



Politechnika Świętokrzyska
Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Marek Gajur

ANALIZA KSZTAŁTOWO-WYMIAROWA I POWIERZCHNIOWA INNOWACYJNEJ TECHNOLOGII ZESPOŁONYCH PIAST SAMOCHODOWYCH Z ŁOŻYSKIEM TOCZNYM (piasta łożyskowa tzw. HUB)

Promotor:

prof. dr hab. inż. Stanisław Adamczak, dr h.c. (multi)

Kielce 2026

Wyrazy szczególnej wdzięczności składam Panu prof. dr. hab. inż. Stanisławowi Adamczakowi, którego wiedza, doświadczenie i zaangażowanie były fundamentem realizacji tej rozprawy. Jego cenne wskazówki, motywacja oraz wsparcie merytoryczne umożliwiły mi osiągnięcie zamierzonych celów badawczych.

Dziękuję również dr. inż. Jackowi Świdorskiemu za pomoc i merytoryczne sugestie, które wzbogaciły analizę i przyczyniły się do udoskonalenia treści pracy.

SPIS TREŚCI

SPIS TREŚCI	5
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SKRÓTÓW I OZNACZEŃ	8
ROZDZIAŁ I.....	11
WPROWADZENIE.....	11
1.1. Wstęp.....	11
1.2. Klasyczna konstrukcja piast kół pojazdów samochodowych.....	14
1.3. Zespólna piasta łożyskowa pierwszej generacji	15
1.4. Zespólna piasta łożyskowa drugiej generacji	16
1.5. Zespólna piasta łożyskowa trzeciej generacji	18
1.6. Zespólna piasta łożyskowa czwartej generacji	20
ROZDZIAŁ II	21
AKTUALNY STAN WIEDZY	21
2.1. Rodzaje łańcuchów wymiarowych i ich obliczanie	21
2.1.1. Terminologia i definicje.....	21
2.1.2. Rodzaje łańcuchów wymiarowych	22
2.1.3. Obliczanie łańcuchów wymiarowych	23
2.1.4. Analiza i synteza łańcuchów wymiarowych	24
2.1.5. Zamiennność całkowita i częściowa.....	25
2.2. Statystyczne metody oceny	29
2.2.1. Wskaźniki zdolności wyposażenia pomiarowego Cg i Cgk	30
2.2.2. Badanie zdolności maszyn Cm, Cmk	33
2.2.3. Relacja między zdolnością maszyny (Cm, Cmk), a zdolnością procesu (Pp, Ppk, Cp, Cpk)	39
2.3. Wnioski	42
ROZDZIAŁ III.....	43
CEL I SPOSÓB REALIZACJI PRACY	43
3.1. Cel pracy	43
3.2. Teza pracy	46
3.3. Sposób realizacji pracy.....	46
ROZDZIAŁ IV.....	49
ANALIZA KONSTRUKCJI PIASTY ŁOŻYSKOWEJ.....	49
TRZECIEJ GENERACJI	49
4.1. ISO GPS	50
4.2. Analiza rysunku konstrukcyjnego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji	55

4.3. Model matematyczny łańcucha wymiarowego luzu wzdłużnego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji	58
4.4. Zamienność całkowita	64
4.4.1. Metoda jednakowej tolerancji	68
4.4.2. Metoda jednakowej klasy tolerancji	69
4.4.3. Metoda jednakowego wpływu	71
4.4.4. Metoda minimum kosztów	72
4.5. Zamienność częściowa	74
4.5.1. Metoda jednakowej tolerancji	75
4.5.2. Metoda jednakowej klasy tolerancji	76
4.5.3. Metoda jednakowego wpływu	77
4.5.4. Metoda minimum kosztów	78
4.5.5. Tolerancje dobrane przez konstruktora	80
4.6. Wyznaczenie środków obszarów zmienności ogniów składowych	82
4.7. Wnioski	84
ROZDZIAŁ V	86
PROCES TECHNOLOGICZNY ZESPOLONEJ PIASTY ŁOŻYSKOWEJ TRZECIEJ GENERACJI	86
5.1. Warunki do zamawiania otoczek	88
5.1.1. Pierścień zewnętrzny	89
5.1.2. Pierścień wewnętrzny kołnierzowy	90
5.2. Obróbka tokarska pierścieni, kucie wałeczków stożkowych	91
5.2.1. Pierścień zewnętrzny	92
5.2.2. Pierścień wewnętrzny kołnierzowy	93
5.2.3. Wałeczek stożkowy	95
5.3. Obróbka cieplna pierścieni oraz wałeczków stożkowych	96
5.3.1. Pierścień zewnętrzny	97
5.3.2. Pierścień wewnętrzny kołnierzowy	102
5.3.3. Wałeczek stożkowy	106
5.4. Obróbka tokarska pierścienia wewnętrznego kołnierzowego po obróbce cieplnej	108
5.5. Obróbka szlifierska pierścieni oraz wałeczków stożkowych	109
5.5.1. Pierścień zewnętrzny	113
5.5.1.1. Szlifować fi zewnętrzny i czoło	115
5.5.1.2. Szlifować bieżnię zgrubnie	120
5.5.1.3. Szlifować bieżnię wykańczającą	122
5.5.1.4. Doglądać bieżnię	127
5.5.2. Pierścień wewnętrzny kołnierzowy	132

5.5.2.1.	Szlifować profil z czołem oporowym i bieżnię zgrubnie	133
5.5.2.2.	Szlifować bieżnię wykańczająco	136
5.5.2.3.	Szlifować bieżnię pomocniczą	141
5.5.2.4.	Dogładszać bieżnię i bieżnię pomocniczą	144
5.5.3.	Obróbka wałeczka stożkowego	148
5.5.4.	Pierścień wewnętrzny	154
5.6.	Linia montażowa	158
5.7.	Wnioski	163
ROZDZIAŁ VI		164
BADANIA STATYSTYCZNE		164
6.1.	Badania wskaźników zdolności przyrządów pomiarowych	166
6.2.	Budżet niepewności	171
6.2.1.	Budżet pomiaru metodą porównawczą	174
6.3.	Badania wskaźników zdolności Cm, Cmk maszyn obróbki ścierniej	180
6.3.1.	Badania wskaźników zdolności maszyn Cm, Cmk dla obrabiarek do obróbki pierścienia zewnętrznego	181
6.3.2.	Badania wskaźników zdolności maszyn Cm, Cmk dla obrabiarek do obróbki pierścienia wewnętrznego kołnierzonego	184
6.3.3.	Badanie wskaźników zdolności Cm, Cmk dla obrabiarki SM-468	186
6.3.4.	Analiza tolerancji wymiarów składowych łańcucha wymiarowego luzu wzdłużnego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji dla zamienności częściowej	187
6.4.	Pomiar luzu wzdłużnego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji	191
6.4.1.	Analiza uzyskanych wyników	194
6.5.	Podsumowanie	199
ROZDZIAŁ VII		200
WNIOSKI KOŃCOWE		200
PODSUMOWANIE		202
LITERATURA		204
NORMY		210
DOKUMENTY JCGM		211
STRONY INTERNETOWE		211
SPIS RYSUNKÓW		212
SPIS TABEL		219
STRESZCZENIE		221
SUMMARY		223

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SKRÓTÓW I OZNACZEŃ

Az	Rozstawienie bieżni pierścienia zewnętrznego
$\alpha 1$	Kąt bieżni prawej pierścienia zewnętrznego
$\alpha 2$	Kąt bieżni lewej pierścienia zewnętrznego
$\beta 1$	Kąt tworzącej wałeczka stożkowego prawego
$\beta 2$	Kąt tworzącej wałeczka stożkowego lewego
Cg	Capability of gauge – Zdolność przyrządu pomiarowego
Cgk	Capability of gauge, corrected – Skorygowana zdolność przyrządu pomiarowego
Cm	Machine capability index – Wskaźnik zdolności maszyny
Cmk	Machine capability index centered - Wskaźnik zdolności maszyny uwzględniający wycentrowanie
Cp	Process capability index – Wskaźnik zdolności procesu
Cpk	Process capability index, corrected – Wskaźnik zdolności procesu uwzględniający wycentrowanie
CMS	Coordinate Measuring Systems – Wpółrzędnościowe systemy pomiarowe
CNC	Computerized Numerical Control - Komputerowe sterowanie urządzeń numerycznych
CSR	Customer Specific Requirements – Specyficzne wymagania klienta
DBw1	Średnica bieżni pierścienia wewnętrznego kołnierзовego
DBw2	Średnica bieżni pierścienia wewnętrznego
DBz1	Średnica bieżni prawej pierścienia zewnętrznego
DBz2	Średnica bieżni lewej pierścienia zewnętrznego
DFMEA	Design Failure Mode and Effects Analysis – Analiza rodzajów i skutków wad w fazie projektowania
dp	Średnica otworu pierścienia wewnętrznego
dw	Średnica zewnętrzna pierścienia kołnierзовego służąca do mocowania pierścienia wewnętrznego stożkowego
DWs1	Średnica średnia wałeczka stożkowego prawego
DWs2	Średnica średnia wałeczka stożkowego lewego

$\phi 1$	Kąt bieżni pierścienia wewnętrznego kołnierzewego
$\phi 2$	Kąt bieżni pierścienia wewnętrznego
GPS	Geometrical Product Specifications – Specyfikacje geometrii wyrobów
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement – Przewodnik wyrażania niepewności pomiaru
JCGM	Joint Committee for Guides in Metrology – Wspólny Komitet ds. Przewodników w Metrologii
k	Współczynnik rozszerzenia dla zadanego prawdopodobieństwa
Lo	Luz osiowy
Lop1	Położenie bieżni pomocniczej pierścienia wewnętrznego kołnierzewego
Lop2	Położenie bieżni pomocniczej pierścienia wewnętrznego
Lr	Luz promieniowy
LSL	Dolna granica tolerancji
MSA	Measurement System Analysis – Analiza Systemów Pomiarowych
MPE	Maximum Permissible Error - Maksymalny dopuszczalny błąd pomiaru
Pp	Process performance index – Wskaźnik zdolności procesu
Ppk	Process performance capability index – Wskaźnik zdolności procesu uwzględniający wycentrowanie
P	Prawdopodobieństwo rozszerzenia
U	Niepewność pomiaru rozszerzona
R&R	Repeatability and Reproducibility – Powtarzalność i Odtwarzalność
UPR	Undulations Per Resolution - Fale na obrót
USL	Górna granica tolerancji
W_5	Mikrofalistość
Z_3	Makrofalistość

ROZDZIAŁ I

WPROWADZENIE

1.1. Wstęp

Łożyskowanie kół pojazdów jest kluczowym elementem układu jezdnego, zapewniającym redukcję tarcia, komfort jazdy oraz płynność ruchu obrotowego. Od czasów starożytnych po współczesność technologia ta przeszła liczne modyfikacje, wprowadzone w celu zwiększenia efektywności, trwałości i bezpieczeństwa pojazdów.

Pierwsze mechanizmy zmniejszające tarcie były stosowane już w starożytnym Egipcie. Przesuwano tam ciężkie bloki kamienne smarując podłoże wodą lub olejem, a niekiedy podkładano pod nie drewniane rolki [65], [45]. W starożytnym Rzymie pojawiły się pierwsze prymitywne osiowe mechanizmy zmniejszające tarcie w wozach transportowych.

Połączenie koła i tarcia tocznego doprowadziło do kolejnego wynalazku, jakim było wynalezienie łożyska. Łożysko toczne to element mechaniczny, który umożliwia ruch obrotowy wału lub osi przy minimalnym tarcu. Przenosi siły działające na wał (promieniowe, osiowe lub obie jednocześnie) na obudowę, wykorzystując elementy toczne, takie jak kulki lub wałeczki, które redukują opory ruchu. Łożysko pozwala na swobodny ruch obrotowy, jednocześnie ograniczając ruch w kierunkach poprzecznych i wzdłużnych, w zależności od jego konstrukcji.

Rewolucja przemysłowa XVIII i XIX wieku przyczyniła się do dynamicznego rozwoju techniki łożyskowania. W 1794 r. Philip Vaughan opatentował pierwsze kulkowe łożysko, które zmniejszało tarcie osi obrotowych [28]. Wraz z pojawieniem się stalowych osi i ulepszonych metod produkcji, łożyska zaczęto stosować w pojazdach kołowych, co poprawiło ich efektywność. Współczesne łożyska toczne stanowią rezultat zaawansowanych osiągnięć zarówno w dziedzinie technologii, jak i materiałoznawstwa. Charakteryzują się one wysoką precyzją wykonania oraz znaczną odpornością mechaniczną, co jest efektem nieustannych innowacji w procesach produkcyjnych.

Łożyska toczne pełnią istotną rolę w szerokim zakresie aplikacji technicznych, od układów precyzyjnych po maszyny o dużych obciążeniach eksploatacyjnych. Ich podstawową funkcją jest minimalizacja strat energii spowodowanych tarcieniem oraz zapewnienie płynności ruchu obrotowego. Łożyska są elementami maszyn, które są

kluczowe dla niezawodnego działania, wydajności i trwałości maszyn oraz urządzeń [10, 11, 14].

Dynamiczny rozwój technologii produkcji oraz inżynierii materiałowej przyczynił się do znaczącej poprawy parametrów użytkowych łożysk, co umożliwia ich stosowanie w coraz bardziej wymagających warunkach pracy. Typowe łożysko toczne składa się z czterech podstawowych elementów:

- Pierścienia wewnętrznego i zewnętrznego – zapewniają one precyzyjne prowadzenie elementów tocznych oraz przenoszą obciążenia osiowe i promieniowe.
- Elementów tocznych – redukują one tarcie poprzez ograniczenie powierzchni styku między pierścieniami.
- Koszyka (separatora) – utrzymuje właściwe rozmieszczenie elementów tocznych i zapobiega ich wzajemnemu kontaktowi, co wpływa na redukcję oporów ruchu i wydłużenie trwałości eksploatacyjnej łożyska.

Wybór materiałów do produkcji łożysk kulkowych jest uzależniony od wymagań eksploatacyjnych oraz specyfiki danej aplikacji. Wśród najczęściej stosowanych materiałów wyróżnia się:

- Stale stopowe – charakteryzujące się wysoką twardością, odpornością na zmęczenie materiałowe oraz zdolnością do pracy w podwyższonych temperaturach.
- Ceramiki techniczne – wykorzystywane w zastosowaniach wymagających minimalnego tarcia, wysokiej odporności na korozję i ekstremalnych temperatur.
- Polimery inżynierskie – stosowane w łożyskach pracujących w środowiskach chemicznie agresywnych lub wymagających właściwości dielektrycznych.

Nowoczesne metody wytwarzania łożysk obejmują zaawansowane procesy obróbki mechanicznej, takie jak:

- Precyzyjne szlifowanie i dogładzanie – zapewniające minimalne tolerancje wymiarowe i wymaganą geometrię powierzchni roboczych.
- Hartowanie indukcyjne i azotowanie – zwiększające odporność na zużycie i wytrzymałość zmęczeniową.
- Powłoki tribologiczne – zmniejszające tarcie i poprawiające odporność na korozję.

Łożyska toczne znajdują zastosowanie w szerokim spektrum urządzeń, w tym w:

- Przemśle motoryzacyjnym – w układach napędowych, skrzyniach biegów i systemach zawieszenia.
- Maszynach przemysłowych – w obrabiarkach CNC, turbinach oraz układach transportowych.
- Technologiach kosmicznych i lotniczych – gdzie kluczowe znaczenie ma odporność na ekstremalne warunki środowiskowe.

W obliczu rosnących wymagań przemysłowych, łożyska toczne muszą spełniać rygorystyczne normy dotyczące trwałości, niezawodności oraz efektywności. Postęp w dziedzinie inżynierii materiałowej i technologii produkcji umożliwia opracowywanie nowych generacji łożysk, charakteryzujących się jeszcze wyższą wydajnością i dłuższym okresem eksploatacji.

Łożyska toczne, będące nieodłącznym elementem współczesnych systemów mechanicznych, podlegają nieustannym ulepszeniom w zakresie konstrukcji, materiałów i technologii wytwarzania. Zastosowanie nowoczesnych metod obróbki oraz innowacyjnych materiałów, pozwala na spełnienie coraz bardziej restrykcyjnych norm przemysłowych, co przekłada się na ich wyższą niezawodność i wydajność operacyjną.

Konstrukcja węzłów łożyskowych poddawana jest procesowi ciągłego doskonalenia w związku z koniecznością obniżania kosztów produkcji, jak również dopasowywania ich do potrzeb rynku. Rynek potrzebuje produktów wysokiej jakości, które będą spełniać swoje zadanie przez ściśle określony czas. Producenci monitorują poziom usterek swoich wyrobów, ponieważ duża wadliwość ich produktów pociąga za sobą dodatkowe koszty związane z obsługą serwisową oraz reklamacjami i jest zagrożeniem ich konkurencyjnej pozycji na rynku [75]. Często usterki te związane są z nietechnologicznością konstrukcji wyrobów, części maszyn i podzespołów, brakiem odpowiedniego wyposażenia montażowego oraz niskim stopniem ich mechanizacji i automatyzacji [39]. Produktami, które są podatne na wymienione wyżej usterki, bez wątpienia są układy przeniesienia napędu samochodów osobowych, zawierające łożyska toczne. Łożyska toczne to wyroby precyzyjne, które w wyniku niewłaściwego obchodzenia się z nimi - począwszy od magazynowania, transportu, montażu, serwisowania po niewłaściwą eksploatację pojazdów - są niszczone [3, 95]. Proces poszukiwania nowych rozwiązań łożyskowania węzłów konstrukcyjnych szczególnie uwidacznia się w przemyśle samochodowym, który jest liderem we wdrażaniu nowych rozwiązań. Modyfikację konstrukcji prowadzi się dwutorowo, z jednej strony jest to działanie w celu unikania możliwości popełniania błędów, z drugiej zaś strony konkurencja na rynku wymusza prowadzenie procesu ciągłej minimalizacji kosztów wytwarzania. Doskonałym przykładem takiego rozwoju jest ewolucja konstrukcji łożyskowania kół jezdnych samochodów oraz technologii ich wytwarzania. Obecnie do łożyskowania kół pojazdów samochodowych coraz częściej stosuje się zespolone piasty łożyskowe. Są to produkty, które oferują bardzo dobre cechy użytkowe (zwarta budowa, mniejszy ciężar masy nieresorowanej, duża sztywność, niskie opory tarcia) przy jednoczesnym obniżeniu kosztów wytworzenia modułu [38, 68, 73, 80].

1.2. Klasyczna konstrukcja piast kół pojazdów samochodowych

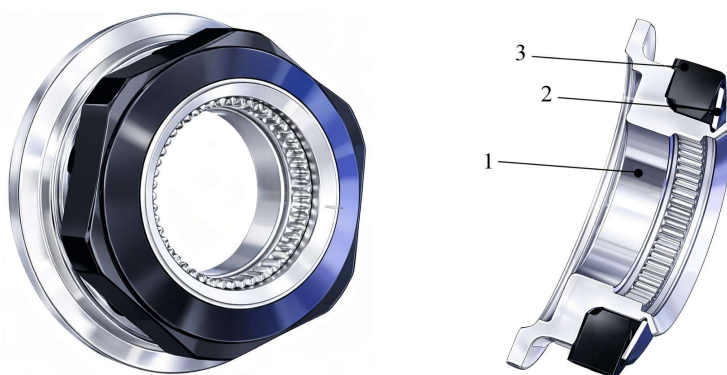
Od początku motoryzacji koła samochodów były osadzone na osiach za pomocą piast. Wzorując się na powozach konnych zastosowano w nich łożyska ślizgowe, które z powodu wad takich, jak niewielka trwałość przy dużych prędkościach i duże opory toczenia, zostały szybko zastąpione przez łożyska toczne [69]. Najstarszym rozwiązaniem łożyskowania piasty koła jest zastosowanie dwóch łożysk tocznych jednorzędowych, stożkowych (rys. 1) lub kulkowych skośnych ustawionych do siebie przeciwnie, z których łożysko wewnętrzne ma zazwyczaj większą średnicę. Ogromną zaletą zastosowania łożysk jednorzędowych jest ich niski koszt zakupu w przypadku konieczności wymiany. Sama wymiana jednak wiąże się z dużą pracochłonnością i koniecznością posiadania dużej ilości sprzętu serwisowego, służącego do samego demontażu i montażu łożysk, a także do ustalenia luzu osiowego pary łożysk. Zachowania od serwisanta procedur montażowych, czystości i zastosowania odpowiedniego środka smarnego. Pomimo, że rozwiązanie to jest obciążone koniecznością rozbudowanej obsługi serwisowej, to z powodzeniem jest nadal stosowane na przykład w osiach zestawów kołowych naczeep samochodów ciężarowych.



Rys. 1. Zespół dwóch łożysk stożkowych piasty koła naczepy samochodu ciężarowego [5]

Kluczowym elementem podczas montażu pary łożysk jest właściwe ustawienie ich napięcia wstępnego. Błędnie ustawione napięcie wstępne powoduje występowanie nadmiernych sił działających na elementy toczne łożysk, prowadzi do zmniejszenia ich trwałości zmęczeniowej [60, 86] oraz wpływa na charakterystykę drgań zespołu [43]. Nadmierne napięcie wstępne prowadzi do zwiększenia temperatury eksploatacyjnej łożyska, co skutkuje przyspieszonym procesem jego degradacji. Z kolei zbyt duży luz w układzie może powodować zużycie przylgowe, prowadzące do zjawiska zacierania wskutek poślizgu. Generowane w tym procesie ciepło osiąga

wartości, które mogą doprowadzić do uszkodzenia łożyska. W celu eliminacji błędów związanych z napięciem wstępnym, uproszczenia procesu montażu oraz wyeliminowania konieczności stosowania dodatkowych narzędzi, producenci wdrożyli do produkcji rozwiązanie konstrukcyjne w postaci specjalistycznej nakrętki łożyskowej (rys. 2). Jej kluczową zaletą jest zdolność do zapewnienia optymalnego momentu dokręcania, co eliminuje konieczność jego określania przez montażystę. Mechanizm ten opiera się na współpracy zazębiających się powierzchni podkładki zębatej i nakrętki, które są dociskane za pomocą sprężyny talerzowej, gwarantując tym samym precyzyjne ustalenie napięcia wstępnego łożysk. Rozwiązanie takie jest stosowane do uzyskiwania właściwego napięcia wstępnego zespołu dwóch łożysk stożkowych piasty koła naczepy samochodu ciężarowego.



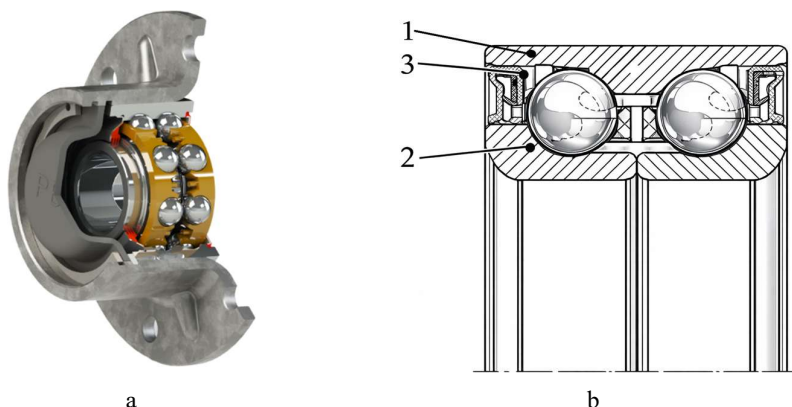
Rys. 2. Specjalna nakrętka łożyskowa: 1 – nakrętka, 2 – sprężyna talerzowa, 3 – podkładka zębata [4]

1.3. Zespolona piasta łożyskowa pierwszej generacji

Łożyska toczne to elementy o wysokiej precyzji, które są szczególnie podatne na błędy montażowe oraz niedokładności wykonawcze. Z tego względu należy dążyć do maksymalnego ograniczenia błędów, a tam gdzie to możliwe, całkowitego ich wyeliminowania. Do najczęstszych nieprawidłowości podczas montażu zalicza się zastosowanie niewłaściwego środka smarnego lub jego nieodpowiednią ilość. Smar pełni kluczową funkcję, separując elementy toczne od bieżni łożyska. Jego niedobór prowadzi do bezpośredniego styku tych powierzchni, co skutkuje ich przyspieszonym zużyciem i uszkodzeniem [22]. Z kolei nadmiar smaru może powodować zjawisko poślizgu elementów tocznych, co negatywnie wpływa na ich trwałość. Niewłaściwe uszczelnienie łożyska może umożliwić przedostawanie się zanieczyszczeń

stałych do jego wnętrza, co prowadzi do powstawania wgnieceń na bieżniach pierścieni na skutek oddziaływania toczących się elementów [17, 96, 97]. Kolejnym zagrożeniem wynikającym z nieszczelności jest korozja, której sprzyja przedostawanie się wody lub środków chemicznych stosowanych do czyszczenia. Obecność tych substancji obniża skuteczność ochrony powierzchni stalowych, przyspieszając proces utleniania.

Jednym z głównych czynników powodujących przegrzewanie i przedwczesne łuszczenie się bieżni jest statyczna niewspółosiowość, która wynika z nieprawidłowego ustawienia otworów oprawy. W celu eliminacji błędów montażowych i wykonawczych producenci opracowali zespoloną piastę pierwszej generacji (rys. 3a). Rozwiązanie to obejmuje dwurzędowe łożysko kulkowe skośne (rys. 3b) lub dwurzędowe łożysko stożkowe, zamknięte w jednej szczelnej obudowie. Konstrukcja ta zapewnia wstępnie ustalony luz roboczy i eliminuje konieczność jego regulacji. Łożyska te są nasmarowane na cały okres eksploatacji, cechują się zwartą budową wzdłużną oraz zmniejszoną masą nieresorowaną w porównaniu do tradycyjnych rozwiązań stosowanych w piastach.



Rys. 3. a) Zespolona piasta łożyskowa pierwszej generacji, b) łożysko kulkowe skośne dwurzędowe: 1 – pierścień zewnętrzny, 2 – pierścień wewnętrzny, 3 – uszczelka

1.4. Zespolona piasta łożyskowa drugiej generacji

Mimo licznych zalet, zespolona piasta łożyskowa pierwszej generacji nie wyeliminowała całkowicie błędów związanych z procesami montażowymi i wykonawczymi w układach łożyskowania piast pojazdów samochodowych. Konstrukcja tego rozwiązania wykazuje wrażliwość na określone nieprawidłowości, do których

należy deformacja gniazd obudowy. Gniazda oprawy muszą charakteryzować się właściwymi parametrami geometrycznymi i nie mogą wykazywać odkształceń. Nawet precyzyjnie wykonane gniazda mogą ulec deformacji w wyniku nieprawidłowego demontażu lub montażu łożyska. Ze względu na cienkościenną strukturę pierścieni łożyskowych, po osadzeniu w obudowie przyjmują one jej kształt. Wzrost odchyłki okrągłości bieżni pod wpływem deformacji obudowy prowadzi do zwiększenia amplitudy drgań generowanych przez łożyska toczne [9, 102], co negatywnie wpływa na ich trwałość eksploatacyjną.

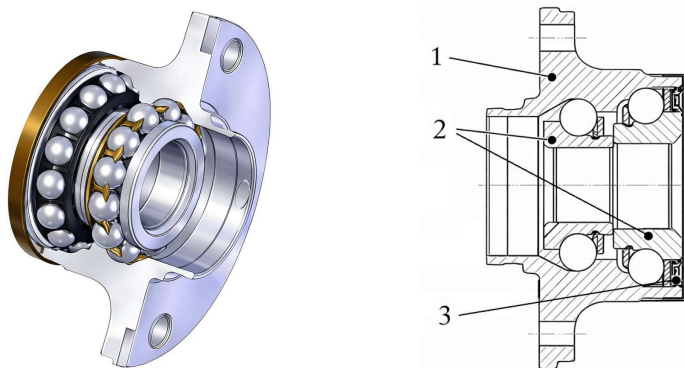
Prawidłowe pasowanie łożyska w obudowie stanowi kluczowy czynnik determinujący jego trwałość użytkową. Zastosowanie nieodpowiedniego pasowania skutkuje nadmiernym luzem lub zbyt dużym napięciem wstępnym. W przypadku zbyt luźnego osadzenia dochodzi do obracania się pierścienia zewnętrznego względem obudowy, co może prowadzić do korozji czarnej. Natomiast nadmierne pasowanie skutkuje kasacją luzu roboczego, uszkodzeniami bieżni pierścienia oraz elementów tocznych, a także wzrostem temperatury pracy, co w konsekwencji prowadzi do przedwczesnej degradacji łożyska.

Ważnym elementem jest sposób przyłożenia siły podczas montażu łożyska. Jeżeli siła montażowa zostanie przeniesiona przez elementy toczne na bieżnię łożyskową, może dojść do powstania lokalnych odkształceń plastycznych na powierzchni bieżni pierścieni łożyskowych, co skutkuje pogorszeniem ich właściwości eksploatacyjnych.

Wadliwie wykonane gniazda obudowy mogą powodować powstanie statycznej niewspółosiowości. Występuje ona w sytuacji, gdy pierścienie łożyskowe przylegają do powierzchni oporowej, która nie jest prostopadła do gniazda łożyska, co może powodować nierównomierne obciążenie łożyska i przyspieszoną degradację jego komponentów.

Rozwój technologiczny doprowadził do opracowania zespolonej piasty łożyskowej drugiej generacji (rys. 4), której konstrukcja umożliwia eliminację wymienionych problemów montażowych. W nowym rozwiązaniu zrezygnowano z klasycznej obsady łożyska na rzecz pierścienia zewnętrznego rozbudowanego o kołnierz montażowy. Do tego kołnierza bezpośrednio mocowane są elementy wirujące układu hamulcowego oraz koło jezdne. Zastosowanie tego rozwiązania pozwoliło na redukcję liczby składowych komponentów, zmniejszenie masy nieresorowanej oraz obniżenie kosztów produkcji. Typowa zespolona piasta łożyskowa drugiej generacji znajduje zastosowanie głównie w przypadku kół nienapędzanych. Dla kół napędzanych opracowano konstrukcję oznaczoną jako zespolona piasta łożyskowa 2.1. Jednakże

jej zastosowanie nie jest powszechne, głównie ze względu na konieczność wykorzystania specjalistycznego oprzyrządowania montażowego.



Rys. 4. Zespólna piasta drugiej generacji: 1 – pierścień zewnętrzny z kołnierzem, 2 – pierścienie wewnętrzne, 3 – uszczelka [4]

1.5. Zespólna piasta łożyskowa trzeciej generacji

Zespólna piasta łożyskowa trzeciej generacji (rys. 5) stanowi moduł o wysokim stopniu integracji, w którego konstrukcji uwzględniono kołnierze umożliwiające bezpośredni montaż tarczy hamulcowej, koła oraz zwrotnicy. Dzięki swojej konstrukcji znajduje zastosowanie zarówno w układach łożyskowania kół napędzanych, jak i nienapędzanych.

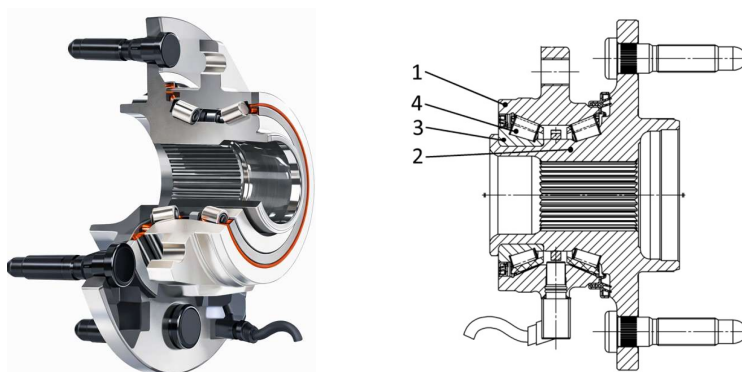
Dwukołnierzowa budowa przyczyniła się do redukcji kosztów montażu oraz eliminacji niekorzystnych zjawisk wpływających na trwałość i efektywność działania łożyska, wynikających z błędów montażowych. Wprowadzenie tej konstrukcji pozwoliło na wyeliminowanie kluczowych wad spotykanych w poprzednich generacjach piast, takich jak: deformacja czopów piast, niewłaściwe pasowanie pomiędzy czopem, a otworem łożyska, statyczna niewspółosiowość, występująca w sytuacji, gdy pierścienie łożyskowe przylegają do powierzchni oporowej, która nie jest prostopadła do czopa piasty.

Dodatkową zaletą tej konstrukcji jest brak konieczności stosowania specjalistycznego oprzyrządowania, zarówno w trakcie montażu fabrycznego, jak i podczas obsługi serwisowej.

Współczesne zespolone piasty łożyskowe trzeciej generacji są wyposażone w dwurzędowe łożyska kulkowe skośne lub dwurzędowe łożyska stożkowe, zamknięte w szczelnej obudowie z precyzyjnie określonym i ustawionym luzem. Łożyska te są fabrycznie nasmarowane na cały okres eksploatacji, co eliminuje

konieczność dodatkowej konserwacji. Charakteryzują się zwartą konstrukcją w kierunku wzdłużnym, niską masą nieresorowaną oraz wysoką sztywnością. Dodatkowo umożliwiają łatwą integrację czujnika ABS, co podnosi funkcjonalność układu jeźdnego pojazdu [4].

W piaście trzeciej generacji do zaciśnięcia pierścienia wewnętrznego stosuje się rozwalcowywanie kołnierza, które jest rozwiązaniem tańszym oraz zmniejszającym wagę piasty w stosunku do rozwiązania wykorzystującego nakrętkę [72]. Zaciśk realizowany poprzez rozwalcowanie obrotowe jest w wielu przypadkach lepszy niż, ten realizowany za pomocą nakrętki [89].



Rys. 5. Zespólna piasta trzeciej generacji: 1 – pierścień zewnętrzny kołnierzowy, 2 – pierścień wewnętrzny kołnierzowy, 3 – standardowy pierścień łożyskowy, wewnętrzny, 4 – element toczy – wałeczek stożkowy [4]

Prezentowana na zdjęciu zespólna piasta łożyskowa trzeciej generacji (rys. 6a) to nowoczesne rozwiązanie stosowane w układach napędowych pojazdów. Jej integracja z wielowypustowym mechanizmem sprzęgającym piastę z kielichem półosi (rys. 6b) oraz zoptymalizowana konstrukcja zapewniają wysoką trwałość, precyzję działania, a także łatwiejszy montaż.



Rys. 6. a) Zespólona piasta łożyskowa trzeciej generacji z wielowypustowym mechanizmem sprzęgającym, b) kielich półosi: 1 – kołnierzowy pierścień zewnętrzny, 2 – kołnierzowy pierścień wewnętrzny z wieńcem zębatym, 3 – kielich półosi z wieńcem zębatym [5]

1.6. Zespólona piasta łożyskowa czwartej generacji

Czwarta generacja zespolonej piasty łożyskowej (rys. 7) powstała poprzez integrację przegubu o stałej prędkości CVJ (*constant velocity joint*) z łożyskiem piasty. Cechą charakterystyczną tego rozwiązania jest to, że powierzchnia bieżni łożyska jest bezpośrednio uformowana na zewnętrznym pierścieniu CVJ. Nowa konstrukcja przyczynia się do zmniejszenia masy o ok. 14% i rozmiaru o 20% w stosunku do trzeciej generacji. Mniejsza odległość osiowa między kołnierzem piasty, a pierścieniem CVJ pomaga zwiększyć stopień swobody przy projektowaniu zawieszenia [52, 84].



Rys. 7. Zespólona piasta czwartej generacji [69]

ROZDZIAŁ II

AKTUALNY STAN WIEDZY

2.1. Rodzaje łańcuchów wymiarowych i ich obliczanie

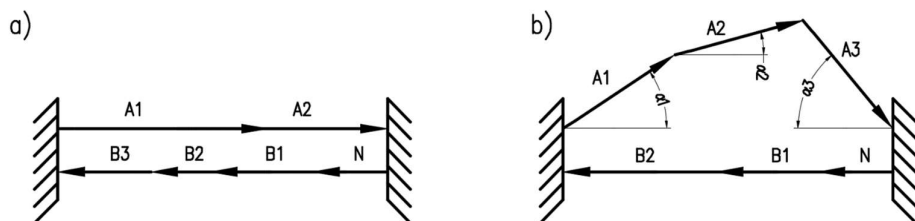
W obliczu rosnącego zapotrzebowania na produkty o wysokiej jakości, projektowanie tolerancji odgrywa kluczową rolę w procesach rozwojowych produktów oraz technologii wytwarzania [79]. Precyzyjna obróbka komponentów składających się na zespoloną piastę samochodową z dwurzędowym łożyskiem stożkowym, stanowi warunek uzyskania pożądanego luzu wzdłużnego. Tak jak każdy parametr, luz również posiada określony zakres tolerancji – im jest on mniejszy, tym większa powtarzalność właściwości użytkowych wytwarzanych piast.

Jednym z podejść stosowanych w analizie tolerancji jest metoda najgorszego przypadku, określana również jako zamienność całkowita [74]. Jej zastosowanie zapewnia poprawność montażu poszczególnych elementów, jednak wymaga stosowania bardzo rygorystycznych tolerancji, co prowadzi do wzrostu kosztów produkcji [13, 34, 47, 87]. Alternatywnym podejściem wykorzystywanym w przemyśle łożyskowym w celu optymalnego doboru podzespołów jest zamienność selekcyjna. Metoda ta, wiąże się jednak z istotnymi trudnościami, takimi jak konieczność precyzyjnych pomiarów, skomplikowany proces montażu oraz problematyczne przechowywanie poszczególnych, uprzednio wyselekcjonowanych komponentów [5, 58]. Ze względu na potrzebę redukcji kosztów wytwarzania producenci coraz częściej odchodzą od zamienności selekcyjnej, na rzecz zamienności częściowej, czyli tolerowania statystycznego. Metoda ta umożliwia rozszerzenie dopuszczalnych zakresów tolerancji dla poszczególnych komponentów oraz pozwala na probabilistyczne określenie prawidłowości montażu [25, 33, 41, 42, 46]. W procesach montażu należy również uwzględnić tarcie między częściami oraz grawitację [31].

2.1.1. Terminologia i definicje

Każda z części, która tworzy maszynę lub urządzenie musi być dopasowana do pozostałych części z odpowiednim luzem lub wciskiem. Wielkość luzu lub wcisku musi być odpowiednio dobrana i poprzedzona dokładną analizą łańcuchów wymiarowych, które określają rozstawienie lub położenie powierzchni podzespołów danego urządzenia. Łańcuch wymiarowy składa się z ogniw łańcucha wymiarowego, które dzielą się na ogniwa składowe oraz ogniwo zamykające, zwane też wypadkowym. Ogniwo zamykające jest ogniwem, którego nominal i odchyłki graniczne

wynikają z nominalów i odchyłek granicznych pozostałych ogniów łańcucha wymiarowego. Ogniwo zamykające oznaczamy zazwyczaj literami N lub X. Ogniwo składowe jest to każde z ogniów wchodzących w skład łańcucha wymiarowego, za wyjątkiem ogniwa zamykającego. Ogniwa składowe oznacza się dużymi literami alfabetu łacińskiego z indeksami cyfrowymi określającymi kolejność ich numeracji, np. A1, A2, ..., A_n. Wśród ogniów składowych rozróżniamy ogniwa zwiększające A_i i ogniwa zmniejszające B_i. Ogniwo zwiększające jest wymiarem, którego zwiększanie powoduje zwiększanie ogniwa zamykającego przy niezmiennych pozostałych wymiarach. Ogniwo zmniejszające jest wymiarem, którego zwiększanie powoduje zmniejszanie ogniwa zamykającego przy niezmiennych pozostałych wymiarach. Schemat łańcucha wymiarowego składającego się z ogniów składowych i ogniwa zamykającego (rys. 8) jest to umowna figura zamknięta, określająca położenie i następstwo ogniów w tym łańcuchu.



Rys. 8. Schemat łańcuchów wymiarowych płaskich: a) z ogniwami równoległymi, b) z ogniwami nierównoległymi

2.1.2. Rodzaje łańcuchów wymiarowych

Łańcuchy wymiarowe dzielimy pod względem usytuowania na płaskie i przestrzenne. Łańcuch, którego wszystkie ogniwa znajdują się w tej samej płaszczyźnie lub kilku płaszczyznach, lecz równoległych do siebie, to łańcuch płaski. Natomiast łańcuch, w którym przynajmniej jedno ogniwo nie spełnia warunków równoległości, niezbędnego w przypadku łańcucha płaskiego, to łańcuch przestrzenny.

