyjnego łożyskowania piasty koła jezdnego za pomocą dwóch łożysk stożkowych [24].....	14
Rys. 2. Łożysko kulkowe skośne dwurzędowe, jako łożysko piasty pierwszej generacji. 1 - pierścień zewnętrzny, 2 - pierścień wewnętrzny, 3 – uszczelka [24]	14
Rys. 3. Łożysko stożkowe dwurzędowe, jako łożysko piasty pierwszej generacji. 1 - pierścień zewnętrzny, 2 - pierścień wewnętrzny, 3 – zapinka [24]	14
Rys. 4. Łożysko piasty drugiej generacji z wykorzystaniem konstrukcji łożyska kulkowego. 1 – pierścień zewnętrzny z kołnierzem, 2 – pierścienie wewnętrzne, 3 – uszczelka	15
Rys. 5. Łożysko piasty drugiej generacji z wykorzystaniem łożyska stożkowego 1 – pierścień zewnętrzny kołnierzowy, 2 – pierścienie wewnętrzne, 3 – uszczelka	15
Rys. 6. Łożysko piasty trzeciej generacji z wykorzystaniem konstrukcji łożyska kulkowego. 1 – pierścień zewnętrzny kołnierzowy, 2 – pierścień wewnętrzny kołnierzowy, 3 – typowy łożyskowy pierścień wewnętrzny	16
Rys. 7. Łożysko piasty trzeciej generacji z wykorzystaniem konstrukcji łożyska stożkowego. 1 – pierścień zewnętrzny kołnierzowy, 2 – pierścień wewnętrzny kołnierzowy, 3 – typowy łożyskowy pierścień wewnętrzny	16
Rys. 8. Łożysko piasty trzeciej generacji z wykonanym uzębieniem na czole kołnierzowego pierścienia wewnętrznego. Zdjęcie po prawej przedstawia kielich półosi. 1 – kołnierzowy pierścień zewnętrzny, 2 – kołnierzowy pierścień wewnętrzny z wieńcem zębatym, 3 – kielich półosi z wieńcem zębatym [24] ...	17
Rys. 9. Łożysko piasty czwartej generacji - kombinacja łożyska piasty trzeciej generacji z przegubem homokinetycznym [26,27]	17
Rys. 10. Zespolona piasta łożyskowa drugiej generacji z wykorzystaniem konstrukcji łożyska kulkowego skośnego. 1- pierścień zewnętrzny kołnierzowy, 2 – pierścień wewnętrzny lewy, 3 – pierścień wewnętrzny prawy, 4 – kulka, 5 – koszyk lewy, 6 – koszyk prawy, 7 – uszczelka, 8 – encoder	36
Rys. 11. Uproszczona konstrukcja zespołu piasty koła z łożyskiem kulkowym skośnym dwurzędowym - źródło [24]	38
Rys. 12. Porównanie wartości tolerancji wyliczonych przy zastosowaniu różnych metod	45
Rys. 13. Odkuwki pierścieni a) zewnętrznego i b) pierścieni wewnętrznych.....	48
Rys. 14. Automat tokarski Mazak: a) Multiplex - 6200 – II, b) QTS - 350.....	49
Rys. 15. Pierścienie po toczeniu a) wewnętrzne, b) zewnętrzne.....	49

Rys. 16. a) pierścień zewnętrzny z otworami w uchwycie b) centrum frezarskie Mazak Variaxis i-500.....	50
Rys. 17. Linia do hartowania i odpuszczania f. Wienstroth.....	50
Rys. 18. a) linia do hartowania indukcyjnego, b) wygląd warstwy zahartowanej	51
Rys. 19. Szlifierki a) RIV 500, b) MC-50.....	52
Rys. 20. a) szlifierka PGE-150R/M, b), pierścień lewy po szlifowaniu profilu bieżni.....	52
Rys. 21. a) szlifierka RTFO-140CM, b) dogładzarka KM-85Z2A.....	53
Rys. 22. a) szlifierka SIV-4EM, b) szlifierka SIW-4CBD.....	53
Rys. 23. Widok pierścienia zewnętrznego po obr. szlifierskiej a) od strony pierścienia lewego wewnętrznego, b) od strony pierścienia wewnętrznego prawego.....	54
Rys. 24. Zmontowana piasta a) widok od strony lewego pierścienia wewnętrznego, b) widok od strony prawego pierścienia wewnętrznego.....	54
Rys. 25. Wynik pomiaru profilu bieżni pierścienia wewnętrznego lewego.....	58
Rys. 26. Wizualizacja wyników średnicy po toczeniu pierścienia wewnętrznego lewego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym.....	61
Rys. 27. Wizualizacja wyników średnicy po obróbce cieplnej pierścienia wewnętrznego lewego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym	62
Rys. 28. Wizualizacja wyników średnicy po szlifowaniu pierścienia wewnętrznego lewego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym	62
Rys. 29. Wizualizacja wyników średnicy po toczeniu pierścienia wewnętrznego lewego, posuw = 0,1 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu normalności	63
Rys. 30. Wizualizacja wyników średnicy po obróbce cieplnej pierścienia wewnętrznego lewego, posuw = 0,1 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym	64
Rys. 31. Wizualizacja wyników średnicy po szlifowaniu pierścienia wewnętrznego lewego, posuw = 0,1 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym	64
Rys. 32. Wizualizacja wyników średnicy po toczeniu pierścienia wewnętrznego lewego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 0,4$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym.....	65

Rys. 33. Wizualizacja wyników średnicy po obróbce cieplnej pierścienia wewnętrznego lewego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 0,4$ mm,	
a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym	66
Rys. 34. Wizualizacja wyników średnicy po szlifowaniu pierścienia wewnętrznego lewego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 0,4$ mm,	
a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym	66
Rys. 35. Wizualizacja wyników średnicy po toczeniu pierścienia wewnętrznego prawego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki	
testu zgodności z rozkładem normalnym.....	68
Rys. 36. Wizualizacja wyników średnicy po obróbce cieplnej pierścienia wewnętrznego prawego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm,	
a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym	69
Rys. 37. Wizualizacja wyników średnicy po szlifowaniu pierścienia wewnętrznego prawego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm,	
a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym	69
Rys. 38. Wizualizacja wyników średnicy po toczeniu pierścienia wewnętrznego prawego, posuw = 0,1 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki	
testu zgodności z rozkładem normalnym.....	70
Rys. 39. Wizualizacja wyników średnicy po obróbce cieplnej pierścienia wewnętrznego prawego, posuw = 0,1 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm,	
a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym	71
Rys. 40. Wizualizacja wyników średnicy po szlifowaniu pierścienia wewnętrznego prawego, posuw = 0,1 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm,	
a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym	71
Rys. 41. Wizualizacja wyników średnicy po toczeniu pierścienia wewnętrznego prawego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 0,4$ mm, a) histogram, b) wyniki	
testu zgodności z rozkładem normalnym.....	72
Rys. 42. Wizualizacja wyników średnicy po obróbce cieplnej pierścienia wewnętrznego prawego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 0,4$ mm,	
a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym	73
Rys. 43. Wizualizacja wyników średnicy po szlifowaniu pierścienia wewnętrznego prawego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 0,4$ mm,	
a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym	73
Rys. 44. Wizualizacja wyników średnicy bieżni lewej pierścienia zewnętrznego po toczeniu, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b)	
wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym.....	76

Rys. 45. Wizualizacja wyników średnicy bieżni lewej pierścienia zewnętrznego po obr. cieplnej, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym.....	76
Rys. 46. Wizualizacja wyników średnicy bieżni lewej pierścienia zewnętrznego po szlifowaniu, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym.....	77
Rys. 47. Wizualizacja wyników średnicy bieżni lewej pierścienia zewnętrznego po toczeniu, posuw = 0,1 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym.....	78
Rys. 48. Wizualizacja wyników średnicy bieżni lewej pierścienia zewnętrznego po obr. cieplnej, posuw = 0,1 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym.....	78
Rys. 49. Wizualizacja wyników średnicy bieżni lewej pierścienia zewnętrznego po szlifowaniu, posuw = 0,1 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym.....	79
Rys. 50. Wizualizacja wyników średnicy bieżni lewej pierścienia zewnętrznego po toczeniu, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 0,4$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym.....	80
Rys. 51. Wizualizacja wyników średnicy bieżni lewej pierścienia zewnętrznego po obr. cieplnej, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 0,4$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym.....	80
Rys. 52. Wizualizacja wyników średnicy bieżni lewej pierścienia zewnętrznego po szlifowaniu, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 0,4$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym.....	81
Rys. 53. Wizualizacja wyników średnicy bieżni prawej pierścienia zewnętrznego po toczeniu, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym.....	82
Rys. 54. Wizualizacja wyników średnicy bieżni prawej pierścienia zewnętrznego po obr. cieplnej, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym.....	82
Rys. 55. Wizualizacja wyników średnicy bieżni prawej pierścienia zewnętrznego po szlifowaniu, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym.....	83
Rys. 56. Wizualizacja wyników średnicy bieżni prawej pierścienia zewnętrznego po toczeniu, posuw = 0,1 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym.....	84

Rys. 57. Wizualizacja wyników średnicy bieżni prawej pierścienia zewnętrznego po obr. cieplnej, posuw = 0,1 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym.....	84
Rys. 58. Wizualizacja wyników średnicy bieżni prawej pierścienia zewnętrznego po szlifowaniu, posuw = 0,1 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym.....	85
Rys. 59. Wizualizacja wyników średnicy bieżni prawej pierścienia zewnętrznego po toczeniu, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 0,4$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym.....	86
Rys. 60. Wizualizacja wyników średnicy bieżni prawej pierścienia zewnętrznego po obr. cieplnej, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 0,4$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym.....	86
Rys. 61. Wizualizacja wyników średnicy bieżni prawej pierścienia zewnętrznego po szlifowaniu, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 0,4$ mm, a) histogram, b) wyniki testu zgodności z rozkładem normalnym.....	87
Rys. 62. Wykresy oceny rozkładu reszt uzyskanych w analizie wpływu parametru dwlt na wartość dwlc lewego pierścienia wewnętrznego w podziale na grupy: a) grupa 1, b) grupa 2, c) grupa 3	104
Rys. 63. Wykresy oceny rozkładu reszt uzyskanych w analizie wpływu parametru dwpt na wartość dwpc prawego pierścienia wewnętrznego w podziale na grupy: a) grupa 1, b) grupa 2, c) grupa 3.....	107
Rys. 64. Wykresy oceny rozkładu reszt uzyskanych w analizie wpływu parametru dzlt na wartość dzlc bieżni lewej pierścienia zewnętrznego w grupach: a) grupa 1, b) grupa 2, c) grupa 3.....	110
Rys. 65 . Wykresy oceny rozkładu reszt uzyskanych w analizie wpływu parametru dzpt na wartość dzpc bieżni prawej pierścienia zewnętrznego w grupach: a) grupa 1, b) grupa 2, c) grupa 3.....	113

SPIS TABEL

Tabela 1. Wartości nominalne i tolerancje określone dla wymiarów podanych na rys. 11 - źródło [24]	40
Tabela 2. Podsumowanie wyników dla trzech metod obliczania tolerancji dla zamienności częściowej [24]	45
Tabela 3. Główne etapy procesu technologicznego.....	47
Tabela 4. Parametry technologiczne obróbki tokarskiej.....	49
Tabela 5. Zestawienie wyników rozkładu twardości	51
Tabela 6. Wartości C_m i C_{mk} dla obrabiarek kształtujących kluczowe charakterystyki.....	56
Tabela 7. Grupy próbek	60
Tabela 8. Analiza opisowa dla wyników średnicy bieżni pierścienia wewnętrznego lewego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm	61
Tabela 9. Analiza opisowa dla wyników średnicy bieżni pierścienia wewnętrznego lewego, posuw = 0,1 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm	63
Tabela 10. Analiza opisowa dla wyników średnicy bieżni pierścienia wewnętrznego lewego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 0,4$ mm	65
Tabela 11. Analiza porównawcza tolerancji uzyskanych wyników dla pierścienia lewego.....	67
Tabela 12. Analiza opisowa dla wyników średnicy bieżni pierścienia wewnętrznego prawego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm	68
Tabela 13. Analiza opisowa dla wyników średnicy bieżni pierścienia wewnętrznego prawego, posuw = 0,1 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm	70
Tabela 14. Analiza opisowa dla wyników średnicy bieżni pierścienia wewnętrznego prawego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 0,4$ mm	72
Tabela 15. Analiza porównawcza tolerancji uzyskanych wyników dla pierścienia prawego.....	74
Tabela 16. Analiza opisowa dla wyników średnicy bieżni lewej pierścienia zewnętrznego posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm.....	75
Tabela 17. Analiza opisowa dla wyników średnicy bieżni lewej pierścienia zewnętrznego, posuw = 0,1 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm.....	77
Tabela 18. Analiza opisowa dla wyników średnicy bieżni lewej pierścienia zewnętrznego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 0,4$ mm.....	79
Tabela 19. Analiza opisowa dla wyników średnicy bieżni prawej pierścienia zewnętrznego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm.....	81

Tabela 20. Analiza opisowa dla wyników średnicy bieżni prawej pierścienia zewnętrznego, posuw = 0,1 mm/obr, promień $r = 1,2$ mm.....	83
Tabela 21. Analiza opisowa dla wyników średnicy bieżni prawej pierścienia zewnętrznego, posuw = 0,25 mm/obr, promień $r = 0,4$ mm.....	85
Tabela 22. Analiza porównawcza tolerancji uzyskanych wyników dla pierścienia zewnętrznego	87
Tabela 23. Wartości p badania rozkładu normalnego dla zmiennych zależnych.	89
Tabela 24. Zestawienie współczynników korelacji punktowo dwuseryjnej Pearsona	90
Tabela 25. Zestawienie wyników dla testów Wilk's Lambda i Levene'a	94
Tabela 26. Zestawienie współczynników korelacji Pearsona dla pierścienia wewnętrznego lewego.....	96
Tabela 27. Zestawienie współczynników korelacji Pearsona dla pierścienia wewnętrznego prawego	97
Tabela 28. Zestawienie współczynników korelacji Pearsona dla pierścienia zewnętrznego	98
Tabela 29. Zestawienie sił korelacji istotnych statystycznie dla pierścienia zewnętrznego	99
Tabela 30. Zestawienie statystyk analizy regresji liniowej dla pierścienia wewnętrznego lewego – wpływ dwłt na dwlc	103
Tabela 31. Zestawienie statystyk analizy regresji liniowej dla pierścienia wewnętrznego prawego – wpływ dwpt na dwpc	106
Tabela 32. Zestawienie statystyk analizy regresji liniowej dla pierścienia zewnętrznego – bieżnia lewa – wpływ dzłt na dzlc	109
Tabela 33. Zestawienie statystyk analizy regresji liniowej dla pierścienia zewnętrznego – bieżnia prawa – wpływ dzpt na dzpc	112
Tabela 34. Zestawienie wyników pomiarów dla pierścienia wewnętrznego lewego.....	148
Tabela 35. Zestawienie wyników pomiarów dla pierścienia wewnętrznego prawego.....	152
Tabela 36. Zestawienie wyników pomiarów dla pierścienia zewnętrznego	157

STRESZCZENIE

Wdrożenie koncepcji ustalenia dziedziczności technologicznej procesu wytwarzania drugiej generacji zespolonych piast samochodowych z łożyskiem tocznym z wykorzystaniem nowoczesnych systemów pomiarowych

Niniejsza praca powstała jako potrzeba rozwiązania problemów FŁT Kraśnik S.A. związanych z wdrożeniem produkcji zespolonych piast łożyskowych. W ramach prac eksperymentalnych uruchomiono produkcję piasty łożyskowej drugiej generacji opartej na konstrukcji dwubieżniowego łożyska kulowego skośnego. Głównym celem rozprawy doktorskiej było opracowanie koncepcji ustalenia dziedziczności technologicznej procesu wytwarzania pierścieni łożyskowych na podstawie analizy statystycznej uzyskanych wyników pomiarów.

We wstępie pracy wyjaśniono pojęcie **dziedziczności technologicznej** w inżynierii mechanicznej jako zjawiska przenoszenia i kumulowania wpływu wcześniejszych operacji technologicznych na właściwości geometryczne i materiałowe wykonywanych części maszyn w kolejnych etapach procesu technologicznego.

Realizacja celu głównego została poprzedzona opisem aktualnego stanu wiedzy na temat zespolonych piast łożyskowych. Dokonano przeglądu literatury podkreślając kluczowe znaczenie zjawiska dziedziczności technologicznej w inżynierii produkcji precyzyjnych wyrobów. Wskazuje on na konieczność całościowego podejścia do projektowania procesów technologicznych łącząc wiedzę o materiałach, ich mikrostrukturze, naprężeniach, parametrach obróbki wraz z matematycznym modelowaniem. Opracowane skomplikowane modele matematyczne, oparte na rachunkach macierzowych i różniczkowych, nie są stosowane w warunkach przemysłowych. Dlatego poszukuje się prostych rozwiązań pozwalających na opracowywanie procesów produkcyjnych z uwzględnieniem dziedziczności technologicznej.