Rodzaj wymiaru ogniwa jest podstawą podziału łańcuchów wymiarowych na liniowe i kątowe. Łańcuch liniowy jest to łańcuch, którego wszystkie wymiary składowe są liniowymi wymiarami długości. Łańcuch kątowy jest to łańcuch, w którym wszystkie ogniwa są wymiarami kątowymi. Ze względu na wzajemne położenie ogniów składowych, łańcuchy leżące na jednej płaszczyźnie dzieli się na łańcuchy proste i złożone. Łańcuch prosty jest złożony wyłącznie z ogniów liniowych równoległych lub z wymiarów kątowych o wspólnym wierzchołku. Każdy łańcuch, który nie spełnia powyższych kryteriów nosi nazwę łańcucha złożonego. Ze względu na

przeznaczenie łańcuchy można podzielić na trzy rodzaje: konstrukcyjne technologiczne i pomiarowe. Łańcuch konstrukcyjny jest to zespół wymiarów, które określają budowę zespołu lub urządzenia. Zespół wymiarów niezbędnych do wykonania danego elementu lub zespołu, ujętych w dokumentacji technologicznej, określa łańcuch technologiczny. Łańcuch pomiarowy jest to zespół wymiarów, które są przedmiotem pomiarów.

2.1.3. Obliczanie łańcuchów wymiarowych

Mając schemat łańcucha wymiarowego można obliczyć wartość nominalną i odchyłki ogniwa zamykającego. Do tego wykorzystuje się metodę wymiarów granicznych lub metodę rachunku różniczkowego. W metodzie wymiarów granicznych nominal ogniwa zamykającego jest różnicą sumy nominalów wszystkich ogniwno zwiększających A_i i sumy nominalów wszystkich ogniwno zmniejszających B_i :

$$N = \sum_{i=1}^k A_i - \sum_{i=k+1}^{n-1} B_i \quad (1)$$

Wymiary graniczne ogniwa zamykającego górny N_{max} i dolny N_{min} obliczamy następująco:

$$N_{max} = \sum_{i=1}^k A_{imax} - \sum_{i=k+1}^{n-1} B_{imin} \quad (2)$$

$$N_{min} = \sum_{i=1}^k A_{imin} - \sum_{i=k+1}^{n-1} B_{imax} \quad (3)$$

Odchyłki graniczne górna n_2 i n_1 dolna są różnicą odpowiednio N_{max} , N_{min} i wymiaru nominalnego N :

$$n_2 = N_{max} - N \quad (4)$$

$$n_1 = N_{min} - N \quad (5)$$

Wykorzystując metodę rachunku różniczkowego oraz pamiętając, że dla wymiarów zwiększających pochodna cząstkowa jest dodatnia, a wymiarów

zmniejszających ujemna, obliczamy górną n_2 i dolną n_1 odchyłkę wymiaru zamykającego, wykorzystując następujące wzory:

$$n_2 = \sum_{i=1}^k \frac{\partial N}{\partial A_i} a_{2i} - \sum_{i=k+1}^{n-1} \frac{\partial N}{\partial B_i} b_{1i} \quad (6)$$

$$n_1 = \sum_{i=1}^k \frac{\partial N}{\partial A_i} a_{1i} - \sum_{i=k+1}^{n-1} \frac{\partial N}{\partial B_i} b_{2i} \quad (7)$$

gdzie:

a_1, b_1 – oznaczają dolne odchyłki graniczne i -tych wymiarów odpowiednio zwiększających i zmniejszających,

a_2, b_2 – oznaczają górne odchyłki graniczne i -tych wymiarów odpowiednio zwiększających i zmniejszających.

2.1.4. Analiza i synteza łańcuchów wymiarowych

Analiza łańcucha wymiarowego polega na wyznaczeniu wartości granicznych jednego z niewiadomych wymiarów łańcucha, przy danych odchyłkach oraz wartościach nominalnych wszystkich pozostałych wymiarów. Zadanie analizy wymiarowej składa się z następujących etapów:

- identyfikacji łańcucha wymiarowego,
- wybór ogniwa zależnego łańcucha wymiarowego,
- wygenerowanie funkcji wymiarowej – równania łańcucha wymiarowego,
- rozwiązanie równania łańcucha wymiarowego [50].

Celem syntezy łańcucha wymiarowego jest wyznaczenie tolerancji ogniwa niezależnych na podstawie znanej tolerancji ogniwa zależnego. Etapy syntezy łańcucha wymiarowego to:

- wyznaczenie tolerancji wymiarów niezależnych,
- wyznaczenie odchyłek wymiarów niezależnych.

Tolerancję wymiarów niezależnych możemy wyznaczyć stosując dodatkowe założenia wpływające na wielkość tolerancji wymiarów. Stosowane metody to:

- metoda jednakowej tolerancji,
- metoda jednakowej klasy tolerancji,

- metoda jednakowego wpływu,
- metoda minimum kosztów.

2.1.5. Zamiennność całkowita i częściowa

Zamiennność części polega na montowaniu współpracujących ze sobą części o określonych tolerancjach wymiarów i kształtów oraz innych własnościach ustalonych przez rysunek techniczny bez dodatkowej obróbki, docierania lub dopasowywania części. W produkcji, która oparta jest na zamienności części, poszczególne podzespoły mogą być wykonywane w różnych wytwórniach i dostarczane do montażu, jako gotowe części w ramach kooperacji. Ten sposób organizacji produkcji pozwala na produkcję poszczególnych elementów składowych, przez firmy specjalizujące się w produkcji określonego asortymentu znajdujące się w różnych zakładach i różnych częściach świata. Tendencja do takiego postępowania w procesie wytwarzania szczególnie widoczna jest w montażu samochodów i ich podzespołów. Szczególnie ważne jest to w przypadku, gdy firmy mają kilku dostawców, którzy produkują takie same części w różnych fabrykach. Niestety utrzymanie wymiarów w ciasnych tolerancjach pociąga za sobą wzrost pracochłonności, a tym samym wzrost kosztów wytwarzania. Tolerancja wykonania danej części lub podzespołu powinna być ekonomicznym równoważnikiem między wymaganiami wynikającymi z konstrukcji, a możliwościami technologicznymi wykonania. W związku z powyższym dla łańcuchów wymiarowych, które posiadają małą liczbę ogniw składowych, bardzo często stosuje się zamiennność całkowitą, która oznacza, iż zmontowane urządzenie będzie działało prawidłowo. Natomiast dla łańcuchów wieloogniwowych i skomplikowanych, stosuje się bardzo często zamiennność częściową. Zamiennność częściowa oznacza, iż z bardzo dużą dozą prawdopodobieństwa zmontowane urządzenie będzie działało prawidłowo [8, 57–59].

Równanie tolerancji dla zamienności całkowitej ma postać:

$$\text{– dla łańcucha prostego} \quad T_N = \sum_{i=1}^{k-1} T_i \quad (8)$$

$$\text{– dla łańcucha złożonego} \quad T_N = \sum_{i=1}^{k-1} \left| \frac{\partial N}{\partial A_i} \right| T_{Ai} \quad (9)$$

Obliczanie tolerancji wymiarów składowych według:

- metody jednakowej tolerancji – tolerancje wszystkich ogniw składowych mają tę samą wartość:

$$T_N = T_{A1} = T_{A2} = \dots = T_{Ak} = T_{B1} = T_{B2} = \dots = T_{Bn} \quad (10)$$

- metody jednakowej klasy tolerancji – wszystkie wymiary składowe łańcucha wymiarowego są tej samej klasy tolerancji:

Tolerancję ogniwa łańcucha wymiarowego obliczamy według wzoru:

$$T_{A_i} = a \sqrt[3]{A_i} \quad (11)$$

gdzie:

a - jest współczynnikiem klasy tolerancji.

Tolerancje wymiaru zamykającego obliczamy stosując wzór:

– dla łańcucha prostego

$$T_{A_i} = a \sum_{i=1}^{k-1} \sqrt[3]{A_i} \quad (12)$$

– dla łańcucha złożonego

$$T_{A_i} = a \sum_{i=1}^{k-1} \left| \frac{\partial N}{\partial A_i} \right| \sqrt[3]{A_i} \quad (13)$$

- metody jednakowego wpływu

$$\left| \frac{\partial N}{\partial A_1} \right| T_{A_1} = \left| \frac{\partial N}{\partial A_2} \right| T_{A_2} = \dots = \left| \frac{\partial N}{\partial A_k} \right| T_{A_k} = m \quad (14)$$

- metody minimum kosztów

$$L = \sum_{i=1}^{k-1} K_{Ai} + \lambda \left(\sum_{i=1}^{n-1} \left| \frac{\partial N}{\partial A_i} \right| T_{Ai} - T_N \right) \quad (15)$$

przy czym:

$$\frac{\partial L}{\partial T_{Ai}} = 0 \quad (16)$$

gdzie:

λ – to współczynnik Lagrange'a,

K – określa się na podstawie złożonych obliczeń zależnych od kosztów.

W przypadku zamienności częściowej metody obliczeń są takie same jak dla zamienności całkowitej, ale bierzemy pod uwagę współczynniki zamienności oznaczane małą literą k , które są zależne od odchylenia standardowego i tolerancji wymiaru składowego:

$$k_N = 6 \frac{\sigma_N}{T_N}; \quad k_{Ai} = 6 \frac{\sigma_{Ai}}{T_{Ai}} \quad (17)$$

gdzie:

σ_{Ai} i T_{Ai} – to odpowiednio odchylenie standardowe i tolerancja i -tego ogniwa.

Współczynnik zamienności w zależności od typu rozkładu składnika łańcucha wymiarowego przyjmuje różną wartość, np.:

- dla rozkładu normalnego $k = 1$
- dla rozkładu prostokątnego $k = \sqrt{3}$
- dla rozkładu Simsona $k = \sqrt{\frac{3}{2}}$

Równanie tolerancji przyjmuje postać:

– dla łańcucha prostego

$$k_N^2 T_N^2 = \sum_{i=1}^{k-1} k_{Ai}^2 T_{Ai}^2 \quad (18)$$

– dla łańcucha złożonego

$$k_N^2 T_N^2 = \sum_{i=1}^{k-1} k_{Ai}^2 \left(\frac{\partial N}{\partial A_i} \right)^2 T_{Ai}^2 \quad (19)$$

Obliczanie tolerancji wymiarów składowych wg:

- metody jednakowej tolerancji

dla łańcucha prostego

$$T^2 = \frac{k_N^2 T_N^2}{\sum_{i=1}^{k-1} k_{Ai}^2} \quad (20)$$

dla łańcucha złożonego

$$T^2 = \frac{k_N^2 T_N^2}{\sum_{i=1}^{k-1} \left(\frac{\partial N}{\partial A_i} \right)^2 k_{Ai}^2} \quad (21)$$

- metody jednakowej klasy tolerancji

– dla łańcucha prostego

$$k_N^2 T_N^2 = a^2 \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt[3]{A_i^2 k_{Ai}^2} \quad (22)$$

– dla łańcucha złożonego

$$k_N^2 T_N^2 = 0,45 a^2 \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{\partial N}{\partial A_i} \right)^2 \sqrt[3]{A_i^2 k_{Ai}^2} \quad (23)$$

- metody jednakowego wpływu
- dla łańcucha prostego

$$\left| \frac{\partial N}{\partial A_1} \right| T_{A_1} = \left| \frac{\partial N}{\partial A_2} \right| T_{A_2} = \dots = \left| \frac{\partial N}{\partial A_n} \right| T_{A_n} = m \quad (24)$$

- dla łańcucha złożonego

$$k_{A_1}^2 \left(\frac{\partial N}{\partial A_1} \right)^2 T_{A_1}^2 = k_{A_2}^2 \left(\frac{\partial N}{\partial A_2} \right)^2 T_{A_2}^2 = \dots = k_{A_n}^2 \left(\frac{\partial N}{\partial A_n} \right)^2 T_{A_n}^2 = m^2 \quad (25)$$

- metody minimum kosztów

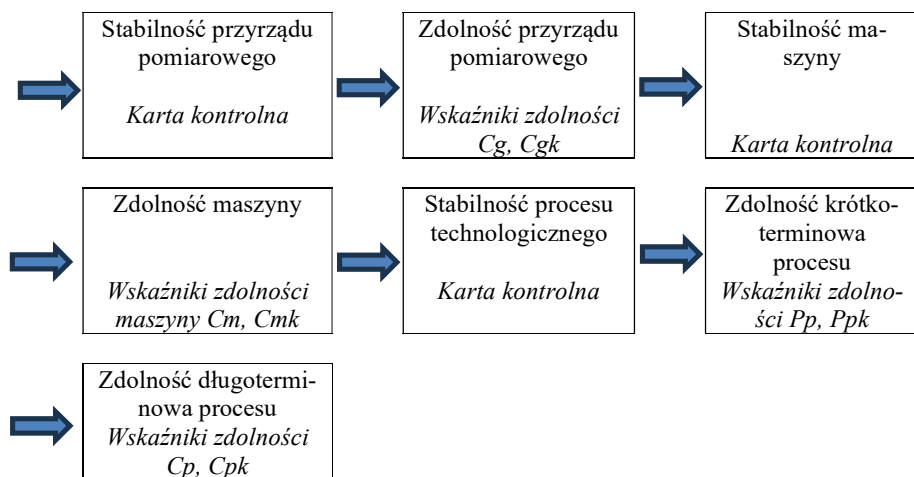
$$L = \sum_{i=1}^{k-1} K_{A_i} + \lambda \left(\sum_{i=1}^{n-1} k_{A_i}^2 \left(\frac{\partial N}{\partial A_i} \right)^2 T_{A_i}^2 - k_N^2 T_N^2 \right) \quad (26)$$

przy czym:

$$\frac{\partial L}{\partial T A_i} = 0 \quad (27)$$

2.2. Statystyczne metody oceny

Badania statystyczne odgrywają kluczową rolę w ocenie i doskonaleniu procesów przemysłowych, umożliwiając podejmowanie decyzji opartych na danych ilościowych. W kontekście zarządzania jakością statystyka dostarcza narzędzi do analizy zmienności, oceny stabilności procesów oraz wiarygodności systemów pomiarowych. Dzięki zastosowaniu metod statystycznych możliwe jest nie tylko monitorowanie bieżącej produkcji, lecz także identyfikacja potencjalnych problemów, zanim wpłyną one na jakość wyrobu. Szczególnie istotne są tu analizy zdolności systemów pomiarowych, maszyn, jak i samych procesów technologicznych. Do tego typu badań zaliczają się badania wskaźników Cg (*capability of gauge*), Cgk (*capability of gauge, corrected*), Cm (*machine capability index*) i Cmk (*machine capability index centered*), Pp (*process performance index*), Ppk (*process performance capability index*) oraz Cp (*process capability index*), Cpk (*process capability index, corrected*), które służą odpowiednio do oceny zdolności przyrządów pomiarowych oraz maszyn i procesów. Koncepcję takich badań przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Schemat zintegrowanego podejścia do kwalifikacji pomiarów, maszyn i procesów technologicznych [83]

2.2.1. Wskaźniki zdolności wyposażenia pomiarowego C_g i C_{gk}

Współczesne przedsiębiorstwa przemysłu maszynowego, w obliczu rosnących wymagań dotyczących dokładności wytwarzanych wyrobów, zobowiązane są do zapewnienia stabilności oraz odpowiedniej zdolności stosowanych środków kontrolno-pomiarowych. Szczególnie istotne staje się to w kontekście produkcji realizowanej w oparciu o certyfikowane systemy zarządzania jakością, takie jak ISO 9000 czy IATF16949:2016. W takich przypadkach wykazanie przydatności narzędzi pomiarowych w konkretnych operacjach procesu technologicznego, stanowi nie tylko element dobrej praktyki, lecz często także wymóg stawiany przez klientów [N1].

Weryfikacja i ocena systemów pomiarowych realizowana jest przy użyciu metody MSA (ang. *Measurement System Analysis – Analiza Systemów Pomiarowych*), która obejmuje zestaw ustandaryzowanych procedur służących do oceny przydatności systemu pomiarowego dla danego zastosowania. Celem tej analizy jest identyfikacja źródeł zmienności pomiarów oraz ocena ich wpływu na wiarygodność uzyskiwanych wyników.

Zgodnie z normą PN-EN ISO 10012, efektywny system zarządzania pomiarami powinien zapewniać, że zarówno wyposażenie pomiarowe, jak i procesy pomiarowe są odpowiednio dostosowane do zamierzonego zastosowania [N2]. Ma to bezpośrednie przełożenie na realizację celów jakościowych organizacji oraz na ograniczenie ryzyka wystąpienia błędnych wyników pomiarów, które mogłyby negatywnie wpłynąć na jakość wyrobu końcowego.

Funkcją systemu zarządzania pomiarami jest zatem efektywne zarządzanie ryzykiem związanym z możliwością uzyskania nieprawidłowych wyników pomiarów, wynikających z niedostosowanego wyposażenia lub niewłaściwego przebiegu procesu pomiarowego. W tym kontekście stosowane metody mogą obejmować zarówno podstawową weryfikację wyposażenia, jak i bardziej zaawansowane techniki statystyczne wykorzystywane do sterowania procesami pomiarowymi.

Zgodnie z jedną z zasad zarządzania jakością przedstawionych w normie ISO 9000, kluczowe znaczenie ma podejście procesowe. W ramach tego podejścia procesy pomiarowe powinny być traktowane jako integralne elementy systemu, których zadaniem jest wspomaganie realizacji celów jakościowych, poprzez dostarczanie wiarygodnych danych na temat parametrów wyrobów [N3].

Jedną z podstawowych metod stosowanych do analizy zdolności wyposażenia pomiarowego jest tzw. „Procedura 1”. Metoda ta znajduje zastosowanie głównie u producentów nowo wytwarzanych przyrządów pomiarowych, a także w miejscach ich docelowej eksploatacji. Jej zasadniczym celem jest wstępna ocena zdolności systemu pomiarowego przed jego wdrożeniem do rutynowych zastosowań produkcyjnych. W ramach tej procedury uwzględnia się rzeczywiste warunki pomiarowe, obejmujące wpływ otoczenia, zmienność elementów składowych systemu oraz liczbę operatorów. W trakcie analizy wyznaczane są wskaźniki: C_g (charakteryzujący rozrzut) oraz C_{gk} (uwzględniający zarówno rozrzut, jak i centrowanie wyników względem wartości referencyjnej), stanowiące miarę zdolności wyposażenia pomiarowego.

Wyznaczanie wskaźników C_g i C_{gk} opiera się na przeprowadzeniu serii, co najmniej 50 pomiarów wzorca pomiarowego, którego rzeczywisty wymiar zlokalizowany jest zazwyczaj w środkowej części przedziału tolerancji analizowanego parametru procesowego. W uzasadnionych przypadkach dopuszcza się redukcję liczby pomiarów, przy czym ich minimalna liczba nie może być mniejsza niż 25. Każdy pomiar powinien być wykonany po uprzednim zdjęciu wzorca z przyrządu pomiarowego i jego ponownym umieszczeniu, co pozwala na uwzględnienie zmienności wynikającej z warunków obsługi. Wszystkie pomiary należy wykonywać w tym samym przekroju pomiarowym. Na podstawie zarejestrowanych wyników obliczane są wartości wskaźników C_g i C_{gk} . Tok obliczeń wskaźników jest następujący:

- obliczanie średniej z serii pomiarów wzorca:

$$\bar{x}_g = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (28)$$

gdzie:

$\bar{x}_g$ – wartość średnia z serii pomiarów wzorca,

x_i – i -ty pomiar wzorca,

n – liczba pomiarów (zazwyczaj $n=50$),

- obliczanie odchylenia standardowego serii pomiarów:

$$s_g = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_g)^2}{n - 1}} \quad (29)$$

gdzie:

s_g – odchylenie standardowe serii pomiarów,

- obliczanie odchylenia średniej pomiarów od wymiaru wzorca:

$$BI = |\bar{x}_g - x_{wz}| \quad (30)$$

gdzie:

x_{wz} – rzeczywista wartość wzorca,

- obliczanie wskaźnika zdolności związanego z rozrzutem C_g [62, 76]:

$$C_g = \frac{0,2T}{6s_g} = \frac{0,2(USL - LSL)}{6s_g} \quad (31)$$

gdzie:

C_g – wskaźnik zdolności związany z rozrzutem,

T – tolerancja,

USL – górny wymiar graniczny,

LSL – dolny wymiar graniczny,

- obliczanie wskaźnika zdolności związanego z rozrzutem i wycentrowaniem C_{gk} [62, 76]:

$$C_{gk} = \frac{0,1T}{3s_g} = \frac{0,1(USL - LSL) - |\bar{x}_g - x_{wz}|}{3s_g} \quad (32)$$

gdzie:

Cgk – wskaźnik zdolności związany z rozrzutem i wycentrowaniem,

- interpretacja wyników:

Na podstawie wyników pomiarów oraz przeprowadzonych obliczeń wskaźników zdolności systemu pomiarowego, obejmujących zarówno rozrzut (Cg), jak i wycentrowanie względem wartości referencyjnej (Cgk), podejmowana jest decyzja o przydatności danego wyposażenia pomiarowego do użytku produkcyjnego. System pomiarowy uznaje się za zdolny, jeżeli spełnione są poniższe kryteria:

$$Cg, Cgk \geq 1,33$$

W przypadku potwierdzenia zdolności przyrządu na podstawie powyższych wskaźników, rekomenduje się kontynuację analizy, poprzez zastosowanie tzw. „Procedury 2”, znanej również jako test R&R (*Repeatability and Reproducibility*) [81], [82].

2.2.2. Badanie zdolności maszyn Cm , Cmk

Badanie zdolności maszyny stanowi jedno z podstawowych narzędzi statystycznej kontroli jakości, wykorzystywanych w celu oceny możliwości technicznych urządzeń produkcyjnych w zakresie spełniania określonych wymagań. Głównym celem tego rodzaju analizy jest określenie, czy dana maszyna – pracująca w ustalonych warunkach technologicznych, przy użyciu określonego narzędzia i materiału – jest w stanie wytwarzać wyroby o stabilnych i powtarzalnych cechach jakościowych.

W szczególności badanie zdolności maszyny pozwala na identyfikację i ocenę zmienności pochodzącej wyłącznie od samego urządzenia, wyłączając wpływ operatora, materiału czy środowiska produkcyjnego. Wskaźniki zdolności, takie jak Cm i Cmk , umożliwiają określenie zarówno rozrzutu produkcji, jak i jej wycentrowania względem wartości nominalnej. Wysokie wartości tych wskaźników, świadczą o wysokim poziomie stabilności i precyzji działania maszyny.

Badania te są nieodzownym elementem kwalifikacji nowego parku maszynowego, walidacji procesów produkcyjnych oraz cyklicznego monitorowania sprawności technicznej urządzeń. Ich przeprowadzenie dostarcza obiektywnych podstaw do podejmowania decyzji o dopuszczeniu maszyny do produkcji seryjnej, wdrożeniu działań korygujących lub przeprowadzeniu modernizacji technicznej.

Wskaźniki zdolności maszyny Cm i Cmk odgrywają istotną rolę w zapewnieniu wysokich standardów jakości w nowoczesnych systemach zarządzania produkcją. Są one integralnym elementem systemów zgodnych z międzynarodowymi normami jakości, w tym ISO 9001 [N4] oraz IATF 16949 [N1]. Odniesione w niniejszej pracy standardy jednoznacznie wskazują na konieczność kształtowania procesów technologicznych w sposób zapewniający wysoki poziom precyzji, rozumianej jako

powtarzalność uzyskiwanych wyników. Równocześnie podkreślają znaczenie dokładności, definiowanej jako zgodność tych wyników z wartościami wzorcowymi. Wymagania te znajdują bezpośrednie odzwierciedlenie w wartościach wskaźników C_m i C_{mk} , stanowiących obiektywną miarę zdolności maszyn do spełnienia określonych kryteriów jakościowych.

Ponadto, liczni odbiorcy końcowi (OEM) oraz dostawcy pierwszego rzędu (1st Tier) wymagają od swoich partnerów biznesowych udokumentowanej stabilności procesów wytwórczych. Wymagania te często są formalnie ujęte w tzw. *Customer Specific Requirements* (CSR), które stanowią integralną część umów handlowych i jakościowych. Również organizacje produkcyjne wdrażają własne wewnętrzne standardy jakości, które określają minimalne wartości wskaźników zdolności, niezbędne do kwalifikacji nowego procesu technologicznego do produkcji seryjnej. Tym samym badanie C_m i C_{mk} stanowi nie tylko narzędzie analizy technicznej, ale również kluczowy element zgodności z wymaganiami klienta i systemami certyfikacji jakości.

W przypadku obrabiarek wyposażonych w układ wielowrzecionowy, ocena zdolności produkcyjnej prowadzona jest indywidualnie dla każdego wrzeciona. Dla każdego z nich przeprowadza się niezależne badanie zdolności, zgodnie z metodyką obliczania wskaźników, odnoszących się do parametrów istotnych z punktu widzenia jakościowego wyrobu. W celu określenia ogólnej zdolności analizowanej obrabiarki, za miarodajne przyjmuje się najniższe uzyskane wartości wskaźników zdolności spośród wszystkich badanych wrzecion. Wskaźnik ten stanowi reprezentatywną miarę zdolności całego układu wielowrzecionowego w kontekście wymagań tolerancyjnych i stabilności procesu.

W przypadku parametrów technologicznych charakteryzujących się jednostronnym ograniczeniem tolerancji — takich jak chropowatość powierzchni, bicie osiowe, kołowość, cylindryczność czy płaskość — których wartość optymalna wynosi zero, a dopuszczalna odchyłka jest określona jedynie przez Górną Wartość Graniczną, ocena zdolności procesu ogranicza się wyłącznie do wyznaczenia wskaźnika C_{mk} . Tego rodzaju podejście wynika z asymetrycznego charakteru tolerancji, w którym tylko przekroczenie granicy górnej skutkuje niespełnieniem wymagań jakościowych. Tok postępowania przy obliczaniu wskaźników jest następujący:

- Przygotowanie do pomiarów
 - Wybór parametru kontrolowanego – należy określić charakterystyczny wymiar lub cechę, która będzie przedmiotem analizy.
 - Zdefiniowanie tolerancji (T) – określenie górnej (USL) i dolnej (LSL) granicy tolerancji.

– Stabilizacja warunków procesu – maszyna musi pracować w stabilnych warunkach z jednym operatorem i tym samym narzędziem, najlepiej na jednym rodzaju materiału.

• Pomiary próby

– Pobranie próbki – wykonuje się zwykle 50 kolejnych detali w sposób ciągły, bez regulacji procesu w trakcie pomiarów. Jeśli próba będzie oceniana na przykład na podstawie 30 części, to przy ufności $p=95\%$ wskaźnik C_m , C_{mk} musi być większy niż 1,78. Zestawienie wymaganych wskaźników C_m , C_{mk} w zależności od wielkości próby i przedziału ufności przedstawiono w tabeli 1.

– Pomiar wartości cechy – dla każdego elementu mierzony jest ten sam parametr (np. średnica, długość),

– Rejestracja danych – wyniki pomiarów zapisywane są w formie tabelarycznej.

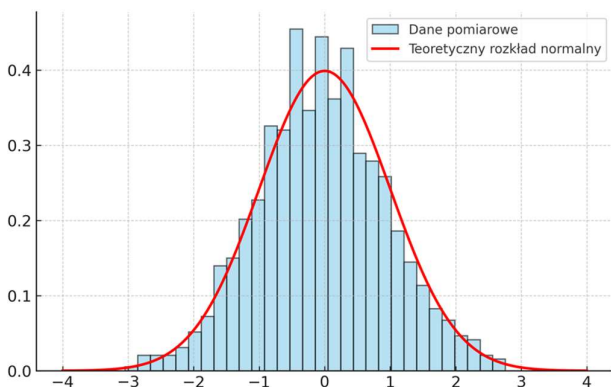
Tabela 1. Wymagane wskaźniki C_m , C_{mk} w zależności od wielkości próby i przedziału ufności [93]

Liczba sztuk	Zalecenia dla C_m/C_{mk} $p = 95\%$	Zalecenia dla C_m/C_{mk} $p = 99\%$
15	2,03	2,23
20	1,91	2,03
30	1,78	1,84
40	1,72	1,74
50	1,67	1,67

• Weryfikacja normalności rozkładu

Zanim obliczy się wskaźniki C_m i C_{mk} , należy sprawdzić czy dane pomiarowe mają rozkład normalny. Można to zrobić na kilka sposobów:

– Jednym z podstawowych, wstępnych kryteriów oceny zgodności rozkładu danych z rozkładem normalnym (rys. 10) jest analiza kształtu histogramu. Choć metoda ta nie pozwala na jednoznaczne potwierdzenie normalności, może stanowić skuteczne narzędzie do jej wstępnego wykluczenia. Histogram pełni zatem rolę diagnostyczną w analizie rozkładu zmiennej losowej, umożliwiając szybką identyfikację potencjalnych nieprawidłowości w strukturze danych.



Rys. 10. Histogram rozkładu normalnego lub bardzo zbliżonego do rozkładu normalnego

– Wstępna ocena zgodności rozkładu empirycznego z rozkładem normalnym może być wspomagana analizą dwóch tzw. parametrów kształtu: skośności (*skewness*) i kurtozy (*kurtosis*). Skośność opisuje asymetrię rozkładu względem średniej, natomiast kurtoza określa stopień koncentracji obserwacji wokół wartości centralnej, czyli tzw. „spiczastość” rozkładu.

Dla rozkładu idealnie normalnego wartości obu tych parametrów teoretycznie wynoszą zero – w przypadku kurtozy przy zastosowaniu tzw. kurtozy zredukowanej (czyli po odjęciu wartości 3 od klasycznej kurtozy). W praktyce, z uwagi na losowy charakter próby, dopuszczalne są niewielkie odchylenia. Przyjmuje się, że jeśli skośność i kurtoza próbki mieszczą się w przedziale od -0,5 do +0,5, może to stanowić silną przesłankę o zgodności danych z rozkładem normalnym.

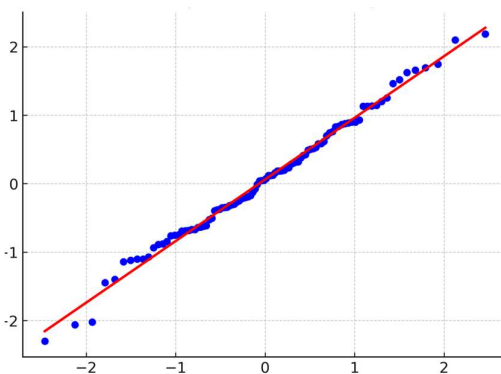
Dodatnia skośność ($S > 0$) świadczy o wydłużonym „ogonie” rozkładu po prawej stronie, natomiast skośność ujemna ($S < 0$) wskazuje na rozciągnięcie rozkładu w lewo. Kurtoza dodatnia sugeruje większe skupienie danych wokół średniej i obecność wartości odstających (rozkład leptokurtyczny), natomiast kurtoza ujemna świadczy o większym rozproszeniu danych i mniejszej liczbie wartości skrajnych (rozkład platykurtyczny). Wartości bliskie zeru (kurtoza mesokurtyczna) są typowe dla rozkładu normalnego.

Interpretacja skośności i kurtozy dostarcza zatem istotnych informacji na temat struktury rozkładu danych i może być wykorzystana, jako jedno z narzędzi wspierających decyzję o zastosowaniu formalnych testów normalności [35, 40].

– Trzecim, najczęściej stosowanym i praktycznie rozstrzygającym kryterium oceny normalności rozkładu danych empirycznych jest tzw. graficzny test normalności (rys. 11). Metoda ta polega na porównaniu kwantyli obserwowanych danych

z odpowiadającymi im kwantylami teoretycznego rozkładu normalnego. Wyniki przedstawiane są w postaci wykresu punktowego, na którym każdy punkt reprezentuje jedną obserwację w próbie [63].

Jeżeli badana zmienna rzeczywiście pochodzi z populacji o rozkładzie normalnym, punkty na wykresie będą układać się w przybliżeniu wzdłuż linii prostej, co świadczy o zgodności rozkładu empirycznego z rozkładem normalnym. Taki układ punktów stanowi silną przesłankę potwierdzającą normalność analizowanej cechy. W przypadku istotnych odchyień od linii prostej – zwłaszcza jeśli układ punktów ma charakter wyraźnie krzywoliniowy lub wykazuje systematyczne odchylenia na krańcach wykresu – można wnioskować, że rozkład danych istotnie odbiega od normalnego [61]. Ze względu na swoją przejrzystość i wysoką wartość diagnostyczną, graficzny test normalności jest często wykorzystywany, jako narzędzie wspomagające analizę przed zastosowaniem formalnych testów statystycznych.



Rys. 11. Wynik graficznego testu normalności rozkładu normalnego

– Testy statystyczne służące do oceny zgodności rozkładu empirycznego z rozkładem normalnym, takie jak test Andersona-Darlinga, są stosowane w celu obiektywnej i ilościowej weryfikacji hipotezy o normalności danych. W przeciwieństwie do metod graficznych, które mogą być subiektywne i zależne od interpretacji, testy statystyczne dostarczają formalnego kryterium decyzyjnego, co ma istotne znaczenie przy analizach wymagających założeń o rozkładzie normalnym.

Test Andersona-Darlinga (AD) to jeden z najbardziej czułych testów normalności, szczególnie w odniesieniu do odchyień w ogonach rozkładu. Jest on uznawany za bardziej rygorystyczny niż testy Kołmogorowa-Smirnowa, ponieważ uwzględnia różnice między empiryczną a teoretyczną funkcją rozkładu na całym zakresie danych [S1] [48]. Stosowany jest zarówno do małych, jak i średnich próbek

($8 \leq n < 2000$) i dobrze sprawdza się w analizach przemysłowych, gdzie wykrywanie odchylenia od normalności – zwłaszcza w ekstremach – ma kluczowe znaczenie (np. analiza stabilności procesów) [S2].

Weryfikacja hipotezy zerowej w teście Andersona-Darlinga polega na ocenie, czy badana próbka pochodzi z populacji o rozkładzie normalnym. Test ten bazuje na porównaniu empirycznej dystrybuanty skumulowanej z teoretyczną dystrybuantą rozkładu normalnego. Im większe są różnice między tymi dystrybuantami – zwłaszcza na krańcach rozkładu – tym większa jest wartość statystyki testowej, co może prowadzić do odrzucenia hipotezy o normalności.

Formalne sformułowanie hipotez:

- ✓ Hipoteza zerowa (H_0): Dane pochodzą z rozkładu normalnego.
- ✓ Hipoteza alternatywna (H_1): Dane nie pochodzą z rozkładu normalnego.

Porównanie z wartością krytyczną lub analiza wartości p :

Wartość p (p -value) wyznaczana jest na podstawie rozkładu statystyki testowej.

Decyzja:

Jeśli $p \leq \alpha$ (np. 0,05), odrzucamy H_0 – dane nie są zgodne z rozkładem normalnym.

Jeśli $p > \alpha$, brak podstaw do odrzucenia H_0 – brak istotnych dowodów przeciwko normalności.

Jeśli w wyniku analizy okaże się, że rozkład badanej zmiennej istotnie odbiega od normalnego, konieczne jest podjęcie odpowiednich działań, ponieważ metoda badania wskaźników C_m , C_{mk} opiera się na założeniu normalności.

Transformacja danych jest jedną z najczęściej stosowanych metod postępowania w przypadku, gdy rozkład empiryczny zmiennej istotnie odbiega od rozkładu normalnego. Jej głównym celem jest przekształcenie wartości obserwowanych w taki sposób, aby uzyskać rozkład możliwie zbliżony do normalnego, co umożliwia zastosowanie metod statystycznych opartych na tym założeniu. Transformacje są szczególnie przydatne w przypadku obecności skośności lub nadmiernej kurtozy w danych.

W praktyce stosuje się różnorodne funkcje transformujące, dobierane w zależności od kierunku i charakteru odchylenia. Transformacja danych powinna być poprzedzona analizą struktury rozkładu oraz potwierdzona ponownym testem normalności, aby upewnić się, że zastosowane przekształcenie skutecznie zniwelowało odchylenia od rozkładu normalnego. Pomimo swojej użyteczności, należy pamiętać, że transformacja zmienia interpretację danych i wyników, dlatego jej stosowanie powinno być świadome, uzasadnione i odpowiednio udokumentowane.

- Obliczanie średniej pomiarów:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (33)$$

gdzie:

$\bar{x}$ – wartość średnia,

x_i – i -ty pomiar,

n – liczba pomiarów (zazwyczaj $n=50$),

- Obliczanie odchylenia standardowego:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (34)$$

gdzie:

s – odchylenie standardowe,

- Obliczanie wskaźnika zdolności maszyny C_m :

$$C_m = \frac{T}{6s} = \frac{USL - LSL}{6s} \quad (35)$$

- Obliczanie wskaźnika wypośrodkowania maszyny C_{mk} :

$$C_{mk} = \min[(USL - \bar{x}) / 3s; (\bar{x} - LSL)/3s] \quad (36)$$

- Interpretacja wyników:

- $C_m \geq 1,67$ i $C_{mk} \geq 1,67$ – dobra zdolność maszyny (minimalne wymaganie przemysłu motoryzacyjnego).
- $\geq 1,33$ – maszyna spełnia standardowe wymagania.
- $< 1,33$ – wymagane działania korygujące.

2.2.3. Relacja między zdolnością maszyny (C_m , C_{mk}), a zdolnością procesu (P_p , P_{pk} , C_p , C_{pk})

W analizie zdolności procesów niezwykle istotne jest nie tylko poprawne obliczenie wskaźników P_p , P_{pk} , C_p i C_{pk} , lecz także umiejętne zaplanowanie

próbki, ponieważ sposób doboru danych wejściowych wpływa bezpośrednio na trafność wniosków. Wskaźniki te można zapisać w postaci formalnych równań, które stanowią podstawę ich interpretacji.

Wskaźnik zdolności potencjalnej procesu P_p , P_{pk} definiuje się identycznie, jak wskaźniki C_m , C_{mk} , różni je natomiast plan próbkowania. Zagadnienie próbkowania ma w tym kontekście fundamentalne znaczenie. W przypadku wskaźników P_p i P_{pk} , które stosuje się do oceny zdolności krótkoterminowej, wielkość próby oraz częstotliwość pobierania, należy dobrać w zależności od rodzaju procesu i rodzaju wyrobu, tak aby wszystkie istotne zmiany zostały wykryte na czas. Próbkę powinny być reprezentatywne dla rozpatrywanej charakterystyki [N5]. Istotne jest, aby próbka była losowa, gdyż jej celem jest odwzorowanie aktualnego rozrzutu cechy jakościowej. Typowym rozwiązaniem jest pobór co n -tego wyrobu z bieżącej produkcji, unikając jednocześnie sytuacji, w której do analizy trafią wyłącznie elementy z początku lub końca serii.

W przypadku oceny C_p i C_{pk} procedura wymaga, aby proces pozostawał w stanie statystycznej kontroli. Oznacza to, że przed obliczeniem wskaźników, należy przeprowadzić analizę kart kontrolnych i upewnić się, że proces nie wykazuje oznak niestabilności. Próby pobiera się w sposób systematyczny z różnych okresów produkcji, na przykład w cyklach godzinowych lub zmianowych, tak aby zebrać dane reprezentatywne dla zmienności długoterminowej. Liczebność próbek powinna być wystarczająca do wiarygodnego oszacowania odchylenia standardowego, a praktyka przemysłowa zaleca zwykle pobór kilkudziesięciu do stu próbek po dwa do dziesięciu elementów w każdej serii (zazwyczaj cztery lub pięć) [N6]. Wskaźnik zdolności C_p definiuje się jako [78]:

$$C_p = \frac{T}{6\sigma} = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (37)$$

Wskaźnik C_{pk} koryguje ocenę zdolności o położenie średniej względem granic tolerancji. Jego wzór ma postać:

$$C_{pk} = \min[(USL - \bar{x}) / 3\sigma; (\bar{x} - LSL) / 3\sigma] \quad (38)$$

Dla wskaźników C_p i C_{pk} odchylenie standardowe nie jest estymowane wyłącznie z całej próby, lecz oblicza się je na podstawie rozrzutu wewnątrzgrupowego, to znaczy z kilku mniejszych próbek pobieranych w określonych odstępach czasu.

Typowo stosuje się tu estymację opartą na średnim rozstępie, w której odchylenie standardowe wyznacza się według wzoru:

$$\sigma = \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (39)$$

Gdzie $\bar{R}$ jest średnim rozstępem z wszystkich próbek, a d_2 wartością stałą zależną od liczności próby (tablicowo określaną w statystycznej kontroli jakości).

W motoryzacji wskaźniki zdolności maszyny (C_m , C_{mk}) odnoszą się bezpośrednio do charakterystyki samego urządzenia, mierząc jego potencjał do produkcji elementów zgodnych ze specyfikacją technologiczną w krótkim czasie, bez uwzględniania czynników zewnętrznych. Natomiast wskaźniki zdolności procesu (C_p , C_{pk}) uwzględniają nie tylko własności samego urządzenia, ale również wpływ czynników środowiskowych, zmienność surowców oraz kompetencje operatorów, będąc tym samym miarą długoterminowej stabilności i powtarzalności procesu produkcyjnego. W literaturze naukowej podkreśla się, że wartości C_m i C_{mk} są zazwyczaj wyższe niż C_p i C_{pk} ze względu na brak uwzględnienia pełnej zmienności procesu. Typowa wartość zdolności maszyny C_{mk} w motoryzacji powinna przekraczać 1,67 [85], podczas gdy minimalna akceptowalna wartość wskaźnika zdolności procesu C_{pk} w tej branży wynosi często 1,33 lub wyżej [18, 93]. Wskaźniki zdolności procesu C_p i C_{pk} stanowią kluczowe narzędzia statystyczne służące do oceny zdolności procesu wytwórczego do spełniania wymagań specyfikacyjnych. Wartość C_p opisuje potencjalną zdolność procesu, zakładając jego centrowanie, podczas gdy C_{pk} uwzględnia rzeczywiste przesunięcie średniej względem granic tolerancji. Istnieje ścisła zależność pomiędzy wartością wskaźnika C_{pk} , a ilością wyprodukowanych części wadliwych – im wyższy C_{pk} , tym mniejsze prawdopodobieństwo wytworzenia elementów poza specyfikacją. Zestawienie wskaźników zdolności procesu C_p oraz C_{pk} i ich wpływu na wielkość produkcji brakowej przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Zależność pomiędzy odchyleniem standardowym, ilością sztuk wadliwych na milion, zdolnością procesu oraz procentem sztuk zgodnych ze specyfikacją

Odchylenia standardowe	Ilość sztuk wadliwych na 1 milion	Zdolność procesu	Ilość sztuk zgodnych ze specyfikacją [%]
± 1	317310,5078	0,33	68,268949
± 2	45500,2638	0,67	95,449973
± 3	2699,7961	1,00	99,730020
± 4	63,3425	1,33	99,993665
$\pm 4,5$	6,7953	1,50	99,999320
± 5	0,5733	1,67	99,999942
± 6	0,0020	2,00	99,999999

2.3. Wnioski

Analiza literatury wskazuje, że współczesne projektowanie łańcuchów wymiarowych oraz zarządzanie tolerancjami odgrywają kluczową rolę w zapewnieniu jakości oraz efektywności procesów wytwórczych. Wraz z rozwojem technologii obserwuje się odejście od klasycznych metod deterministycznych, takich jak zamienność całkowita, na rzecz metod statystycznych umożliwiających probabilistyczną ocenę możliwości montażu wytworzonych części i redukcję kosztów produkcji. Ważnym elementem współczesnych systemów jakości jest kompleksowa analiza zdolności narzędzi pomiarowych, maszyn oraz procesów przy użyciu wskaźników C_g , C_{gk} , C_m , C_{mk} , C_p i C_{pk} , które pozwalają na ilościową ocenę stabilności i powtarzalności procesów technologicznych. Zastosowanie metod statystycznych w analizie tolerancji umożliwia skuteczne sterowanie jakością wytwarzania, zapewniając jednocześnie optymalne powiązanie wymagań konstrukcyjnych, technologicznych i ekonomicznych.

ROZDZIAŁ III

CEL I SPOSÓB REALIZACJI PRACY

3.1. Cel pracy

Kluczowym aspektem procesu montażu piast łożyskowych jest prawidłowe ustawienie napięcia wstępnego. Nieprawidłowe wartości tego parametru prowadzą do powstawania nadmiernych sił oddziałujących na elementy toczne łożysk, co skutkuje obniżeniem ich trwałości zmęczeniowej oraz wpływa na charakterystykę drgań zespołu. Nadmierne napięcie wstępne powoduje wzrost temperatury eksploatacyjnej łożyska, przyspieszając proces jego degradacji, natomiast zbyt duży luz w układzie sprzyja powstawaniu zużycia przylgowego, które może prowadzić do zjawiska zacierania w wyniku poślizgu. Proces ten generuje ciepło o natężeniu mogącym doprowadzić do uszkodzenia łożyska. Analiza literatury wskazuje na brak jednoznacznych wytycznych dotyczących wartości oraz tolerancji luzu wzdłużnego, jakie należy stosować w zespołach łożyskowych. Ponadto, brak jest rozważań odnoszących się do możliwości zastosowania zamienności częściowej oraz jej potencjalnego wpływu na redukcję kosztów produkcji piast.

Celem pracy było opracowanie nowej technologii wytwarzania oraz modelu matematycznego łańcuchów wymiarowych, umożliwiającego wyznaczenie tolerancji wykonania wymiarów wynikowych a także opracowanie modeli dla zamienności pełnej i częściowej przy określonym poziomie prawdopodobieństwa oraz przeprowadzenie analizy wpływu tych rozwiązań na możliwość rozszerzenia tolerancji i redukcję kosztów produkcji.

Osiągnięcie głównego celu pracy wymagało wyznaczenia poniższych celów szczegółowych:

- Analiza rysunku konstrukcyjnego piasty łożyskowej trzeciej generacji opracowanego przez FŁT Kraśnik S.A., ze szczególnym uwzględnieniem aspektów wymiarowych, obejmujących identyfikację i ocenę parametrów geometrycznych, tolerancji wykonania oraz powiązań wymiarowych poszczególnych elementów składowych zespołu. Analiza ta miała na celu określenie wpływu przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych na dokładność montażu, prawidłowe ustawienie napięcia wstępnego łożysk oraz spełnienie wymagań eksploatacyjnych i jakościowych.

- Opracowanie modelu matematycznego łańcuchów wymiarowych, obejmowało uwzględnienie tolerancji wykonania elementów składowych zespołu, w celu przeprowadzenia analizy luzu wzdłużnego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji. Model ten umożliwia określenie zależności pomiędzy odchyłkami wymiarowymi poszczególnych części, a wartością uzyskanego luzu wzdłużnego, co stanowi podstawę do optymalizacji procesu montażu, zapewnienia prawidłowego napięcia wstępnego łożysk oraz oceny możliwości zastosowania zamienności częściowej w kontekście redukcji kosztów produkcji.
- Przyjęcie zasad zamienności pełnej i częściowej, z uwzględnieniem określonego poziomu prawdopodobieństwa, stanowiło podstawę do przeprowadzenia obliczeń opartych na równaniach opisujących ustalone łańcuchy wymiarowe konstrukcji piasty łożyskowej. Analiza ta została przeprowadzona w kontekście modelu luzu wzdłużnego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji, co umożliwiło określenie wpływu odchyłek wymiarowych elementów składowych na wartość luzu łożysk. Wyniki obliczeń pozwoliły na ocenę, w jakim stopniu zastosowanie zamienności częściowej może przyczynić się do utrzymania wymaganych parametrów eksploatacyjnych przy jednoczesnej redukcji kosztów wytwarzania.
- Ustalenie wstępnych tolerancji dla kluczowych wymiarów konstrukcyjnych, z uwzględnieniem przyjętego wariantu zamienności częściowej, stanowiło istotny etap analizy modelu luzu wzdłużnego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji. Przeprowadzono porównanie odchyłek obliczonych zgodnie z zasadą zamienności częściowej, dla zadanego poziomu prawdopodobieństwa, z tolerancjami przyjętymi przez konstruktora w dokumentacji technicznej. Analiza różnic została odniesiona do przewidywanej wartości luzu wzdłużnego, prawdopodobieństwa spełnienia specyfikacji montażowej oraz ryzyka przekroczeń granic funkcjonalnych. Uzyskane wyniki wskazały obszary, w których zastosowanie zamienności częściowej umożliwia bezpieczne rozszerzenie tolerancji bez wpływu na uzyskiwaną wartość luzu wzdłużnego oraz bez pogorszenia charakterystyki pracy zespołu, co przekłada się na potencjalną redukcję kosztów obróbki i montażu.
- Ustalenie kolejnych operacji technologicznych dla poszczególnych elementów składowych zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji, obejmowało opracowanie szczegółowej sekwencji procesów wytwórczych, uwzględniającej wymagania konstrukcyjne, tolerancje wykonania oraz właściwości materiałowe. Procedura ta obejmowała określenie kolejności operacji obróbki skrawaniem, procesów obróbki cieplnej, operacji wykańczających oraz kontroli jakości, tak

aby zapewnić uzyskanie parametrów geometrycznych i funkcjonalnych zgodnych z dokumentacją techniczną. Szczególny nacisk położono na etapy mające bezpośredni wpływ na wartość luzu wzdłużnego.

- Przyjęcie baz technologicznych, a także określenie wymagań do zakupu maszyn technologicznych do wytwarzania pierścieni łożyskowych i elementów tocznych stanowiły kluczowy etap przygotowania procesu produkcyjnego elementów składowych zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji. Etap ten obejmował określenie optymalnych powierzchni bazowych dla poszczególnych operacji obróbkowych w celu zapewnienia właściwej dokładności pozycjonowania detali, minimalizacji błędów kumulowanych w łańcuchach wymiarowych oraz utrzymania wymaganych tolerancji geometrycznych. Równolegle przeprowadzono analizę możliwości zastosowania dostępnych maszyn technologicznych, koncentrując się na ich zdolności do realizacji operacji w wymaganych klasach dokładności, powtarzalności wymiarowej i stabilności procesu.
- Opracowanie procesów technologicznych dla poszczególnych elementów zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji obejmowało kompleksowe zaplanowanie sekwencji operacji wytwórczych, obejmujących obróbkę cieplną, procesy tokarskie, frezarskie oraz szlifierskie, a także dobór odpowiednich parametrów obróbki w celu zapewnienia zgodności wyrobu z wymaganiami konstrukcyjnymi i eksploatacyjnymi. Uwzględniono charakterystykę materiałów stosowanych do wytwarzania pierścieni łożyskowych, piasty oraz elementów tocznych, tak aby parametry cieplne i skrawania minimalizowały odkształcenia termiczne i naprężenia własne, jednocześnie gwarantując osiągnięcie wymaganych tolerancji kształtu, położenia oraz chropowatości powierzchni. Dla operacji tokarskich, frezarskich i szlifierskich określono optymalne prędkości obrotowe, posuwy, głębokości skrawania oraz strategie, ze szczególnym uwzględnieniem wymiarów krytycznych wpływających na wartość luzu wzdłużnego. Równolegle przyjęto zestaw narzędzi pomiarowych, obejmujący przyrządy kontrolne i systemy pomiarów w toku produkcji, umożliwiające bieżącą weryfikację parametrów wymiarowych i geometrycznych, co pozwoliło na zapewnienie wysokiej powtarzalności wyrobu, minimalizację braków produkcyjnych oraz utrzymanie stabilności procesu w warunkach produkcji seryjnej.
- Przeprowadzono badania zdolności obrabiarek, obejmujące ocenę powtarzalności i dokładności wykonywania wymiarów krytycznych dla poszczególnych elementów składowych zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji. Analiza wyników, z wykorzystaniem wskaźników zdolności C_m i C_{mk} , pozwoliła na określenie rzeczywistych możliwości technologicznych zastosowanych maszyn

oraz ich stabilności w warunkach produkcji seryjnej. Na tej podstawie ustalono ostateczne tolerancje ogniów składowych wpływających na wartość luzu wzdłużnego, zapewniające utrzymanie luzu wzdłużnego piast. W kolejnym etapie zrealizowano montaż próbnej serii piast łożyskowych trzeciej generacji w liczbie 50 sztuk, stanowiącej reprezentatywną próbę weryfikacyjną. Analiza wyników pomiarów luzu wzdłużnego pozwoliła na potwierdzenie zasadności przyjętych założeń konstrukcyjno-technologicznych oraz na identyfikację ewentualnych obszarów wymagających dalszej optymalizacji procesu wytwarzania.

3.2. Teza pracy

W oparciu o przegląd literatury dotyczącej podjętego zagadnienia, wyniki wstępnych analiz, własne obserwacje oraz opinie ekspertów sformułowano następującą tezę badawczą:

Opracowanie nowej technologii wytwarzania oraz budowa modelu matematycznego łańcuchów wymiarowych umożliwia ustalenie tolerancji wykonania przyjętych wymiarów wynikowych. Zastosowanie zamienności częściowej pozwala na rozszerzenie tolerancji i zmniejszenie kosztów wytwarzania.

3.3. Sposób realizacji pracy

Niniejsza rozprawa doktorska składa się z siedmiu rozdziałów.

W rozdziale pierwszym przedstawiono charakterystykę kolejnych generacji zespolonych piast łożyskowych, uwzględniając ich ewolucję konstrukcyjną, rozwiązania technologiczne oraz zakres zastosowań. Szczególny nacisk położono na omówienie korzyści wynikających z wdrożenia tego typu rozwiązań, obejmujących zarówno aspekt ekonomiczny, przejawiający się w redukcji kosztów i skróceniu czasu procesów wytwórczych, jak i aspekt eksploatacyjny w warunkach rzeczywistej eksploatacji. Analizie poddano także wpływ zastosowania poszczególnych generacji piast na optymalizację procesów montażowych oraz ograniczenie ryzyka wystąpienia awarii w trakcie użytkowania.

Rozdział drugi poświęcono omówieniu aktualnego stanu wiedzy w zakresie teorii i praktyki dotyczącej łańcuchów wymiarowych, obejmującym ich klasyfikację, metody obliczania, analizę oraz syntezę. Szczegółowo przedstawiono procedury obliczeniowe z wykorzystaniem zasad zamienności pełnej i częściowej, przy uwzględnieniu zadanego poziomu prawdopodobieństwa spełnienia wymagań konstrukcyjnych. Zaprezentowano zarówno deterministyczne, jak i probabilistyczne podejścia do wyznaczania wartości granicznych wymiarów w poszczególnych ogniwach

łańcucha. W kolejnych częściach rozdziału opisano metody badania zdolności przyrządów pomiarowych C_g , C_{gk} , a także metody oceny zdolności maszyn, oparte na wskaźnikach C_m i C_{mk} . Szczególną uwagę poświęcono zależności pomiędzy wymaganą zdolnością maszyny (C_m , C_{mk}) a oczekiwaną zdolnością procesu (C_p , C_{pk}) dla analizowanego parametru, wskazując na konsekwencje niespełnienia wymagań w tym zakresie dla stabilności procesu oraz jakości wyrobu. Omówione zagadnienia stanowią teoretyczną podstawę do dalszych analiz przedstawionych w kolejnych rozdziałach pracy.

W rozdziale trzecim opisany został cel główny pracy oraz cele szczegółowe, postawiono tezę badawczą oraz sposób realizacji pracy doktorskiej.

W rozdziale czwartym przeprowadzono szczegółową analizę rysunku konstrukcyjnego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji, obejmującą identyfikację wszystkich wymiarów krytycznych z punktu widzenia kształtowania luzu wzdłużnego. Wyniki tej analizy stanowiły podstawę do opracowania modelu matematycznego łańcucha wymiarowego luzu wzdłużnego, odzwierciedlającego zależności pomiędzy odchyłkami wymiarowymi poszczególnych ogniw składowych a wartością luzu końcowego. Opracowany model oraz jego szczegółowa analiza umożliwiły wyznaczenie współczynników wpływu poszczególnych ogniw na luz wzdłużny, co pozwoliło na określenie stopnia ich znaczenia w procesie montażu i eksploatacji zespołu. Na podstawie równań opisujących łańcuch wymiarowy przeprowadzono obliczenia wartości dopuszczalnych tolerancji dla wariantów zamienności pełnej oraz zamienności częściowej, przy założonym poziomie prawdopodobieństwa spełnienia wymagań. Uzyskane tolerancje, obliczone według zasad zamienności częściowej, zestawiono i porównano z wartościami tolerancji przyjętymi przez konstruktora w dokumentacji technicznej, co pozwoliło na ocenę potencjalnych możliwości optymalizacji wymiarowej w kontekście jakości oraz kosztów wytwarzania. W dalszym etapie analiz wyznaczono środki obszarów zmienności dla każdego ogniwia wchodzącego w skład równania luzu wzdłużnego, co umożliwiło określenie optymalnych wartości nominalnych.

Rozdział piąty poświęcono szczegółowemu opisowi procesu technologicznego wytwarzania zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji. W pierwszej części przedstawiono warunki zamawiania otoczek, z opisem wymagań dla pierścienia zewnętrznego oraz pierścienia wewnętrznego kołnierзовego. Następnie zaprezentowano procesy obróbki tokarskiej pierścieni oraz kucia wałeczków stożkowych. Kolejna sekcja zawiera omówienie procesów obróbki cieplnej, obejmujących pierścień zewnętrzny, pierścień wewnętrzny kołnierзовy oraz wałeczek stożkowy. W dalszej części rozdziału opisano obróbkę tokarską pierścienia wewnętrznego kołnierзовego

po obróbce cieplnej oraz kompleksowy proces obróbki szlifierskiej pierścieni i wałeczków stożkowych. Dla pierścienia zewnętrznego wyszczególniono etapy szlifowania oraz proces dogładzania bieżni. Analogicznie, dla pierścienia wewnętrznego kołnierzonego omówiono procesy szlifowania profilu, bieżni, bieżni pomocniczej oraz proces dogładzania. Przedstawiono również opis szlifowania wałeczków stożkowych oraz warunki do zamawiania pierścienia wewnętrznego. Rozdział zamyka opis linii montażowej, obejmującej końcowy etap procesu technologicznego, w którym poszczególne elementy są łączone w kompletny zespół piasty łożyskowej.

Rozdział szósty poświęcono badaniom wskaźników zdolności maszyn stosowanych w procesach obróbki ścierniej, których wyniki stanowiły podstawę do ostatecznego określenia dopuszczalnych tolerancji dla ogniw składowych łańcucha wymiarowego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji. Analiza zdolności maszyn obejmowała ocenę stabilności i powtarzalności parametrów obróbki w odniesieniu do wymiarów, mających bezpośredni wpływ na wartość luzu wzdłużnego. W kolejnej części rozdziału przedstawiono badania zdolności przyrządów pomiarowych wykorzystywanych w trakcie produkcji pierścieni łożyskowych oraz elementów tocznych wchodzących w skład zespołu piasty. Szczególny nacisk położono na przyrządy stosowane do pomiaru wymiarów determinujących wartość luzu wzdłużnego, a tym samym decydujących o prawidłowym napięciu wstępnym łożysk i trwałości eksploatacyjnej całego zespołu.

Dla wybranych przyrządów pomiarowych szczegółowo opisano metodykę wyznaczania budżetu niepewności pomiaru, obejmującą identyfikację wszystkich istotnych składników niepewności oraz analizę wpływu na całkowitą niepewność wyniku. W końcowej części rozdziału zaprezentowano wyniki pomiarów luzu wzdłużnego w wyprodukowanych piastach łożyskowych trzeciej generacji. Dane te poddano analizie statystycznej, umożliwiającej ocenę zgodności uzyskanych wartości z wymaganiami konstrukcyjnymi i tolerancjami ustalonymi na podstawie wcześniejszych badań. Analiza ta stanowiła istotny element weryfikacji poprawności przyjętych założeń technologicznych oraz potwierdzenia zdolności procesu do spełnienia parametrów funkcjonalnych zespołu.

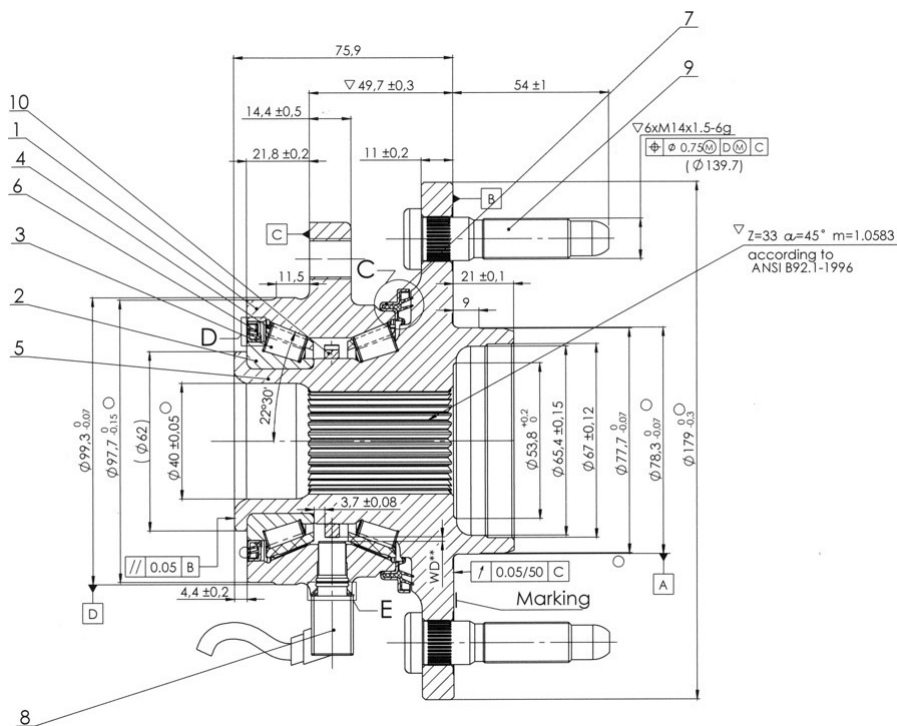
Rozdział siódmy przedstawia podsumowanie oraz wnioski końcowe z przeprowadzonych badań. Zawarta w nich konkluzja wskazuje, że rozszerzenie pól tolerancji podzespołów piasty łożyskowej trzeciej generacji umożliwiło wyeliminowanie czasochłonnej operacji selekcji elementów, co uprościło proces wytwórczy i obniżyło koszt montażu o 8%.

Na końcu rozprawy przedstawiono źródła literaturowe wykorzystane do jej opracowania.

ROZDZIAŁ IV

ANALIZA KONSTRUKCJI PIASTY ŁOŻYSKOWEJ TRZECIEJ GENERACJI

Analiza matematyczna łańcuchów wymiarowych została przeprowadzona dla zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji z wykorzystaniem konstrukcji łożysk stożkowych. Uruchomienie produkcji zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji w FLT Kraśnik stanowiło istotny krok w kierunku poszerzenia oferty o produkty o wyższym stopniu integracji. Dotychczas tego typu rozwiązania, zawierające zintegrowane bieżnie wymagające hartowania indukcyjnego oraz kołnierze montażowe, nie były wytwarzane w zakładzie. Wymagało to wdrożenia nowych technologii obróbki, precyzyjnego montażu elementów tocznych oraz metod kontroli. Projekt uruchomienia objął również adaptację parku maszynowego, opracowanie dedykowanego procesu technologicznego oraz walidację jakości zgodnie z wymaganiami przemysłu motoryzacyjnego. Realizacja tego zadania potwierdziła zdolność zakładu do elastycznego reagowania na zmieniające się potrzeby rynku oraz do produkcji komponentów zgodnych z najnowszymi standardami technicznymi. Pierwszym krokiem było przeprowadzenie szczegółowej analizy konstrukcji zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji, która obejmowała analizę wymagań konstrukcyjnych, materiałowych, identyfikację kluczowych cech geometrycznych i funkcjonalnych oraz weryfikację zgodności projektu z obowiązującymi normami. Budowę zespolonej piasty przedstawiono na rysunku 12.



Rys. 12. Zespolona piasta łożyskowa trzeciej generacji z wykorzystaniem konstrukcji łożysk stożkowych. 1 – pierścień zewnętrzny, 2 – pierścień wewnętrzny, 3 – element toczy – waleczek stożkowy, 4 – kosz, 5 – pierścień wewnętrzny kołnierzykowy, 6 – uszczelka z deflektorem, 7 – uszczelka, 8 – czujnik, 9 – śruba piasty, 10 – pierścień impulsowy

4.1. ISO GPS

Wyrób prawidłowo wykonany musi spełniać zdefiniowane wymagania funkcjonalne oraz estetyczne, zgodnie z oczekiwaniami użytkownika końcowego. Jednym z kluczowych warunków determinujących osiągnięcie wymaganej wartości użytkowej jest nadanie wyrobowi odpowiedniej formy geometrycznej na etapie procesu wytwarzania. W tym kontekście kluczową rolę odgrywa również rozwój, a także doskonalenie technik pomiarowych, które przyczyniają się do intensyfikacji postępu technologicznego oraz umożliwiają szybkie i precyzyjne wykonywanie pomiarów gotowych elementów [1, 53].

Należy jednak zauważyć, że nawet najbardziej zaawansowane technologicznie maszyny pomiarowe nie są w stanie zapewnić poprawności procesu pomiarowego, a tym samym właściwej oceny i kwalifikacji wytworzonego wyrobu, w przypadku braku jednoznacznego określenia wymagań geometrycznych przez konstruktora.

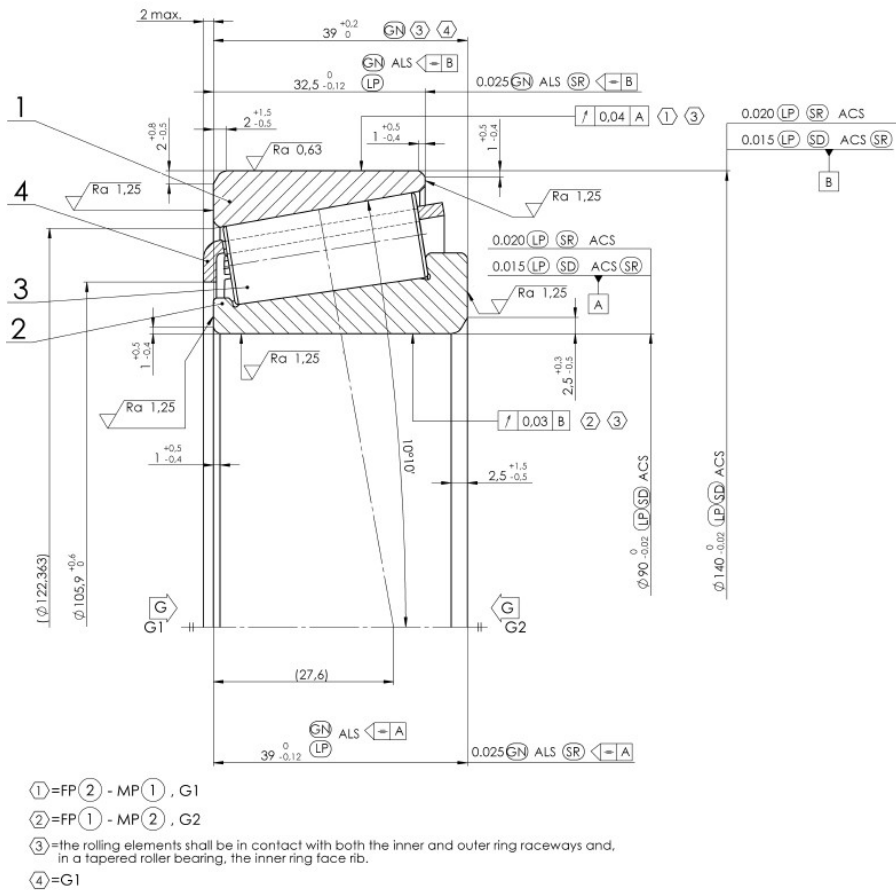
Pomiary elementów o relatywnie prostych kształtach mogą być interpretowane w sposób wieloznaczny, co w konsekwencji prowadzi do potencjalnych niezgodności.

Wdrożenie standaryzowanych metod opisu geometrycznego jest warunkiem niezbędnym do zapewnienia prawidłowej komunikacji pomiędzy uczestnikami procesu produkcyjnego: konstruktorem, technologiem, metrologiem oraz pomiędzy dostawcą i odbiorcą [49, 51]. Szczęólnego znaczenia nabiera stosowanie ujednoliconego, międzynarodowego języka graficznego, zwłaszcza w warunkach globalizacji procesów produkcyjnych i różnorodności wykorzystywanych systemów pomiarowych.

Współczesny rozwój systemów CAD, CAM oraz CMS (*Coordinate Measuring Systems*) dodatkowo podkreśla potrzebę stosowania jednolitych modeli cyfrowych wyrobów, zawierających kompletne informacje dotyczące tolerancji geometrycznych, zdefiniowanych na etapie projektowania.

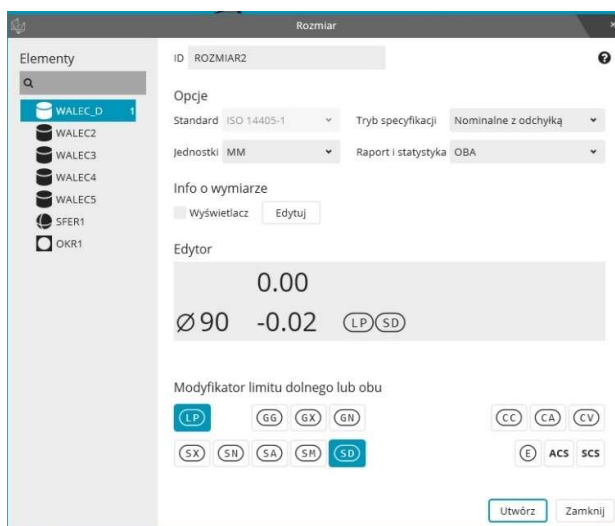
System opisu tolerancji geometrycznych jest przedmiotem stałego rozwoju w ramach działań Międzynarodowej Organizacji Normalizacyjnej (ISO). Aktualnie obejmuje on zbiór około 130 norm określanych wspólnym mianem ISO GPS (*Geometrical Product Specifications*) [49, 51], [N7]. Znajomość oraz prawidłowe stosowanie systemu ISO GPS stanowi obecnie podstawowy warunek poprawnego opracowania dokumentacji technicznej, zwłaszcza w sektorze motoryzacyjnym, gdzie zapewnienie funkcjonalności, niezawodności oraz zamienności produkowanych części jest kluczowe dla zachowania konkurencyjności przedsiębiorstw. Do tego celu zostały stworzone normy ISO GPS. Cechy wymiarowe i geometryczne łożysk tocznych poprzecznych opisane są w normie ISO 492:2014 - Rolling bearings — Radial bearings — Geometrical product specifications (GPS) and tolerance values [N8]. Przykład zastosowania normy ISO 492:2014 dla łożyska pokazano na rysunku 13.

Użycie modyfikatorów w normie łożyskowej ISO 492 niesie ze sobą istotne zalety z punktu widzenia jednoznaczności i powtarzalności wykonywania pomiarów na współrzędnościowej maszynie pomiarowej (CMM). Redukuje to możliwość błędnej interpretacji przez technologa i metrologa. Wprowadzenie modyfikatorów na rysunku wymusza zbieżność między intencją projektową a metodą weryfikacji jakości. Pozwala to projektantom na dokładne zdefiniowanie funkcjonalnych granic dopuszczalnych odchyłek.



Rys. 13. Rysunek łożyska stożkowego wykonany z wykorzystaniem modyfikatorów ISO GPS [FLT]

Współczesne systemy CAD/CAM/CMM mogą automatycznie odczytywać informacje o modyfikatorach z modeli 3D. Umożliwia to bezpośrednie generowanie programów pomiarowych bez potrzeby ręcznego interpretowania dokumentacji (rys. 14).



Rys. 14. Możliwości wyboru modyfikatorów wg normy ISO 14405-1 w oprogramowaniu pomiarowym PC-Dmis CAD++ 2025.1 (materiał udostępniony przez firmę HEXAGON)

Wykorzystanie modyfikatorów również w raportach pomiarowych przynosi szereg korzyści dla kontroli jakości i walidacji procesów:

- dokładne odwzorowanie warunków funkcjonalnych pomiaru,
- umożliwienie porównywalności wyników między zakładami lub seriami,
- redukcja reklamacji i niezgodności wynikających z błędnej interpretacji,
- możliwość automatycznego zapisu wyników w systemach.

Do pełniejszego opisu niezbędne są jeszcze normy PN-EN ISO 1101:2017 opisująca tolerancje geometryczne, symbole kształtu, bicia, położenia i kierunku, ramki tolerancji oraz modyfikatory [N9] oraz norma PN-EN ISO 14405-1:2016 zawierająca definicje i symbole dla wymiarów liniowych oraz modyfikatory [N10].

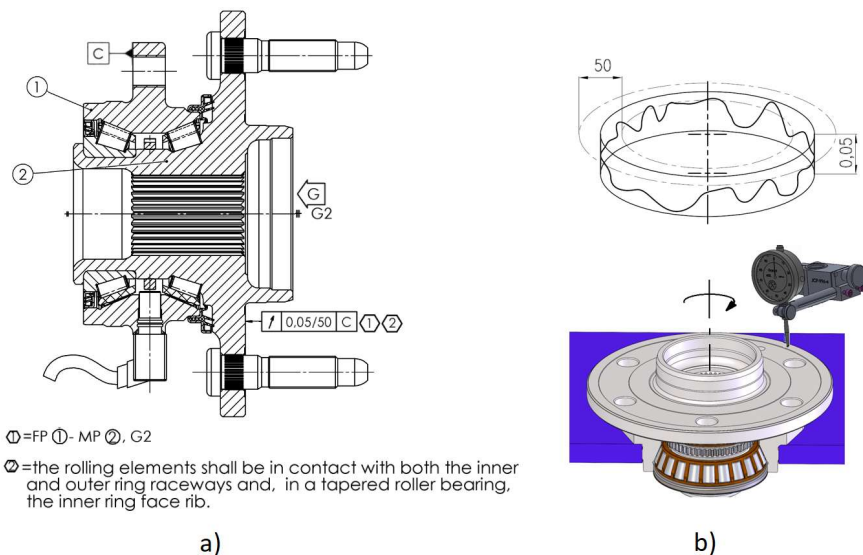
Normy ISO GPS pozwalają na doprecyzowanie warunków pomiaru tak, aby sposób jego przeprowadzenia był jednoznacznie określony. Dla zespolonej piasty łożyskowej dzięki modyfikatorom oraz symbolom graficznym można opisać pomiar bicia obwodowego osiowego $\sqrt{f} \begin{array}{|c|} \hline 0,05/50 \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline C \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline 2 \\ \hline \end{array}$ (rys. 15a).

Dla parametru bicia promieniowego zdefiniowano tolerancję dopuszczalną oraz zakres wymiarowy powierzchni, w obrębie którego należy prowadzić pomiar. Określono również powierzchnię bazową służącą do jego wykonania. W dokumentacji technicznej ujęto dwa wskaźniki ostrzegawcze, odnoszące się do rysunku 15b,

zawierające szczegółowe wytyczne dotyczące sposobu mocowania elementu podczas procedury pomiarowej.

Pierwszy wskaźnik precyzuje, która część zespołu piasty łożyskowej powinna być unieruchomiona – jest to zewnętrzny pierścień kołnierzyowy (oznaczenie FP ①), natomiast część obracana to wewnętrzny pierścień kołnierzyowy (oznaczenie MP ②). Wskazano również kierunek działania siły grawitacji (G2), który należy uwzględnić w trakcie dokonywania pomiaru. Drugi wskaźnik nakazuje, aby w trakcie pomiaru elementy toczne (wałeczki stożkowe) pozostawały w stałym kontakcie zarówno z głównymi bieżniami roboczymi, jak i z bieżnią pomocniczą.

Pomiar realizowany jest w kilku przekrojach poprzecznych, rozmieszczonych na wybranych promieniach w obrębie zakresu określonego w specyfikacji. Odchyłka bicia w danym przekroju definiowana jest jako różnica maksymalnych wskazań czujnika zegarowego. Końcowy wynik pomiaru stanowi największą wartość tej różnicy spośród wszystkich przekrojów pomiarowych.



Rys. 15. a) Specyfikacja tolerancji bicia osiowego powierzchni czołowej piasty łożyskowej trzeciej generacji; b) pole tolerancji w postaci pierścienia cylindrycznego o wysokości $T=0,05$ mm, którego oś pokrywa się z osią obrotu elementu. Zakres wymiarowy powierzchni objętej kontrolą został określony jako szerokość czoła $L=50$ mm [7]

4.2. Analiza rysunku konstrukcyjnego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji

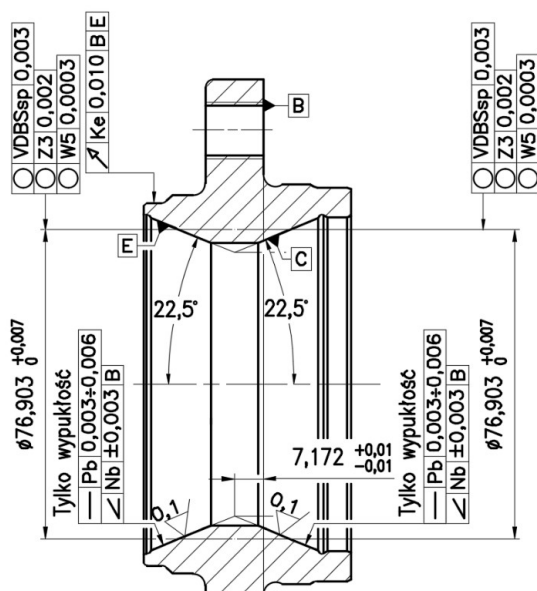
Jak pokazano na rysunku 12, zespolona piasta łożyskowa składa się z pierścienia zewnętrznego, pierścienia wewnętrznego, elementów tocznych – wałeczków stożkowych oraz pierścienia wewnętrznego kołnierзовego, których wymiary mają wpływ na luz wzdłużny piasty. Wartość i tolerancja luzu wzdłużnego piasty została określona przez konstruktora i wynosi $Lo=0^{+0,050}_0$.

Analiza tolerancji rysunkowej wymiarów wpływających na luz wzdłużny zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji została przeprowadzona zgodnie z zasadą najgorszego przypadku (*Worst Case Method*), przyjętą przez konstruktora w fazie projektowania. Oznacza to, że dopuszczalny luz wzdłużny został oszacowany na podstawie skrajnych kombinacji tolerancji wymiarów mających bezpośredni wpływ na jego wartość. Choć konstruktor przyjął konserwatywne założenie obliczeniowe (najgorszy przypadek), to w fazie finalizacji dokumentacji zdecydował się nieznacznie rozszerzyć tolerancje wybranych wymiarów, opierając się na wiedzy o stabilności i przewidywalności procesów produkcyjnych będących pod statystyczną kontrolą.

Podczas analizy konstrukcji istotne jest uwzględnienie metody DFMEA (*Design Failure Mode and Effects Analysis*), będącej analityczną techniką umożliwiającą zespołowi projektowemu systematyczne identyfikowanie oraz ocenę potencjalnych błędów, ich przyczyn i skutków. Zastosowanie DFMEA pozwala na wczesne wykrycie i eliminację możliwych wad konstrukcyjnych przed zatwierdzeniem komponentu do etapu produkcji, co znacząco zwiększa niezawodność i bezpieczeństwo projektowanego wyrobu [19].

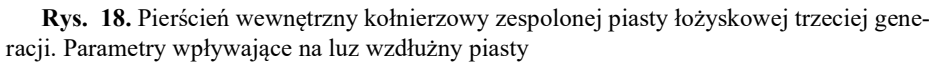
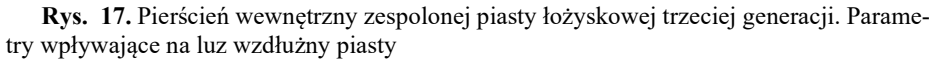
Kluczowe wymiary i tolerancje części składowych piasty to między innymi:

- Pierścień zewnętrzny (rys. 16) - dla którego najważniejsze wymagania wymiarowo-geometryczne to: średnice, kąty, zarys, odchyłka okrągłości oraz położenie bieżni głównych.