Cel główny pracy, teza badawcza i sposób realizacji pracy doktorskiej poprzedził rozdział, w którym przeprowadzono analizę konstrukcji piasty łożyskowej drugiej generacji oraz opracowano model matematyczny równania łańcucha wymiarowego dla luzu osiowego oraz jego równania tolerancji. Przeprowadzono weryfikację modelu matematycznego poprzez analizę i syntezę łańcucha wymiarowego oraz weryfikację tolerancji przyjętych przez konstruktora. Dokonano wyboru elementów składowych piasty do wykonania eksperymentów, przyjęto licznosci próbek, wytypowano obserwowane zmienne ilościowe i określono parametry technologiczne jako zmienne niezależne dla operacji toczenia oraz wykonano badania

zdatności maszyn pod kątem zapewnienia wymaganych wskaźników dla kluczowych charakterystyk. Wyniki pomiarów, wykonanych po każdej operacji procesu technologicznego, poddano analizie statystycznej z wykorzystaniem korelacji wielowymiarowej i regresji. Ustalono, które wymiary i po jakich operacjach charakteryzują się wrażliwością na wcześniejsze operacje wykonując analizę opisową i badania normalnego rozkładu średnic bieżni z wykorzystaniem testu Shapiro-Wilka. Zbadano korelacje pomiędzy zmiennymi zależnymi a niezależnymi za pomocą testu korelacji punktowo-dwuseryjnej Pearsona oraz przeprowadzono analizę jednorodności wariancji przy użyciu testu Levene'a. Wykorzystując test Pearsona przeanalizowano również potencjalne zależności kaskadowe. Dla bieżni pierścienia zewnętrznego wykonano badanie na występowanie korelacji krzyżowej. Zaobserwowano silne i umiarkowane korelacje pomiędzy średnicami bieżni po toczeniu a średnicami po obróbce cieplnej dla wszystkich typów pierścieni. Obliczono współczynnik determinacji oraz statystykę Fishera-Snedecora. Zbadano wykresy normalności reszt, obliczono intercept, współczynnik regresji b , standaryzowany współczynnik regresji b^* , oraz poziomy istotności p dla oceny statystycznej istotności poszczególnych parametrów. Opracowano modele dziedziczności technologicznej dla średnic bieżni łożyskowych po hartowaniu z odpuszczaniem zespolonej piasty łożyskowej II generacji z wykorzystaniem konstrukcji łożyska kulowego skośnego.

Wyniki badań i opracowane modele matematyczne równania dziedziczności technologicznej posłużyły do opracowania wniosków końcowych zestawionych w rozdziale siódmym pracy. Zawierają one również krótkie podsumowanie wykonanego przeglądu literatury. Podkreślono zrealizowanie głównego celu pracy polegającego na ustaleniu relacji dziedziczności technologicznej wymiarów wybranych elementów składowych zespolonej piasty łożyskowej drugiej generacji. Badania wykazały, że cechy geometryczne powstałe w wyniku wcześniejszych operacji technologicznych mają istotny wpływ na jakość wyrobu. Potwierdzają zasadność przyjętej koncepcji badawczej oraz stanowią dowód na postawioną tezę badawczą pracy o istnieniu dziedziczności technologicznej. Podkreślono również wartość praktyczną uzyskanych rezultatów badań z możliwością zastosowania opracowanej metodyki w przemyśle łożyskowym. Zaproponowano kierunki prowadzenia dalszych badań nad dziedzicznością technologiczną, obejmujące dodatkowe czynniki wpływające na ostateczną jakość wyrobu, takie jak deformacje cieplne, naprężenia resztkowe oraz kształt i proporcje wymiarowe.

SUMMARY

This work was created as a result of the need to solve the problems of FŁT Kraśnik S.A. related to the implementation of the production of unitized bearing hubs. As part of the experimental work carried out, the production of a second-generation bearing hub based on a double-row angular contact ball bearing design was launched. The main objective of the doctoral thesis was to develop a concept for determining the technological heritage of the bearing ring production process based on statistical analysis of the measurement results obtained.

The achievement of the main objective was preceded by a description of the current state of knowledge on composite bearing hubs. A review of the literature was conducted, emphasising the key importance of the phenomenon of technological inheritance in the engineering of precision products. It points to the need for a comprehensive approach to the design of technological processes, combining knowledge of materials, their microstructure, stresses and machining parameters with mathematical modelling. The complex mathematical models developed, based on matrix and differential calculations, are not used in industrial conditions. Therefore, simple solutions are sought that allow the development of production processes taking into account technological inheritance.

The main objective of the work, the research thesis and the method of implementation of the doctoral thesis preceded the chapter in which an analysis of the second-generation bearing hub design was carried out and a mathematical model of the dimensional chain equation for axial clearance and its tolerance equation was developed. The mathematical model was verified by analysing and synthesising the dimensional chain and verifying the tolerances adopted by the designer. The hub components for the experiments were selected, the number of samples was determined, the observed quantitative variables were selected and the technological parameters were defined as independent variables for the turning operation. The suitability of the machines was tested in terms of ensuring the required indicators for key characteristics. The results of the measurements, taken after each operation of the technological process, were subjected to statistical analysis using multidimensional correlation and regression. It was determined which dimensions and after which operations are sensitive to previous operations by performing a descriptive analysis and testing the normal distribution of raceway diameters using the Shapiro-Wilk test. Correlations between dependent and independent variables were examined using Pearson's two-serial point correlation test, and an analysis of variance homogeneity was performed using Levene's test. Pearson's test was also used

to analyse potential cascade relationships. A cross-correlation test was performed for the outer ring raceway. Strong and moderate correlations were observed between the diameters of the raceways after rolling and the diameters after heat treatment for all ring types. The coefficient of determination and Fisher-Snedecor statistics were calculated. The normality graphs of the residuals were examined, and the intercept, regression coefficient b , standardised regression coefficient b^* , and significance levels p were calculated for the statistical evaluation of the significance of individual parameters. Technological heritability models were developed for the diameters of bearing races after quenching and tempering of a unitized second-generation bearing hub using an angular contact ball bearing design.

The research results and developed mathematical models of technological inheritance equations were used to draw up the final conclusions presented in chapter seven of the thesis. They also include a brief summary of the literature review. The achievement of the main objective of the thesis, which was to determine the technological inheritance relationship of the dimensions of selected components of a second-generation unitized bearing hub, was emphasised. The research showed that the geometric features resulting from previous technological operations have a significant impact on the quality of the product. They confirm the validity of the adopted research concept and provide evidence for the research thesis of the thesis on the existence of technological inheritance. The practical value of the research results obtained was also emphasised, with the possibility of applying the developed methodology in the bearing industry. Directions for further research on technological inheritance were proposed, covering additional factors affecting the final quality of the product, such as thermal deformations, residual stresses, and shape and dimensional proportions.

ZAŁĄCZNIKI

Załącznik A

Tabela 34 Zestawienie wyników pomiarów dla pierścienia wewnętrznego lewego

lp	dwlt	dwlc	dwls	vdwlt	vdwlc	nls	nlc	nls	grupa
1	40,670	40,735	40,226	0,010	0,020	11,720	11,735	11,386	1
2	40,660	40,720	40,226	0,020	0,030	11,715	11,725	11,385	1
3	40,690	40,750	40,230	0,010	0,020	11,720	11,735	11,388	1
4	40,660	40,725	40,226	0,010	0,030	11,725	11,730	11,381	1
5	40,685	40,745	40,222	0,010	0,030	11,720	11,725	11,383	1
6	40,675	40,730	40,221	0,010	0,030	11,775	11,780	11,383	1
7	40,670	40,720	40,235	0,010	0,020	11,745	11,765	11,388	1
8	40,675	40,740	40,220	0,010	0,020	11,720	11,725	11,388	1
9	40,670	40,730	40,234	0,010	0,030	11,740	11,745	11,386	1
10	40,685	40,735	40,234	0,010	0,030	11,730	11,745	11,385	1
11	40,680	40,750	40,226	0,010	0,020	11,720	11,735	11,381	1
12	40,680	40,745	40,223	0,010	0,010	11,720	11,740	11,389	1
13	40,655	40,710	40,234	0,010	0,030	11,720	11,725	11,383	1
14	40,675	40,740	40,236	0,010	0,010	11,720	11,735	11,380	1
15	40,670	40,735	40,232	0,010	0,030	11,720	11,730	11,381	1
16	40,665	40,715	40,229	0,010	0,020	11,720	11,725	11,383	1
17	40,670	40,735	40,226	0,010	0,020	11,720	11,740	11,383	1
18	40,675	40,735	40,226	0,010	0,030	11,720	11,740	11,384	1
19	40,665	40,720	40,230	0,010	0,020	11,720	11,735	11,383	1
20	40,670	40,730	40,228	0,010	0,010	11,720	11,725	11,381	1
21	40,670	40,730	40,228	0,010	0,020	11,730	11,750	11,385	1
22	40,675	40,735	40,219	0,010	0,020	11,725	11,740	11,385	1
23	40,665	40,720	40,226	0,010	0,020	11,720	11,735	11,384	1
24	40,675	40,730	40,228	0,010	0,020	11,725	11,725	11,382	1
25	40,670	40,730	40,225	0,010	0,010	11,730	11,745	11,380	1
26	40,670	40,730	40,227	0,010	0,030	11,725	11,740	11,384	1
27	40,675	40,735	40,225	0,010	0,020	11,720	11,725	11,383	1
28	40,665	40,720	40,230	0,010	0,020	11,720	11,740	11,381	1
29	40,665	40,720	40,220	0,010	0,010	11,720	11,730	11,381	1
30	40,655	40,715	40,225	0,010	0,030	11,720	11,725	11,381	1

31	40,670	40,735	40,226	0,020	0,030	11,725	11,735	11,381	1
32	40,655	40,715	40,233	0,010	0,030	11,720	11,740	11,382	1
33	40,670	40,725	40,230	0,010	0,030	11,725	11,745	11,383	1
34	40,660	40,705	40,222	0,010	0,030	11,725	11,735	11,383	1
35	40,665	40,725	40,229	0,010	0,030	11,725	11,730	11,385	1
36	40,650	40,705	40,223	0,010	0,030	11,725	11,735	11,383	1
37	40,660	40,715	40,236	0,010	0,030	11,735	11,750	11,385	1
38	40,665	40,725	40,228	0,010	0,010	11,725	11,740	11,385	1
39	40,660	40,710	40,226	0,010	0,020	11,720	11,740	11,384	1
40	40,665	40,720	40,230	0,010	0,010	11,720	11,730	11,380	1
41	40,660	40,705	40,235	0,010	0,020	11,720	11,725	11,382	1
42	40,665	40,715	40,232	0,010	0,020	11,720	11,740	11,381	1
43	40,660	40,715	40,230	0,010	0,020	11,730	11,750	11,383	1
44	40,675	40,735	40,229	0,010	0,030	11,720	11,730	11,382	1
45	40,670	40,730	40,225	0,010	0,020	11,720	11,725	11,382	1
46	40,675	40,725	40,214	0,010	0,010	11,720	11,725	11,383	1
47	40,670	40,725	40,227	0,010	0,030	11,720	11,740	11,382	1
48	40,685	40,735	40,236	0,010	0,010	11,720	11,730	11,384	1
49	40,670	40,720	40,231	0,010	0,020	11,720	11,730	11,380	1
50	40,675	40,730	40,230	0,010	0,020	11,720	11,740	11,381	1
51	40,710	40,720	40,230	0,010	0,030	11,695	11,705	11,377	2
52	40,690	40,715	40,230	0,010	0,030	11,690	11,700	11,379	2
53	40,665	40,700	40,230	0,010	0,025	11,695	11,710	11,377	2
54	40,680	40,705	40,230	0,010	0,030	11,700	11,715	11,384	2
55	40,695	40,720	40,228	0,010	0,030	11,695	11,705	11,379	2
56	40,660	40,695	40,229	0,010	0,020	11,695	11,710	11,379	2
57	40,695	40,720	40,229	0,010	0,030	11,705	11,720	11,382	2
58	40,665	40,705	40,229	0,010	0,020	11,700	11,725	11,382	2
59	40,660	40,690	40,230	0,010	0,030	11,695	11,715	11,379	2
60	40,700	40,715	40,230	0,010	0,030	11,700	11,715	11,381	2
61	40,685	40,720	40,227	0,010	0,030	11,705	11,720	11,377	2
62	40,650	40,690	40,231	0,010	0,030	11,695	11,720	11,384	2
63	40,675	40,705	40,231	0,010	0,030	11,695	11,710	11,379	2
64	40,680	40,705	40,231	0,010	0,030	11,700	11,715	11,381	2
65	40,675	40,705	40,229	0,010	0,030	11,715	11,725	11,381	2
66	40,665	40,690	40,229	0,010	0,030	11,710	11,725	11,382	2

67	40,665	40,685	40,229	0,010	0,030	11,715	11,730	11,383	2
68	40,685	40,705	40,232	0,010	0,020	11,720	11,740	11,382	2
69	40,685	40,705	40,230	0,010	0,030	11,705	11,725	11,382	2
70	40,720	40,715	40,231	0,010	0,020	11,710	11,720	11,381	2
71	40,690	40,710	40,225	0,010	0,010	11,715	11,730	11,380	2
72	40,700	40,725	40,233	0,010	0,025	11,710	11,735	11,380	2
73	40,675	40,690	40,231	0,010	0,020	11,700	11,710	11,380	2
74	40,700	40,710	40,228	0,010	0,020	11,710	11,720	11,381	2
75	40,670	40,695	40,230	0,010	0,025	11,720	11,740	11,377	2
76	40,710	40,710	40,227	0,010	0,030	11,695	11,710	11,380	2
77	40,695	40,710	40,230	0,010	0,010	11,690	11,710	11,383	2
78	40,690	40,710	40,226	0,010	0,030	11,695	11,715	11,382	2
79	40,700	40,710	40,224	0,010	0,020	11,715	11,730	11,379	2
80	40,675	40,700	40,229	0,010	0,020	11,720	11,740	11,379	2
81	40,685	40,710	40,227	0,010	0,010	11,705	11,725	11,380	2
82	40,685	40,715	40,233	0,010	0,030	11,710	11,730	11,377	2
83	40,675	40,710	40,226	0,010	0,020	11,725	11,740	11,383	2
84	40,680	40,700	40,230	0,010	0,030	11,710	11,735	11,382	2
85	40,675	40,685	40,231	0,010	0,030	11,715	11,735	11,384	2
86	40,720	40,725	40,228	0,010	0,030	11,695	11,710	11,381	2
87	40,695	40,720	40,226	0,010	0,020	11,710	11,725	11,380	2
88	40,700	40,715	40,233	0,010	0,020	11,690	11,710	11,381	2
89	40,680	40,695	40,232	0,010	0,030	11,700	11,720	11,381	2
90	40,680	40,710	40,228	0,010	0,020	11,695	11,710	11,380	2
91	40,675	40,695	40,226	0,010	0,030	11,700	11,725	11,379	2
92	40,685	40,700	40,233	0,010	0,025	11,685	11,720	11,382	2
93	40,695	40,715	40,225	0,010	0,010	11,710	11,730	11,379	2
94	40,680	40,715	40,228	0,010	0,030	11,695	11,720	11,382	2
95	40,675	40,700	40,226	0,010	0,030	11,700	11,720	11,383	2
96	40,680	40,710	40,229	0,010	0,025	11,690	11,710	11,383	2
97	40,675	40,695	40,231	0,010	0,030	11,700	11,720	11,379	2
98	40,675	40,690	40,229	0,010	0,030	11,715	11,730	11,378	2
99	40,680	40,705	40,228	0,010	0,020	11,720	11,740	11,380	2
100	40,675	40,700	40,227	0,010	0,030	11,710	11,725	11,382	2
101	40,705	40,750	40,227	0,010	0,020	11,725	11,735	11,377	3
102	40,700	40,740	40,229	0,010	0,020	11,735	11,740	11,382	3

103	40,690	40,750	40,229	0,010	0,020	11,745	11,750	11,378	3
104	40,690	40,750	40,231	0,010	0,020	11,745	11,755	11,378	3
105	40,690	40,745	40,226	0,010	0,030	11,730	11,740	11,376	3
106	40,685	40,725	40,226	0,010	0,030	11,740	11,755	11,382	3
107	40,690	40,725	40,223	0,010	0,010	11,725	11,735	11,383	3
108	40,685	40,725	40,227	0,010	0,030	11,735	11,740	11,381	3
109	40,675	40,725	40,231	0,010	0,030	11,740	11,755	11,378	3
110	40,695	40,745	40,234	0,010	0,010	11,725	11,730	11,378	3
111	40,690	40,740	40,230	0,010	0,020	11,740	11,745	11,383	3
112	40,690	40,740	40,233	0,010	0,020	11,730	11,750	11,383	3
113	40,685	40,740	40,229	0,010	0,020	11,735	11,740	11,381	3
114	40,695	40,750	40,229	0,010	0,020	11,740	11,755	11,378	3
115	40,670	40,725	40,235	0,010	0,010	11,735	11,750	11,377	3
116	40,695	40,745	40,224	0,010	0,010	11,740	11,750	11,382	3
117	40,685	40,730	40,231	0,010	0,020	11,745	11,760	11,382	3
118	40,690	40,740	40,229	0,010	0,020	11,730	11,745	11,382	3
119	40,685	40,735	40,230	0,010	0,010	11,720	11,730	11,381	3
120	40,685	40,725	40,233	0,010	0,030	11,725	11,740	11,380	3
121	40,685	40,735	40,231	0,010	0,010	11,740	11,745	11,380	3
122	40,675	40,715	40,230	0,010	0,010	11,735	11,750	11,381	3
123	40,675	40,740	40,228	0,010	0,030	11,740	11,750	11,381	3
124	40,670	40,725	40,223	0,010	0,010	11,730	11,750	11,380	3
125	40,680	40,730	40,225	0,010	0,020	11,720	11,730	11,380	3
126	40,685	40,715	40,225	0,010	0,030	11,730	11,750	11,379	3
127	40,685	40,730	40,226	0,010	0,020	11,730	11,745	11,381	3
128	40,685	40,735	40,231	0,010	0,010	11,735	11,750	11,380	3
129	40,685	40,715	40,230	0,010	0,030	11,740	11,745	11,382	3
130	40,675	40,735	40,232	0,010	0,010	11,730	11,745	11,379	3
131	40,680	40,730	40,231	0,010	0,020	11,725	11,740	11,378	3
132	40,675	40,705	40,228	0,010	0,030	11,720	11,735	11,380	3
133	40,680	40,730	40,227	0,010	0,020	11,715	11,730	11,381	3
134	40,680	40,730	40,227	0,010	0,020	11,730	11,735	11,383	3
135	40,680	40,730	40,230	0,010	0,020	11,725	11,740	11,382	3
136	40,680	40,715	40,225	0,010	0,030	11,730	11,745	11,382	3
137	40,685	40,720	40,230	0,010	0,020	11,730	11,735	11,379	3
138	40,685	40,720	40,224	0,010	0,020	11,735	11,745	11,379	3