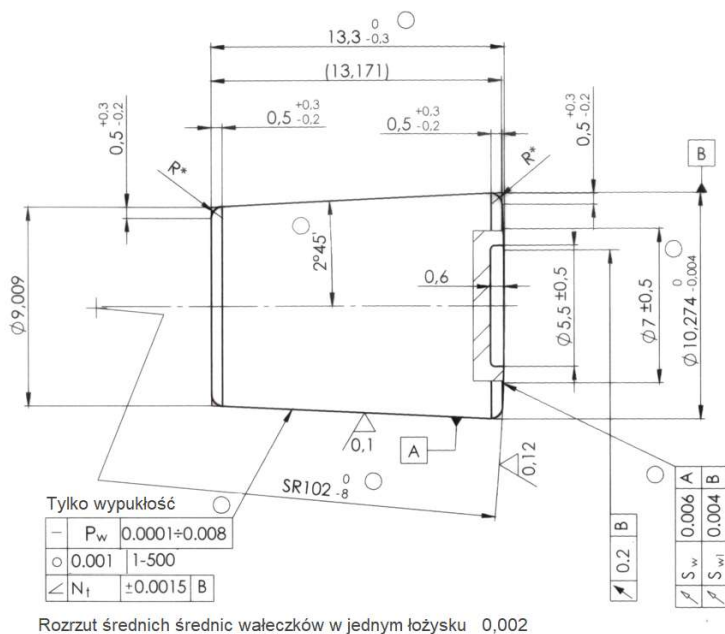


Rys. 16. Pierścień zewnętrzny zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji. Parametry wpływające na luz wzdłużny piasty

- Pierścień wewnętrzny (rys. 17) - dla którego najważniejsze wymagania wymiarowo-geometryczne to: średnica, kąt, profil/zarys, odchyłka okrągłości oraz położenie bieżni głównej, położenie oraz kąt bieżni pomocniczej oraz średnica otworu pierścienia.
- Pierścień wewnętrzny kołnierzowy (rys. 18) - dla którego najważniejsze wymagania wymiarowo-geometryczne to: średnica, kąt, profil/zarys, odchyłka okrągłości, położenie bieżni głównej, położenie, kąt bieżni pomocniczej oraz średnica zewnętrzna, na którą wciskany jest pierścień wewnętrzny.



- Wałeczek stożkowy (rys. 19) - dla którego najważniejsze wymagania wymiarowo-geometryczne to: średnica, kąt, profil/zarys oraz odchyłka okrągłości powierzchni toczonej.



Rys. 19. Wałeczek stożkowy zespolonej piastry łożyskowej trzeciej generacji

4.3. Model matematyczny łańcucha wymiarowego luzu wzdłużnego zespolonej piastry łożyskowej trzeciej generacji

Model matematyczny łańcucha wymiarowego luzu wzdłużnego w zespolonej piaście łożyskowej trzeciej generacji stanowi fundamentalne narzędzie analityczne wykorzystywane w procesie projektowania oraz optymalizacji konstrukcji. Głównym celem zastosowania tego modelu jest precyzyjne odwzorowanie wpływu tolerancji geometrycznych i wymiarowych poszczególnych składników zespołu na końcowy luz wzdłużny, który decyduje o prawidłowym funkcjonowaniu układu, jego trwałości oraz efektywności montażu [92].

Zastosowanie modelu pozwala na rozstrzygnięcie, czy dla danego układu wymagana jest pełna (całkowita) zamienność części, czy też możliwe jest przyjęcie strategii zamienności częściowej. W przypadku zamienności całkowitej konstruktorzy opierają się zazwyczaj na zasadzie najgorszego przypadku, zakładającej ekstremalne kombinacje odchylek wymiarowych w ramach dopuszczonych tolerancji. Takie

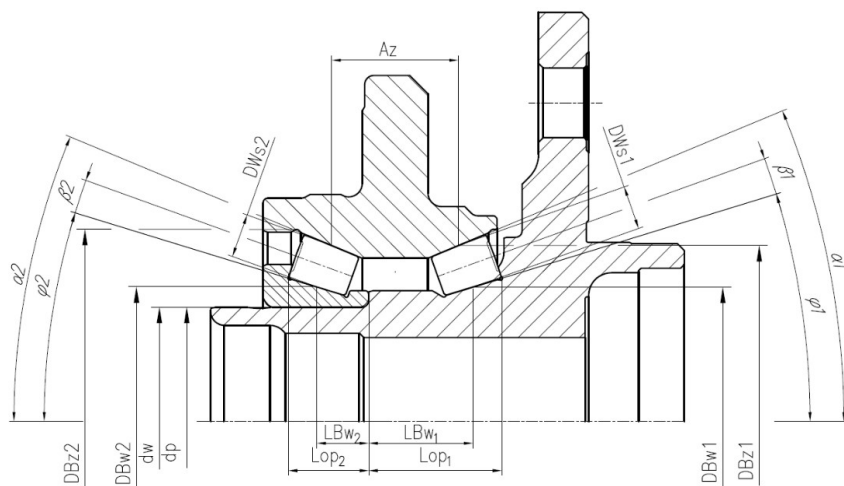
podejście zapewnia, że wszystkie elementy spełniające wymagania rysunkowe będą funkcjonować poprawnie niezależnie od ich wzajemnej konfiguracji. Jednakże konsekwencją tej strategii są stosunkowo wąskie tolerancje wykonawcze, które generują istotne koszty technologiczne związane z koniecznością precyzyjnej obróbki lub selekcji komponentów.

Alternatywą dla podejścia konserwatywnego jest wykorzystanie strategii zamienności częściowej, opartej na statystycznym modelowaniu rozkładów wymiarów – na przykład metodą RSS (*Root Sum Square*) lub za pomocą symulacji Monte Carlo. W tym ujęciu dopuszcza się pewien procentowy udział wyrobów niespełniających wymagań, przy jednoczesnym zapewnieniu, że zdecydowana większość kombinacji wymiarowych mieści się w akceptowalnym zakresie luzu wzdluznego. Taki model pozwala na znaczące rozszerzenie tolerancji produkcyjnych bez ryzyka utraty funkcjonalności zespołu, co z kolei przekłada się na zmniejszenie kosztów wytwarzania i większą elastyczność w doborze technologii obróbczej [71, 77], [20].

Ponadto, model łańcucha wymiarowego umożliwia szczegółową analizę czułości poszczególnych wymiarów w kontekście ich wpływu na wartość końcową luzu wzdluznego. Identyfikacja wymiarów krytycznych pozwala konstruktorowi oraz technologowi na ukierunkowanie działań kontroli jakości, a także racjonalne przypisanie klas tolerancji. W praktyce prowadzi to do zwiększenia efektywności produkcji przy zachowaniu wymaganego poziomu niezawodności wyrobu końcowego.

Zastosowanie takiego modelu w procesie projektowym stanowi zatem pomost między teorią projektowania maszyn a praktyką inżynierii produkcji. Pozwala nie tylko na weryfikację funkcjonalności konstrukcji w warunkach skrajnych, ale także na adaptację tolerancji do realnych możliwości wytwórczych przy zachowaniu ekonomicznej opłacalności.

Na zamienność częściową zdecydowano się również podczas uruchomienia zespolonej piasty łożyskowej w FŁT Kraśnik S.A. Pozwoliło to na realizowanie statystycznej kontroli nad procesem wytwarzania oraz ograniczenie czynności kontrolno-pomiarowych. Aby prawidłowo określić wartości tolerancji, konieczne jest dokładne poznanie łańcucha wymiarowego i określenie wpływu tolerancji ogniwo składowych na tolerancję ogniwa zamykającego.



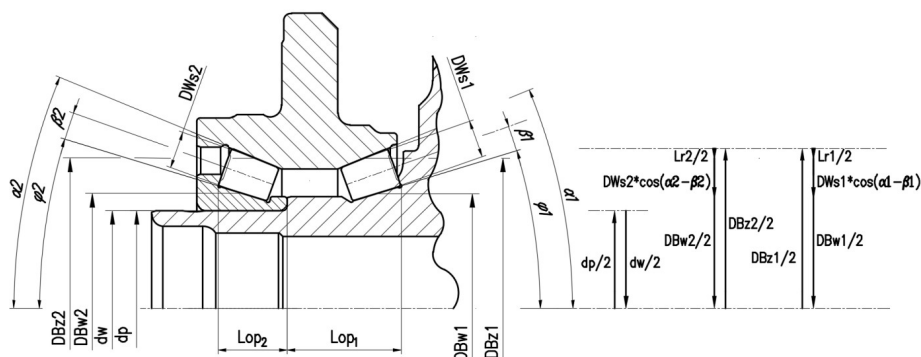
Rys. 20. Schemat wymiarowy zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji

Omawiany przypadek łańcucha wymiarowego zespolonej piasty z wykorzystaniem łożyska dwurzędowego stożkowego przedstawiono na rysunku 20. Schemat do analizy wymiarowej składa się z następujących ogniw składowych i ich wartości:

- Az – rozstawienie bieżni pierścienia zewnętrznego [27,714 mm],
- $DBz1$ – średnica bieżni prawej pierścienia zewnętrznego [76,903 mm],
- $\alpha1$ – kąt bieżni prawej pierścienia zewnętrznego [$22^{\circ}30'$],
- $DBz2$ – średnica bieżni lewej pierścienia zewnętrznego [76,903 mm],
- $\alpha2$ – kąt bieżni lewej pierścienia zewnętrznego [$22^{\circ}30'$],
- $DBw1$ – średnica bieżni pierścienia wewnętrznego kołnierзовego [58,754 mm],
- $\phi1$ – kąt bieżni pierścienia wewnętrznego kołnierзовego [17°],
- $DWs1$ – średnica średnia wałeczka stożkowego prawego [9,6415 mm],
- $\beta1$ – kąt tworzącej wałeczka stożkowego prawego [$2^{\circ}45'$],
- $Lop1$ – położenie bieżni pomocniczej pierścienia wewnętrznego kołnierзовego [29,201 mm],
- dp – średnica otworu pierścienia wewnętrznego [50 mm],
- $LBw1$ – położenie bieżni pierścienia wewnętrznego [22,887 mm],
- $DBw2$ – średnica bieżni pierścienia wewnętrznego [58,755 mm],
- $\phi2$ – kąt bieżni pierścienia wewnętrznego [17°],
- $DWs2$ – średnica średnia wałeczka stożkowego lewego [9,6415 mm],
- $\beta2$ – kąt tworzącej wałeczka stożkowego lewego [$2^{\circ}45'$],

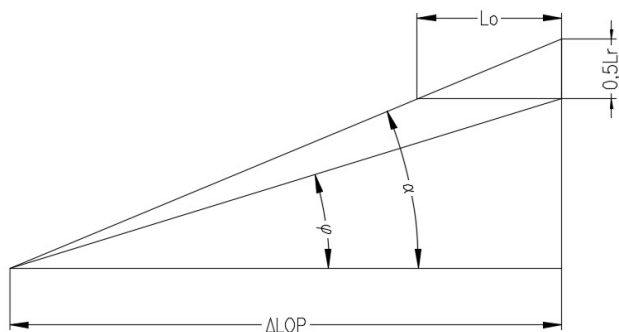
- $Lop2$ – położenie bieżni pomocniczej pierścienia wewnętrznego [17,659 mm],
- $LBw2$ – położenie bieżni pierścienia wewnętrznego [11,343 mm],
- dw – średnica zewnętrzna pierścienia kołnierzewego służąca do mocowania pierścienia wewnętrznego stożkowego [50 mm].

Jako, że dla przedstawianego schematu w praktyce dokonuje się pomiarów średnicowych ($DBz1$, $DBz2$, $DBw1$, $DBw2$, $DWs1$, $DWs2$) elementów piasty na określonych wysokościach (Az , $LBw1$, $LBw2$), do obliczeń wykorzystane zostaną wymiary średnicowe zrzutowane na oś pionową (rys. 21). Ogniwo zamykające to luz promieniowy Lr , będący sumą luzów promieniowych $Lr1$ oraz $Lr2$.



Rys. 21. Schemat łańcucha wymiarowego

Wpływ na luz piasty mają również położenia bieżni pomocniczych pierścienia wewnętrznego kołnierzewego oraz bieżni pomocniczej pierścienia wewnętrznego. W celu uproszczenia obliczeń do łańcucha wprowadzona zostanie tylko zmiana wartości położenia bieżni pomocniczych. Wpływ zmiany położenia bieżni pomocniczej na luz promieniowy przedstawiono na rysunku 22.



Rys. 22. Wpływ zmiany położenia bieżni pomocniczej na luz zespolonej piast łożyskowej. Lo – luz osiowy, Lr – luz promieniowy, α – kąt bieżni pierścienia zewnętrznego kołnierowego, φ – kąt bieżni pierścienia wewnętrznego

Wpływ zmiany położenia bieżni pomocniczej na luz promieniowy (Lr) można zapisać wg zależności:

$$0,5Lr_{\Delta LOP} = \operatorname{tg}\alpha\Delta LOP - \operatorname{tg}\varphi\Delta LOP \quad (40)$$

W przeprowadzonych obliczeniach uwzględniono również redukcję luzu promieniowego wynikającą z ciasnego pasowania pomiędzy otworem pierścienia wewnętrznego stożkowego (dw) a średnicą zewnętrzną pierścienia wewnętrznego kołnierowego (dp). Powiększenie średnicy bieżni pierścienia wewnętrznego, będące konsekwencją tego pasowania, może być w przybliżeniu oszacowane jako około 80% wartości wcisku [36] lub alternatywnie obliczone przy użyciu odpowiednich zależności matematycznych [44].

Ze względu na niesymetryczną budowę pierścienia oraz zmienny przekrój jego geometrii, zdecydowano się na przeprowadzenie badań doświadczalnych z wykorzystaniem próbki składającej się z trzech egzemplarzy. W ramach eksperymentu dokonano montażu wcześniej pomierzonych pierścieni, a następnie przystąpiono do procesu rozwalcowywania kołnierza (rys. 23b). Na podstawie przeprowadzonych pomiarów stwierdzono, iż zmiana wymiaru bieżni głównej pierścienia wewnętrznego wynosi średnio około 75% wartości wcisku pomiędzy otworem pierścienia a średnicą zewnętrzną pierścienia kołnierowego wewnętrznego (tabela 3).

Pomiary zostały wykonane przy użyciu współrzędnościowej maszyny pomiarowej Leitz PMM (rys. 23a), dla której maksymalny dopuszczalny błąd (*Maximum Permissible Error*) $E_0 \text{ MPE} = 0,6 + L/600$.

Tabela 3. Wyniki pomiarów zmiany wymiaru bieżni pierścienia wewnętrznego w wyniku ciasnego pasowania.

Wymiar średnicy wałka [mm]	Wymiar średnicy otworu pierścienia [mm]	Wymiar bieżni przed wciśnięciem [mm]	Wymiar bieżni po wciśnięciu [mm]	Wcisk [mm]	Zmiana wymiaru bieżni [mm]	Zmiana wymiaru bieżni w stosunku do wcisku [%]
50,0088	49,9933	58,7507	58,7625	0,0155	0,0118	76
50,0146	49,9913	58,7546	58,7718	0,0233	0,0172	74
50,0319	49,9937	58,7286	58,757	0,0382	0,0284	74



a



b

Rys. 23. a) Współrzędnościowa maszyna pomiarowa Leitz PMM, b) pierścień wewnętrzny kołnierza z wciśniętym pierścieniem wewnętrznym oraz rozwalczonym kołnierzem

Uwzględniając powyższe, równanie łańcucha na luz promieniowy piasty można zapisać wg wzoru (2):

$$0,5Lr = \frac{DBz1}{2} + \frac{DBz2}{2} - \frac{DBw1}{2} - Dws1 \cos(\alpha1 - \beta1) - \frac{DBw2}{2} - \quad (41)$$

$$Dws2 \cos(\alpha2 - \beta2) + \operatorname{tg}\alpha1\Delta Lop1 - \operatorname{tg}\varphi1\Delta Lop1 + \operatorname{tg}\alpha2\Delta Lop2 -$$

$$\operatorname{tg}\varphi2\Delta Lop2 + \frac{0.75dp - 0.75dw}{2}$$

Jako, że dla łożysk stożkowych mierzy się luz wzdłużny (Lo) oraz wiedząc, iż zależność pomiędzy luzami przedstawia wzór:

$$\frac{0,5Lr}{Lo} = \operatorname{tg}\alpha \quad (42)$$

Równanie łańcucha wymiarowego dla luzu wzdłużnego można zapisać następująco:

$$Lo = N = \frac{DBz1}{2\operatorname{tg}\alpha1} + \frac{DBz2}{2\operatorname{tg}\alpha2} - \frac{DBw1}{2\operatorname{tg}\alpha1} - \frac{Dws1 \cos(\alpha1 - \beta1)}{\operatorname{tg}\alpha1} + \Delta Lop1 - \frac{\Delta Lop1 \operatorname{tg}\varphi1}{\operatorname{tg}\alpha1} - \quad (43)$$

$$\frac{DBw2}{2\operatorname{tg}\alpha2} - \frac{Dws2 \cos(\alpha2 - \beta2)}{\operatorname{tg}\alpha2} + \Delta Lop2 - \frac{\Delta Lop2 \operatorname{tg}\varphi2}{\operatorname{tg}\alpha2} + \frac{0.75dp - 0.75dw}{2\operatorname{tg}\alpha2} = 0$$

4.4. Zamiennosc całkowita

W celu sformułowania równania opisującego sumaryczną tolerancję, konieczne jest wyznaczenie pochodnych cząstkowych względem każdej zmiennej występującej w równaniu łańcucha wymiarowego dla luzu wzdłużnego (wzór 43).

W związku z powyższym równanie na sumę tolerancji (wzór 8) przyjmuje postać:

$$\left| \frac{\delta N}{\delta DBz1} \right| T_{DBz1} + \left| \frac{\delta N}{\delta DBz2} \right| T_{DBz2} + \left| \frac{\delta N}{\delta DBw1} \right| T_{DBw1} + \left| \frac{\delta N}{\delta DBw2} \right| T_{DBw2} + \left| \frac{\delta N}{\delta DWS1} \right| T_{DWS1}$$

$$+ \left| \frac{\delta N}{\delta DWS2} \right| T_{DWS2} + \left| \frac{\delta N}{\delta Lop1} \right| T_{Lop1} + \left| \frac{\delta N}{\delta Lop2} \right| T_{Lop2} + \left| \frac{\delta N}{\delta dp} \right| T_{dp} + \left| \frac{\delta N}{\delta dw} \right| T_{dw} +$$

$$\left| \frac{\delta N}{\delta \alpha2} \right| T_{\alpha2} + \left| \frac{\delta N}{\delta \alpha1} \right| T_{\alpha1} + \left| \frac{\delta N}{\delta \beta1} \right| T_{\beta1} + \left| \frac{\delta N}{\delta \beta2} \right| T_{\beta2} + \left| \frac{\delta N}{\delta \varphi1} \right| T_{\varphi1} + \left| \frac{\delta N}{\delta \varphi2} \right| T_{\varphi2} = T_N$$

Obliczenia pochodnych cząstkowych – wartość analityczna (współczynników wpływu):

$$\frac{\delta N}{\delta D_{BZ1}} = \frac{1}{2\text{tg}\alpha_1};$$

$$\frac{\delta N}{\delta D_{BZ2}} = \frac{1}{2\text{tg}\alpha_2};$$

$$\frac{\delta N}{\delta D_{BW1}} = -\frac{1}{2\text{tg}\alpha_1};$$

$$\frac{\delta N}{\delta D_{BW2}} = -\frac{1}{2\text{tg}\alpha_2};$$

$$\frac{\delta N}{\delta D_{Dws}} = -\frac{\cos(\alpha_1 - \beta_1)}{\text{tg}\alpha_1};$$

$$\frac{\delta N}{\delta D_{Dws2}} = -\frac{\cos(\alpha_2 - \beta_2)}{\text{tg}\alpha_2};$$

$$\frac{\delta N}{\delta L_{OP}} = 1 - \frac{\text{tg}\varphi_1}{\text{tg}\alpha_1};$$

$$\frac{\delta N}{\delta L_{OP2}} = 1 - \frac{\text{tg}\varphi_2}{\text{tg}\alpha_2};$$

$$\frac{\delta N}{\delta d_p} = \frac{0,75}{2\text{tg}\alpha_2};$$

$$\frac{\delta N}{\delta d_w} = -\frac{0,75}{2\text{tg}\alpha_2};$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta N}{\delta \alpha_1} = & -\frac{DBz1}{2\text{tg}^2\alpha_1}\sec^2\alpha_1 - \frac{DBw1}{2\text{tg}^2\alpha_1}\sec^2\alpha_1 - \frac{Dws1 \cos(\alpha_1 - \beta_1)}{\text{tg}^2\alpha_1}\sec^2\alpha_1 \\ & + \frac{Dws1 \sin(\alpha_1 - \beta_1)}{\text{tg}\alpha_1} - \frac{\Delta Lop1 \text{tg}\varphi_1}{\text{tg}^2\alpha_1}\sec^2\alpha_1; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta N}{\delta \alpha_2} = & -\frac{DBz2}{2\text{tg}^2\alpha_2}\sec^2\alpha_2 - \frac{DBw2}{2\text{tg}^2\alpha_2}\sec^2\alpha_2 - \frac{Dws2 \cos(\alpha_2 - \beta_2)}{\text{tg}^2\alpha_2}\sec^2\alpha_2 \\ & + \frac{Dws2 \sin(\alpha_2 - \beta_2)}{\text{tg}\alpha_2} - \frac{\Delta Lop2\text{tg}\varphi_2}{\text{tg}^2\alpha_2}\sec^2\alpha_2 \\ & - \frac{0,75dp - 0,75dw}{\text{tg}^2\alpha_2}\sec^2\alpha_2; \end{aligned}$$

$$\frac{\delta N}{\delta \beta_1} = -\frac{Dws1 \sin(\alpha_1 - \beta_1)}{\text{tg}\alpha_1};$$

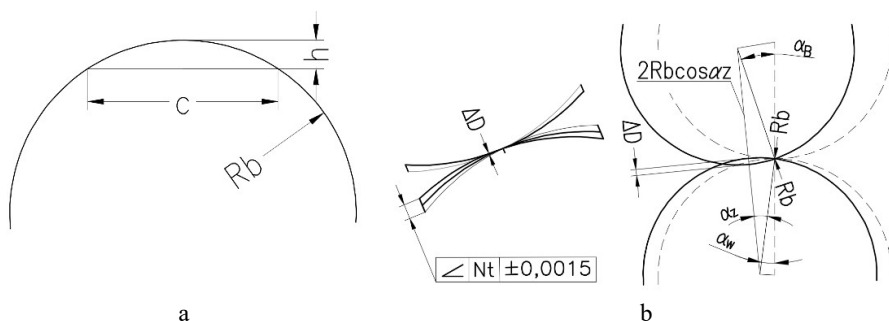
$$\frac{\delta N}{\delta \beta_2} = -\frac{Dws2 \sin(\alpha_2 - \beta_2)}{\text{tg}\alpha_2};$$

$$\frac{\delta N}{\delta \varphi_1} = \frac{\Delta Lop1\sec^2\varphi_1}{\text{tg}\alpha_1};$$

$$\frac{\delta N}{\delta \varphi_2} = \frac{\Delta Lop2\sec^2\varphi_2}{\text{tg}\alpha_2}.$$

Należy jednak zauważyć, że takie podejście może prowadzić do przeszacowania wpływu niektórych zmiennych na wynik końcowy. Szczególną trudność stanowi uwzględnienie tolerancji kątowych bieżni oraz ich oddziaływanie na wartość luzu wzdłużnego piasty. Tolerancje kątów są wartościami dobieranymi z normy w zależności od klasy wykonania łożyska. Tolerancje te ze względu na ich niewielką wartość wynikającą z funkcjonalności łożyska, mają niewielki wpływ na luz osiowy łożyska. Dodatkowo ich wpływ jest pomniejszany przez fakt, że bieżnie łożyska stożkowego są wypukłe. Wypukłość dla bieżni głównych pierścienia zewnętrznego kołnierzowego zawiera się w zakresie od 0,003÷0,006 mm. Wymagania wypukłości dla tworzącej wałeczka stożkowego zostały określone w przedziale 0,001÷0,008 mm. Średnia wartość wypukłości dla obu powierzchni wynosi $h=0,0045$ mm, a ich teoretyczna długość $c=13,3$ mm. W związku z powyższym średni zarys obu bieżni można opisać tę samą wartością promienia Rb (rys. 24a):

$$Rb = \frac{c^2}{8h} + \frac{h}{2} = \frac{13,3^2}{8 \cdot 0,0045} + \frac{0,0045}{2} = 4913,61 \text{ mm} \quad (44)$$



Rys. 24. a) Schemat wyznaczania średniego promienia zarysu bieźni. b) Wpływ odchyłek kątowych bieźni i tworzącej wałeczka stożkowego na zmianę średnicy bieźni z uwzględnieniem promienia zarysu bieźni Rb

Odchyłka kątowa bieźni dla bieźni pierścienia zewnętrznego wynosi $\pm 0,003$ mm (na długości bieźni 13,3 mm), a więc zmiana kątowa w stopniach wynosi:

$$\alpha_B = \arctg \frac{\pm 0,003}{13,3} = \pm 0,0129^\circ \quad (45)$$

Odchyłka kątowa tworzącej wałeczka wynosi $\pm 0,0015$ mm, a więc zmiana kątowa w stopniach wynosi:

$$\alpha_W = \arctg \frac{\pm 0,0015}{13,3} = \pm 0,0065^\circ \quad (46)$$

Wzięto pod uwagę najbardziej niekorzystny przypadek, czyli taki, w którym jedna bieźnia posiada odchyłkę na plus, a druga na minus. Jako, że powstały trójkąt jest trójkątem równoramiennym, tak więc dwa kąty w trójkącie są równe i wynoszą (rys. 24b):

$$\alpha_Z = \frac{0,0129 + 0,0065}{2} = 0,0097^\circ \quad (47)$$

Tak więc zmiana wymiaru wynikająca ze zmiany kąta wynosić będzie:

$$\Delta D = 2Rb(1 - \cos \alpha_Z) = 0,00014 \text{ mm} \quad (48)$$

Z powyższego widać, że wpływ zmiany kąta na zmiany średnicowe jest kilkunastokrotnie mniejszy niż wpływ tolerancji średnicowych. Tę samą zasadę można przyjąć do styku wałeczka z bieżniami pierścieni wewnętrznych. Powyższa zasada dotyczy również tolerancji kątowej bieżni pomocniczej. Bieżnia pomocnicza posiadająca wypukłość $0 \div 0,002$ mm współpracuje z czołem sferycznym wałeczka stożkowego, którego promień sfery zawiera się w przedziale SR102₋₈ mm. W przypadku bieżni pomocniczej wartość wpływu kąta musi być jeszcze pomnożona przez współczynnik wpływu $\frac{\delta N}{\delta L_{OP}}$.

W związku z powyższym równanie na sumę tolerancji przyjmie postać:

$$\left| \frac{\delta N}{\delta D_{BZ1}} \right| T_{DBZ1} + \left| \frac{\delta N}{\delta D_{BZ2}} \right| T_{DBZ2} + \left| \frac{\delta N}{\delta D_{BW1}} \right| T_{DBW1} + \left| \frac{\delta N}{\delta D_{BW2}} \right| T_{DBW2} + \left| \frac{\delta N}{\delta D_{WS1}} \right| T_{DWS1} + \left| \frac{\delta N}{\delta D_{WS2}} \right| T_{DWS2} + \left| \frac{\delta N}{\delta L_{OP1}} \right| T_{Lop1} + \left| \frac{\delta N}{\delta L_{OP2}} \right| T_{Lop2} + \left| \frac{\delta N}{\delta d_p} \right| T_{dp} + \left| \frac{\delta N}{\delta d_w} \right| T_{dw} = T_N$$

Obliczenia pochodnych cząstkowych – wartość liczbową:

$$\begin{aligned} \frac{\delta N}{\delta D_{BZ1}} &= 1,207; \frac{\delta N}{\delta D_{BZ2}} = 1,207; \frac{\delta N}{\delta D_{BW1}} = -1,207; \frac{\delta N}{\delta D_{BW2}} = -1,207; \\ \frac{\delta N}{\delta D_{WS1}} &= -2,272; \frac{\delta N}{\delta D_{WS2}} = -2,272; \frac{\delta N}{\delta L_{OP1}} = 0,262; \frac{\delta N}{\delta L_{OP2}} = 0,262; \\ \frac{\delta N}{\delta d_p} &= 0,905; \frac{\delta N}{\delta d_w} = -0,905. \end{aligned}$$

Zatem ostateczne równanie tolerancji po podstawieniu wartości liczbowych przyjmie postać:

$$\begin{aligned} 1,207 \cdot T_{DBZ1} + 1,207 \cdot T_{DBZ2} + 1,207 \cdot T_{DBW1} + 1,207 \cdot T_{DBW2} + 2,272 \cdot \\ T_{DWS1} + 2,272 \cdot T_{DWS2} + 0,262 \cdot T_{Lop1} + 0,262 \cdot T_{Lop2} + 0,905 \cdot \\ T_{dw} + 0,905 \cdot T_{dp} = T_N \end{aligned}$$

4.4.1. Metoda jednakowej tolerancji

Dla tolerancji ogniwa zamykającego $T_N = 0,050$ mm (wymiar zamykający $N = 0^{+0,050}_0$ mm), oraz korzystając ze wzoru (9) oraz założenia, że tolerancje wszystkich ogniw składowych mają taką samą tolerancję (10):

$$T_N = \sum_{i=1}^{k-1} \left| \frac{\partial N}{\partial A_i} \right| T_{Ai} \quad \text{przy założeniu } T_{Ai} = T$$

suma tolerancji przy założeniu jednakowych tolerancji ogniów składowych przyjmie postać:

$$1,207 \cdot T + 1,207 \cdot T + 1,207 \cdot T + 1,207 \cdot T + 2,272 \cdot T + 2,272 \cdot T + 0,262 \cdot T + 0,262 \cdot T + 0,905 \cdot T + 0,905 \cdot T = T_N$$

$$11,706T = 0,050$$

$$T \cong 4,3 \mu\text{m}$$

ostatecznie można zapisać, że tolerancje poszczególnych ogniów składowych są sobie równe i wynoszą:

$$T_{DBZ1} = T_{DBZ} = T_{DBW} = T_{DBW2} = T_{DWS1} = T_{DWS2} = T_{Lop1} = T_{Lop} = T_{dw} = T_{dp} = 4,3 \mu\text{m}$$

Wykres procentowego wpływu ogniów składowych na luz wzdłużny dla metody jednakowej tolerancji przedstawiono na rysunku 25.



Rys. 25. Wykres procentowego wpływu ogniów składowych na luz wzdłużny – metoda jednakowej tolerancji

4.4.2. Metoda jednakowej klasy tolerancji

Dla tolerancji ogniwa zamykającego $T_N = 0,050$ mm wyliczamy współczynnik klasy tolerancji „a” według wzoru (11):

$$T_{DBZ1} = a^3 \sqrt{D_{BZ1}} = a^3 \sqrt{76,903} = a \cdot 4,252;$$

$$T_{DBZ} = a^3 \sqrt[3]{D_{BZ2}} = a^3 \sqrt[3]{76,903} = a \cdot 4,252;$$

$$T_{DBW1} = a^3 \sqrt[3]{D_{BW1}} = a^3 \sqrt[3]{58,754} = a \cdot 3,888;$$

$$T_{DBW2} = a^3 \sqrt[3]{D_{BW2}} = a^3 \sqrt[3]{58,755} = a \cdot 3,888;$$

$$T_{DWS1} = a^3 \sqrt[3]{D_{WS1}} = a^3 \sqrt[3]{9,6415} = a \cdot 2,128;$$

$$T_{DW} = a^3 \sqrt[3]{D_{WS}} = a^3 \sqrt[3]{9,6415} = a \cdot 2,128;$$

$$T_{LOP1} = a^3 \sqrt[3]{Lop_1} = a^3 \sqrt[3]{29,201} = a \cdot 3,079;$$

$$T_{LOP2} = a^3 \sqrt[3]{Lop_2} = a^3 \sqrt[3]{17,659} = a \cdot 2,604;$$

$$T_{dp} = a^3 \sqrt[3]{dp} = a^3 \sqrt[3]{50} = a \cdot 3,684;$$

$$T_{dw} = a^3 \sqrt[3]{dw} = a^3 \sqrt[3]{50} = a \cdot 3,684;$$

Po podstawieniu wartości do równania tolerancji otrzymujemy:

$$1,207 \cdot a \cdot 4,252 + 1,207 \cdot a \cdot 4,252 + 1,207 \cdot a \cdot 3,888 + 1,207 \cdot a \cdot 3,888 + 2,272 \cdot a \cdot 2,128 + 2,272 \cdot a \cdot 2,128 + 0,262 \cdot a \cdot 3,079 + 0,262 \cdot a \cdot 2,604 + 0,905 \cdot a \cdot 3,684 + 0,905 \cdot a \cdot 3,684 = 0,050$$

skąd:

$$a = 0,0013;$$

stąd tolerancje poszczególnych wymiarów wynoszą:

$$T_{DBZ1} = a^3 \sqrt[3]{D_{BZ1}} = 0,0013^3 \sqrt[3]{76,903} \cong 5,5 \mu m;$$

$$T_{DBZ2} = a^3 \sqrt[3]{D_{BZ2}} = 0,0013^3 \sqrt[3]{76,903} \cong 5,5 \mu m;$$

$$T_{DBW1} = a^3 \sqrt[3]{D_{BW1}} = 0,0013^3 \sqrt[3]{58,754} \cong 5 \mu m;$$

$$T_{DBW2} = a^3 \sqrt[3]{D_{BW2}} = 0,0013^3 \sqrt[3]{58,755} \cong 5 \mu m;$$

$$T_{DWS1} = a^3 \sqrt[3]{D_{WS1}} = 0,0013^3 \sqrt[3]{9,6415} \cong 2,8 \mu m;$$

$$T_{DWS2} = a^3 \sqrt[3]{D_{WS2}} = 0,0013^3 \sqrt[3]{9,6415} \cong 2,8 \mu m;$$

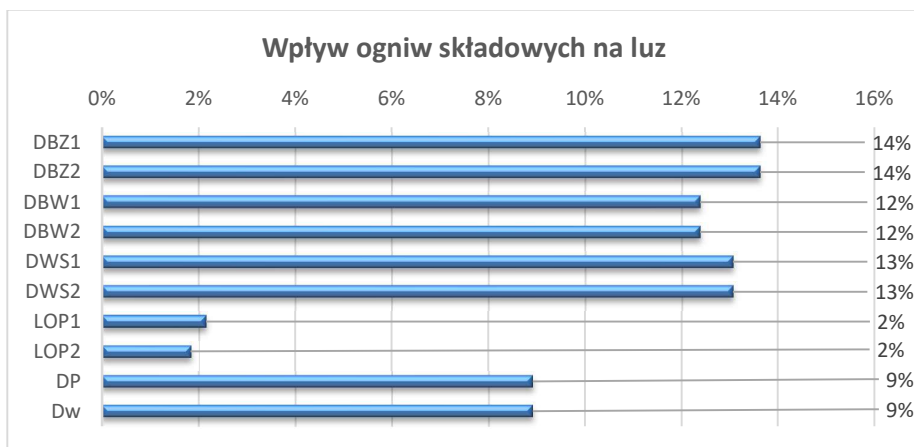
$$T_{LOP1} = a^3 \sqrt[3]{Lop_1} = 0,0013^3 \sqrt[3]{29,201} \cong 4 \mu m;$$

$$T_{LOP2} = a^3 \sqrt[3]{Lop_2} = 0,0013^3 \sqrt[3]{17,659} \cong 3,4 \mu m;$$

$$T_{dp} = a^3 \sqrt[3]{dp} = 0,0013 \sqrt[3]{50} \cong 4,8 \mu m;$$

$$T_{dw} = a^3 \sqrt[3]{dw} = 0,0013 \sqrt[3]{50} \cong 4,8 \mu m;$$

Wykres procentowego wpływu ogniw składowych na luz wzdłużny dla metody jednakowej klasy tolerancji przedstawiono na rysunku 26.



Rys. 26. Wykres procentowego wpływu ogniw składowych na luz wzdłużny – metoda jednakowej klasy tolerancji

4.4.3. Metoda jednakowego wpływu

Dla metody jednakowego wpływu zakładamy zgodnie z wzorem (14):

$$\left| \frac{\delta N}{\delta D_{BZ}} \right| T_{DBZ1} = \left| \frac{\delta N}{\delta D_{BZ2}} \right| T_{DBZ2} = \left| \frac{\delta N}{\delta D_{BW1}} \right| T_{DBW1} = \left| \frac{\delta N}{\delta D_{BW2}} \right| T_{DBW2} = \left| \frac{\delta N}{\delta D_{WS1}} \right| T_{DWS1} =$$

$$\left| \frac{\delta N}{\delta D_{WS2}} \right| T_{DWS2} = \left| \frac{\delta N}{\delta L_{OP1}} \right| T_{LOP1} = \left| \frac{\delta N}{\delta L_{OP2}} \right| T_{LOP2} = \left| \frac{\delta N}{\delta dp} \right| T_{dp} = \left| \frac{\delta N}{\delta dw} \right| T_{dw} = m$$

otrzymujemy, więc:

$$10 \cdot m = T_N = 50 \mu m;$$

$$m = 5 \mu m;$$

stąd tolerancje poszczególnych wymiarów wynoszą:

$$T_{DBZ1} \cong 4,1 \mu m;$$

$$T_{DBZ2} \cong 4,1 \mu m;$$

$$T_{DB} \cong 4,1 \mu m;$$

$$T_{DBW2} \cong 4,1 \mu m;$$

$$T_{DWS1} \cong 2,2 \mu m;$$

$$T_{DWS2} \cong 2,2 \mu m;$$

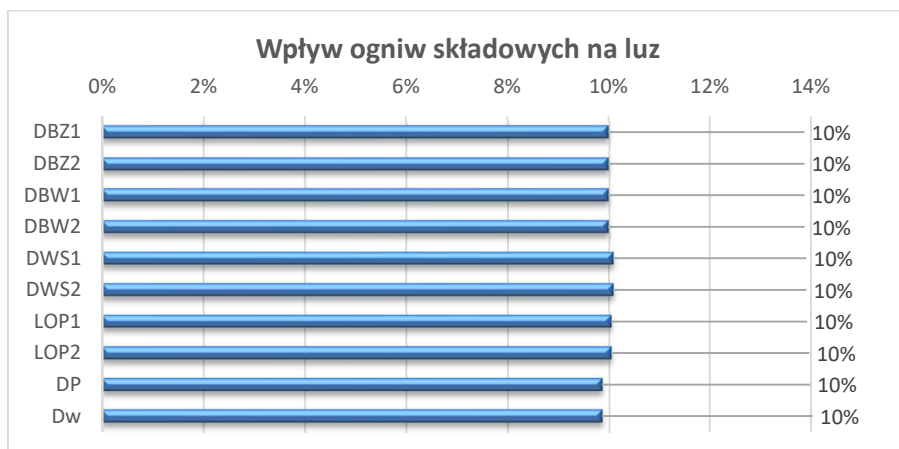
$$TL_{OP1} \cong 19 \mu m;$$

$$TL_{OP} \cong 19 \mu m;$$

$$Tdp \cong 5,2 \mu m;$$

$$Tdw \cong 5,2 \mu m;$$

Wykres procentowego wpływu ogniw składowych na luz wzdłużny dla metody jednakowego wpływu przedstawiono na rysunku 27.



Rys. 27. Wykres procentowego wpływu ogniw składowych na luz wzdłużny – metoda jednakowego wpływu

4.4.4. Metoda minimum kosztów

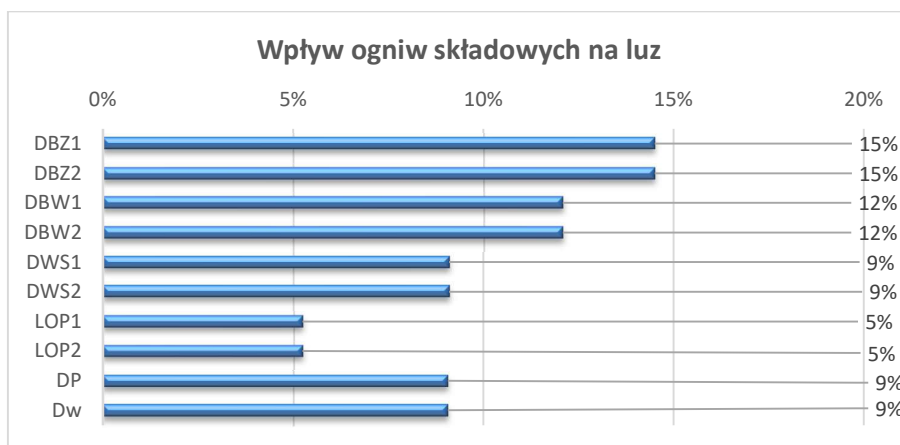
W metodzie minimalizacji kosztów konieczne jest wyznaczenie współczynnika K , którego określenie wymaga złożonych obliczeń uwzględniających koszty wytwarzania. W praktyce proces ten okazuje się czasochłonny i trudny do zastosowania. Prostszy rozwiązaniem jest zapisanie równania tolerancji w arkuszu kalkulacyjnym. Na tej podstawie, korzystając z doświadczenia oraz wiedzy technologów o możliwościach parku maszynowego, można dobrać odpowiednie wartości tolerancji. Takie podejście pozwala spełnić wymagania konstrukcyjne, jak i technologiczne.

Obliczenia w arkuszu kalkulacyjnym przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Arkusz kalkulacyjny Excel – wyliczenie ogniwa zamykającego

=A2*B2+A2*C2+A2*D2+A2*E2+A3*F2+A3*G2+A4*H2+A4*I2+A5*J2+A5*K2											
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
	DBZ1	DBZ2	DBW1	DBW2	DWS1	DWS2	LOP1	LOP2	DP	Dw	TN
1,207	0,006	0,006	0,005	0,005	0,002	0,002	0,010	0,010	0,005	0,005	0,050
2,272											
0,262											
0.905											

Wykres procentowego wpływu ogniw składowych na luz wzdłużny dla metody minimum kosztów przedstawiono na rysunku 28.



Rys. 28. Wykres procentowego wpływu ogniw składowych na luz wzdłużny – metoda minimum kosztów

Zestawienie wyników tolerancji ogniw składowych dla zmienności całkowitej przedstawiono w tabeli 5. Otrzymane wartości tolerancji są niewielkie i w praktyce niemożliwe jest utrzymanie tolerancji wykonywanych części na tak wysokim poziomie lub utrzymanie się w nich byłoby nieuzasadnione ekonomicznie. Dlatego też przy produkcji zespolonej piasty trzeciej generacji zdecydowano się na zastosowanie zmienności częściowej, w której tolerancja ogniwa zamykającego zachowana jest z określonym prawdopodobieństwem.

Tabela 5. Zestawienie wyników tolerancji ogniw składowych dla zamienności całkowitej

Wymiar ogniwa [mm]	Metoda obliczeń			
	jednakowej to- lerancji $T_{ai}=\text{const.}$	jednakowej klasy do- kładności $a=\text{const.}$	jednako- wego wpływu $m=\text{const.}$	minimum kosz- tów
	Wartość tolerancji [μm]			
DBZ1=76,903	4,3	5,5	4,1	6
DBZ2=76,903	4,3	5,5	4,1	6
DBW1=58,754	4,3	5	4,1	5
DBW2=58,755	4,3	5	4,1	5
DWS1=9,6415	4,3	2,8	2,2	2
DWS2=9,6415	4,3	2,8	2,2	2
LOP1=29,201	4,3	4	19	10
LOP2=17,659	4,3	3,4	19	10
$dp=50$	4,3	4,8	5,2	5
$dw=50$	4,3	4,8	5,2	5

4.5.Zamiennność częściowa

W przypadku zamienności częściowej, metody obliczeń są takie same, jak dla zamienności całkowitej, ale bierzemy pod uwagę współczynniki zamienności oznaczane małą literą k , które są zależne od odchylenia standardowego i tolerancji wymiaru składowego. Niezależnie od rozkładów ogniw składowych, jeżeli mamy do czynienia z co najmniej sześcioma ogniwami składowymi, możemy przyjąć, że rozkład ogniwa zamykającego jest zbliżony do normalnego [58].

W przypadku standardowych procesów motoryzacyjnych wartości wskaźników przydatności procesu C_p i C_{pk} muszą być większe niż 1,33, a rozkład wartości musi być normalny [93]. Współczynnik zmienności dla poszczególnych komórek składowych i komórki zamykającej przyjęto jak dla rozkładu normalnego i prawdopodobieństwa produktu niezgodnego poniżej 0,01%, $k=6/8=0,75$ (C_p ; $C_{pk} \geq 1,33$) [70].

Dla częściowej zamienności równanie dla sumy tolerancji zgodnie z wzorem (19) ma postać:

$$\begin{aligned}
& \left(\frac{\delta N}{\delta D_{BZ1}}\right)^2 k_{DBZ}^2 T_{DBZ}^2 + \left(\frac{\delta N}{\delta D_{BZ}}\right)^2 k_{DBZ2}^2 T_{DBZ2}^2 + \left(\frac{\delta N}{\delta D_{BW}}\right)^2 k_{DB}^2 T_{DBW1}^2 + \\
& \left(\frac{\delta N}{\delta D_{BW2}}\right)^2 k_{DBW2}^2 T_{DBW2}^2 + \left(\frac{\delta N}{\delta D_{WS1}}\right)^2 k_{DWS1}^2 T_{DWS1}^2 + \left(\frac{\delta N}{\delta D_{WS2}}\right)^2 k_{DWS2}^2 T_{DWS2}^2 + \\
& \left(\frac{\delta N}{\delta L_{OP1}}\right)^2 k_{Lop1}^2 T_{Lo}^2 + \left(\frac{\delta N}{\delta L_{OP2}}\right)^2 k_{Lop2}^2 T_{Lop2}^2 + \\
& \left(\frac{\delta N}{\delta dp}\right)^2 k_{dp}^2 T_{dp}^2 + \left(\frac{\delta N}{\delta dw}\right)^2 k_{dw}^2 T_{dw}^2 = k_N^2 \cdot T_N^2
\end{aligned}$$

Zakładając, że wszystkie ogniwa składowe oraz ogniwo zamykające charakteryzują się rozkładem normalnym, a minimalna wartość wskaźników zdolności procesu Cp oraz Cpk wynosi 1,33, możliwe jest uproszczenie wzoru do następującej postaci:

$$1,207^2 T_{DBZ1}^2 + 1,207^2 T_{DBZ2}^2 + 1,207^2 T_{DBW1}^2 + 1,207^2 T_{DBW2}^2 + 2,272^2 T_{DW}^2 + 2,272^2 T_{DWS2}^2 + 0,262^2 T_{Lop1}^2 + 0,262^2 T_{Lop2}^2 + 0,905^2 T_{dp}^2 + 0,905^2 T_{dw}^2 = T_N^2$$

4.5.1. Metoda jednakowej tolerancji

Korzystając z wzoru (22) na tolerancję ogniwa zamykającego i przy założeniu, że $T_{Ai} = T$:

$$k_N^2 T_N^2 = \sum_{i=1}^{k-1} k_{Ai}^2 \left(\frac{\partial N}{\partial A_i}\right)^2 T_{Ai}^2 \quad \text{przy założeniu } T_{Ai} = T$$

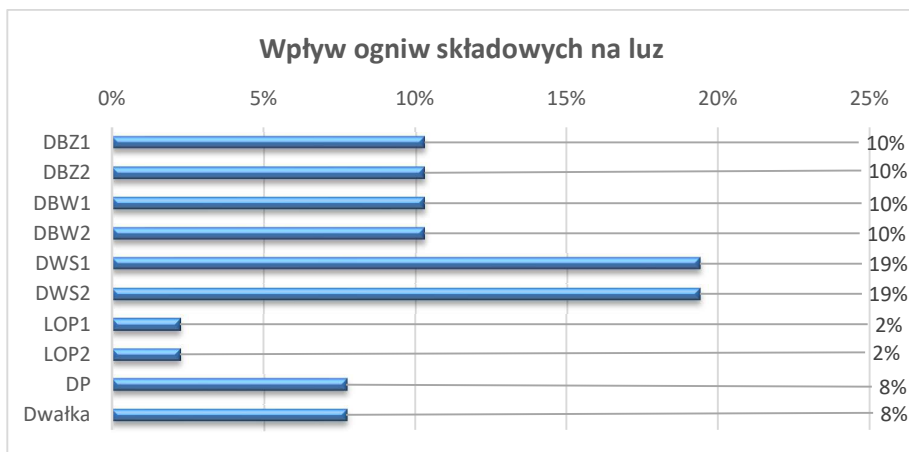
Równanie sumy tolerancji dla zamienności częściowej przyjmuje postać:

$$\begin{aligned}
1,207^2 T^2 + 1,207^2 T^2 + 1,207^2 T^2 + 1,207^2 T^2 + 2,272^2 T^2 + 2,272^2 T^2 + 0,262^2 T^2 + \\
0,262^2 T^2 + 0,905^2 T^2 + 0,905^2 T^2 = 0,05^2 \\
17,927 T^2 = 0,0025 \\
T = 11,8 \mu m
\end{aligned}$$

Ostatecznie wszystkie tolerancje ogniw składowych są sobie równe i wynoszą:

$$T_{DBZ1} = T_{DBZ2} = T_{DBW} = T_{DBW} = T_{DWS1} = T_{DWS2} = T_{Lop1} = T_{Lop2} = T_{dw} = T_{dp} = 11,8 \mu m$$

Wykres procentowego wpływu ogniw składowych na luz wzdłużny dla metody jednakowej tolerancji i zamienności częściowej przedstawiono na rysunku 29.



Rys. 29. Wykres procentowego wpływu ogniw składowych na luz wzdłużny dla zamienności częściowej – metoda jednakowej tolerancji.

4.5.2. Metoda jednakowej klasy tolerancji

Korzystając ze wzoru (23) i podstawiając dane, równanie sumy tolerancji przyjmuje postać:

$$0,45^2 a^2 (1,207^2 \sqrt[3]{76,903^2} + 1,207^2 \sqrt[3]{76,903^2} + 1,207^2 \sqrt[3]{58,754^2} + 1,207^2 \sqrt[3]{58,755^2} + 2,272^2 \sqrt[3]{9,6415^2} + 2,272^2 \sqrt[3]{9,6415^2} + 0,262^2 \sqrt[3]{29,201^2} + 0,262^2 \sqrt[3]{17,659^2} + 0,905^2 \sqrt[3]{50^2} + 0,905^2 \sqrt[3]{50^2}) = 0,05^2$$

skąd:

$$a = 0,0086;$$

stąd tolerancje poszczególnych wymiarów wynoszą:

$$T_{DBZ1} = 0,45 a \sqrt[3]{D_{BZ1}} = 0,45 \cdot 0,0086 \sqrt[3]{76,903} \cong 16,4 \mu m;$$

$$T_{DBZ2} = 0,45 a \sqrt[3]{D_{BZ2}} = 0,45 \cdot 0,0086 \sqrt[3]{76,903} \cong 16,4 \mu m;$$

$$T_{DBW1} = 0,45 a \sqrt[3]{D_{BW1}} = 0,45 \cdot 0,0086 \sqrt[3]{58,754} \cong 15 \mu m;$$

$$T_{DBW2} = 0,45 a \sqrt[3]{D_{BW2}} = 0,45 \cdot 0,0086 \sqrt[3]{58,755} \cong 15 \mu m;$$

$$T_{DWS1} = 0,45 a \sqrt[3]{D_{WS1}} = 0,45 \cdot 0,0086 \sqrt[3]{9,6415} \cong 8,2 \mu m;$$

$$T_{DWS2} = 0,45 a \sqrt[3]{D_{WS2}} = 0,45 \cdot 0,0086 \sqrt[3]{9,6415} \cong 8,2 \mu m;$$

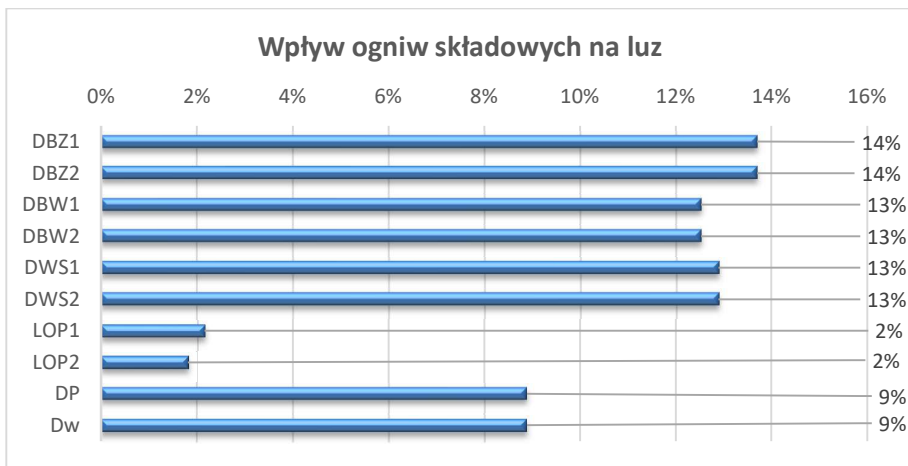
$$T_{LOP} = 0,45a\sqrt[3]{Lop_1} = 0,45 \cdot 0,0086\sqrt[3]{29,201} \cong 11,9 \mu m;$$

$$T_{LOP2} = 0,45a\sqrt[3]{Lop_2} = 0,45 \cdot 0,0086\sqrt[3]{17,659} \cong 10 \mu m;$$

$$T_{dp} = 0,45a\sqrt[3]{dp} = 0,45 \cdot 0,0086\sqrt[3]{50} \cong 14,2 \mu m;$$

$$T_{dw} = 0,45a\sqrt[3]{dw} = 0,45 \cdot 0,0086\sqrt[3]{50} \cong 14,2 \mu m;$$

Wykres procentowego wpływu ogniw składowych na luz wzdłużny dla metody jednakowej klasy tolerancji i zamienności częściowej przedstawiono na rysunku 30.



Rys. 30. Wykres procentowego wpływu ogniw składowych na luz wzdłużny dla zamienności częściowej – metoda jednakowej klasy tolerancji

4.5.3. Metoda jednakowego wpływu

Dla metody jednakowego wpływu korzystamy ze wzoru (25) i po podstawieniu danych otrzymujemy:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\delta N}{\delta_{DBZ}}\right)^2 k_{DBZ1}^2 T_{DBZ1}^2 &= \left(\frac{\delta N}{\delta_{DBZ}}\right)^2 k_{DBZ2}^2 T_{DBZ2}^2 = \left(\frac{\delta N}{\delta_{DBW}}\right)^2 k_{DBW1}^2 T_{DBW1}^2 = \\ \left(\frac{\delta N}{\delta_{DBW}}\right)^2 k_{DBW2}^2 T_{DBW2}^2 &= \left(\frac{\delta N}{\delta_{DWS}}\right)^2 k_{DWS1}^2 T_{DWS1}^2 = \left(\frac{\delta N}{\delta_{DWS}}\right)^2 k_{DWS2}^2 T_{DWS2}^2 = \\ \left(\frac{\delta N}{\delta_{LOP1}}\right)^2 k_{LOP1}^2 T_{LOP1}^2 &= \left(\frac{\delta N}{\delta_{LOP2}}\right)^2 k_{LOP2}^2 T_{LOP2}^2 = \\ \left(\frac{\delta N}{\delta_{dp}}\right)^2 k_{dp}^2 T_{dp}^2 &= \left(\frac{\delta N}{\delta_{dw}}\right)^2 k_{dw}^2 T_{dw}^2 = m^2 \end{aligned}$$

otrzymujemy więc:

$$10 \cdot m^2 = 50^2$$

$$m = 15,8$$

stąd tolerancje poszczególnych wymiarów wynoszą:

$$T_{DBZ1} \cong 13,1 \mu m;$$

$$T_{DB} \cong 13,1 \mu m;$$

$$T_{DBW1} \cong 13,1 \mu m;$$

$$T_{DBW2} \cong 13,1 \mu m;$$

$$T_{DWS1} \cong 6,9 \mu m;$$

$$T_{DWS2} \cong 6,9 \mu m;$$

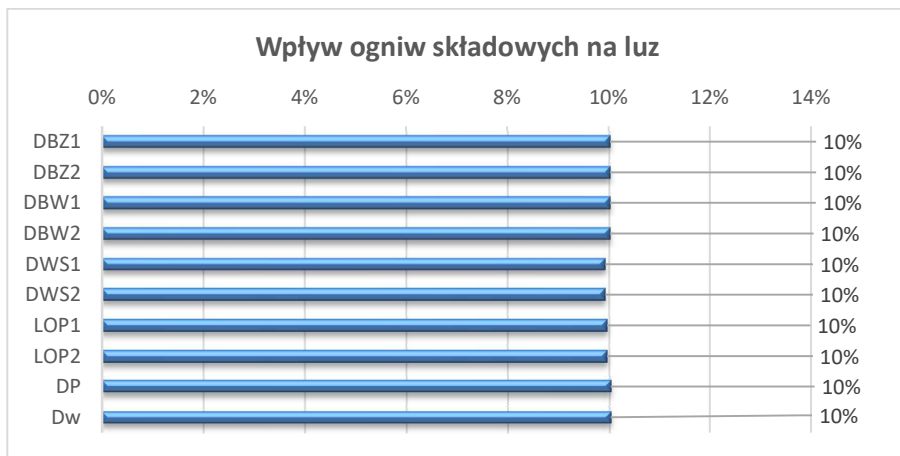
$$T_{LOP} \cong 60 \mu m;$$

$$T_{LOP} \cong 60 \mu m;$$

$$T_{dp} \cong 17,5 \mu m;$$

$$T_{dw} \cong 17,5 \mu m;$$

Wykres procentowego wpływu ogniw składowych na luz wzdłużny dla metody jednakowego wpływu i zmienności częściowej przedstawiono na rysunku 31.



Rys. 31. Wykres procentowego wpływu ogniw składowych na luz wzdłużny dla zmienności częściowej – metoda jednakowego wpływu

4.5.4. Metoda minimum kosztów

W metodzie minimalizacji kosztów tak samo, jak przy zmienności częściowej konieczne jest wyznaczenie współczynnika K , którego określenie wymaga złożonych obliczeń uwzględniających koszty wytwarzania. Dlatego w tym przypadku również łatwiej jest zapisać równanie tolerancji (19) w arkuszu kalkulacyjnym i na

podstawie doświadczenia oraz wiedzy technologów dobrać takie wartości tolerancji, aby spełniały one zarówno wymagania konstrukcyjne jak i technologiczne.

Obliczenia w arkuszu kalkulacyjnym przedstawiono w tabeli 6. W kolumnie „O” przedstawiono wartość tolerancji ogniwa zamykającego liczonego dla zmienności częściowej. W kolumnie „N” przedstawiono wartość tolerancji ogniwa zamykającego liczonego jak dla zmienności całkowitej. Wartość ta jest około trzykrotnie większa niż ta założona przez konstruktora dla zmienności całkowitej.

Wartość powiększonej tolerancji możemy w prosty sposób obliczyć korzystając ze wzoru na współczynnik powiększenia. Dla $m=10$ i $k=1$.

Gdzie:

m – ilość ogniw składowych;

k – współczynnik dla rozkładu normalnego.

Zatem R – współczynnik powiększenia tolerancji ogniw składowych dla rozkładu normalnego wynosi:

$$R = \frac{\sqrt{m-1}}{k} = \frac{\sqrt{10-1}}{1} = 3 \quad (49)$$

zatem tolerancja ogniwa zamykającego wynosi:

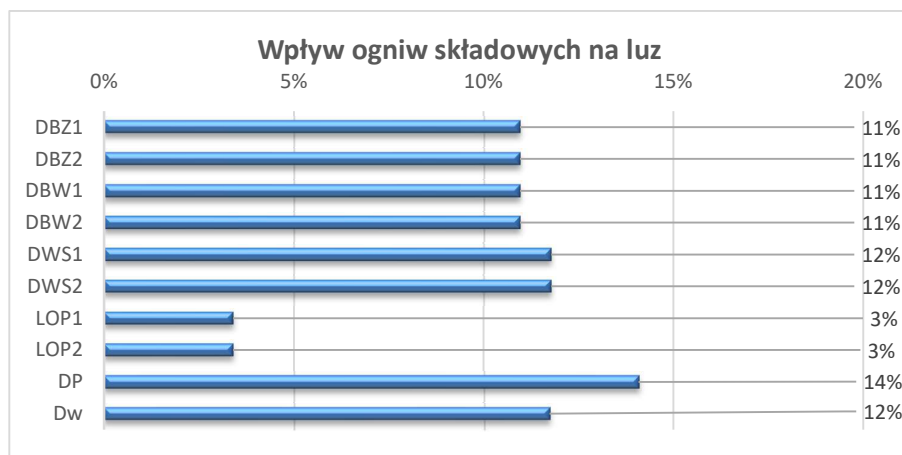
$$T = R \cdot T_N = 3T_N = 150 \mu m \quad (50)$$

Tabela 6. Arkusz kalkulacyjny Excel – wyliczenie ogniwa zamykającego dla zmienności częściowej

$=PIERWIASTEK(POTĘGA(C8;2)*POTĘGA(D8;2)+POTĘGA(C8;2)*POTĘGA(E8;2)+POTĘGA(C8;2)*POTĘGA(F8;2)+POTĘGA(C8;2)*POTĘGA(G8;2)+POTĘGA(C9;2)*POTĘGA(H8;2)+POTĘGA(C9;2)*POTĘGA(I8;2)+POTĘGA(C10;2)*POTĘGA(J8;2)+POTĘGA(C10;2)*POTĘGA(K8;2)+POTĘGA(C11;2)*POTĘGA(L8;2)+POTĘGA(C11;2)*POTĘGA(M8;2))$													
C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	
	DBZ1	DBZ2	DBW1	DBW2	DWS1	DWS2	LOP1	LOP2	DP	Dw	TN	TN^2	
1,207	18	18	18	18	4	4	30	30	14	14	146,1	50,0	
2,272													
0,262													
0,905													

Wykres procentowego wpływu ogniw składowych na luz wzdłużny dla metody minimum kosztów i zmienności częściowej przedstawiono na rysunku 32.

Wpływ tolerancji poszczególnych ogniów składowych określonych przez konstruktora na luz wzdłużny piasty został przedstawiony na rysunku 33. Z kolei tabela 8 zawiera zestawienie wartości tolerancji tych ogniów, wyznaczonych zarówno na podstawie metod zamienności częściowej, jak i określonych przez konstruktora.



Rys. 33. Wykres procentowego wpływu ogniów składowych na luz wzdłużny dla zamienności częściowej – tolerancje określone przez konstruktora

Zastosowanie zasady zamienności częściowej umożliwia rozszerzenie tolerancji wymiarowych produkowanych elementów maszyn, co przekłada się na szereg istotnych korzyści technologicznych i ekonomicznych. Szersze tolerancje pozwalają na zwiększenie wydajności procesów wytwórczych poprzez zmniejszenie wymagań dotyczących precyzji obróbki, co z kolei obniża koszty produkcji. Ponadto zwiększona tolerancja sprzyja zmniejszeniu braków produkcyjnych i uproszczeniu kontroli jakości. W ujęciu inżynierskim, odpowiednio dobrane tolerancje zapewniają jednocześnie spełnienie wymagań funkcjonalnych zespołu mechanicznego przy zachowaniu niezawodności jego działania.

Tabela 8. Zestawienie wyników tolerancji ogniów składowych dla zamienności częściowej oraz określonej przez konstruktora

Wymiar ogniwa [mm]	Metoda obliczeń				
	jednakowej tolerancji	jednakowej klasy dokładności	jednakowego wpływu	minimum kosztów	tolerancje określone przez konstr.
	Tai=const.	a=const.	m=const.		
	Wartość tolerancji [μm]				
DBZ1=76,903	11,8	16,4	13,1	18	7
DBZ2=76,903	11,8	16,4	13,1	18	7
DBW1=58,754	11,8	15	13,1	18	7
DBW2=58,755	11,8	15	13,1	18	7
DWS1=9,6415	11,8	8,2	6,9	4	4
DWS2=9,6415	11,8	8,2	6,9	4	4
LOP1=29,201	11,8	11,9	60	30	10
LOP2=17,659	11,8	10	60	30	10
dp=50	11,8	1,2	17,5	14	12
dw=50	11,8	14,2	17,5	14	10

4.6. Wyznaczenie środków obszarów zmienności ogniów składowych

Ze względu na brak dostatecznej wiedzy dotyczącej zdolności maszyn do realizacji operacji szlifowania oraz dogładzania, a także dysponowanie jedynie informacją o dopuszczalnej całkowitej tolerancji złożenia $N = 0^{+0,05}_0$ mm, podjęto decyzję o odwróceniu tradycyjnej sekwencji projektowania procesu technologicznego. W związku z tym tolerancje procesowe zostaną określone dopiero po przeprowadzeniu analizy zdolności obrabiarek. W pierwszym etapie konieczne jest wyznaczenie wartości średnich (środków obszarów zmienności) dla poszczególnych ogniów łańcucha. Badanie zdolności maszyn należy przeprowadzić przy ustawieniu obrabiarki na wartość średnią, wyznaczoną na podstawie obliczeń. Na podstawie uzyskanych wyników empirycznych zostaną następnie dobrane odpowiednie tolerancje procesowe, tak aby spełnione zostały kryteria wskaźników zdolności procesu: C_m oraz C_{mk} , przy czym przyjęto minimalny akceptowalny poziom tych wskaźników równy 1,67.

Z uwagi na fakt, iż zarówno wymiary średnic bieżni głównych pierścieni, jak i średnice wałeczków tocznych podawane są w postaci wartości średnich, konieczne jest uwzględnienie odpowiedniej korekty luzu wzdłużnego łożysk, wynikającej z tej

specyfikacji wymiarowania. Metoda definiowania wymiarów bieżni została zaadaptowana z klasycznych rozwiązań konstrukcyjnych łożysk, w których pierścienie mają charakter cienkościenny i wykazują znaczną podatność na odkształcenia. W wyniku tego, po montażu w węźle łożyskowym, przyjmują one geometryczny kształt narzucony przez obudowę lub wał. Ze względu na dużą liczbę elementów tocznych oraz trudność, a w praktyce niemożność, uwzględnienia ich wszystkich w pomiarach i obliczeniach, jak również ze względu na przyjętą metodę określania średnic pierścieni, podjęto decyzję o oszacowaniu redukcji luzu wzdłużnego piasty, względem jego wartości obliczeniowej. Takie podejście pozwala na uproszczenie modelu obliczeniowego przy zachowaniu jego wystarczającej dokładności na potrzeby analizy technicznej.

W celu wyznaczenia wartości korekty luzu wzdłużnego piasty łożyskowej przyjęto, że poszczególne ogniwa łańcucha wymiarowego charakteryzują się ustalonymi wartościami odchyłek, które zostały wykorzystane w obliczeniach. Założone wartości tych odchyłek dla każdego ogniwa są następujące (1/3 maksymalnej wartości kołowości lub bicia):

- DBz1 – 0,001 mm,
- DBz2 – 0,001 mm,
- DBw1 – 0,001 mm,
- DWs1 – 0,0003 mm,
- Lop1 – 0,004 mm,
- dp – 0,001 mm,
- DBw2 – 0,000 mm,
- DWs2 – 0,0003 mm,
- Lop2 – 0,001 mm,
- dw – 0,001 mm.

A więc wartość korekty zmniejszającej luz wzdłużny piasty będzie wynosić:

$$K_N = 1,207 \cdot 0,001 + 1,207 \cdot 0,001 - 1,207 \cdot 0,001 - 1,207 \cdot 0 - 2,272 \cdot 0,0003 - 2,272 \cdot 0,0003 + 0,905 \cdot 0,001 - 0,905 \cdot 0,001 = 0,0068 \text{ mm}$$

Na podstawie równania łańcucha wymiar nominalny N (luz osiowy) wynosi:

$$N = \frac{76,903}{2tg22,5^\circ} + \frac{76,903}{2tg22,5^\circ} - \frac{58,754}{2tg22,5^\circ} - \frac{9,6415 \cdot \cos(22,5^\circ - 2,75^\circ)}{tg22,5^\circ} + 0$$

$$- \frac{0 \cdot tg17^\circ}{tg22,5^\circ} - \frac{58,755}{2tg22,5^\circ} - \frac{9,6415 \cdot \cos(22,5^\circ - 2,75^\circ)}{tg22,5^\circ} + 0$$

$$- \frac{0 \cdot tg17^\circ}{tg22,5^\circ} + \frac{0,75 \cdot 50 - 0,75 \cdot 50}{2tg22,5^\circ} = 0$$

Następnie wiedząc, że wartość luzu wzdłużnego i jego tolerancja wynosi $N = 0^{+0,05}_0$ mm, obliczamy współrzędną środka obszaru zmienności M_N , która jest równa:

$$M_N = \sum \left(\frac{\partial N}{\partial A_i} \right) M_{Ai} \quad \text{gdzie} \quad M_{Ai} = \frac{1}{2}(a_{2i} + a_{1i}) \quad (51)$$

W tym przypadku zakładamy, że:

$$M_N = 0,025 \text{ mm}$$

Przyjmując współrzędne środków pól tolerancji dla poszczególnych ogniw składowych na poziomie:

$$M_{DBZ1}=M_{DBZ2}= 0,0075 \text{ mm}; \quad M_{DBW1}= - 0,019 \text{ mm}; \quad M_{DBW2}= - 0,0035 \text{ mm};$$

$$M_{DWS1}=M_{DWS2}= - 0,002 \text{ mm}; \quad M_{LOP1}=0 \text{ mm}; \quad M_{LOP2}= - 0,01 \text{ mm}; \quad M_{dp}= - 0,006 \text{ mm};$$

$$M_{dw}= 0,016 \text{ mm}.$$

Podstawiając do wzoru (49) i pomniejszając współrzędną o wartość korekty luzu K_N , otrzymujemy założoną współrzędną środka obszaru zmienności M_N :

$$M_N = 1,207 \cdot 0,0075 + 1,207 \cdot 0,0075 - 1,207 \cdot (-0,009) - 1,207 \cdot (-0,0035) - 2,272 \cdot (-0,002) -$$

$$2,272 \cdot (-0,002) + 0,262 \cdot 0 + 0,262 \cdot (-0,01) + 0,905 \cdot (-0,006) - 0,096 \cdot 0,015 -$$

$$0,0068 = 0,0025 \text{ mm}$$

4.7. Wnioski

Przeprowadzona analiza konstrukcji zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji potwierdziła skuteczność zastosowania metod obliczeniowych łańcuchów wymiarowych w ocenie wpływu tolerancji geometrycznych na luz wzdłużny zespołu. Jednoznaczne zdefiniowanie i interpretacja wymagań geometrycznych przyczyniła się do zwiększenia precyzji pomiarów oraz poprawy jakości dokumentacji konstrukcyjnej. Zastosowanie podejścia opartego na zamienności częściowej pozwoliło na

optymalizację tolerancji wymiarowych przy jednoczesnym zachowaniu wymaganych parametrów funkcjonalnych wyrobu. Opracowany model stanowi wartościowe narzędzie wspomagające proces projektowania i walidacji konstrukcji w przemyśle łożyskowym, umożliwiając racjonalizację kosztów produkcji i przy zachowaniu niezawodności wytwarzanych komponentów.

ROZDZIAŁ V

PROCES TECHNOLOGICZNY ZESPOLONEJ PIASTY ŁOŻYSKOWEJ TRZECIEJ GENERACJI

Opracowanie procesu technologicznego elementów zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji z łożyskiem stożkowym zgodnie z wymaganiami normy IATF 16949 (*International Automotive Task Force* – IATF) wymaga podejścia systemowego, zorientowanego na jakość, identyfikowalność i ciągłe doskonalenie.

Norma ISO 9001 oraz standard IATF 16949 pozostają ze sobą w ścisłym związku strukturalnym i funkcjonalnym, co wynika zarówno z ich historii rozwoju, jak i z aktualnych wymogów branżowych. ISO 9001 stanowi fundamentalną i uniwersalną normę systemu zarządzania jakością (SZJ), opracowaną przez Międzynarodową Organizację Normalizacyjną (*International Organization for Standardization*), natomiast IATF 16949 jest jej branżowym rozszerzeniem, opracowanym przez Międzynarodową Grupę Zadaniową ds. Motoryzacji w odpowiedzi na specyficzne potrzeby przemysłu motoryzacyjnego.

Pod względem strukturalnym IATF 16949:2016 w pełni integruje wymagania ISO 9001:2015, co oznacza, że spełnienie wymagań IATF automatycznie implikuje zgodność z ISO 9001. Standard IATF nie funkcjonuje jako samodzielna norma, lecz jako uzupełnienie ISO 9001, zawierające dodatkowe wymagania branżowe, ukierunkowane na zapewnienie jakości i ciągłości dostaw w łańcuchu produkcji motoryzacyjnej. Przedsiębiorstwa ubiegające się o certyfikację IATF muszą zatem najpierw spełnić wszystkie ogólne wymagania ISO 9001, a następnie zaimplementować wymagania specyficzne dla IATF 16949, obejmujące m.in. zarządzanie ryzykiem, rozwój dostawców, śledzenie komponentów oraz prewencyjne metody zarządzania jakością.

Dlatego też, kolejne etapy tworzenia procesu technologicznego muszą być zgodne z podejściem opartym na zasadach zarządzania jakością, analizie ryzyka oraz ciągłym doskonaleniu, co wynika zarówno z wymagań normy IATF 16949, jak i praktyki inżynierskiej związanej z wytwarzaniem elementów, takich jak piasta łożyskowa z łożyskiem stożkowym.

W przypadku tego typu komponentów, które pełnią kluczową rolę w układzie jezdnym pojazdu, proces technologiczny musi być projektowany z uwzględnieniem:

- identyfikowalności parametrów krytycznych,
- stosowania zaawansowanych technik planowania jakości (APQP - *Advanced Product Quality Planning*),

- weryfikacji projektowej (DFMEA - *Design Failure Mode and Effects Analysis*) oraz analizy niezawodności procesu (PFMEA - *Process Failure Mode and Effects Analysis*),
- a także statystycznego sterowania procesem (SPC) na etapie produkcji seryjnej.

W celu jednoznacznego zdefiniowania i udokumentowania kluczowych charakterystyk produktu oraz procesu produkcyjnego, które mają bezpośredni wpływ na funkcjonalność i niezawodność łożyska, zgodność z wymaganiami klienta i normami technicznymi, stosuje się formularze kluczowych charakterystyk produktu (SCIF- *Specification Characteristics Identification Form*), które są wynikiem analizy DFMEA. SCIF jest narzędziem zapewnienia jakości, które wspiera identyfikację i kontrolę cech krytycznych dla funkcji, bezpieczeństwa i zgodności wyrobu z wymaganiami technicznymi. Formularz kluczowych charakterystyk produktu dla zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji przedstawiono na rysunku 34.

Specification Characteristics Identification Form (SCIF)							
Supplier:		Fabryka Łożysk Tocznych - Kraśnik S.A.					
Supplier Code:		00000					
Component / Assembly Part Number(s)		515036 tender drawing					
		ZPS-001A TT-500434 / 2019-10-16 _design drawing					
2018-03-12 SCIF				2018-03-14 DFMEA		2019-10-16 Drawing	
Item	Feature / Requirement	Bubble on Drawing (or grid ref A)	Special characteristic (according drawing)	Customer Interface	Acceptance Criteria / Metric	Source: including item from / DFMEA - No 194	Location on Drawing OT-00839
1	Pierścień zewnętrzny-Średnica ustalająca	C1	▽		$\varnothing 99,3^{+0}_{-0.074}$	①	unmarked
2	Pierścień zewnętrzny-Otworki mocujące	A6	▽		3xM14x1,5-6H	②	unmarked
3	Pierścień wewnętrzny-Średnica osadzenia tarczy hamulcowej	C4	▽		$\varnothing 78,3^{+0}_{-0.074}$	③	unmarked
4	Pierścień wewnętrzny-Średnica osadzenia felgi	C5	▽		$\varnothing 77,7^{+0}_{-0.074}$	④	unmarked
5	Pierścień wewnętrzny-Otwór centrujący	D7	▽		3xM14x1,5-6H	⑤	unmarked
6	Pierścień wewnętrzny-Wielowypust	B4	▽		Z=33, α=45°, m=1,0583	⑥	unmarked
7	Zespół piasty-Położenie czoła pierścienia zewnętrznego względem czoła pierścienia wewnętrznego	A2	▽		49,7 ±0,3	⑦	unmarked
8	Zespół piasty-Szpilkki mocujące	B4	▽		6xM14x1,5-6g	⑧	unmarked

Rys. 34. Formularz kluczowych charakterystyk produktu (SCIF) dla zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji

Zastosowanie podejścia procesowego wymaga ścisłego zdefiniowania operacji obróbkowych, takich jak toczenie, frezowanie, hartowanie indukcyjne, szlifowanie, dogładzanie oraz montaż łożyska, z jednoczesnym uwzględnieniem tolerancji geometrycznych oraz wymaganych właściwości materiałowych. Kluczowe znaczenie

ma również integracja kontroli jakości w czasie rzeczywistym, co pozwala na szybkie reagowanie na odchylenia i minimalizację ryzyka wprowadzenia do obiegu wyrobu niezgodnego ze specyfikacją.

W rezultacie, prawidłowo zaprojektowany i zatwierdzony proces technologiczny piasty łożyskowej, zgodny z podejściem opartym na dowodach i prewencji, stanowi fundament dla zapewnienia niezawodności, bezpieczeństwa oraz zgodności z wymaganiami klienta branży motoryzacyjnej.

W celu optymalizacji kosztów produkcji oraz zwiększenia efektywności ekonomicznej całego procesu wytwórczego, część operacji technologicznych została powierzona podmiotom zewnętrznym, realizującym zadania w ramach strategii outsourcingu. Dotyczy to w szczególności zakupu komponentów półfabrykatowych oraz gotowych elementów, które nie są wytwarzane bezpośrednio w strukturach Fabryki Łożysk Tocznych (FŁT). Przedmiotem zleceń zewnętrznych jest m.in. dostawa otoczek pierścienia zewnętrznego oraz pierścienia wewnętrznego kołnierзовego, a także gotowego do montażu pierścienia wewnętrznego. Taki podział zakresu produkcji stanowi świadome działanie wynikające z analizy kosztów jednostkowych, dostępności technologii obróbczych, mocy produkcyjnych oraz możliwości logistycznych, przy jednoczesnym zachowaniu pełnej kontroli nad jakością i zgodnością komponentów z wymaganiami technicznymi oraz dokumentacją konstrukcyjną. Z perspektywy inżynierii produkcji, decyzja o zleceniu części procesów poza główny zakład wiąże się również z koniecznością stosowania metod kwalifikacji i monitorowania dostawców, zgodnych z wymaganiami normy IATF 16949. W praktyce oznacza to wdrożenie audytów procesowych, walidację dostarczanych wyrobów, a także zapewnienie pełnej identyfikowalności partii i parametrów krytycznych, co pozwala na utrzymanie integralności jakościowej całego wyrobu – zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji. Tym samym, zintegrowane podejście do zarządzania łańcuchem dostaw, łączące własną produkcję z wykorzystaniem wybranych kooperantów, umożliwia zachowanie konkurencyjności rynkowej bez kompromisów w zakresie wymagań technicznych, funkcjonalnych i bezpieczeństwa eksploatacyjnego gotowego produktu.