139	40,710	40,760	40,227	0,010	0,020	11,730	11,745	11,378	3
140	40,695	40,745	40,223	0,010	0,030	11,725	11,745	11,379	3
141	40,685	40,735	40,224	0,010	0,010	11,730	11,745	11,380	3
142	40,695	40,745	40,233	0,010	0,010	11,735	11,750	11,379	3
143	40,700	40,750	40,227	0,010	0,020	11,735	11,755	11,379	3
144	40,695	40,745	40,233	0,010	0,010	11,730	11,745	11,380	3
145	40,700	40,750	40,224	0,010	0,020	11,740	11,755	11,382	3
146	40,680	40,735	40,226	0,010	0,010	11,735	11,750	11,378	3
147	40,680	40,730	40,231	0,010	0,025	11,740	11,755	11,376	3
148	40,690	40,735	40,227	0,010	0,010	11,730	11,740	11,378	3
149	40,695	40,745	40,231	0,010	0,010	11,740	11,755	11,377	3
150	40,690	40,735	40,225	0,010	0,010	11,735	11,750	11,381	3

Załącznik B

Tabela 35. Zestawienie wyników pomiarów dla pierścienia wewnętrznego prawego

lp	dwpt	dwpc	dwps	vdwpt	vdwpc	npt	npc	nps	grupa
1	48,190	48,250	47,723	0,010	0,020	11,730	11,735	11,377	1
2	48,205	48,260	47,724	0,010	0,020	11,725	11,735	11,378	1
3	48,190	48,255	47,722	0,020	0,010	11,730	11,740	11,380	1
4	48,185	48,255	47,726	0,010	0,020	11,725	11,735	11,382	1
5	48,185	48,255	47,722	0,010	0,020	11,735	11,750	11,384	1
6	48,200	48,260	47,730	0,010	0,020	11,735	11,745	11,380	1
7	48,200	48,255	47,724	0,010	0,010	11,730	11,735	11,386	1
8	48,205	48,265	47,722	0,010	0,030	11,725	11,735	11,380	1
9	48,205	48,270	47,723	0,010	0,030	11,730	11,735	11,382	1
10	48,195	48,260	47,718	0,010	0,020	11,730	11,735	11,377	1
11	48,185	48,255	47,722	0,010	0,030	11,735	11,750	11,382	1
12	48,210	48,260	47,725	0,020	0,020	11,735	11,750	11,380	1
13	48,200	48,260	47,727	0,010	0,020	11,720	11,725	11,379	1
14	48,190	48,250	47,724	0,010	0,030	11,730	11,735	11,381	1
15	48,195	48,265	47,726	0,010	0,020	11,725	11,735	11,378	1
16	48,195	48,265	47,724	0,010	0,020	11,725	11,740	11,383	1

17	48,200	48,260	47,722	0,010	0,020	11,730	11,735	11,383	1
18	48,190	48,250	47,730	0,010	0,030	11,730	11,735	11,382	1
19	48,215	48,275	47,720	0,010	0,020	11,725	11,735	11,382	1
20	48,205	48,265	47,724	0,010	0,030	11,725	11,730	11,384	1
21	48,200	48,265	47,731	0,010	0,030	11,735	11,745	11,381	1
22	48,210	48,270	47,726	0,010	0,020	11,730	11,740	11,382	1
23	48,205	48,270	47,720	0,010	0,020	11,720	11,735	11,382	1
24	48,200	48,265	47,728	0,010	0,025	11,725	11,740	11,380	1
25	48,205	48,270	47,728	0,010	0,020	11,720	11,730	11,379	1
26	48,205	48,265	47,727	0,010	0,010	11,720	11,735	11,380	1
27	48,200	48,265	47,726	0,010	0,010	11,715	11,730	11,380	1
28	48,195	48,260	47,723	0,010	0,010	11,715	11,730	11,381	1
29	48,190	48,255	47,724	0,010	0,010	11,720	11,735	11,379	1
30	48,190	48,255	47,723	0,010	0,010	11,720	11,735	11,382	1
31	48,190	48,255	47,723	0,010	0,010	11,720	11,730	11,381	1
32	48,195	48,265	47,719	0,010	0,010	11,720	11,730	11,380	1
33	48,200	48,270	47,725	0,010	0,010	11,720	11,735	11,381	1
34	48,180	48,245	47,722	0,010	0,010	11,720	11,735	11,381	1
35	48,195	48,255	47,728	0,010	0,030	11,730	11,745	11,381	1
36	48,195	48,250	47,720	0,010	0,010	11,725	11,735	11,380	1
37	48,195	48,260	47,723	0,020	0,020	11,735	11,745	11,379	1
38	48,195	48,255	47,724	0,010	0,010	11,735	11,750	11,382	1
39	48,180	48,245	47,725	0,010	0,010	11,735	11,750	11,381	1
40	48,195	48,260	47,720	0,010	0,030	11,725	11,740	11,380	1
41	48,195	48,260	47,723	0,010	0,010	11,730	11,735	11,380	1
42	48,200	48,275	47,726	0,010	0,030	11,730	11,735	11,380	1
43	48,180	48,245	47,722	0,010	0,010	11,730	11,735	11,380	1
44	48,190	48,250	47,718	0,010	0,010	11,720	11,725	11,382	1
45	48,195	48,265	47,724	0,010	0,010	11,715	11,730	11,382	1
46	48,195	48,260	47,722	0,010	0,010	11,720	11,725	11,381	1
47	48,195	48,260	47,730	0,010	0,010	11,730	11,735	11,381	1
48	48,195	48,255	47,725	0,010	0,010	11,725	11,735	11,383	1
49	48,200	48,260	47,724	0,010	0,020	11,730	11,740	11,383	1
50	48,195	48,260	47,723	0,010	0,010	11,730	11,735	11,384	1
51	48,170	48,250	47,721	0,010	0,020	11,715	11,730	11,381	2

52	48,210	48,270	47,714	0,010	0,010	11,725	11,735	11,382	2
53	48,195	48,285	47,724	0,020	0,020	11,715	11,725	11,384	2
54	48,185	48,240	47,717	0,010	0,020	11,715	11,720	11,382	2
55	48,185	48,250	47,707	0,010	0,020	11,715	11,725	11,379	2
56	48,205	48,290	47,721	0,010	0,020	11,715	11,725	11,378	2
57	48,195	48,275	47,715	0,010	0,020	11,715	11,730	11,383	2
58	48,190	48,265	47,730	0,010	0,010	11,720	11,735	11,385	2
59	48,220	48,270	47,708	0,010	0,010	11,730	11,740	11,383	2
60	48,185	48,275	47,718	0,010	0,010	11,715	11,730	11,381	2
61	48,185	48,255	47,707	0,010	0,010	11,715	11,720	11,382	2
62	48,210	48,280	47,721	0,010	0,030	11,715	11,730	11,382	2
63	48,200	48,290	47,724	0,010	0,010	11,715	11,730	11,383	2
64	48,195	48,275	47,716	0,010	0,010	11,720	11,735	11,380	2
65	48,195	48,260	47,722	0,020	0,020	11,720	11,735	11,381	2
66	48,190	48,260	47,718	0,010	0,010	11,720	11,735	11,381	2
67	48,185	48,260	47,718	0,010	0,030	11,720	11,735	11,382	2
68	48,180	48,255	47,721	0,010	0,010	11,725	11,740	11,382	2
69	48,210	48,290	47,723	0,010	0,010	11,725	11,735	11,382	2
70	48,205	48,265	47,721	0,010	0,010	11,725	11,735	11,379	2
71	48,195	48,260	47,723	0,010	0,010	11,725	11,735	11,380	2
72	48,205	48,270	47,722	0,020	0,020	11,720	11,735	11,383	2
73	48,220	48,270	47,718	0,010	0,020	11,720	11,735	11,381	2
74	48,210	48,265	47,729	0,010	0,020	11,725	11,735	11,384	2
75	48,205	48,270	47,714	0,010	0,010	11,715	11,730	11,381	2
76	48,195	48,265	47,721	0,010	0,010	11,720	11,730	11,385	2
77	48,195	48,265	47,728	0,010	0,010	11,720	11,735	11,384	2
78	48,190	48,255	47,712	0,010	0,010	11,715	11,720	11,381	2
79	48,190	48,255	47,718	0,010	0,020	11,715	11,730	11,380	2
80	48,195	48,270	47,719	0,010	0,010	11,720	11,730	11,382	2
81	48,190	48,255	47,728	0,010	0,010	11,715	11,730	11,382	2
82	48,210	48,265	47,719	0,010	0,020	11,725	11,735	11,380	2
83	48,210	48,265	47,722	0,010	0,030	11,720	11,730	11,380	2
84	48,180	48,245	47,719	0,010	0,010	11,715	11,730	11,380	2
85	48,190	48,255	47,728	0,010	0,010	11,715	11,725	11,379	2
86	48,195	48,255	47,720	0,020	0,020	11,720	11,730	11,379	2