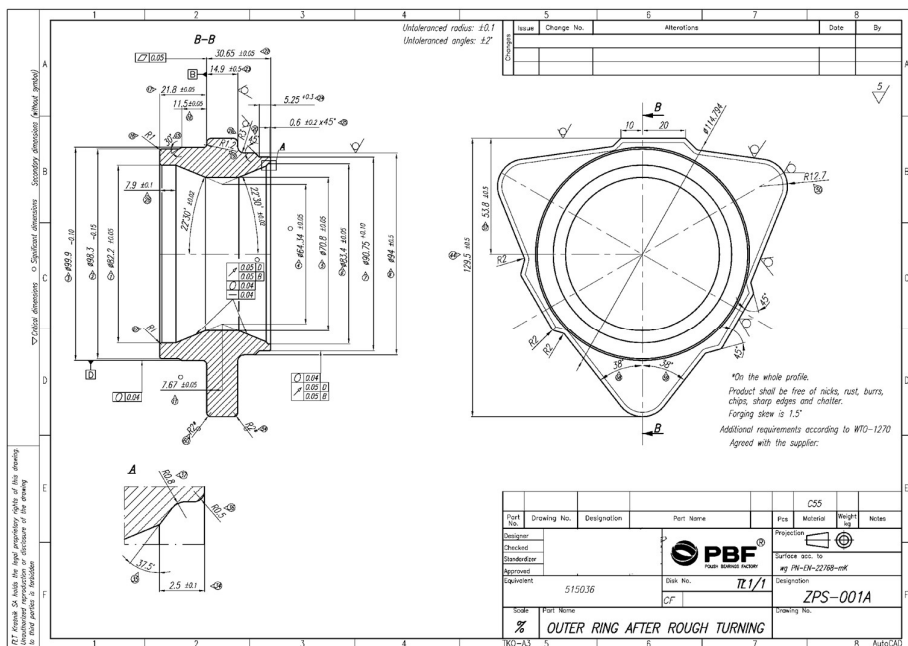
5.1. Warunki do zamawiania otoczek

Zamawianie otoczek pierścieni, zarówno zewnętrznych, jak i wewnętrznych, odbywa się w oparciu o precyzyjnie zdefiniowane warunki techniczne, które wynikają z wieloletniego doświadczenia Fabryki Łożysk Tocznych w projektowaniu i produkcji łożysk tocznych. Otoczki muszą spełniać rygorystyczne wymagania w zakresie składu chemicznego, właściwości mechanicznych, struktury materiału oraz

dokładności wymiarowej. Szczególny nacisk kładzie się na jakość powierzchni, jednorodność materiału, brak wad hutniczych oraz możliwość dalszej obróbki cieplno-mechanicznej bez ryzyka wystąpienia odkształceń. Wymagania te zostały opracowane na podstawie długoterminowej eksploatacji komponentów łożyskowych w warunkach obciążeń dynamicznych, co pozwoliło na optymalizację kryteriów odbioru oraz minimalizację ryzyka wad ukrytych, wpływających na trwałość i niezawodność gotowego wyrobu.

5.1.1. Pierścień zewnętrzny

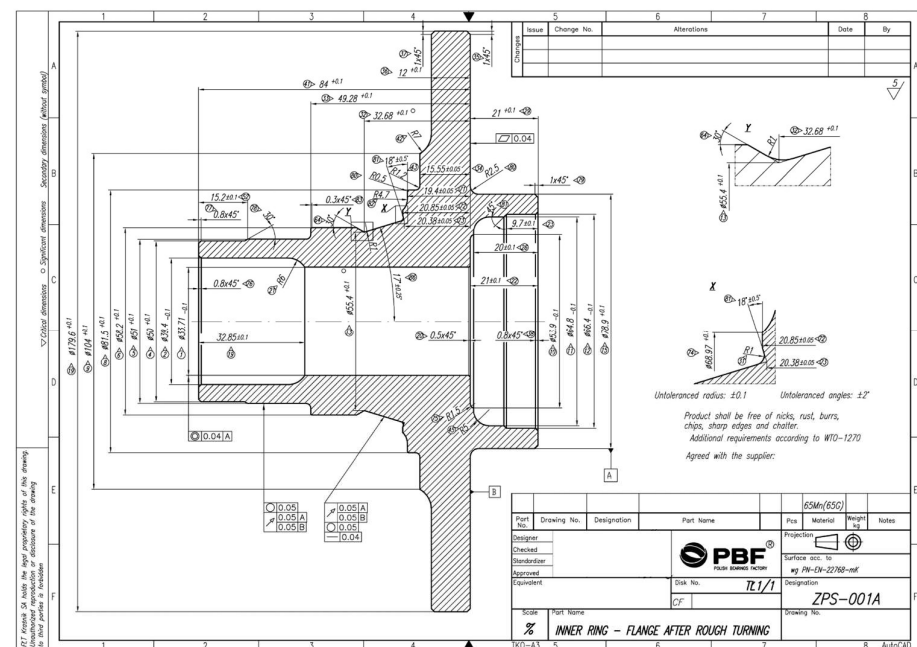
Wymagania odnośnie specyfikacji wymiarowej i geometrycznej przedstawiono w dokumencie na rysunku 35. Dodatkowe wymagania dotyczące: powierzchni, technologii wytwarzania, składu chemicznego, mikrostruktury, makrostruktury, wtrąceń makroskopowych, czystości stali, twardości, struktury ziarna przełomu, zabezpieczenia antykorozyjnego i sposobu pakowania, programu kontroli, próbek kwalifikacyjnych, oznakowania opakowań, certyfikatu jakości oraz warunków gwarancji stanowią integralną część oceny zgodności dostarczanych otoczek z wymaganiami technologicznymi FŁT. Ich przestrzeganie jest niezbędne dla zapewnienia powtarzalności parametrów eksploatacyjnych i wysokiej niezawodności finalnych komponentów łożyskowych. Wszystkie powyższe wymagania zostały szczegółowo określone w dokumencie referencyjnym WTO-1270, który stanowi obowiązującą podstawę dla oceny zgodności dostarczanych otoczek pierścieni zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji z wymaganiami technicznymi i jakościowymi Fabryki Łożysk Tocznych.



Rys. 35. Rysunek otoczki pierścienia zewnętrznego zintegrowanej piasty łożyskowej trzeciej generacji

5.1.2. Pierścień wewnętrzny kołnierzowy

Wymagania dotyczące specyfikacji wymiarowej i geometrycznej przedstawiono w dokumencie zaprezentowanym na rysunku 36. Dodatkowe wymagania, tak jak w przypadku pierścienia zewnętrznego, określono w dokumencie WTO-1270.



Rys. 36. Rysunek otoczki pierścienia wewnętrznego kołnierзовego zintegrowanej piasty łożyskowej trzeciej generacji

5.2. Obróbka tokarska pierścieni, kucie wałeczków stożkowych

W celu minimalizacji kosztów produkcji podjęto decyzję o zakupie otoczek pierścienia zewnętrznego oraz pierścienia wewnętrznego po etapie toczenia zgrubnego. Działanie to wpisuje się w strategię częściowego outsourcingu operacji wstępnych, które nie wymagają wysokiej precyzji wykonania. Jednak ze względu na krytyczne znaczenie dokładności wymiarowej i jakości powierzchni tych komponentów w końcowym wyrobie, postanowiono, że operacje wykańczające pozostaną w zakresie produkcji własnej. Wykańczające obróbki tokarskie oraz frezarskie zostaną zrealizowane w FŁT Kraśnik. Pozwoli to na pełną kontrolę nad kluczowymi parametrami geometrycznymi i funkcjonalnymi, istotnymi z punktu widzenia kolejnych operacji, trwałości eksploatacyjnej i bezpieczeństwa użytkowania piasty łożyskowej. Takie podejście łączy efektywność kosztową z zapewnieniem wysokiej jakości finalnego komponentu, zgodnej z wymaganiami norm branżowych i oczekiwaniami klientów.

5.2.1. Pierścień zewnętrzny

Technologiczny przebieg obróbki tokarskiej pierścienia zewnętrznego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji został opracowany z uwzględnieniem zarówno wymagań geometryczno-wymiarowych, jak i specyfiki funkcjonalnej komponentu. Proces ten obejmuje szereg operacji, których celem jest uzyskanie finalnej geometrii zgodnej z dokumentacją konstrukcyjną oraz zapewnienie odpowiednich naddatków dla powierzchni, które będą obrabiane poprzez szlifowanie. Szczególny nacisk położono na zachowanie dokładności bazowania i przygotowanie powierzchni pod dalsze etapy obróbki z zachowaniem wymaganych tolerancji i jakości powierzchni. Technologiczny przebieg obróbki tokarskiej pierścienia zewnętrznego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji obejmuje kolejno operacje:

- Rozpakować,
- Toczyć pierścień (rys. 38) – obrabiarka QTS – 350,
- Wiercić 3 otwory, gwintować – obrabiarka KDVM1000LA - zakup (rys. 37),
- Frezować spłaszczenie. Wiercić otwory, gwintować – obrabiarka KDVM1000LA - zakup,
- Myć – myjka AKA-36.



Rys. 37. Obrabiarka KDVM1000LA - zakupiona do celów uruchomienia produkcji zespolonej piasty łożyskowej

		KARTA OPERACYJNA		Opracował: _____ Sprawdził: _____ Opr. pomiar: _____ Spr. pomiar: _____		Organizacja stanowiska roboczego: IT0-472 Instrukcja ustawienia obrabiarki: IT0-130 Indeks operacji: 1759 Użytkowanie narzędzi pomiarowych: ITX-187		Strona 1 Stron 1	
Wydział: PS2 Nr operacji: 010		Symbol detalu: ZPS-001A		Tytuł: 100		Nazwa operacji: Toczyć pierścień		Narzędzia: QTS-350	
Klasy wartości parametrów technologicznych Report: B Krytyczna: A Ważna: I Drugorzędna (nie oznacza się)				Symbol wymiaru: DBSF H.S1		Wymiar: 76.60 ^{+0.10}		Pomocne pomiarowe: MG-142, MD-225, JDO-413, JOK-1031, JOK-1322, JOK-1316, JOK-1309	
				Symbol wymiaru: DBSF H.S2		Wymiar: 76.60 ^{+0.10}		Pomocne pomiarowe: MG-142, MD-225, JDO-413, JOK-1031, JOK-1322, JOK-1316, JOK-1301	
				Symbol wymiaru: KA1		Wymiar: 22°30'±0.05		Pomocne pomiarowe: M MHC-XX	
				Symbol wymiaru: KA2		Wymiar: 22°30'±0.05		Pomocne pomiarowe: M MHC-XX	
				Symbol wymiaru: D		Wymiar: Ø97.70 ^{-0.15}		Pomocne pomiarowe: P MG-122, K MRB-171	
				Symbol wymiaru: D1		Wymiar: Ø99.30 ^{-0.07}		Pomocne pomiarowe: P MG-122, K MRB-357	
				Symbol wymiaru: VD1P		Wymiar: 0.03		Pomocne pomiarowe: P MG-122, K MRB-221	
				Symbol wymiaru: D3		Wymiar: Ø90.20 ^{-0.10}		Pomocne pomiarowe: P MG-122, K MRB-221	
				Symbol wymiaru: H.D3		Wymiar: 7.8		Pomocne pomiarowe: P MG-142, M MRC-204	
				Symbol wymiaru: D5		Wymiar: Ø82.80 ^{-0.05}		Pomocne pomiarowe: P MG-142, M MRC-204	
				Symbol wymiaru: D6		Wymiar: Ø84.03 ^{+0.15}		Pomocne pomiarowe: P MG-142, M MRC-724, JOK-1840, JOK-1317	
				Symbol wymiaru: DW		Wymiar: Ø71.30 ^{+0.20}		Pomocne pomiarowe: P MG-142, M MRC-118, JOK-665	
				Symbol wymiaru: H.DW		Wymiar: 22.0		Pomocne pomiarowe: P MG-142, M MRC-118, JOK-665	
				Symbol wymiaru: H.DW		Wymiar: 15.5		Pomocne pomiarowe: P MG-142, M MRC-118, JOK-665	
				Symbol wymiaru: H.DW		Wymiar: 22.0		Pomocne pomiarowe: P MG-142, M MRC-118, JOK-665	
				Symbol wymiaru: KeDW		Wymiar: 0.02		Pomocne pomiarowe: M MHC-XX	
				Symbol wymiaru: k		Wymiar: 11.5 ^{+0.02}		Pomocne pomiarowe: M MHC-XX	
				Symbol wymiaru: k1		Wymiar: 7.17 ^{+0.08}		Pomocne pomiarowe: M MHC-XX	
				Symbol wymiaru: C		Wymiar: 51.45 ^{+0.18}		Pomocne pomiarowe: P MG-112, K MSA-240	
				Symbol wymiaru: C1		Wymiar: 21.80 ^{+0.08}		Pomocne pomiarowe: P MG-112, K MSA-240	
				Symbol wymiaru: C2		Wymiar: 29.60 ^{+0.10}		Pomocne pomiarowe: P MG-112, K MSA-240	
				Symbol wymiaru: C3		Wymiar: 5.25 ^{+0.3}		Pomocne pomiarowe: M MHC-XX	
				Symbol wymiaru: C4		Wymiar: 14.4 ^{+0.2}		Pomocne pomiarowe: M MAUA-BG	
				Symbol wymiaru: i		Wymiar: 1.0 ^{+0.2}		Pomocne pomiarowe: M MHC-XX	
				Symbol wymiaru: i1		Wymiar: 5.85 ^{+0.1}		Pomocne pomiarowe: M MHC-XX	
				Symbol wymiaru: i2		Wymiar: 8.47 ^{+0.1}		Pomocne pomiarowe: M MHC-XX	
				Symbol wymiaru: i3		Wymiar: 2.02 ^{+0.1}		Pomocne pomiarowe: M MHC-XX	

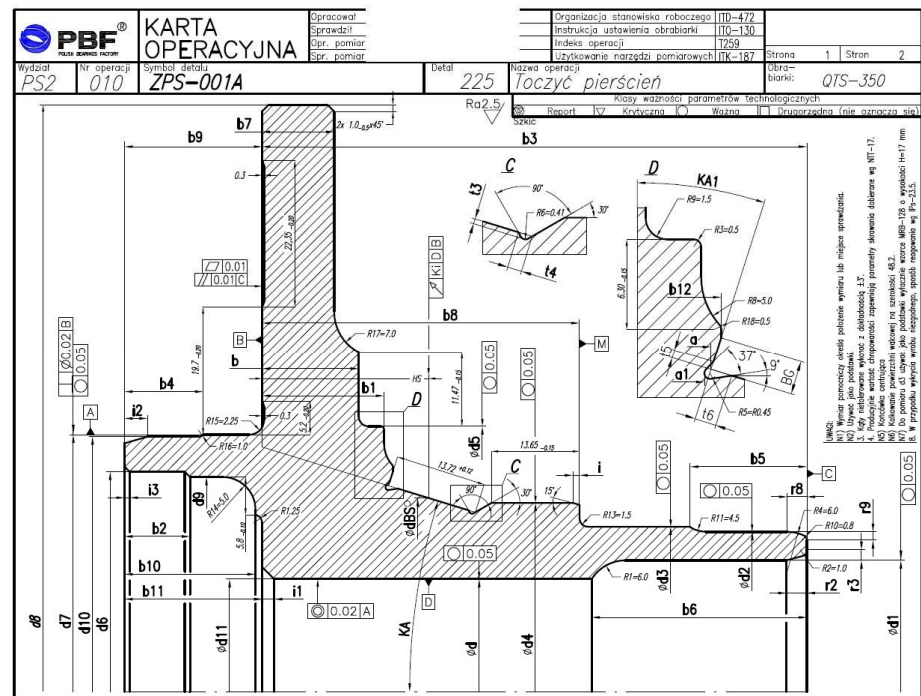
Rys. 38. Karta operacyjna obróbki tokarskiej pierścienia zewnętrznego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji

Parametry skrawania, wartości posuwów oraz dobór narzędzi tokarskich i frezarskich zostały określone na podstawie analizy właściwości materiału obrabianego, wymagań technologicznych oraz założonych klas dokładności. Dobór ten uwzględnia również warunki sztywności układu obrabiarka–uchwyt–narzędzie, a także wymagania dotyczące chropowatości powierzchni, trwałości narzędzi oraz stabilności procesu obróbkowego. Wartości parametrów obróbkowych zostały wprowadzone do programów sterujących obrabiarkami CNC dla każdej z przewidzianych operacji technologicznych.

5.2.2. Pierścień wewnętrzny kołnierзовy

Analogenicznie jak dla pierścienia zewnętrznego, dla pierścienia wewnętrznego kołnierowego opracowano technologiczny przebieg obróbki tokarskiej pierścienia wewnętrznego kołnierowego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji, który obejmuje kolejno operacje:

- Rozpakować,
- Toczyć pierścień (rys. 39)– obrabiarka QTS – 350 (rys. 40).



Rys. 39. Pierwsza strona karty operacyjnej obróbki tokarskiej pierścienia wewnętrznego kołnierзовego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji



Rys. 40. Obrabiarka QTS-350 – MAZAK QUICK TURN SMART 350

5.3. Obróbka cieplna pierścieni oraz waleczków stożkowych

W związku z uruchomieniem produkcji zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji, której elementy składowe, takie jak pierścień zewnętrzny oraz pierścień wewnętrzny kołnierzowy, wymagają wysokiej odporności na zużycie, zastosowano technologię hartowania indukcyjnego. Proces ten stanowi efektywną metodę selektywnego utwardzania warstwy wierzchniej materiału przy jednoczesnym zachowaniu plastycznego rdzenia. Hartowanie indukcyjne stanowi nowoczesną, energooszczędną i proekologiczną technologię obróbki cieplnej, cechującą się wysoką efektywnością w porównaniu z konwencjonalnymi metodami utwardzania powierzchniowego, takimi jak nawęglanie. Proces ten znajduje szczególne zastosowanie w przypadku elementów o osiowo-symetrycznym lub płaskim kształcie, jednak w ostatnich latach obserwuje się jego rosnącą implementację również w obróbce detali o złożonej geometrii. Zwiększona precyzja, możliwość lokalnego utwardzania oraz ograniczony wpływ termiczny na cały element czynią hartowanie indukcyjne atrakcyjną alternatywą dla tradycyjnych metod cieplnych w nowoczesnych procesach produkcyjnych [24]. Hartowanie indukcyjne polega na szybkim nagrzewaniu powierzchni materiału przy użyciu prądu o odpowiednio dobranej częstotliwości, a następnie jej intensywnym chłodzeniu, co skutkuje przemianą strukturalną do fazy martenzytycznej. Warstwa zahartowana osiąga twardość na poziomie powyżej 50–60 HRC, co znacząco zwiększa odporność na zużycie ścierne, zmęczeniowe oraz obciążenia dynamiczne. Rdzeń pozostaje niezmieniony strukturalnie, zachowując swoje właściwości plastyczne i zdolność do pochłaniania energii, co przekłada się na zwiększoną odporność elementu na kruche pękanie pod wpływem obciążeń udarowych. W przeciwieństwie do hartowania objętościowego, które prowadzi do jednolitego utwardzenia całej objętości materiału i może zwiększać jego kruchość, hartowanie indukcyjne umożliwia precyzyjne modyfikowanie właściwości mechanicznych wyłącznie w obszarze powierzchniowym. Głębokość warstwy zahartowanej w procesie hartowania indukcyjnego jest ściśle zależna od doboru parametrów technologicznych, takich jak częstotliwość prądu indukcyjnego, moc dostarczana do elementu, całkowity czas nagrzewania, właściwości materiałowe obrabianego elementu oraz warunki wymiany ciepła [23]. Szczególnie istotnym czynnikiem pozostaje częstotliwość prądu – przy zastosowaniu wysokich częstotliwości uzyskuje się stosunkowo płytką warstwę utwardzoną ze względu na ograniczoną głębokość przenikania prądu wirowego. Z kolei niższe częstotliwości umożliwiają głębsze nagrzewanie materiału, co przekłada się na zwiększoną głębokość zahartowania. Zastosowanie hartowania indukcyjnego w produkcji elementów precyzyjnych, takich jak komponenty zespolonej piasty łożyskowej dzięki lokalnemu charakterowi procesu oraz

krótkim czasem nagrzewania i chłodzenia pozwala na istotne ograniczenie odkształceń oraz naprężeń własnych, które powodują zmiany wymiarów przedmiotu oraz jego odkształcenia [27]. Dodatkowo, ograniczenie obróbki cieplnej wyłącznie do warstwy powierzchniowej minimalizuje wielkość usuwania naddatków obróbczych, co sprzyja zwiększeniu efektywności procesów wytwórczych oraz poprawie właściwości użytkowych finalnego produktu. Hartowanie indukcyjne jest, więc idealnym wyborem, gdy wymagane jest połączenie twardej, odpornej na zużycie powierzchni z plastycznym i wytrzymałym rdzeniem zdolnym do absorpcji obciążeń dynamicznych [16].

5.3.1. Pierścień zewnętrzny

Proces hartowania indukcyjnego pierścienia zewnętrznego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji realizowany jest z wykorzystaniem maszyny do hartowania indukcyjnego firmy SAET (rys. 42a). Narzędziem, które wytwarza zmienne pole elektromagnetyczne i tym samym nagrzewa powierzchnie obrabianego elementu jest induktor (rys. 42b). Urządzenie to zostało zakupione w celu wdrożenia oraz realizacji procesu produkcji zespolonej piasty łożyskowej, stanowiąc integralny element linii technologicznej dedykowanej precyzyjnej obróbce cieplnej.

Sposób realizacji procesu obróbki cieplnej został szczegółowo określony w karcie technologicznej obróbki cieplnej (rys. 43). Dokument ten zawiera kompletny opis przebiegu procesu, parametry nastawcze, poziomy kontroli jakości oraz wymagania techniczne stawiane obrabianemu elementowi. Karta technologiczna stanowi podstawę formalną do przeprowadzenia procesu zgodnie z obowiązującymi standardami jakościowymi i technologicznymi.



a



b

Rys. 42. a) Maszyna do hartowania indukcyjnego firmy SAET posiadająca dwa stanowiska do hartowania pierścienia zewnętrznego oraz pierścienia wewnętrznego kołnierzo-
wego, b) induktor pierścienia zewnętrznego

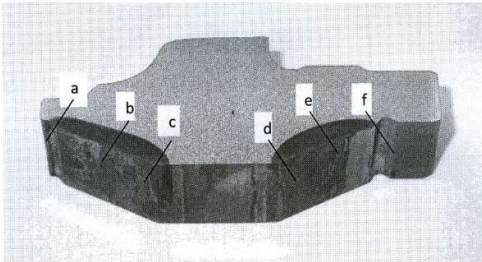
[illegible]

Rys. 43. Karta technologiczna obróbki cieplnej pierścienia zewnętrznego zespolonej pias-
ty łożyskowej trzeciej generacji

Poprawność wykonania procesu obróbki cieplnej metodą hartowania indukcyjnego, pierścień zewnętrzny zespolonej piasty łożyskowej (jedna sztuka na zmianę) poddawany jest kontroli na zgodność z wymaganiami określonymi w karcie operacyjnej oraz w warunkach techniczno-odbiorczych WTO-1261. Weryfikacja ta obejmuje między innymi ocenę jakościową i ilościową warstwy utwardzonej oraz analizę twardości rdzenia, co pozwala na potwierdzenie skuteczności przeprowadzonego procesu oraz spełnienia kryteriów eksploatacyjnych.

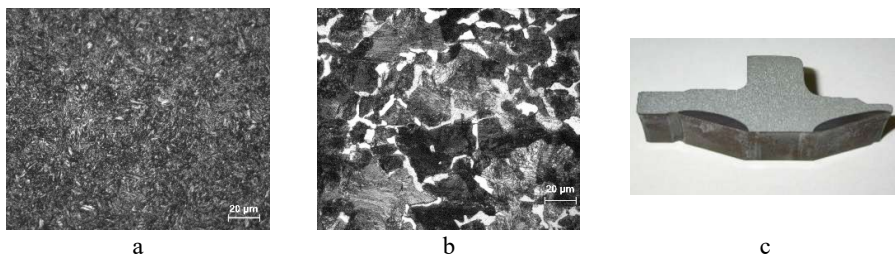
Pomiar twardości przeprowadzany jest w przekroju poprzecznym elementu, w celu określenia profilu twardości od powierzchni do rdzenia. Uzyskane wyniki rozkładu twardości warstwy zahartowanej, jak również wartości twardości w strefie nieutwardzonej (rdzeniu), przedstawiono na rysunku 44. Interpretacja tych wyników umożliwia ocenę głębokości skutecznego hartowania, jednorodności warstwy utwardzonej oraz potwierdzenie, że rdzeń zachował wymagane właściwości plastyczne.

Spełnienie wymagań w zakresie twardości powierzchniowej i rdzeniowej stanowi kluczowy warunek dopuszczenia elementu do dalszego etapu produkcji i jednocześnie gwarantuje jego niezawodność w warunkach eksploatacyjnych, obejmujących obciążenia zmienne oraz zmęczenie materiału.

Fabryka Łożysk Toczących – Kraśnik S.A.	Wyniki badań			Nr wyniku badań: 1513/M/2023	
Centralne Laboratorium (TJB)	Dla : PS2	Na zlecenie: Kor. służbowa	Z dnia : 25.08.2023 r.	Strona 1	Stron 1
Treść zamówienia :					
Przeprowadzić badania pierścienia zewnętrznego ZPS-001A-01 według WTO-1261.					
Opis i wyniki badań:					
Pomiary twardości metodą Vickersa HV1. Miejsca rozkładów twardości przedstawiono na poniższym szkicu, natomiast wyniki pomiarów zestawiono w tablicach nr 1 i 2.					
					
Szkic do wykonania rozkładów twardości. Wg rys. wymagana grubość warstwy utwardzonej w przekrojach a, c, d, f, - min. 1,5 mm, w przekrojach b, e - min 3,5 mm.					
TABLICA NR 1.					
Odległość od powierzchni bieżni /mm/	Twardość Vickersa HV1–rozkład a	Twardość Vickersa HV1–rozkład c	Twardość Vickersa HV1–rozkład d	Twardość Vickersa HV1–rozkład f	
0,3	728	744	732	741	
0,9	735	747	717	722	
1,5	739	718	659	731	
TABLICA NR 2.					
Odległość od powierzchni bieżni /mm/	Twardość Vickersa HV1–rozkład b	Twardość Vickersa HV1–rozkład e			
0,3	736	736			
1,1	745	738			
1,9	744	724			
2,7	739	714			
3,5	704	650			
Twardość rdzenia wynosiła – 221 ÷ 237 HV (wymagana twardość 217÷265 HV). Gatunek materiału C55.					
Opracowano: TJB/Centralne Laboratorium Sekcja Metalografii Dnia: 04.10.2023 r.					

Rys. 44. Wynik badań pomiaru twardości pierścienia zewnętrznego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji

Na próbce pierścienia zewnętrznego wykonano zgląd metalograficzny, wytrawiono w nitalu i poddano ocenie mikrostrukturę. Wygląd mikrostruktury warstwy utwardzonej oraz rdzenia przedstawiono na rysunku 45.



Rys. 45. Wygląd mikrostruktury a) warstwy utwardzonej próbki pierścienia zewnętrznego (1000x), b) rdzenia próbki pierścienia zewnętrznego (1000x), c) wygląd próbki

Próbkę pierścienia zewnętrznego poddano badaniu na gatunek materiału na spektrometrze SPECTROLAB LAVM12 (rys. 46). Materiał pierścienia odpowiadał gatunkowi materiału C55. Wyniki analizy zestawiono w tabeli 9.



Rys. 46. Spektrometr SPECTROLAB LAVM12

Hartowanie obu pierścieni odbywa się równolegle na dwóch niezależnych stanowiskach obróbkowych. Proces hartowania pierścienia wewnętrznego kołnierzewego realizowany jest po lewej stronie maszyny hartowniczej. Układ stanowiska roboczego, obejmujący system mocowania oraz induktor, przedstawiono na rysunku 48a. Natomiast rysunek 48b ilustruje przekrój pierścienia wewnętrznego kołnierzewego z uwidocznioną strefą zahartowaną. W celu weryfikacji poprawności procesu hartowania indukcyjnego, pierścień wewnętrzny kołnierzowy zespolonej piasty łożyskowej (jedna sztuka na zmianę) poddawany jest kontroli zgodności z wymaganiami karty operacyjnej oraz warunkami techniczno-odbiorczymi WTO-1262. Ocena obejmuje analizę twardości warstwy utwardzonej i rdzenia na przekroju poprzecznym, co umożliwia określenie profilu twardości i potwierdzenie skuteczności obróbki cieplnej (rys. 49 i rys. 50).

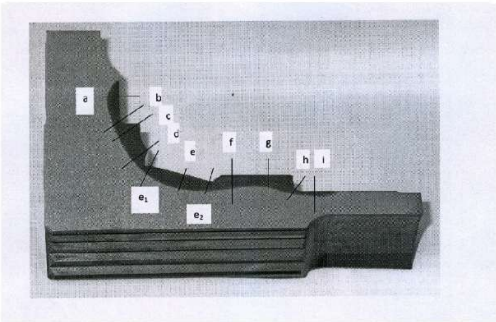


a



b

Rys. 48. a) Układ stanowiska roboczego maszyny do hartowania indukcyjnego firmy SAET, obejmujący system mocowania oraz induktor do obróbki pierścienia wewnętrznego kołnierzewego, b) przekrój pierścienia wewnętrznego kołnierzewego z uwidocznioną strefą zahartowaną

Fabryka Łożysk Toczących – Kraśnik S.A.	Wyniki badań			Nr wyniku badań: 1513/A/M/2023	
Centralne Laboratorium (TJB)	Dla : PS2	Na zlecenie: Kor. służbowa	Z dnia : 28.08.2023 r.	Strona 1	Stron 2
Treść zamówienia : Przeprowadzić badania pierścienia wewnętrznego ZPS-001A-05 według WTO-1262.					
Opis i wyniki badań: Program badań: Pomiary twardości metodą Vickersa HV1. Miejsca rozkładów twardości przedstawiono na poniższym szkicu, natomiast wyniki pomiarów zestawiono w tablicach.					
					
Szkic do wykonania rozkładów twardości. Wg rys. wymagana grubość warstwy utwardzonej w przekrojach a, b, c, d, f, g, h, i - min. 1,9 mm, dla przekroju bieżni e - min. 3,5 mm, dla e1 i e2 - min 1,5 mm.					
TABLICA NR 1.					
Odległość od powierzchni bieżni /mm/	Twardość Vickersa HV1				
	rozkład a	rozkład b	rozkład c	rozkład d	
0,3	705	715	734	720	
1,1	663	708	712	717	
1,9	657	697	707	705	
TABLICA NR 2.					
Odległość od powierzchni bieżni /mm/	Twardość Vickersa HV1				
	rozkład f	rozkład g	rozkład h	rozkład i	
0,3	696	715	735	760	
1,1	694	659	727	747	
1,9	635	655	732	752	

Rys. 49. Wynik badań pomiaru twardości pierścienia wewnętrznego kołnierzego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji, strona 1

- 2 -

TABLICA NR 3.

Odległość od powierzchni bieżni /mm/	Twardość Vickersa HV1	
	rozkład e_1	rozkład e_2
0,3	768	742
0,9	758	758
1,5	748	774

TABLICA NR 4.

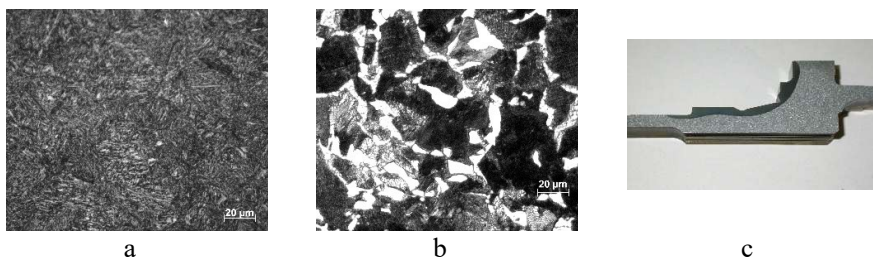
Odległość od powierzchni bieżni /mm/	Twardość Vickersa HV1- rozkład e
0,3	773
1,1	763
1,9	769
2,7	761
3,5	730

Twardość rdzenia wynosiła – $221 \div 228$ HV (wymagana twardość $217 \div 265$ HV).
Gatunek materiału C55.

Opracowano:
TJB/Centralne Laboratorium
Sekcja Metalografii
Dnia: 04.10.2023 r.

Rys. 50. Wynik badań pomiaru twardości pierścienia wewnętrznego kołnierzewego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji, strona 2

Na próbce pierścienia wewnętrznego kołnierzewego wykonano zgład metalograficzny, wytrawiono w nitalu i poddano ocenie mikrostrukturę. Wygląd mikrostruktury warstwy utwardzonej oraz rdzenia przedstawiono na rysunku 51.



Rys. 51. Wygląd mikrostruktury a) warstwy utwardzonej próbki pierścienia wewnętrznego kołnierzewego (1000x), b) rdzenia próbki pierścienia wewnętrznego kołnierzewego (1000x), c) wygląd próbki

Próbkę pierścienia zewnętrznego poddano badaniu na gatunek materiału na spektrometrze. Materiał pierścienia odpowiadał gatunkowi materiału C55. Wyniki analizy zestawiono w tabeli 10.

Tabela 10. Wyniki analizy składu chemicznego próbki pierścienia wewnętrznego kołnierzego

Pierwiastek	Wyniki analizy składu chemicznego próbki pierścienia wewnętrznego kołnierzego [%]
Węgiel (C)	0,58
Krzem (Si)	0,21
Mangan (Mn)	0,64
Chrom (Cr)	0,14
Fosfor (P)	0,020
Siarka (S)	0,005
Nikiel (Ni)	0,017
Molibden (Mo)	0,002
Miedź (Cu)	0,036
Aluminium (Al)	0,009

5.3.3. Waleczek stożkowy

Proces hartowania wałeczków stożkowych odbywa się w atmosferze ochronnej dwutlenku węgla (CO₂) i przeprowadza się z wykorzystaniem agregatów hartowniczych, zapewniających precyzyjne sterowanie parametrami cieplnymi i atmosferycznymi. Obróbka cieplna polega na nagraniu elementów do temperatury austenitowania (850°C), przy jednoczesnym utrzymaniu atmosfery ochronnej CO₂, która zapobiega utlenianiu powierzchniowym oraz niepożądanym reakcjom chemicznym. Po osiągnięciu wymaganej temperatury, wałeczki są szybko chłodzone w oleju, co umożliwia uzyskanie struktury martenzytycznej. Zastosowanie atmosfery ochronnej CO₂ pozwala na uzyskanie wysokiej jakości powierzchni, eliminując potrzebę dodatkowego oczyszczania po procesie. Proces hartowania odbywa się na agregacie hartowniczym WODC. Szczegółowy opis parametrów i przebieg operacji hartowania wałeczka stożkowego zawarty jest w karcie operacyjnej obróbki cieplnej (rys. 52), które dodatkowo doprecyzowują instrukcje przywołane w karcie operacyjnej.

[illegible]

Rys. 52. Karta technologiczna obróbki cieplnej wałeczka stożkowego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji

Waleczki po obróbce poddawane są badaniom i z częstotliwością określoną w karcie operacyjnej. Twardość waleczków badana jest z każdej partii w ilości trzech sztuk. Badanie metalograficzne waleczków wykonywane jest przez laboratorium próbką trzech sztuk na zmianę. Wynik badania przedstawia rysunek 53.

Fabryka Łożysk Tocznych – Kraśnik S.A. NJ/ Centralne Laboratorium			W wykonano ega. Adresat Wynik badań Nr 612/M Dla NJD/ Hartownia				
Materiał badany			Nr wn.	Nr zgl.	Wytop	Ilość partii	Dostawca
Waleczki w gat. 100Cr6 / Wzory /			18/2020	-----	430154	26100	NJD/Hartownia
Nr zlecenia	Wymiar Typ	Ilość prób	Martenzyt 2 + 6	Dyspersja węglików 3,3a+5,5a	Twardość HRC 60 + 65	Ziarno przelomu 8 + 10	Odwęglenie max 0,1 /mm/
1910100	ZPS-001A - 350	3	4	4,4a	63	8 - 9	----
Orzeczenie: Badane próby waleczków pod względem w/w parametrów odpowiadają wymaganiom zawartym w WTC-2.							
Data wystawienia			Wykonał:		Kierownik Centralnego Laboratorium		
					Kierownik Laboratorium		

7437b1 FLT-Kraśnik S.A.

Rys. 53. Wynik badania metalograficznego oraz pomiaru twardości waleczka stożkowego ZPS-001A

5.4. Obróbka tokarska pierścienia wewnętrznego kołnierзовego po obróbce cieplnej

Dla pierścienia wewnętrznego kołnierзовego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji, po zakończeniu procesu obróbki cieplnej przewidziano realizację technologicznego ciągu operacji obróbki tokarskiej. Obróbka ta ma na celu uzyskanie wymaganych parametrów geometrycznych i jakościowych powierzchni funkcjonalnych, zgodnych ze specyfikacją i wymaganiami eksploatacyjnymi zespołu łożyskowego. Kolejnymi etapami są poszczególne operacje tokarskie, realizowane w kolejności:

- Wiercić, gwintować otwory - obrabiarka KDVM1000LA - zakup,
- Przeciągać wielowypust – obrabiarka LG5710AS-1000 - zakup,
- Toczyć profil na twardo (rys. 54) – obrabiarka QTS – 350.

Zastosowanie obróbki tokarskiej na twardo profilu pierścienia wewnętrznego wynika z konieczności zapewnienia wysokiej dokładności wymiarowej oraz odpowiedniej jakości powierzchni, z uwagi na bezpośrednią współpracę tej powierzchni z uszczelnieniem trójwargowym. Uszczelka ta pełni istotną funkcję w zakresie ochrony wnętrza zespołu łożyskowego przed wnikaniem zanieczyszczeń oraz utrzymania środka smarnego, co wymaga spełnienia rygorystycznych wymagań

dotyczących chropowatości oraz geometrii powierzchni. Obróbka na twardo umożliwia osiągnięcie tych parametrów w warunkach eksploatacyjnych, gwarantując trwałość połączenia uszczelniającego oraz niezawodność całego zespołu.

 KARTA OPERACYJNA Spracował: _____ Sprawdził: _____ Opr. pomiar: _____ Spr. pomiar: _____		Organizacja: Atworko robotnicze [M]-172 Instrukcja: ustawienia obrabiarki [M]-130 Indeks operacji: T015 Użytkowanie narzędzi pomiarowych [IX]-187		Strona 1 z 1 Stron 1	
Wzrost: P-5 Nr operacji: 040 Symbol detalu: ZPS-001A		Nazwa operacji: 225 Tłoczyć profil na twardo		Obrab. wark: 015-350	
Klasy ważności parametrów technologicznych Raport: [] Kryteria: [] Ważna: [] Uwaga: [] Uwaga: [] (nie odrzucać się)		Symbol wymiaru: d5 Wymiar: Ø80.55 ±0.10 WdSP: 17.35		Pomocne pomiarowe: NRP-14, JAC-19, JAC-599, JAC-593-1, JAC-1000, JAC-1801, JAC-592, MRS-95, MRS-221, Podstawo, MRS-117	
b6 14.6 ±0.05		K: MRS-172, JAC-1740 centralizacja		O Nie rejestruje się Pomiar 100%	
Ki 0.05		Warunki skrawania według programu: Program, lewa strona, prawa strona, SM233, Schemat ustawienia, lewa strona, prawa strona, 665, Czas cyklu, Tc = 42 s, Norma, szt/h		Warunki skrawania według programu: Program, lewa strona, prawa strona, SM233, Schemat ustawienia, lewa strona, prawa strona, 665, Czas cyklu, Tc = 42 s, Norma, szt/h	
1. Przy ustawieniu maszyny i wstawieniu produkcji (wydrukami z MKA-KX) potwierdzić wartości: stopu montażowych, promieni i fazyk znajdujących się na szwicie. 2. Ochroniarstwo: Rdz sprawdzacz (na MKA-KX przy ustawieniu maszyny, wstawieniu produkcji), warunek wg warunku MKA-427. Produkcja: wartość chropowatości zewnętrznej pomiaru dobierana wg NT-17. 3. W przypadku wykrycia wady materiałowej, sposób rozwiązania wg IPS-23.5 4. Pierwszy i ostatni próbkę sprawdzacz wg IPS-36		1. Przy ustawieniu maszyny i wstawieniu produkcji (wydrukami z MKA-KX) potwierdzić wartości: stopu montażowych, promieni i fazyk znajdujących się na szwicie. 2. Ochroniarstwo: Rdz sprawdzacz (na MKA-KX przy ustawieniu maszyny, wstawieniu produkcji), warunek wg warunku MKA-427. Produkcja: wartość chropowatości zewnętrznej pomiaru dobierana wg NT-17. 3. W przypadku wykrycia wady materiałowej, sposób rozwiązania wg IPS-23.5 4. Pierwszy i ostatni próbkę sprawdzacz wg IPS-36		1. Przy ustawieniu maszyny i wstawieniu produkcji (wydrukami z MKA-KX) potwierdzić wartości: stopu montażowych, promieni i fazyk znajdujących się na szwicie. 2. Ochroniarstwo: Rdz sprawdzacz (na MKA-KX przy ustawieniu maszyny, wstawieniu produkcji), warunek wg warunku MKA-427. Produkcja: wartość chropowatości zewnętrznej pomiaru dobierana wg NT-17. 3. W przypadku wykrycia wady materiałowej, sposób rozwiązania wg IPS-23.5 4. Pierwszy i ostatni próbkę sprawdzacz wg IPS-36	

Rys. 54. Karta technologiczna obróbki tokarskiej pierścienia wewnętrznego kołnierzo-
wego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji

5.5. Obróbka szlifierska pierścieni oraz waleczków stożkowych

W związku z rosnącymi wymaganiami dotyczącymi dokładności wymiarowej, jakości powierzchni oraz powtarzalności parametrów geometrycznych elementów wchodzących w skład zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji, zasadnym było wyposażenie procesu technologicznego w wyspecjalizowane szlifierki oraz do-
gładzarki. Obróbka pierścieni, charakteryzujących się złożoną geometrią oraz obec-
nością powierzchni o zróżnicowanych wymaganiach funkcjonalnych, stanowi istotne wyzwanie zarówno pod względem doboru odpowiednich strategii obróbko-
wych, jak i zapewnienia efektywnego transportu oraz pozycjonowania detali w stre-
fie obróbczej.