87	48,195	48,270	47,724	0,010	0,010	11,715	11,725	11,377	2
88	48,195	48,285	47,722	0,010	0,010	11,715	11,730	11,383	2
89	48,180	48,245	47,710	0,020	0,020	11,715	11,720	11,383	2
90	48,190	48,255	47,715	0,010	0,010	11,715	11,725	11,382	2
91	48,195	48,275	47,726	0,010	0,010	11,710	11,725	11,382	2
92	48,200	48,280	47,719	0,010	0,010	11,715	11,720	11,382	2
93	48,180	48,245	47,718	0,010	0,010	11,720	11,725	11,382	2
94	48,195	48,255	47,712	0,010	0,010	11,715	11,720	11,381	2
95	48,195	48,275	47,727	0,010	0,010	11,715	11,730	11,383	2
96	48,195	48,275	47,720	0,010	0,020	11,715	11,725	11,383	2
97	48,190	48,255	47,722	0,010	0,010	11,720	11,730	11,381	2
98	48,195	48,255	47,713	0,020	0,010	11,740	11,750	11,381	2
99	48,200	48,280	47,722	0,010	0,010	11,735	11,745	11,380	2
100	48,200	48,285	47,722	0,010	0,010	11,745	11,765	11,379	2
101	48,205	48,250	47,718	0,010	0,020	11,725	11,745	11,379	3
102	48,190	48,230	47,715	0,020	0,010	11,725	11,735	11,380	3
103	48,200	48,230	47,715	0,010	0,010	11,730	11,740	11,382	3
104	48,190	48,195	47,721	0,010	0,010	11,730	11,740	11,382	3
105	48,205	48,265	47,723	0,010	0,030	11,720	11,735	11,379	3
106	48,205	48,265	47,723	0,010	0,010	11,735	11,755	11,377	3
107	48,210	48,265	47,712	0,010	0,010	11,730	11,740	11,381	3
108	48,205	48,235	47,718	0,010	0,010	11,725	11,745	11,382	3
109	48,195	48,230	47,717	0,020	0,010	11,725	11,745	11,379	3
110	48,180	48,220	47,721	0,010	0,010	11,715	11,735	11,382	3
111	48,200	48,245	47,710	0,010	0,010	11,715	11,735	11,382	3
112	48,200	48,230	47,723	0,020	0,010	11,735	11,755	11,382	3
113	48,205	48,255	47,717	0,010	0,010	11,735	11,740	11,380	3
114	48,205	48,265	47,720	0,010	0,030	11,735	11,740	11,381	3
115	48,205	48,265	47,719	0,010	0,010	11,725	11,740	11,381	3
116	48,190	48,250	47,723	0,010	0,020	11,740	11,755	11,379	3
117	48,195	48,240	47,711	0,020	0,020	11,735	11,745	11,379	3
118	48,195	48,255	47,720	0,010	0,010	11,735	11,745	11,378	3
119	48,210	48,260	47,713	0,010	0,020	11,725	11,745	11,382	3
120	48,195	48,260	47,717	0,010	0,020	11,730	11,745	11,383	3
121	48,195	48,255	47,722	0,010	0,030	11,725	11,745	11,377	3

122	48,210	48,265	47,718	0,010	0,010	11,725	11,735	11,381	3
123	48,195	48,260	47,718	0,010	0,020	11,720	11,740	11,383	3
124	48,195	48,260	47,720	0,010	0,020	11,715	11,730	11,380	3
125	48,205	48,265	47,720	0,010	0,010	11,730	11,740	11,380	3
126	48,195	48,260	47,718	0,010	0,020	11,735	11,745	11,380	3
127	48,215	48,275	47,717	0,010	0,030	11,735	11,745	11,379	3
128	48,215	48,290	47,715	0,010	0,020	11,735	11,745	11,379	3
129	48,215	48,250	47,708	0,010	0,020	11,725	11,735	11,379	3
130	48,195	48,230	47,714	0,020	0,020	11,730	11,740	11,379	3
131	48,190	48,235	47,722	0,010	0,010	11,735	11,740	11,381	3
132	48,200	48,245	47,720	0,010	0,010	11,725	11,735	11,381	3
133	48,200	48,245	47,713	0,010	0,030	11,715	11,735	11,378	3
134	48,200	48,240	47,716	0,010	0,020	11,730	11,740	11,381	3
135	48,200	48,245	47,719	0,010	0,010	11,715	11,735	11,380	3
136	48,185	48,235	47,718	0,010	0,010	11,715	11,730	11,378	3
137	48,205	48,280	47,713	0,010	0,020	11,715	11,725	11,378	3
138	48,200	48,275	47,716	0,010	0,030	11,735	11,745	11,377	3
139	48,200	48,280	47,717	0,010	0,010	11,725	11,745	11,380	3
140	48,205	48,250	47,717	0,010	0,020	11,715	11,735	11,381	3
141	48,210	48,250	47,717	0,010	0,020	11,725	11,740	11,382	3
142	48,185	48,245	47,724	0,010	0,010	11,725	11,740	11,383	3
143	48,190	48,235	47,709	0,010	0,030	11,715	11,725	11,383	3
144	48,200	48,245	47,718	0,010	0,010	11,715	11,735	11,381	3
145	48,185	48,200	47,721	0,010	0,010	11,715	11,735	11,382	3
146	48,205	48,240	47,725	0,010	0,020	11,715	11,735	11,383	3
147	48,210	48,250	47,721	0,020	0,020	11,715	11,725	11,380	3
148	48,200	48,245	47,713	0,010	0,030	11,725	11,740	11,380	3
149	48,210	48,250	47,718	0,010	0,020	11,715	11,725	11,382	3
150	48,200	48,245	47,722	0,010	0,030	11,725	11,735	11,382	3

Załącznik C

Tabela 36. Zestawienie wyników pomiarów dla pierścienia zewnętrznego

Lp	dzlt	dzlc	dzls	vdzlt	dzlc	dzpt	dzpc	dzps	dzpt	vdzpc	mt	mc	ms	grupa
1	65,370	65,290	65,881	0,010	0,010	72,880	72,875	73,387	0,010	0,010	23,540	23,560	23,498	1
2	65,375	65,290	65,865	0,010	0,010	72,875	72,885	73,372	0,010	0,010	23,500	23,520	23,498	1
3	65,370	65,285	65,876	0,010	0,010	72,880	72,885	73,381	0,010	0,010	23,490	23,490	23,498	1
4	65,365	65,280	65,879	0,010	0,020	72,875	72,875	73,380	0,010	0,010	23,500	23,500	23,488	1
5	65,360	65,275	65,874	0,010	0,010	72,875	72,890	73,384	0,010	0,020	23,510	23,530	23,488	1
6	65,360	65,275	65,877	0,010	0,010	72,865	72,865	73,377	0,010	0,010	23,490	23,500	23,478	1
7	65,365	65,280	65,885	0,010	0,010	72,870	72,855	73,378	0,010	0,010	23,500	23,520	23,488	1
8	65,350	65,260	65,877	0,010	0,010	72,875	72,885	73,377	0,010	0,010	23,510	23,520	23,498	1
9	65,355	65,270	65,885	0,010	0,010	72,875	72,870	73,382	0,010	0,020	23,490	23,510	23,498	1
10	65,375	65,290	65,885	0,010	0,010	72,880	72,875	73,380	0,010	0,010	23,490	23,510	23,488	1
11	65,365	65,285	65,874	0,010	0,010	72,870	72,855	73,373	0,010	0,010	23,510	23,530	23,478	1
12	65,365	65,280	65,870	0,010	0,010	72,870	72,865	73,377	0,010	0,010	23,490	23,500	23,478	1
13	65,355	65,270	65,869	0,010	0,020	72,865	72,860	73,374	0,010	0,020	23,510	23,530	23,488	1
14	65,355	65,270	65,865	0,010	0,020	72,865	72,875	73,376	0,010	0,010	23,500	23,520	23,488	1
15	65,355	65,280	65,876	0,010	0,010	72,865	72,865	73,378	0,010	0,010	23,490	23,510	23,488	1
16	65,355	65,275	65,875	0,010	0,010	72,865	72,875	73,370	0,010	0,010	23,510	23,530	23,488	1
17	65,370	65,290	65,895	0,010	0,010	72,875	72,875	73,363	0,010	0,010	23,510	23,530	23,498	1
18	65,360	65,285	65,877	0,010	0,010	72,875	72,855	73,380	0,010	0,010	23,540	23,540	23,498	1
19	65,365	65,285	65,875	0,010	0,010	72,870	72,860	73,380	0,010	0,020	23,510	23,530	23,478	1
20	65,365	65,280	65,887	0,010	0,010	72,875	72,865	73,377	0,010	0,010	23,510	23,520	23,498	1
21	65,365	65,280	65,888	0,010	0,020	72,870	72,870	73,376	0,010	0,020	23,490	23,500	23,498	1
22	65,370	65,290	65,870	0,010	0,010	72,870	72,845	73,380	0,010	0,010	23,500	23,520	23,498	1
23	65,380	65,295	65,875	0,010	0,010	72,870	72,845	73,379	0,010	0,010	23,490	23,500	23,498	1
24	65,350	65,285	65,895	0,010	0,010	72,855	72,830	73,374	0,010	0,020	23,510	23,530	23,498	1
25	65,355	65,280	65,870	0,010	0,010	72,865	72,855	73,387	0,010	0,010	23,500	23,520	23,498	1
26	65,355	65,260	65,878	0,010	0,010	72,865	72,855	73,384	0,010	0,010	23,490	23,510	23,498	1
27	65,350	65,265	65,877	0,010	0,010	72,865	72,845	73,381	0,010	0,010	23,510	23,530	23,498	1
28	65,355	65,265	65,879	0,010	0,010	72,855	72,845	73,384	0,010	0,010	23,510	23,530	23,498	1
29	65,365	65,270	65,890	0,010	0,010	72,860	72,870	73,375	0,010	0,010	23,490	23,510	23,478	1
30	65,365	65,280	65,885	0,010	0,010	72,870	72,870	73,378	0,010	0,010	23,510	23,530	23,498	1
31	65,350	65,275	65,876	0,002	0,010	72,855	72,840	73,380	0,010	0,020	23,500	23,520	23,498	1
32	65,360	65,275	65,885	0,010	0,010	72,860	72,845	73,376	0,010	0,010	23,540	23,540	23,498	1

33	65,355	65,270	65,885	0,010	0,020	72,855	72,870	73,378	0,010	0,020	23,510	23,530	23,478	1
34	65,360	65,275	65,874	0,010	0,010	72,865	72,845	73,380	0,010	0,010	23,510	23,530	23,488	1
35	65,355	65,270	65,885	0,010	0,020	72,865	72,850	73,374	0,010	0,020	23,490	23,510	23,488	1
36	65,350	65,285	65,872	0,010	0,010	72,855	72,855	73,385	0,010	0,010	23,500	23,520	23,478	1
37	65,365	65,285	65,882	0,010	0,010	72,860	72,895	73,367	0,010	0,020	23,500	23,520	23,478	1
38	65,370	65,295	65,895	0,010	0,010	72,885	72,895	73,376	0,010	0,010	23,510	23,530	23,488	1
39	65,345	65,275	65,887	0,010	0,010	72,855	72,855	73,375	0,010	0,010	23,520	23,540	23,478	1
40	65,360	65,280	65,881	0,010	0,020	72,865	72,870	73,380	0,010	0,020	23,510	23,530	23,478	1
41	65,365	65,275	65,890	0,010	0,010	72,865	72,840	73,365	0,010	0,020	23,500	23,520	23,488	1
42	65,360	65,285	65,900	0,010	0,010	72,860	72,870	73,377	0,010	0,020	23,490	23,500	23,488	1
43	65,345	65,275	65,885	0,010	0,010	72,855	72,870	73,377	0,010	0,020	23,500	23,520	23,488	1
44	65,360	65,285	65,886	0,010	0,010	72,850	72,850	73,380	0,000	0,020	23,500	23,520	23,498	1
45	65,355	65,270	65,874	0,010	0,020	72,850	72,845	73,376	0,000	0,010	23,520	23,530	23,498	1
46	65,345	65,265	65,879	0,010	0,010	72,850	72,835	73,372	0,000	0,020	23,520	23,530	23,478	1
47	65,360	65,280	65,870	0,010	0,010	72,865	72,850	73,377	0,010	0,020	23,490	23,500	23,478	1
48	65,360	65,280	65,882	0,010	0,010	72,860	72,885	73,379	0,010	0,010	23,500	23,520	23,478	1
49	65,370	65,290	65,881	0,010	0,010	72,870	72,900	73,376	0,010	0,000	23,520	23,530	23,478	1
50	65,380	65,280	65,878	0,010	0,010	72,870	72,845	73,372	0,010	0,010	23,490	23,510	23,478	1
51	65,395	65,310	65,878	0,010	0,010	72,900	72,905	73,369	0,010	0,010	23,490	23,510	23,488	2
52	65,395	65,315	65,871	0,010	0,010	72,890	72,905	73,366	0,010	0,010	23,480	23,500	23,488	2
53	65,395	65,315	65,871	0,010	0,010	72,885	72,895	73,374	0,010	0,010	23,480	23,500	23,488	2
54	65,405	65,315	65,882	0,010	0,010	72,875	72,890	73,379	0,010	0,010	23,490	23,510	23,488	2
55	65,370	65,315	65,866	0,010	0,010	72,870	72,880	73,377	0,010	0,010	23,490	23,510	23,498	2
56	65,360	65,295	65,875	0,010	0,010	72,875	72,885	73,375	0,010	0,010	23,490	23,510	23,498	2
57	65,350	65,295	65,874	0,010	0,010	72,885	72,900	73,375	0,010	0,010	23,480	23,490	23,498	2
58	65,360	65,295	65,876	0,010	0,010	72,900	72,910	73,375	0,010	0,010	23,480	23,500	23,498	2
59	65,340	65,285	65,880	0,010	0,010	72,880	72,885	73,382	0,010	0,010	23,490	23,510	23,498	2
60	65,340	65,285	65,875	0,010	0,010	72,890	72,905	73,376	0,010	0,010	23,490	23,510	23,488	2
61	65,370	65,300	65,873	0,010	0,010	72,900	72,910	73,376	0,010	0,010	23,480	23,500	23,488	2
62	65,375	65,310	65,879	0,010	0,010	72,880	72,885	73,378	0,010	0,010	23,490	23,500	23,488	2
63	65,350	65,285	65,887	0,010	0,010	72,900	72,910	73,380	0,010	0,010	23,480	23,500	23,488	2
64	65,350	65,285	65,886	0,010	0,010	72,880	72,895	73,380	0,010	0,010	23,490	23,500	23,488	2
65	65,350	65,280	65,877	0,010	0,010	72,880	72,895	73,375	0,010	0,010	23,490	23,510	23,498	2
66	65,350	65,285	65,878	0,010	0,010	72,890	72,900	73,378	0,010	0,010	23,480	23,500	23,498	2
67	65,350	65,285	65,874	0,010	0,010	72,890	72,905	73,376	0,010	0,010	23,490	23,510	23,498	2
68	65,360	65,285	65,881	0,010	0,010	72,870	72,890	73,380	0,010	0,010	23,470	23,490	23,498	2