Elementy wchodzące w skład łożysk tocznych należą do grupy części maszyn o przekroju kołowym, dla których istotne znaczenie ma precyzyjna kontrola parametrów geometrycznych. W szczególności, odchyłka okrągłości stanowi jeden z kluczowych wskaźników jakościowych, mających bezpośredni wpływ na prawidłowe funkcjonowanie mechanizmów realizujących ruch obrotowy. Zarówno charakter, jak i wielkość tej odchyłki wpływają na efektywność przenoszenia obciążeń oraz trwałość eksploatacyjną współpracujących elementów. Z tego względu kształtowe odchyłki geometryczne powinny być przedmiotem systematycznej kontroli metrologicznej [67]. Jednoczesna analiza kształtu geometrycznego, parametrów chropowatości i falistości powierzchni umożliwia kompleksową ocenę właściwości tribologicznych elementów, co stanowi istotny etap w procesie oceny ich jakości i przydatności do zastosowań inżynierskich [54].

Odchyłki kształtu w elementach tworzących połączenia ruchome mają istotny wpływ na jakość i stabilność ich pracy, przyczyniając się do generowania drgań, hałasu oraz zmiennych oporów ruchu. Zjawiska te negatywnie oddziałują na precyzję przemieszczeń względnych pomiędzy współpracującymi częściami. Ponadto, obecność odchyłek geometrycznych może ujawnić się na etapie montażu, powodując trudności montażowe lub wręcz uniemożliwiając prawidłowe złożenie mechanizmów. Każdy wytwarzany element charakteryzuje się unikalnym profilem geometrycznym, uwarunkowanym specyfiką zastosowanych metod technologicznych. Kształt i wartość odchyłki okrągłości powierzchni czynnych elementów łożysk tocznych są w dużym stopniu determinowane przez wybrany przebieg procesu wytwarzania, ze szczególnym uwzględnieniem operacji szlifowania powierzchni współpracujących. Parametry te odzwierciedlają jakość wykonania i mają bezpośredni wpływ na właściwości funkcjonalne elementów w warunkach eksploatacyjnych [12, 29, 94]. Szczególny wpływ na falistość przedmiotu obrabianego, parametry obróbki oraz trwałość ściernicy mają drgania samowzbudne ściernicy i przedmiotu obrabianego [30], [56]. Terminy i definicje dotyczące profili okrągłości opisane są w normie PN-EN ISO 12181-1:2012 Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Okrągłość. Część 1: Terminologia i parametry okrągłości [N11] oraz w PN-EN ISO 12181-2:2012 Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Okrągłość. Część 2: Operatory specyfikacji [N12].

W nowoczesnej metrologii geometrycznej powierzchni wykorzystuje się transformację Fouriera jako narzędzie analityczne w ocenie odchyłek kształtu, takich jak okrągłość czy walcowość. Technika ta umożliwia rozkład sygnału pomiarowego o ograniczonej długości na sumę funkcji sinusoidalnych o różnych częstotliwościach, co pozwala na dokładne zidentyfikowanie i ilościowe określenie składowych odpowiedzialnych za deformacje geometryczne [55]. Składowa zerowa odpowiada

wartości średniej profilu (np. promieniowi średniemu), natomiast kolejne harmoniczne opisują deformacje o częstotliwościach będących wielokrotnością częstotliwości podstawowej, co umożliwia szczegółową analizę złożoności profilu badanej powierzchni. Zastosowanie tej metody pozwala na lepsze zrozumienie charakteru błędów obróbkowych oraz ich wpływu na jakość elementów maszyn. Geneza występowania poszczególnych składowych harmonicznnych pozostaje bezpośrednio związana z numerem fali harmonicznnej w układzie UPR (*Undulations Per Resolution*). Każda składowa odpowiada konkretnej częstotliwości, która może być interpretowana jako wynik określonych niejednorodności procesu obróbki, błędów kinematycznych lub dynamicznych układów technologicznych oraz błędu powstałego w wyniku źle przeprowadzonego pomiaru. Analiza tych składowych umożliwia identyfikację źródeł deformacji geometrycznych oraz ocenę ich wpływu na końcową jakość elementu. Źródła lub przyczyny generowania kolejnych składowych harmonicznnych można sklasyfikować według numeru harmonicznnej:

- 0 - średnica mierzonego elementu,
- 1 - mimośrodowość mierzonego elementu względem osi wrzeciona lub osi stolika pomiarowego,
- 2 - owal jako charakter profilu okrągłości elementu lub pochylenie elementu na stole pomiarowym,
- 3÷7 - wielograniastość jako charakter profilu okrągłości. Przyczyną może być mocowanie przedmiotu lub parametry procesu produkcyjnego,
- 8÷15 - niestabilność procesu obróbki,
- >15 - drgania układu podczas procesu obróbki, wpływ parametrów skrawania, niejednorodność materiału, szумы procesu produkcyjnego, reakcje między materiałem obrabianym a narzędziem.

Produkcja łożysk obejmuje wiele etapów procesu technologicznego, z których jednym z kluczowych jest szlifowanie powierzchni bieżni [90, 91]. Szlifowanie bieżni pierścienia zewnętrznego odbywa się z wykorzystaniem średnicy zewnętrznej pierścienia, a więc i ta powierzchnia musi zostać dokładnie wykonana. Szlifowanie bezkłowe, powszechnie stosowane w tej technologii, umożliwia skuteczne kształtowanie geometrii pierścieni łożyskowych, zapewniając wysoką wydajność oraz precyzję w zakresie okrągłości [26, 32, 101]. Jedną z najbardziej efektywnych metod tego rodzaju obróbki jest technika wykorzystująca dwie podpory do ustalenia pozycji pierścienia oraz elektromagnetyczny opór, który wprowadza go w ruch obrotowy (rys. 55). Taki sposób szlifowania pozwala uzyskać wysoką dokładność wymiarową i kształtową wyrobów, a także sprzyja automatyzacji zarówno pojedynczych obrabiarek, jak i całych linii produkcyjnych [98–100].

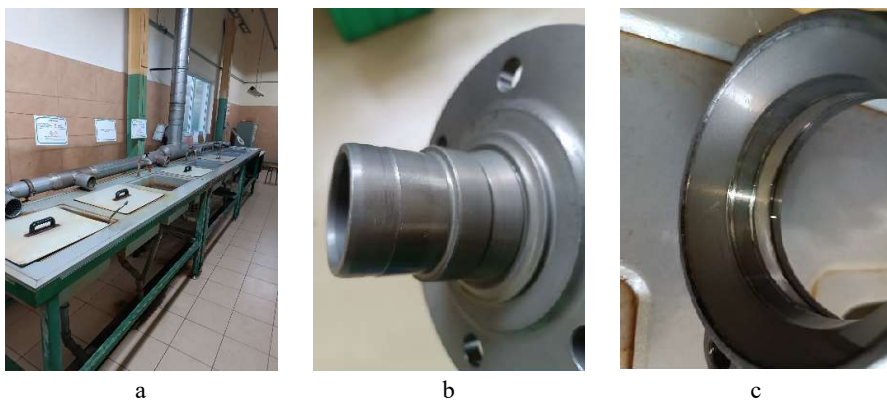


Rys. 55. Widok podpór oraz elektromagnetycznego oporu, a) obrabiarka 3MZEY1320, b) obrabiarka 3MZE2320

Efekt końcowy szlifowania zależy od wielu różnych, trudnych do zmierzenia parametrów procesu. Jednym z niepożądanych zjawisk termicznych występujących w strefie obróbki podczas procesu szlifowania są przypalenia szlifierskie. Powstają one w wyniku nadmiernego wydzielania ciepła, które nie jest efektywnie odprowadzane ze strefy skrawania, co może prowadzić do zmian strukturalnych, takich jak odwęglenie, przemiany fazowe czy powstanie naprężeń własnych. Czynniki sprzyjające przypaleniom to m.in. niewłaściwie dobrane parametry skrawania, źle dobrana ściernica, niedostateczne chłodzenie [21, 88]. Dlatego istotnym elementem procesów obróbki ścierniej jest monitorowanie i kontrola występowania przypaleń szlifierskich, które mogą negatywnie wpływać na właściwości mechaniczne oraz trwałość eksploatacyjną obrabianych elementów. W procesach technologicznych obróbki ścierniej stosowanych w FŁT Kraśnik kontrola przypaleń szlifierskich prowadzona jest na każdym etapie obróbki, a jej szczegółowy przebieg został określony w instrukcji technologicznej ITA-223. Zakres czynności składających się na ten proces to:

- odtłuszczenie chemiczne, czas 3÷5 min,
- trawienie, czas 20÷60 s,
- płukanie,
- rozjaśnianie, czas 3÷5 min,
- płukanie,
- neutralizacja, czas 2÷3 min,
- płukanie,
- konserwacja, min. 1,5 min.

Wygląd powierzchni pierścieni poddanych trawieniu oraz widok pomieszczenia trawialni z infrastrukturą do wykrywania przypałów szlifierskich przedstawia rysunek 56.



Rys. 56. a) Pomieszczenie trawialni z infrastrukturą do wykrywania przypałów szlifierskich, b) powierzchnie pierścienia zewnętrznego kołnierzewego poddane trawieniu – brak przypałów szlifierskich, c) powierzchnie pierścienia wewnętrznego poddane trawieniu – brak przypałów szlifierskich

Tradycyjne obrabiarki wykorzystywane do wytwarzania pierścieni klasycznych łożysk tocznych charakteryzują się ograniczoną możliwością automatycznego załadunku elementów do strefy obróbczej, co uniemożliwia utrzymanie wysokiej wydajności procesu technologicznego. Z tego względu koniecznym był zakup obrabiarek, umożliwiających realizację operacji wykończeniowych z zachowaniem wysokiej precyzji oraz automatyzacji procesu podawania obrabianych detali w strefę obróbki.

Zarówno dla pierścienia zewnętrznego, jak i wewnętrznego kołnierzewego zestaw obrabiarek składa się z trzech szlifierek i jednej doglądarki.

5.5.1. Pierścień zewnętrzny

Ze względu na konieczność umiejscowienia bazy obróbczej na kołnierzu, obróbka pierścienia zewnętrznego wymaga zastosowania obrabiarki umożliwiającej efektywny załadunek detalu do strefy roboczej. Obejmuje to prawidłowe osadzenie pierścienia na podporach oraz jego ustabilizowanie na oporze pełniącym jednocześnie funkcję mechanizmu nadającego obrót w trakcie procesu obróbki. W tym celu zastosowano obrabiarki wyposażone w ruchomy opór, który w trakcie przeładunku jest automatycznie wycofywany poza strefę obróbki, co pozwala na bezkolizyjny i sprawny załadunek detalu. Opór w szlifierkach stosowanych do produkcji łożysk tocznych najczęściej jest elektromagnesem, który generuje pole magnetyczne

skierowane na metalowy pierścień. Siła magnetyczna nadaje ruch obrotowy pierścienia oraz stabilizuje pozycję pierścienia podczas obróbki [37].

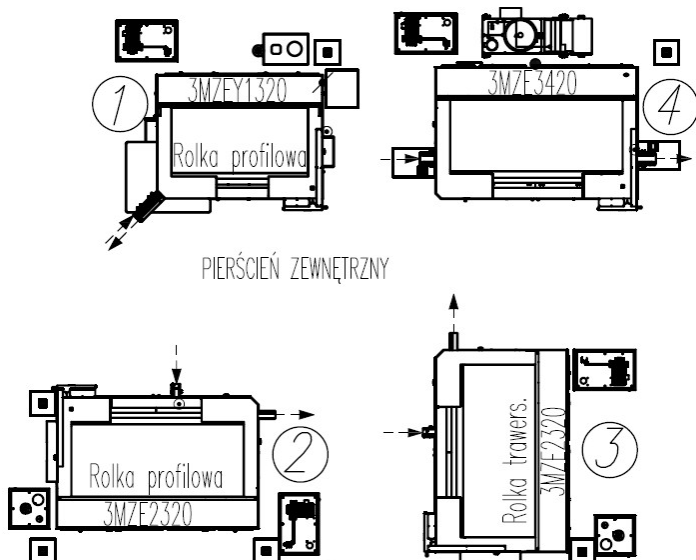
Zalety magnetycznego oporu:

- brak potrzeby mechanicznego mocowania,
- ogranicza błędy montażowe i naprężenia,
- umożliwia szlifowanie cienkościennych pierścieni bez ich deformacji,
- bardzo często jest regulowany.

Proces szlifowania bieżni pierścienia zewnętrznego został podzielony na dwie fazy: zgrubną i wykańczającą, co umożliwia utrzymanie jednakowego czasu cyklu (55 s) dla wszystkich obrabiarek zintegrowanych w linii technologicznej, przy jednoczesnym zapewnieniu wysokiej powtarzalności wymiarowej.

Schemat rozmieszczenia obrabiarek przeznaczonych do obróbki pierścienia zewnętrznego przedstawiono na rysunku 57. Kolejnymi etapami procesu obróbek wykańczających są operacje, realizowane w kolejności:

- Szlifować fi zew. i czoło - obrabiarka RIFA 3MZEY1320,
- Szlifować bieżnię zgrubnie – obrabiarka RIFA 3MZE2320,
- Szlifować bieżnię wykańczająco – obrabiarka RIFA 3MZE2320,
- Dogładszać bieżnię – obrabiarka RIFA 3MZE3420.



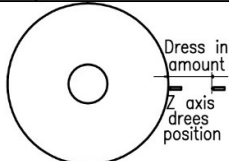
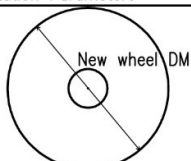
Rys. 57. Schemat ustawienia obrabiarek do szlifowania i dogładzania pierścienia zewnętrznego

5.5.1.1. Szlifować fi zewnątrz i czoło

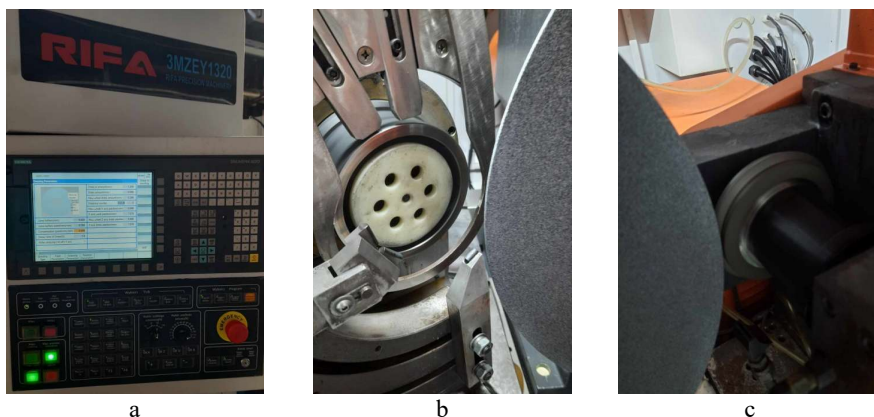
Pierwszą operacją szlifierską przewidzianą dla pierścienia zewnętrznego jest szlifowanie dwóch wzajemnie prostopadłych powierzchni, które w dalszym etapie procesu będą pełniły funkcję baz obróbczych dla kolejnych operacji technologicznych. W analizowanej operacji za bazy obróbcze przyjęto powierzchnię kołnierza [B] oraz zewnętrzną średnicę $\varnothing 90$ [D]. Wymagania dotyczące tolerancji wymiarowych, chropowatości powierzchni oraz odchyłek kształtu zostały określone w karcie operacyjnej (rys. 58). Parametry skrawania zostały przedstawione w załączniku do karty procesowej (rys. 59). Nazewnictwo parametrów technicznych pozostawiono w języku angielskim w celu usprawnienia procesu wprowadzania danych oraz zminimalizowania ryzyka popełnienia błędów interpretacyjnych. Proces szlifowania jest realizowany z wykorzystaniem obrabiarki RIFA 3MZEY1320 (rys. 60), wyposażonej w automatyczny system wyważania ściernicy oraz urządzenie do napędu rolki profilowej. Obrabiarka została zakupiona według opracowanych przez FŁT Kraśnik warunków technicznych do zamówienia maszyn WTO-1263. Wymagania stawiane pierścieniom zewnętrznym przed i po operacji szlifowania fi zewnątrz i czoła zawarte w WTO-1263 przedstawiono na rysunku 61.

PBF		Wydział: P-9	Obrabiarz: 3MZEY1320	KARTA OPERACYJNA		Nr karty:																																																				
Sprawczony parametr		Narzędzia pomiarowe		Dokument rejestracyjny	Nazwa części: Pierścień wewnętrzny z kołnierzem	Indeks części:																																																				
Oznaczenie	Wymiar	Cecha		Częstość wódc pomiarów	typ detalu: ZPS-001A	S213																																																				
D1	$\varnothing 90.000^{+0.030}_{+0.010}$	P W9-122 K WRB-519 JCK-1032 JCK-1311	3,0	1	Nazwa operacji: Szlifować $\varnothing$ zew. i czoło.																																																					
H-D1	[3,0]				Klasy ważności parametrów technologicznych ☒ Report ☐ Krytyczna ☐ Ważna ☐ Drugorzędna (nie oznacza się)																																																					
VD1s	0.003				Szkic operacji:																																																					
C1	$29.600^{+0.010}_{-0.010}$	P W9-112 K WRB-881 JDD-413	1	1																																																						
VC1	0.010																																																									
Ra	0.8	K WRB-426 M MHC-XX	1	1																																																						
Przypalenie szlifierskie	NIEDOPUSZCZALNE																																																									
Karta autokontroli		1 szt/60min		Zad/m																																																						
wg ITA-223																																																										
Oprzężenie: <table border="1"> <thead> <tr> <th>Nazwa</th> <th>Ilość</th> <th>Cecha</th> <th>Ilość</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Opór</td> <td>W</td> <td>SDC-3373</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Podpora wahlowa poprzeczna</td> <td>W</td> <td>SDC-3380</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Podpora skośna</td> <td>W</td> <td>SDC-3377</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Tłoczek podający</td> <td>W</td> <td>PSN-4351</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Trzpień tłoczka podającego</td> <td>W</td> <td>PSN-4352</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Tuleja dystansowa</td> <td>W</td> <td>SEP-194</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Zastawka oporu</td> <td>W</td> <td>SDC-3384</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Prowadnik łukowy</td> <td>W</td> <td>PSN-4361</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Tuleja dystansowa przewodnika</td> <td>W</td> <td>PSN-4353</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Listwa rynny wylotowej</td> <td>W</td> <td>PSN-4360</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Spód rynny</td> <td>W</td> <td>PSN-4371</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Rolla diamentowa profilowa</td> <td>W</td> <td>SEO-113</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>							Nazwa	Ilość	Cecha	Ilość	Opór	W	SDC-3373	1	Podpora wahlowa poprzeczna	W	SDC-3380	1	Podpora skośna	W	SDC-3377	1	Tłoczek podający	W	PSN-4351	1	Trzpień tłoczka podającego	W	PSN-4352	1	Tuleja dystansowa	W	SEP-194	1	Zastawka oporu	W	SDC-3384	1	Prowadnik łukowy	W	PSN-4361	1	Tuleja dystansowa przewodnika	W	PSN-4353	1	Listwa rynny wylotowej	W	PSN-4360	1	Spód rynny	W	PSN-4371	1	Rolla diamentowa profilowa	W	SEO-113	1
Nazwa	Ilość	Cecha	Ilość																																																							
Opór	W	SDC-3373	1																																																							
Podpora wahlowa poprzeczna	W	SDC-3380	1																																																							
Podpora skośna	W	SDC-3377	1																																																							
Tłoczek podający	W	PSN-4351	1																																																							
Trzpień tłoczka podającego	W	PSN-4352	1																																																							
Tuleja dystansowa	W	SEP-194	1																																																							
Zastawka oporu	W	SDC-3384	1																																																							
Prowadnik łukowy	W	PSN-4361	1																																																							
Tuleja dystansowa przewodnika	W	PSN-4353	1																																																							
Listwa rynny wylotowej	W	PSN-4360	1																																																							
Spód rynny	W	PSN-4371	1																																																							
Rolla diamentowa profilowa	W	SEO-113	1																																																							
Parametry skrawania: wg załącznika dla So-13185																																																										
Naddatek na czoło		[mm]		0.15																																																						
Naddatek na $\varnothing$		[mm]		0.20																																																						
Czas maszynowy		[min./szt]		0,916(55s)																																																						
Informacje dodatkowe: - Warunki w zakresie wyglądu zewnętrznego wg WTL-10. - Użytkowanie narzędzi pomiarowych wg ITK-187. - Instrukcja organizacji stanowiska roboczego wg ITD-515. - Sposób reagowania wg IPs-23.6. - Obciążanie ściernicy wg ITE-9. - Dopuszcza się dołączenie wyników kontroli w zamian zapisu w karcie autokontroli. - Dopuszcza się porównawczą ocenę wzrokową z porównawczymi wzorcami chropowatości. - Pierwszą i ostatnią sztukę sprawdzać wg IPs-36.																																																										
Sciernica: 600/400x20/12.5x305																																																										
Symbol zmiany		Nr KZ		Treść zmiany		Data																																																				
Sprawdził, data i podpis:		Sprawdził, data i podpis:		Uprz. pomiarowa, data i podpis:		Fedpis																																																				

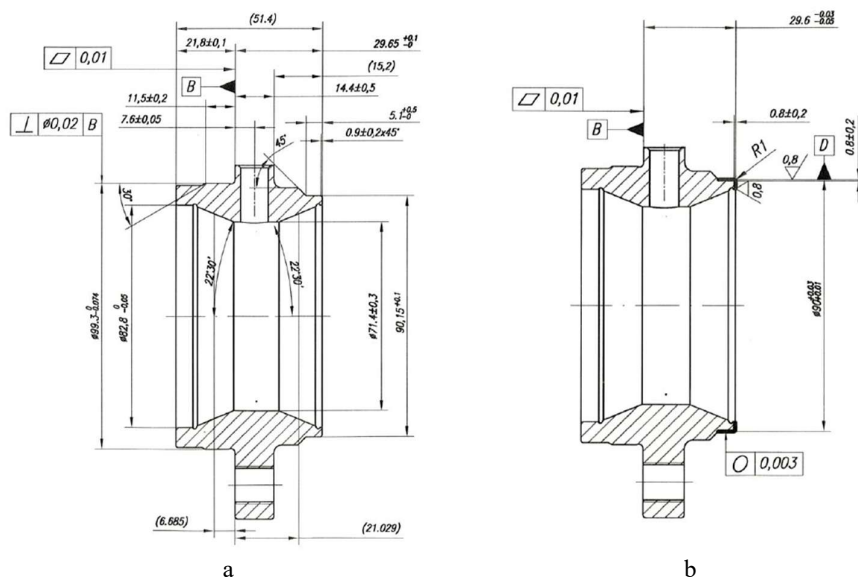
Rys. 58. Karta operacyjna obróbki szlifierskiej. Operacja – szlifować fi zewnętrzny i czoło

		Obrabiarka: 3MZEY1320		ZALĄCZNIK KARTY OPERACYJNEJ So-13185											
Parametry skrawania															
Feed Parameters															
Fast forward(mm):		Fast forward speed(mm/min):		1500.000											
Hastening(mm):		Hastening speed(mm/min):		10.000											
Rough 1(mm): ~0.170		Rough 1 speed(mm/min):		0.800											
Rough 2(mm): ~0.130		Rough 2 speed(mm/min):		0.600											
Return form rough(mm): 0.000		Delay-time of rough grinding(s):		0.0											
Precision grinding(mm): ~0.020		Precision grinding speed(mm/min):		0.300											
Return form precision(mm): 0.000		Delay-time of spark out grinding(s):		3.0											
Spark-out grinding(mm): 0.010		Spark-out grinding speed(mm/min):		0.180											
Dressing Parameters															
		Dress in amount(mm):													
		Dress amount(mm):		0.010											
		New wheel dress amount(mm):		6.300											
		Dressing counter:		3											
		New wheel X axis position(mm):		0.000											
X axis work position(mm):															
Jump buffers(mm): 0.020		New wheel Z axis drees position(mm):		0.000											
Jump buffers speed(mm/min): ~0.500		Z axis dress position(mm):													
Compensation speed(mm/min): ~0.050															
Delay-time of Dress(s): 1.0															
Roller dressing (=0 off;=1 on): 1															
Rotation Parameters															
		New wheel DM(mm):		600.000											
		Wheel actual DM(mm):													
		Wheel finish DM(mm):		450.000											
		Wheel line speed(mm/s):		~42.0											
		Wheel speed(r/min):													
Wheel moter rated speed(r/min):		1910													
Gauge out after jaw close (s)		0.0		Workpiece speed(r/min)											
Roller Start Time(s)		0.0		Workpiece moter rated speed(r/min)											
Workpiece axis OUT(mm)		0.000		Roller speed(r/min):											
Workpiece axis IN(mm)		~23.000		Roller moter rated speed(r/min)											
Workpiece axis IN speed(mm/min)		1200.000		AE (=0 off;=1 on):											
Workpiece axis OUT speed(mm/min)		1500.000		0:Line Speed;1:Constant Speed:											
				0											
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 10%;">Symbol Zmiany</td> <td style="width: 10%;">Nr KZT</td> <td style="width: 40%;">Treść zmiany</td> <td style="width: 10%;">Data</td> <td style="width: 10%;">Podpis</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Opracował, data i podpis:</td> <td>Sprawdził, data i podpis:</td> <td colspan="2">Uprz. pomiarowe, data i podpis :</td> </tr> </table>						Symbol Zmiany	Nr KZT	Treść zmiany	Data	Podpis	Opracował, data i podpis:		Sprawdził, data i podpis:	Uprz. pomiarowe, data i podpis :	
Symbol Zmiany	Nr KZT	Treść zmiany	Data	Podpis											
Opracował, data i podpis:		Sprawdził, data i podpis:	Uprz. pomiarowe, data i podpis :												

Rys. 59. Załącznik do karty operacyjnej szlifowania czoła i fi zewnątrz, określający parametry obróbki



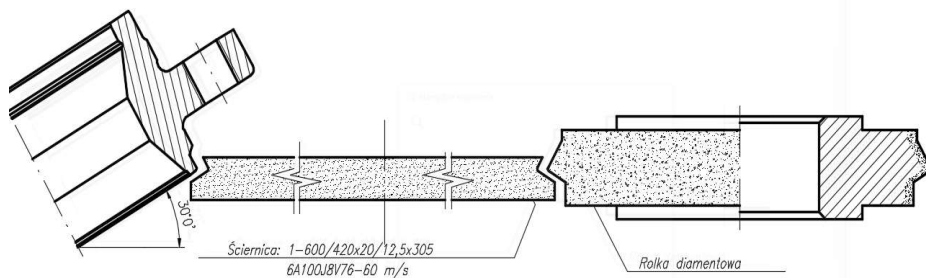
Rys. 60. Obrabiarka RIFA 3MZEY1320: a) pulpit, b) widok strefy obróbczej - ściernica podprzy, opór, c) widok strefy obróbczej - ściernica, rolka kondycjonująca profilowa



Rys. 61. Wymagania stawiane pierścieniom zewnętrznym zawarte w WTO-1263: a) przed operacją szlifowania fi zewnątrz i czoła, b) po operacji szlifowania fi zewnątrz i czoła

Z uwagi na kształt szlifowanej powierzchni do kondycjonowania ściernicy używana jest rolka diamentowa profilowa SEO-113. Pierścień zewnętrzny podczas operacji szlifowania jest skrzyżowany pod kątem 30° w stosunku do ściernicy. Kąt skrzyżowania wynika z konieczności szlifowania dwóch wzajemnie prostopadłych powierzchni.

Schemat ustawienia pierścienia, ściernicy i rolki diamentowej przedstawiono na rysunku 62.

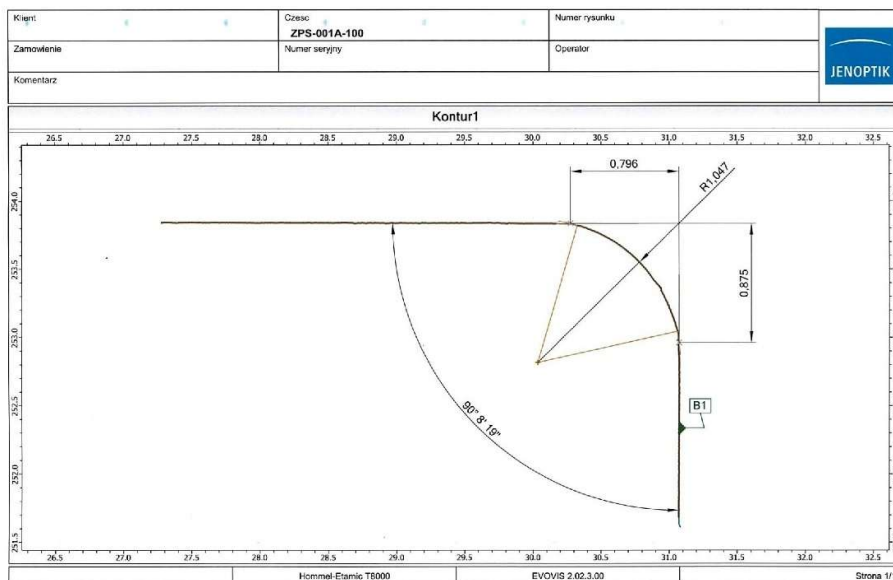


Rys. 62. Schemat ustawienia pierścienia, ściernicy oraz rolki diamentowej dla operacji szlifowania fi zewnętrz i czoła

Ponieważ powierzchnie, które będą szlifowane podczas tej operacji nie są obrabiane cieplnie i posiadają niską twardość rzędu $230 \div 279$ HV ($217 \div 265$ HB), wymagają doboru odpowiedniej charakterystyki ściernicy. Do prób przygotowano wstępnie trzy różne charakterystyki ściernic:

- TYROLIT 6A100J8V76
- ANDRE 96A802J8VTE10-63
- ANDRE 9A3XC100K7VE01

Po ustawieniu obrabiarki zgodnie z wytycznymi zawartymi w karcie technologicznej przeprowadzono operację szlifowania pierścienia. Uzyskany profil poddano kontroli pod kątem zgodności z wymaganiami wymiarowymi określonymi w rysunku konstrukcyjnym. Wymiary te nie zostały uwzględnione bezpośrednio w procesie technologicznym, ponieważ są zapewniane przez zastosowane narzędzie – w tym przypadku profilową rolkę diamentową. Kontrola zgodności profilu odbywa się podczas wdrożenia rolki do procesu produkcyjnego oraz w przypadkach uzasadnionych technologicznie lub jakościowo. Wyniki weryfikacji zarysu przedstawiono na rysunku 63. Wynik jest zgodny z wymaganiami zawartymi w WTO-1263 oraz rysunkiem konstrukcyjnym.



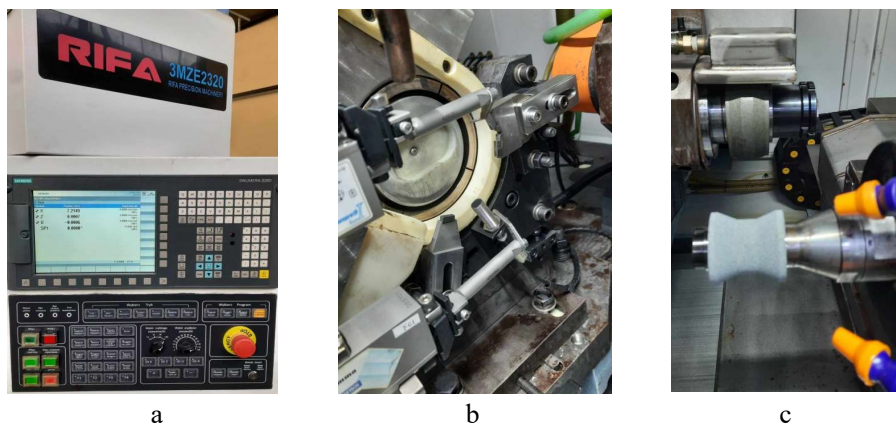
Rys. 63. Wynik pomiaru zarysu otrzymanego w wyniku szlifowania ściernicą przygotowaną przy użyciu rolki diamentowej profilowej SEO-113

5.5.1.2. Szlifować bieżnie zgrubnie

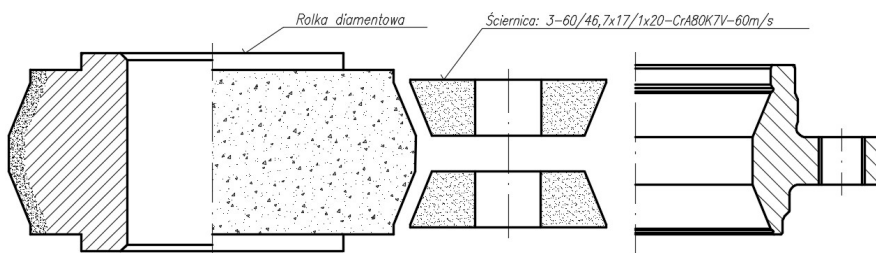
Drugą operacją szlifierską przewidzianą dla pierścienia zewnętrznego jest zgrubne szlifowanie bieżni. Bazami technologicznymi dla tej operacji są powierzchnia kołnierza [B] oraz średnica zewnętrzna [D]. Przebieg procesu szlifowania oraz parametry skrawania zostały opisane w karcie operacyjnej (rys. 64). Operacja jest realizowana na obrabiarce RIFA 3MZE2320 (rys. 65), wyposażonej w układ napędowy rolki kondycjonującej, system detekcji początku szlifowania (akustyczny) oraz system aktywnej kontroli średnicy szlifowanej bieżni. Obrabiarka została zakupiona według opracowanych przez FŁT Kraśnik warunków technicznych do zamówienia maszyn WTO-1268. Z uwagi na czas kondycjonowania ściernicy oraz trwałość narzędzia do przygotowania ściernicy na tej operacji używana jest rolka diamentowa kształtowa. Schemat ustawienia pierścienia, ściernicy i rolki diamentowej przedstawia rysunek 66. Do tej operacji, użyte są dwie ściernice firmy Andre o charakterystyce CrA80K7V. Twardość powierzchni szlifowanych to 655÷772 HV (58÷63 HRC).

PBF		Wydział: P-9	Obrobiarka: 3MZE2320	KARTA OPERACYJNA		Nr karty:
Sprawdzany parametr		Narzędzia pomiarowe	Dokument rejestracyjny	Nazwa części: Pierścień wewnętrzny z kołnierzem		Indeks części:
Oznaczenie	Wymiar	Cecha	Częstość pomiarów	Typ detalu: ZPS-001A		S213
DBS1	$\phi 76.753^{+0.015}_{-0.015}$	S NRP-9 P MG-142 K MXD-453 K MG-142-37 K JDD-413 K JCK-1031 K JCK-1825	1 1 1 1 1 1 1	Nazwa operacji: Szlifować bieżnię zgruba		
hs1	6,685			Klasy ważności parametrów technologicznych ☒ Report ☐ Krytyczna ☐ Ważna ☐ Drugorzędna (nie oznacza się)		
VDBS1sp	0.009			Szkic operacji:		
KA1	$22^{\circ}30'0''^{+0.128}_{-0.128}$	S NRP-10 P MG-512 K MXD-453 K JDD-413 K JCP-404-2 K MG-521-57 K MG-122-37	1 1 1 1 1 1 1			
Nb1	± 0.005					
L	10					
h1	1,685					
h2	11,685					
SDB1	0.008					
DBS2	$\phi 76.753^{+0.015}_{-0.015}$	S NRP-11 P MG-142 K MG-141-100 K MXD-453 K JDD-413 K JCK-1031 K JCK-1824 K JCP-665 K JCH-50-1-3	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1			
VDBS2sp	0.009					
Ke2	0.015					
KA2	$22^{\circ}30'0''^{+0.128}_{-0.128}$	S NRP-12 P MG-512 K MXD-453 K JDD-413 K JCP-404-2 K JCP-1012 K JCK-1525 K JCP-1801 K JCP-1801	1 1 1 1 1 1 1 1 1			
Nb2	± 0.005					
L	10					
h3	15,029					
h4	25,029					
SDB2	0.008					
Ra	0.6	K MRR-425 M MHCC-XX	1 1	wg ITA-223		
Przypalenia szlifierskie	NIEDOPUSZCZALNE			Wymiar pomocniczy		
(B)	$7.172^{+0.018}_{-0.018}$	P JAC-85 K MXD-453 K JCK-1791	1 0 3			
Doprzyrządowanie:						
Nazwa		Rodz.	Cecha	losz.		
Opór		W	SDC-3382	1		
Podpora wahlowa poprzeczna		W	SDC-3378	1		
Podpora prosta		W	SDC-3374	1		
Zastawka oporu		W	SDC-3383	1		
Łapa podająca		W	PSN-4369	1		
Łapa podtrzymująca		W	PSN-4368	1		
Koncówka elektrowrzeciona		W	SOK-914	1		
Nokrętka		W	SON-74	1		
Tuleja dystansowa		W	SEP-195	1		
Ogranicznik rynny		W	PSN-4370	1		
Rynna wylotowa		W	PSN-4363	1		
Spód rynny wylotowej		W	PSN-4364	1		
Rynna wlotowa		W	PSN-4365	1		
Dolna listwa rynny wlotowej		W	PSN-4366	1		
Górna listwa rynny wlotowej		W	PSN-4367	1		
Trzpień zastawki oporu		W	PSN-4373	1		
Rolkę diamentową profilową		W	SEO-114	1		
Pierścień dystansowy		W	SOP-163	1		
Informacje dodatkowe:						
1. Warunki w zakresie wyglądu zewnętrznego wg WIT-10.						
2. Użytkowanie narzędzi pomiarowych wg ITK-187.						
3. Instrukcja organizacji stanowiska roboczego wg ITD-515.						
4. Sposób reagowania wg IPs-23.6.						
5. Obciążanie ściernic wg ITE-9.						
6. Dopuszcza się porównawczą ocenę wzrokową z porównawczymi wzorcami chropowatości.						
7. Pierwszą i ostatnią sztukę sprawdzać wg IPs-36.						
7. Wartość wymiaru B gwarantuje dotrzymanie tolerancji DBS1 i DBS2.						
Parametry skrawania: wg załącznika dla So-13186						
Nadatek na ϕ		[mm] 0.20				
Czas maszynowy		[min./szt.] 0,916(55s)				
Sciernica-2szt.: 60/46,7x17/1x20						
Symbol zmiany	Nr KZT	Treść zmiany			Data	Podpis
Spracował, data i podpis:		Sprawdził, data i podpis:		Uprz. pomiarowe, data i podpis:		

Rys. 64. Karta operacyjna obróbki szlifierskiej. Operacja – szlifować bieżnię zgrubnie



Rys. 65. Obrabiarka RIFA 3MZE2320. a) pulpit, b) widok strefy obróbczej - podpory, opór, końcówki oraz czujniki pomiarowe c) widok strefy obróbczej - ściernica, rolka diamentowa profilowa



Rys. 66. Schemat ustawienia pierścienia zewnętrznego, ściernic oraz rolki diamentowej kształtowej

5.5.1.3. Szlifować bieżnie wykańczająco

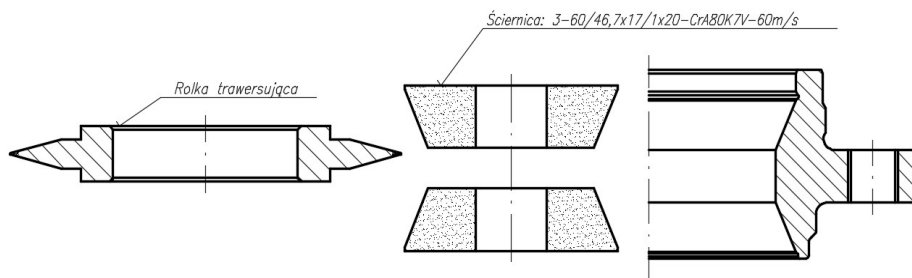
Trzecią operacją szlifierską dla pierścienia zewnętrznego jest operacja szlifowania bieżni wykańczająco. Bazami technologicznymi dla tej operacji są powierzchnia kołnierza [B] oraz średnica zewnętrzna [D]. W trakcie procesu szlifowane są równocześnie obie bieżnie. Przebieg procesu szlifowania oraz parametry skrawania zostały opisane w karcie operacyjnej (rys. 67). Parametr oceny okrągłości zarysu Z_3 (oznaczony na rysunku 67), zwany makrofalistością, jest średnią arytmetyczną trzech najwyższych wysokości nierówności występujących na obwodzie elementu dla zakresu $2\div 15$ fal/obrót [2].