69	65,360	65,285	65,873	0,010	0,020	72,885	72,890	73,371	0,010	0,020	23,480	23,500	23,478	2
70	65,370	65,295	65,873	0,010	0,010	72,900	72,910	73,380	0,010	0,010	23,490	23,510	23,478	2
71	65,370	65,300	65,871	0,010	0,010	72,890	72,910	73,375	0,010	0,010	23,480	23,500	23,488	2
72	65,370	65,285	65,872	0,010	0,010	72,910	72,925	73,375	0,010	0,010	23,480	23,500	23,488	2
73	65,370	65,290	65,878	0,010	0,010	72,905	72,910	73,379	0,010	0,020	23,490	23,510	23,488	2
74	65,360	65,295	65,875	0,010	0,010	72,885	72,895	73,380	0,010	0,010	23,480	23,490	23,488	2
75	65,360	65,290	65,878	0,010	0,010	72,885	72,895	73,380	0,010	0,010	23,490	23,500	23,498	2
76	65,360	65,295	65,874	0,010	0,010	72,890	72,915	73,372	0,010	0,010	23,490	23,510	23,498	2
77	65,370	65,305	65,880	0,010	0,010	72,895	72,900	73,380	0,010	0,010	23,470	23,490	23,478	2
78	65,375	65,270	65,877	0,010	0,010	72,900	72,905	73,368	0,010	0,020	23,470	23,490	23,478	2
79	65,375	65,305	65,870	0,010	0,010	72,885	72,900	73,376	0,010	0,010	23,480	23,500	23,478	2
80	65,370	65,295	65,890	0,010	0,010	72,895	72,905	73,380	0,010	0,010	23,490	23,500	23,488	2
81	65,385	65,315	65,873	0,010	0,010	72,895	72,905	73,377	0,010	0,010	23,480	23,500	23,488	2
82	65,375	65,280	65,881	0,010	0,020	72,895	72,905	73,380	0,010	0,020	23,490	23,510	23,488	2
83	65,375	65,280	65,880	0,010	0,020	72,895	72,905	73,380	0,010	0,020	23,490	23,510	23,488	2
84	65,375	65,310	65,879	0,010	0,010	72,895	72,905	73,387	0,010	0,010	23,490	23,510	23,488	2
85	65,375	65,295	65,869	0,010	0,010	72,905	72,905	73,364	0,010	0,010	23,490	23,510	23,478	2
86	65,385	65,310	65,874	0,010	0,010	72,895	72,900	73,370	0,010	0,010	23,480	23,500	23,478	2
87	65,375	65,280	65,874	0,010	0,020	72,900	72,910	73,377	0,010	0,020	23,470	23,490	23,488	2
88	65,375	65,295	65,877	0,010	0,010	72,905	72,920	73,377	0,010	0,010	23,490	23,500	23,488	2
89	65,385	65,310	65,878	0,010	0,010	72,905	72,915	73,368	0,010	0,010	23,490	23,500	23,478	2
90	65,385	65,310	65,866	0,010	0,010	72,905	72,915	73,368	0,010	0,010	23,480	23,500	23,478	2
91	65,375	65,295	65,883	0,010	0,010	72,875	72,890	73,379	0,010	0,010	23,490	23,510	23,478	2
92	65,385	65,310	65,881	0,010	0,010	72,885	72,895	73,378	0,010	0,010	23,480	23,500	23,478	2
93	65,385	65,310	65,879	0,010	0,010	72,885	72,900	73,378	0,010	0,010	23,470	23,490	23,488	2
94	65,385	65,295	65,875	0,010	0,010	72,895	72,905	73,375	0,010	0,010	23,490	23,510	23,488	2
95	65,375	65,315	65,875	0,010	0,010	72,880	72,885	73,373	0,010	0,010	23,480	23,500	23,478	2
96	65,375	65,325	65,880	0,010	0,010	72,895	72,900	73,380	0,010	0,010	23,490	23,510	23,488	2
97	65,375	65,325	65,874	0,010	0,010	72,900	72,910	73,372	0,010	0,010	23,470	23,490	23,498	2
98	65,360	65,270	65,871	0,010	0,010	72,890	72,900	73,368	0,010	0,020	23,490	23,510	23,498	2
99	65,385	65,310	65,875	0,010	0,010	72,900	72,910	73,369	0,010	0,020	23,490	23,510	23,478	2
100	65,330	65,265	65,880	0,010	0,010	72,890	72,890	73,380	0,010	0,020	23,490	23,500	23,488	2
101	65,365	65,270	65,881	0,010	0,010	72,815	72,825	73,380	0,010	0,010	23,490	23,510	23,488	3
102	65,385	65,280	65,876	0,010	0,010	72,820	72,840	73,378	0,010	0,010	23,480	23,500	23,498	3
103	65,380	65,270	65,873	0,010	0,007	72,850	72,845	73,376	0,010	0,020	23,490	23,500	23,498	3
104	65,380	65,270	65,879	0,010	0,010	72,830	72,855	73,377	0,010	0,010	23,480	23,490	23,498	3

105	65,370	65,270	65,874	0,010	0,020	72,830	72,840	73,376	0,010	0,010	23,480	23,500	23,498	3
106	65,370	65,270	65,874	0,010	0,020	72,850	72,840	73,375	0,010	0,010	23,490	23,510	23,498	3
107	65,370	65,270	65,879	0,010	0,020	72,835	72,855	73,380	0,010	0,020	23,480	23,490	23,498	3
108	65,370	65,270	65,880	0,010	0,020	72,850	72,855	73,377	0,010	0,020	23,470	23,490	23,498	3
109	65,360	65,280	65,880	0,010	0,020	72,835	72,850	73,380	0,010	0,020	23,480	23,490	23,498	3
110	65,360	65,270	65,881	0,010	0,020	72,835	72,850	73,380	0,010	0,010	23,470	23,480	23,498	3
111	65,360	65,290	65,885	0,010	0,020	72,830	72,845	73,379	0,010	0,020	23,480	23,500	23,498	3
112	65,350	65,260	65,873	0,010	0,020	72,835	72,850	73,379	0,010	0,020	23,490	23,510	23,498	3
113	65,350	65,250	65,875	0,010	0,020	72,835	72,850	73,371	0,010	0,020	23,490	23,500	23,498	3
114	65,350	65,250	65,880	0,010	0,020	72,830	72,840	73,376	0,010	0,020	23,490	23,510	23,488	3
115	65,350	65,250	65,875	0,010	0,020	72,835	72,855	73,379	0,010	0,020	23,480	23,500	23,488	3
116	65,350	65,250	65,872	0,010	0,020	72,835	72,856	73,380	0,010	0,020	23,470	23,490	23,488	3
117	65,350	65,250	65,876	0,010	0,020	72,835	72,860	73,380	0,010	0,020	23,490	23,510	23,478	3
118	65,325	65,250	65,884	0,010	0,020	72,840	72,860	73,378	0,010	0,020	23,490	23,500	23,488	3
119	65,380	65,270	65,875	0,010	0,010	72,830	72,850	73,378	0,010	0,020	23,470	23,490	23,488	3
120	65,360	65,280	65,875	0,010	0,020	72,860	72,870	73,374	0,010	0,020	23,480	23,500	23,478	3
121	65,360	65,280	65,880	0,010	0,010	72,830	72,850	73,377	0,010	0,010	23,490	23,510	23,498	3
122	65,360	65,270	65,875	0,010	0,020	72,845	72,860	73,374	0,010	0,020	23,480	23,500	23,498	3
123	65,350	65,260	65,872	0,010	0,010	72,845	72,860	73,380	0,010	0,020	23,480	23,490	23,498	3
124	65,350	65,250	65,882	0,010	0,020	72,845	72,860	73,380	0,010	0,020	23,490	23,510	23,478	3
125	65,350	65,250	65,877	0,010	0,020	72,845	72,875	73,378	0,010	0,020	23,490	23,510	23,478	3
126	65,350	65,250	65,886	0,010	0,020	72,850	72,870	73,380	0,010	0,020	23,480	23,500	23,478	3
127	65,330	65,230	65,884	0,010	0,020	72,850	72,870	73,377	0,010	0,020	23,480	23,500	23,478	3
128	65,320	65,240	65,874	0,010	0,020	72,860	72,870	73,370	0,010	0,020	23,470	23,490	23,478	3
129	65,390	65,280	65,881	0,010	0,020	72,860	72,880	73,377	0,010	0,010	23,480	23,490	23,478	3
130	65,375	65,270	65,875	0,010	0,020	72,860	72,880	73,380	0,010	0,020	23,490	23,500	23,478	3
131	65,370	65,300	65,881	0,010	0,010	72,865	72,885	73,379	0,010	0,010	23,490	23,500	23,488	3
132	65,360	65,260	65,879	0,010	0,010	72,865	72,880	73,379	0,010	0,020	23,480	23,500	23,498	3
133	65,360	65,260	65,876	0,010	0,020	72,865	72,870	73,378	0,010	0,020	23,470	23,490	23,498	3
134	65,360	65,260	65,874	0,010	0,020	72,865	72,895	73,377	0,010	0,010	23,480	23,490	23,498	3
135	65,330	65,250	65,883	0,010	0,020	72,865	72,865	73,379	0,010	0,030	23,480	23,500	23,488	3
136	65,375	65,280	65,873	0,010	0,010	72,860	72,875	73,374	0,010	0,010	23,490	23,510	23,488	3
137	65,370	65,300	65,877	0,010	0,010	72,875	72,890	73,377	0,010	0,010	23,470	23,490	23,478	3
138	65,370	65,290	65,871	0,010	0,020	72,875	72,895	73,375	0,010	0,020	23,480	23,500	23,478	3
139	65,370	65,290	65,882	0,010	0,010	72,860	72,860	73,378	0,010	0,010	23,490	23,510	23,488	3
140	65,360	65,260	65,877	0,010	0,020	72,860	72,885	73,380	0,010	0,020	23,490	23,510	23,488	3

141	65,355	65,260	65,883	0,010	0,020	72,870	72,885	73,378	0,010	0,020	23,480	23,500	23,488	3
142	65,350	65,250	65,884	0,010	0,020	72,870	72,885	73,379	0,010	0,020	23,470	23,490	23,488	3
143	65,350	65,300	65,878	0,010	0,020	72,860	72,880	73,380	0,010	0,020	23,490	23,500	23,488	3
144	65,345	65,280	65,876	0,010	0,020	72,875	72,880	73,379	0,010	0,020	23,490	23,510	23,488	3
145	65,335	65,260	65,877	0,010	0,010	72,875	72,890	73,380	0,010	0,010	23,470	23,490	23,488	3
146	65,335	65,240	65,877	0,010	0,020	72,875	72,890	73,375	0,010	0,020	23,480	23,500	23,478	3
147	65,335	65,240	65,877	0,010	0,020	72,875	72,900	73,378	0,010	0,020	23,480	23,500	23,478	3
148	65,335	65,230	65,886	0,010	0,010	72,890	72,890	73,380	0,010	0,010	23,490	23,510	23,488	3
149	65,335	65,240	65,878	0,010	0,010	72,890	72,900	73,376	0,010	0,010	23,490	23,510	23,488	3
150	65,335	65,240	65,876	0,010	0,020	72,885	72,895	73,378	0,010	0,010	23,470	23,490	23,488	3