PBF		Wydział: P-9	Obrobiarka: 3MZE2320	KARTA OPERACYJNA		Nr karty:																																																																								
Sprawdzony parametr		Narzędzia pomiarowe	Dokument Człystościowość pomiarów	Nazwa części: Pierścień wewnętrzny z kołnierzem	Indeks części:																																																																									
Oznaczenie	Wymiar	Cecha		Typ detalu: ZPS-001A	S213																																																																									
DBS1	$\phi 76,903^{+0,004}_{-0,009}$	S NRP-9 MG-142 K MRD-881 MG-142-37 K JDD-413 K JCK-1031 K JCK-1825	16,35	Nazwa operacji: Szlifować bieżnię wykańczającą																																																																										
VDBS1sp	0.003	S NRP-10 MG-512 K MRD-881 K JDD-413 K JCP-404-2 K MG-521-57 K MG-122-37	32,5 22,5	Klasy ważności parametrów technologicznych Report ☒ Krytyczna ☐ Ważna ☐ Drugorzędna (nie oznacza się)																																																																										
KA1	$22^{\circ}30'0''^{+0^{\circ}53'}_{-0^{\circ}53'}$	S NRP-10 MG-512 K MRD-881 K JDD-413 K JCP-404-2 K MG-521-57 K MG-122-37	32,5 22,5	Szkic operacji:																																																																										
Nb1	± 0.003	S NRP-10 MG-512 K MRD-881 K JDD-413 K JCP-404-2 K MG-521-57 K MG-122-37	32,5 22,5																																																																											
SDB1	0.005	S NRP-11 MG-142 K MG-141-100 K MRD-881 K JDD-413 K JCK-1031 K JCK-1824 K JCP-665 K JCH-50-1-3	45,6	Wymiar pomocniczy Wydruk pomiaru 2 szt./zm																																																																										
DBS2	$\phi 76,903^{+0,004}_{-0,009}$	S NRP-11 MG-142 K MG-141-100 K MRD-881 K JDD-413 K JCK-1031 K JCK-1824 K JCP-665 K JCH-50-1-3	45,6	Wydruk pomiaru 2 szt./zm																																																																										
VDBS2sp	0.003	S NRP-11 MG-142 K MG-141-100 K MRD-881 K JDD-413 K JCK-1031 K JCK-1824 K JCP-665 K JCH-50-1-3	45,6	Wydruk pomiaru 2 szt./zm																																																																										
Ke2	0.010	S NRP-11 MG-142 K MG-141-100 K MRD-881 K JDD-413 K JCK-1031 K JCK-1824 K JCP-665 K JCH-50-1-3	45,6	Wydruk pomiaru 2 szt./zm																																																																										
KA2	$22^{\circ}30'0''^{+0^{\circ}53'}_{-0^{\circ}53'}$	S NRP-12 MG-512 K MRD-881 K JDD-413 K JCP-404-2 K JCP-1012 K JCP-1025 K JCP-1801 K JCP-1801	51,6 61,6	Wydruk pomiaru 2 szt./zm																																																																										
Nb2	± 0.003	S NRP-12 MG-512 K MRD-881 K JDD-413 K JCP-404-2 K JCP-1012 K JCP-1025 K JCP-1801 K JCP-1801	51,6 61,6	Wydruk pomiaru 2 szt./zm																																																																										
SDB2	0.005	S NRP-12 MG-512 K MRD-881 K JDD-413 K JCP-404-2 K JCP-1012 K JCP-1025 K JCP-1801 K JCP-1801	51,6 61,6	Wydruk pomiaru 2 szt./zm																																																																										
DBS	$\phi 76,903^{+0,004}_{-0,009}$	P JAC-85 K MRD-881 K JCK-1791 P JAC-85 K MRD-881 K JCK-1791		Wydruk pomiaru 2 szt./zm																																																																										
(B)	$7.172^{+0,009}_{-0,010}$	P JAC-85 K MRD-881 K JCK-1791 P JAC-85 K MRD-881 K JCK-1791		Wydruk pomiaru 2 szt./zm																																																																										
Pb1	$0.003^{+0,006}_{-0,006}$	M MHCC-XX	N7	Wydruk pomiaru 2 szt./zm																																																																										
Pb2	$0.003^{+0,006}_{-0,006}$	M MHCC-XX	N7	Wydruk pomiaru 2 szt./zm																																																																										
Z3_1	2.0	M MHCC-XX	N7	Wydruk pomiaru 2 szt./zm																																																																										
Z3_2	2.0	M MHCC-XX	N7	Wydruk pomiaru 2 szt./zm																																																																										
Filter	Gausso/2=15/LSC	M MHCC-XX	N7	Wydruk pomiaru 2 szt./zm																																																																										
Ra	0.4	M MHCC-XX	N7	Wydruk pomiaru 2 szt./zm																																																																										
Przypalenia szlifierskie	NIEDOPUSZCZALNE			Wydruk pomiaru 2 szt./zm																																																																										
Oprządkowanie: <table border="1"> <thead> <tr> <th>Nazwa</th> <th>Rodz.</th> <th>Cecha</th> <th>Ilość</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Opór</td> <td>W</td> <td>SDC-3382</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Podpora wahlwa poprzeczna</td> <td>W</td> <td>SDC-3378</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Podpora prosta</td> <td>W</td> <td>SDC-3374</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Zastawka oporu</td> <td>W</td> <td>SDC-3383</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Lapa podająca</td> <td>W</td> <td>PSN-4369</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Lapa podtrzymująca</td> <td>W</td> <td>PSN-4368</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Koncówka elektrowrzeciona</td> <td>W</td> <td>SOK-914</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Nakrętka</td> <td>W</td> <td>SON-74</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Tuleja dystansowa</td> <td>W</td> <td>SEP-196</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Tuleja dystansowa</td> <td>W</td> <td>SEP-197</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Ogranicznik rynny</td> <td>W</td> <td>PSN-4370</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Rynna wylotowa</td> <td>W</td> <td>PSN-4363</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Spód rynny wylotowej</td> <td>W</td> <td>PSN-4364</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Rynna wylotowa</td> <td>W</td> <td>PSN-4365</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Dolna listwa rynny wylotowej</td> <td>W</td> <td>PSN-4366</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Górna listwa rynny wylotowej</td> <td>W</td> <td>PSN-4367</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Trzpień zastawki oporu</td> <td>W</td> <td>PSN-4373</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>							Nazwa	Rodz.	Cecha	Ilość	Opór	W	SDC-3382	1	Podpora wahlwa poprzeczna	W	SDC-3378	1	Podpora prosta	W	SDC-3374	1	Zastawka oporu	W	SDC-3383	1	Lapa podająca	W	PSN-4369	1	Lapa podtrzymująca	W	PSN-4368	1	Koncówka elektrowrzeciona	W	SOK-914	1	Nakrętka	W	SON-74	1	Tuleja dystansowa	W	SEP-196	1	Tuleja dystansowa	W	SEP-197	1	Ogranicznik rynny	W	PSN-4370	1	Rynna wylotowa	W	PSN-4363	1	Spód rynny wylotowej	W	PSN-4364	1	Rynna wylotowa	W	PSN-4365	1	Dolna listwa rynny wylotowej	W	PSN-4366	1	Górna listwa rynny wylotowej	W	PSN-4367	1	Trzpień zastawki oporu	W	PSN-4373	1
Nazwa	Rodz.	Cecha	Ilość																																																																											
Opór	W	SDC-3382	1																																																																											
Podpora wahlwa poprzeczna	W	SDC-3378	1																																																																											
Podpora prosta	W	SDC-3374	1																																																																											
Zastawka oporu	W	SDC-3383	1																																																																											
Lapa podająca	W	PSN-4369	1																																																																											
Lapa podtrzymująca	W	PSN-4368	1																																																																											
Koncówka elektrowrzeciona	W	SOK-914	1																																																																											
Nakrętka	W	SON-74	1																																																																											
Tuleja dystansowa	W	SEP-196	1																																																																											
Tuleja dystansowa	W	SEP-197	1																																																																											
Ogranicznik rynny	W	PSN-4370	1																																																																											
Rynna wylotowa	W	PSN-4363	1																																																																											
Spód rynny wylotowej	W	PSN-4364	1																																																																											
Rynna wylotowa	W	PSN-4365	1																																																																											
Dolna listwa rynny wylotowej	W	PSN-4366	1																																																																											
Górna listwa rynny wylotowej	W	PSN-4367	1																																																																											
Trzpień zastawki oporu	W	PSN-4373	1																																																																											
Informacje dodatkowe: - Warunki w zakresie wyglądu zewnętrznego wg WTL-10. - Użytkowanie narzędzi pomiarowych wg ITK-187. - Instrukcja organizacji stanowiska roboczego wg ITD-515. - Sposób reagowania wg IPs-23.6. - Obciążanie ściernicy wg ITE-6. - Pierwszą i ostatnią sztukę sprawdzać wg IPs-36. - Wartość wymiaru B gwarantuje dotrzymanie tolerancji DBS1 i DBS2. - N7) Niedopuszczalna liczba dominujących fal 21 ± 1 (filtr Gausso/2=50/LSC) Parametry skrawania: wg załącznika dla So-13187 Nadatek na ϕ [mm] 0.15 Czas maszynowy [min./szt.] 0,916(55s) Sciernica-2szt.: 60/46,7x17/1x20																																																																														
Symbol zmiany	Nr KZT	Treść zmiany		Data	Podpis																																																																									
Upracował, data i podpis:		Sprawdził, data i podpis:		Uprz. pomiarowe, data i podpis:																																																																										

Rys. 67. Karta operacyjna obróbki szlifierskiej. Operacja – szlifować bieżnię wykańczającą (parametry oznaczone jako DBS1 oraz DBS2 w obliczeniach zamienności oznaczone są jako DBz1 i DBz2)

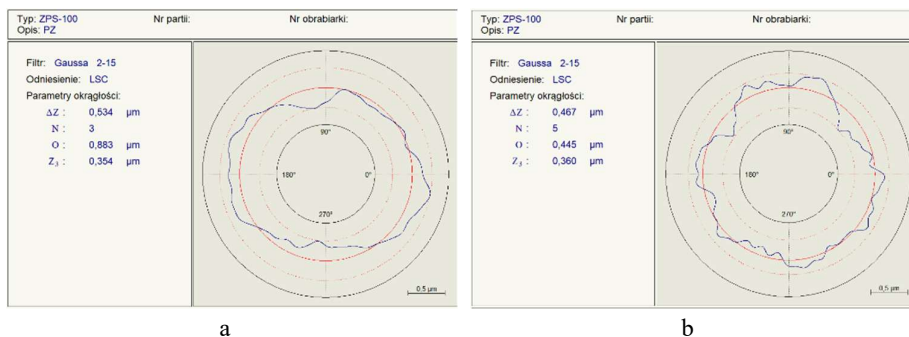
Operacja jest realizowana na obrabiarce RIFA 3MZE2320 (tak jak w przypadku operacji szlifowania bieżni zgrubnie) wyposażonej w układ napędowy rolki kondycjonującej oraz system aktywnej kontroli średnicy szlifowanej bieżni. Obrabiarka została zakupiona według opracowanych przez FŁT Kraśnik warunków technicznych do zamówienia maszyn WTO-1253.

Z uwagi na wysoką dokładność obróbki, dużą stabilność czasową parametrów kondycjonowania oraz możliwość korekcji wartości wypukłości bieżni, w tej operacji do przygotowania ściernic została zastosowana rolka diamentowa trawersująca. Do operacji tej użyte są dwie ściernice firmy Andre o charakterystyce CrA80K7V. Schemat ustawienia pierścienia, ściernic i rolki diamentowej przedstawia rysunek 68.



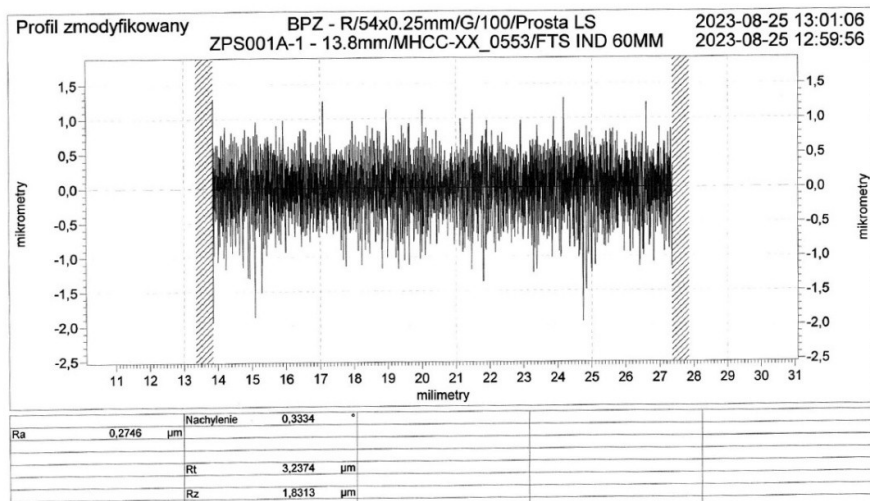
Rys. 68. Schemat ustawienia pierścienia, ściernic oraz rolki trawersującej SEO-116

Po ustawieniu obrabiarki zgodnie z wytycznymi zawartymi w karcie operacyjnej przeprowadzono operację szlifowania pierścienia. Uzyskany profil poddano kontroli pod kątem zgodności z wymaganiami wymiarowymi określonymi w karcie. Wyniki pomiarów okrągłości, wypukłości i chropowatości obu bieżni przedstawiono na rysunkach 69÷73.



Rys. 69. Wyniki pomiarów okrągłości bieżni po szlifowaniu wykańczającym: a) bieżnia nr 1, b) bieżnia nr 2

5.23.12.97



Rys. 73. Wynik pomiaru chropowatości bieżni nr 2 po szlifowaniu wykańczającym

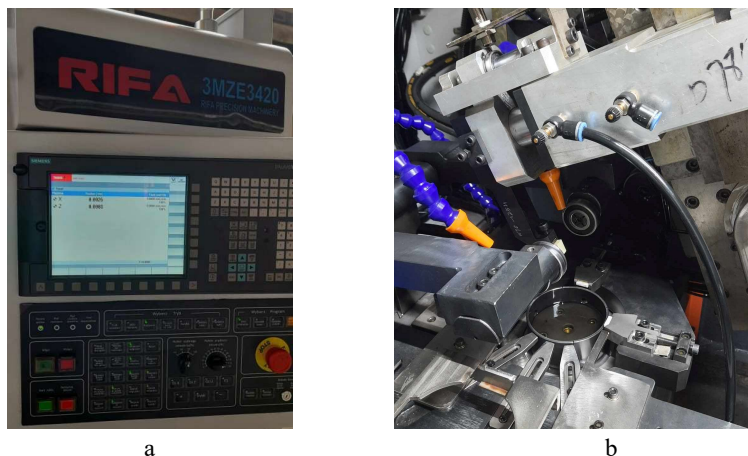
5.5.1.4. Dogładzać bieżnie

Czwartą operacją technologiczną dla pierścienia zewnętrznego jest operacja dogładzania bieżni. Bazami obróbkowymi w tej operacji są powierzchnia czołowa [B] oraz średnica zewnętrzna [D], docisk pierścienia do oporu realizowany jest poprzez rolki dociskowe współpracujące z powierzchnią czołową szlifowaną podczas pierwszej operacji. W trakcie tej operacji dogładzane są jednocześnie obie bieżnie. Przebieg procesu dogładzania oraz parametry skrawania zostały opisane w karcie operacyjnej (rys. 74). Parametr oceny okrągłości zarysu W_5 (oznaczony na rysunku 74), zwany mikrofalistością, jest średnią arytmetyczną pięciu najwyższych wysokości nierówności występujących na obwodzie elementu dla zakresu 15÷500 fal/obrót.

PBF		Wydział:	Obrobliarka:	Nr karty:																																																																																																																											
P-9		3MZE3420		KARTA OPERACYJNA																																																																																																																											
Sprawdzany parametr		Narzędzia pomiarowe	Dokument rejestracyjny	Nazwa części: <i>Pierścień wewnętrzny z kołnierzem</i>	Indeks części:																																																																																																																										
Oznaczenie	Wymiar	Cecha	Typ detalu:	ZPS-001A	S010																																																																																																																										
Nazwa operacji: Dogładzać bieżnię																																																																																																																															
Klasy ważności parametrów technologicznych ☒ Report ☐ Krytyczna ☐ Ważna ☐ Drugorzędna (nie oznacza się)																																																																																																																															
Szkic operacji:																																																																																																																															
<table border="1"> <tr> <td>DBS1</td> <td>$\phi 76.903^{+0.015}_0$</td> <td>S NRP-9</td> <td>1</td> <td rowspan="10">Karta autokontroli-tylko parametry ważne</td> <td rowspan="10">1 szt./60min</td> </tr> <tr> <td>h1</td> <td>6.685</td> <td>P MG-142</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>VDBS1sp</td> <td>0.003</td> <td>K MRD-881</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>KA1</td> <td>$22^\circ 30' 0''^{+0^\circ 53'}_{-0^\circ 53'}$</td> <td>K MG-142-37</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Nb1</td> <td>± 0.003</td> <td>K JDD-413</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>L</td> <td>10</td> <td>K JCK-1031</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>h1</td> <td>1.685</td> <td>K JCK-1825</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>h2</td> <td>11.685</td> <td>S NRP-10</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>SDB1</td> <td>0.005</td> <td>P MG-512</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>DBS2</td> <td>$\phi 76.903^{+0.015}_0$</td> <td>K MRD-881</td> <td>1</td> <td rowspan="10">Wydruk pomiaru</td> <td rowspan="10">2 szt./zrn</td> </tr> <tr> <td>h2</td> <td>21.029</td> <td>K MG-141-100</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>VDBS2sp</td> <td>0.003</td> <td>K MRD-881</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Ke2</td> <td>0.010</td> <td>K JDD-413</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>KA2</td> <td>$22^\circ 30' 0''^{+0^\circ 53'}_{-0^\circ 53'}$</td> <td>K JCK-1031</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Nb2</td> <td>± 0.003</td> <td>K JCP-404-2</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>L</td> <td>10</td> <td>K JCP-1012</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>h3</td> <td>16.029</td> <td>K JCK-1526</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>h4</td> <td>26.029</td> <td>K JCP-1801</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>SDB2</td> <td>0.005</td> <td>K JCP-1801</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>DBS</td> <td>$\phi 76.903^{+0.015}_0$</td> <td>P JAC-85</td> <td>1</td> <td rowspan="10">wg ITA-223</td> <td rowspan="10">5 szt./20min</td> </tr> <tr> <td>Pb1</td> <td>0.003 ± 0.006</td> <td>K MRD-881</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Pb2</td> <td>0.003 ± 0.006</td> <td>K JCK-1791</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Z3_1</td> <td>2.0</td> <td>M MHCC-XX</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Z3_2</td> <td>2.0</td> <td>M MHCC-XX</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>W5_1</td> <td>0.3</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>W5_2</td> <td>0.3</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Ra</td> <td>0.1</td> <td>M MHCC-XX</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Przypalenie szliflerskie</td> <td>NIEDOPUSZCZALNE</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Ocena wzrokowa</td> <td>Wymagana jednolita powierzchnia bieżni bez śladów poprzedniej obróbki.</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>						DBS1	$\phi 76.903^{+0.015}_0$	S NRP-9	1	Karta autokontroli-tylko parametry ważne	1 szt./60min	h1	6.685	P MG-142	1	VDBS1sp	0.003	K MRD-881	1	KA1	$22^\circ 30' 0''^{+0^\circ 53'}_{-0^\circ 53'}$	K MG-142-37	1	Nb1	± 0.003	K JDD-413	1	L	10	K JCK-1031	1	h1	1.685	K JCK-1825	1	h2	11.685	S NRP-10	1	SDB1	0.005	P MG-512	1	DBS2	$\phi 76.903^{+0.015}_0$	K MRD-881	1	Wydruk pomiaru	2 szt./zrn	h2	21.029	K MG-141-100	1	VDBS2sp	0.003	K MRD-881	1	Ke2	0.010	K JDD-413	1	KA2	$22^\circ 30' 0''^{+0^\circ 53'}_{-0^\circ 53'}$	K JCK-1031	1	Nb2	± 0.003	K JCP-404-2	1	L	10	K JCP-1012	1	h3	16.029	K JCK-1526	1	h4	26.029	K JCP-1801	1	SDB2	0.005	K JCP-1801	1	DBS	$\phi 76.903^{+0.015}_0$	P JAC-85	1	wg ITA-223	5 szt./20min	Pb1	0.003 ± 0.006	K MRD-881	1	Pb2	0.003 ± 0.006	K JCK-1791	1	Z3_1	2.0	M MHCC-XX	1	Z3_2	2.0	M MHCC-XX	1	W5_1	0.3			W5_2	0.3			Ra	0.1	M MHCC-XX	0	Przypalenie szliflerskie	NIEDOPUSZCZALNE			Ocena wzrokowa	Wymagana jednolita powierzchnia bieżni bez śladów poprzedniej obróbki.		
DBS1	$\phi 76.903^{+0.015}_0$	S NRP-9	1	Karta autokontroli-tylko parametry ważne	1 szt./60min																																																																																																																										
h1	6.685	P MG-142	1																																																																																																																												
VDBS1sp	0.003	K MRD-881	1																																																																																																																												
KA1	$22^\circ 30' 0''^{+0^\circ 53'}_{-0^\circ 53'}$	K MG-142-37	1																																																																																																																												
Nb1	± 0.003	K JDD-413	1																																																																																																																												
L	10	K JCK-1031	1																																																																																																																												
h1	1.685	K JCK-1825	1																																																																																																																												
h2	11.685	S NRP-10	1																																																																																																																												
SDB1	0.005	P MG-512	1																																																																																																																												
DBS2	$\phi 76.903^{+0.015}_0$	K MRD-881	1			Wydruk pomiaru	2 szt./zrn																																																																																																																								
h2	21.029	K MG-141-100	1																																																																																																																												
VDBS2sp	0.003	K MRD-881	1																																																																																																																												
Ke2	0.010	K JDD-413	1																																																																																																																												
KA2	$22^\circ 30' 0''^{+0^\circ 53'}_{-0^\circ 53'}$	K JCK-1031	1																																																																																																																												
Nb2	± 0.003	K JCP-404-2	1																																																																																																																												
L	10	K JCP-1012	1																																																																																																																												
h3	16.029	K JCK-1526	1																																																																																																																												
h4	26.029	K JCP-1801	1																																																																																																																												
SDB2	0.005	K JCP-1801	1																																																																																																																												
DBS	$\phi 76.903^{+0.015}_0$	P JAC-85	1	wg ITA-223	5 szt./20min																																																																																																																										
Pb1	0.003 ± 0.006	K MRD-881	1																																																																																																																												
Pb2	0.003 ± 0.006	K JCK-1791	1																																																																																																																												
Z3_1	2.0	M MHCC-XX	1																																																																																																																												
Z3_2	2.0	M MHCC-XX	1																																																																																																																												
W5_1	0.3																																																																																																																														
W5_2	0.3																																																																																																																														
Ra	0.1	M MHCC-XX	0																																																																																																																												
Przypalenie szliflerskie	NIEDOPUSZCZALNE																																																																																																																														
Ocena wzrokowa	Wymagana jednolita powierzchnia bieżni bez śladów poprzedniej obróbki.																																																																																																																														
Opryzgławianie: <table border="1"> <tr> <th>Nazwa</th> <th>Rodz.</th> <th>Cecha</th> <th>losz</th> </tr> <tr> <td>Opór</td> <td>W</td> <td>SPA-643</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>Zespół podór dogładzarki</td> <td>W</td> <td>SPP-116</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>Łapa podająca</td> <td>W</td> <td>SPI-3076</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>Łista prowadząca</td> <td>W</td> <td>SPI-3078</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>Płytki prowadząca</td> <td>W</td> <td>SPI-3073</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>Oprawa osłki lewa</td> <td>W</td> <td>SPO-760</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Oprawa osłki prawa</td> <td>W</td> <td>SPO-761</td> <td>1</td> </tr> </table>						Nazwa	Rodz.	Cecha	losz	Opór	W	SPA-643	2	Zespół podór dogładzarki	W	SPP-116	2	Łapa podająca	W	SPI-3076	2	Łista prowadząca	W	SPI-3078	2	Płytki prowadząca	W	SPI-3073	4	Oprawa osłki lewa	W	SPO-760	1	Oprawa osłki prawa	W	SPO-761	1																																																																																										
Nazwa	Rodz.	Cecha	losz																																																																																																																												
Opór	W	SPA-643	2																																																																																																																												
Zespół podór dogładzarki	W	SPP-116	2																																																																																																																												
Łapa podająca	W	SPI-3076	2																																																																																																																												
Łista prowadząca	W	SPI-3078	2																																																																																																																												
Płytki prowadząca	W	SPI-3073	4																																																																																																																												
Oprawa osłki lewa	W	SPO-760	1																																																																																																																												
Oprawa osłki prawa	W	SPO-761	1																																																																																																																												
Informacje dodatkowe: - Warunki w zakresie wyglądu zewnętrznego wg WIT-10. - Użytkowanie narzędzi pomiarowych wg ITK-187. - Instrukcja organizacji stanowiska roboczego wg ITD-515. - Sposób reagowania wg IPs-23.6. - Pomiar przez odchylki (Nb1, Nb2) nachylenia bieżni. - Wyłącznie wypukłość. - Nie dopuszcza się uzyskania liczby fal na bieżniach równej wielokrotności liczby wałeczków lub wielokrotności liczby wałeczków ± 1. - Pierwszą i ostatnią sztukę sprawdzać wg IPs-36. - Niedopuszczalna liczba dominujących fal 21± 1 (filtr Gaussa/2± 50/LSC)																																																																																																																															
Parametry skrawania: wg załącznika dla So-13188																																																																																																																															
Naddatek na ϕ [mm] 0.010 Czas maszynowy [min./szt] 0,916(55s)																																																																																																																															
Osełka 2szt.: 14x10x45																																																																																																																															
Symbol zmiany: Nr KZT Treść zmiany Data Podpis Opracował, data i podpis: Sprawdził, data i podpis: Oprz. pomiarowe, data i podpis:																																																																																																																															

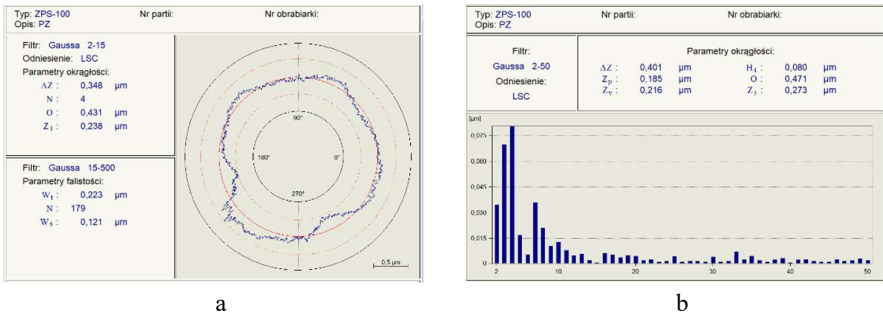
Rys. 74. Karta operacyjna obróbki szliflerskiej. Operacja – dogładzać bieżnię

Operacja jest realizowana na obrabiarce RIFA 3MZE3420 (rys. 75) wyposażonej w dwa stanowiska do dogładzania obu bieżni jednocześnie. Obrabiarka została zakupiona według opracowanych przez FŁT Kraśnik warunków technicznych do zamówienia maszyn WTO-1254.

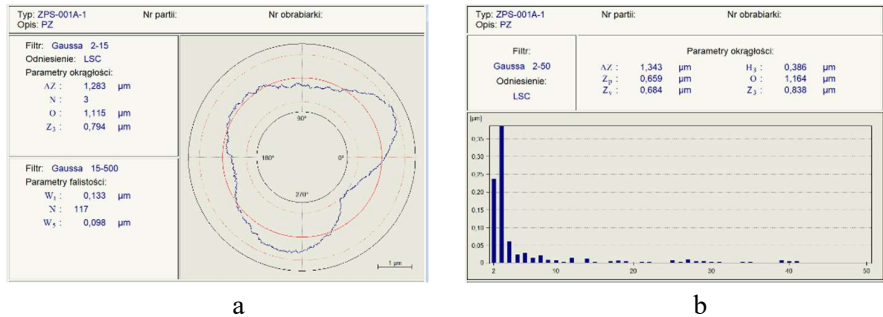


Rys. 75. Obrabiarka RIFA 3MZE3420: a) pulpit, b) widok strefy obróbczej - podpory, opór, głowica oscylacyjna wraz z osłką, rolki dociskowe

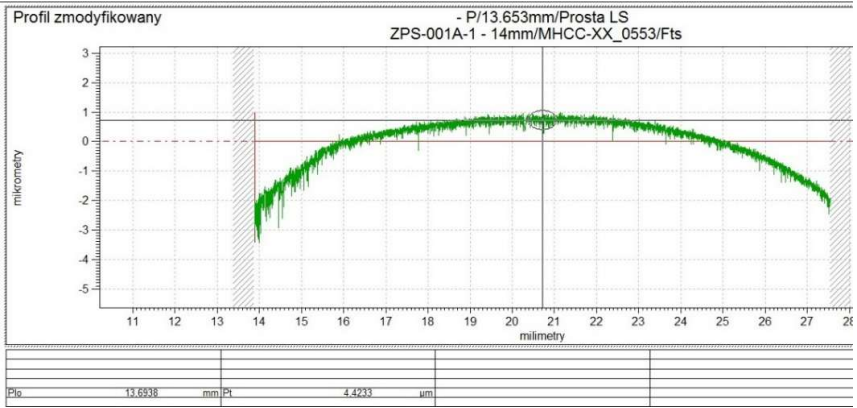
Proces dogładzania realizowany jest za pomocą narzędzia o szerokości zbliżonej do szerokości dogładzanej powierzchni, ruchu oscylacyjnego narzędzia oraz ruchu obrotowego pierścienia zewnętrznego. Do wykonania operacji używane są dwa pilniki firmy Darmann o charakterystyce FA600-150FV51S. Po ustawieniu obrabiarki zgodnie z wytycznymi zawartymi w karcie operacyjnej przeprowadzono operację dogładzania bieżni pierścienia. Uzyskany profil poddano kontroli pod kątem zgodności z wymaganiami wymiarowymi określonymi w karcie. Wyniki pomiarów okrągłości, wypukłości i chropowatości obu bieżni przedstawiono na rysunkach 76÷81.



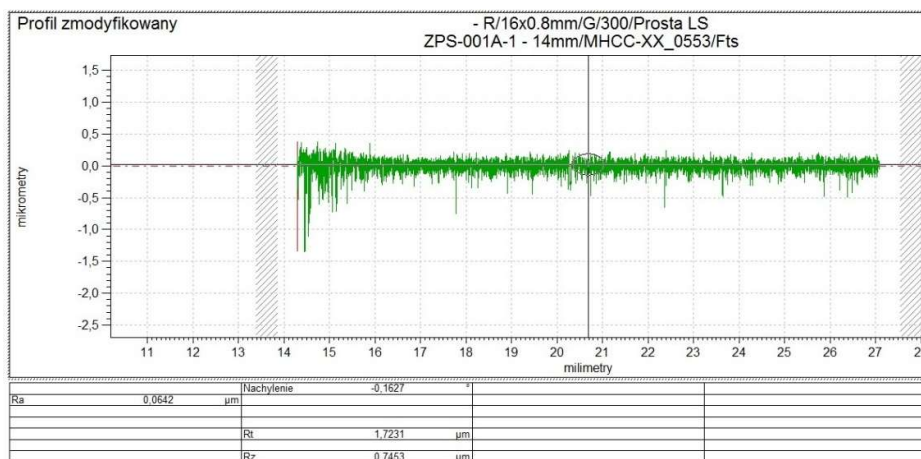
Rys. 76. Wynik pomiaru okrągłości bieżni nr 1 po doglądaniu: a) profil okrągłości powierzchni bieżni po doglądaniu wraz z parametrami okrągłości i falistości, b) analiza harmoniczna profilu okrągłości bieżni po doglądaniu (maksimum w paśmie 21 ± 1 harmonicznej jest niedopuszczalne)



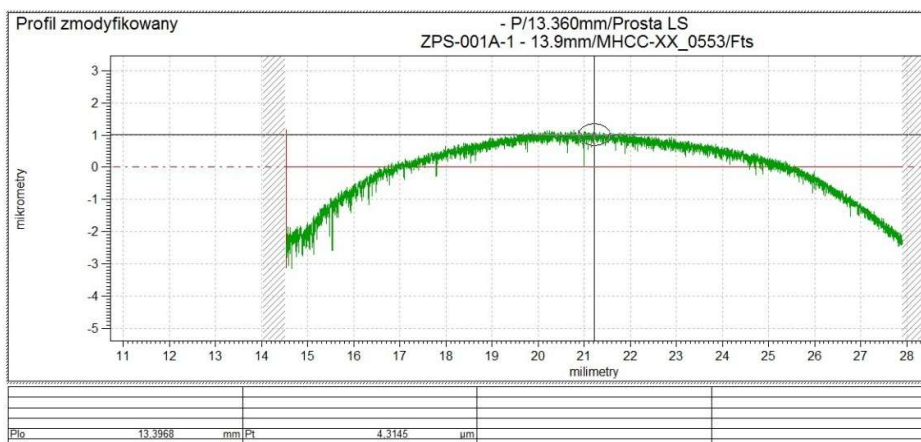
Rys. 77. Wynik pomiaru okrągłości bieżni nr 2 po doglądaniu: a) profil okrągłości powierzchni bieżni po doglądaniu wraz z parametrami okrągłości i falistości, b) analiza harmoniczna profilu okrągłości bieżni po doglądaniu (maksimum w paśmie 21 ± 1 harmonicznej jest niedopuszczalne)



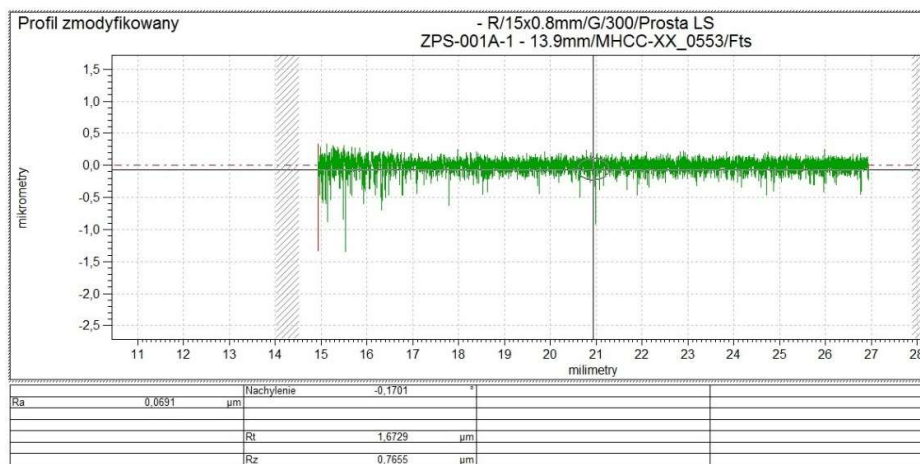
Rys. 78. Zarys bieżni wraz z wartością wypukłości bieżni nr 1 po doglądaniu



Rys. 79. Wynik pomiaru chropowości bieżni nr 1 po szlifowaniu wykańczającym



Rys. 80. Zarys bieżni wraz z wartością wypukłości bieżni nr 2 po dogładzaniu



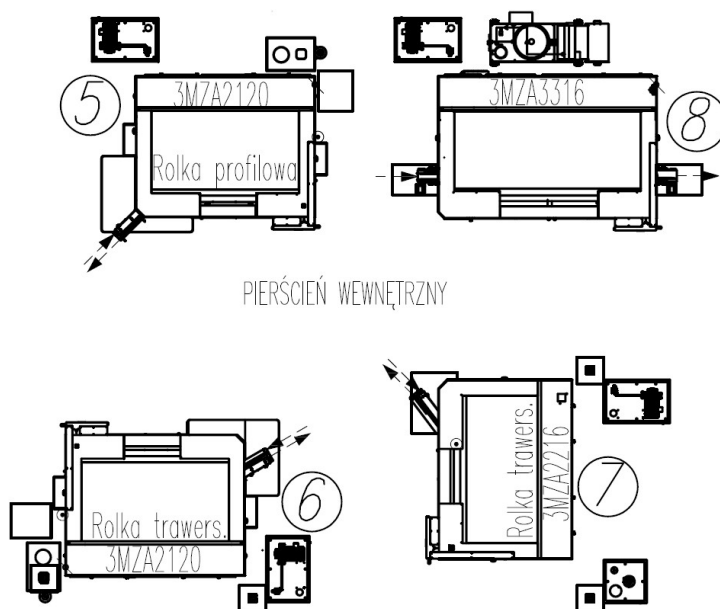
Rys. 81. Wynik pomiaru chropowatości bieżni nr 2 po szlifowaniu wykańczającym

5.5.2. Pierścień wewnętrzny kołnierzowy

Pierścień wewnętrzny ze względu na umieszczenie bazy obróbczej na kołnierzu wymaga zastosowania obrabiarki, która umożliwi załadunek w strefę obróbki (umiejscowienie pierścienia na podporach oraz wsparciu go na oporze, który jednocześnie nadaje pierścieniowi ruch obrotowy podczas obróbki). Tak jak w przypadku pierścienia zewnętrznego, zdecydowano się na obrabiarki z ruchomym oporem, który na czas przeładunku zostaje wycofany ze strefy obróbki, umożliwiając tym samym załadunek pierścienia. Proces szlifowania pierścienia wewnętrznego kołnierzowego (również jak w przypadku pierścienia zewnętrznego) realizowany jest w czasie cyklu 55 s dla wszystkich obrabiarek zintegrowanych w linii technologicznej.

Schemat rozmieszczenia obrabiarek przeznaczonych do obróbki pierścienia wewnętrznego kołnierzowego przedstawiono na rysunku 82. Kolejnymi etapami procesu obróbek wykańczających są operacje realizowane w kolejności:

- Szlifować profil z czołem oporowym i bieżnię zgrubnie - obrabiarka RIFA 3MZA2120,
- Szlifować bieżnię wykańczająco – obrabiarka RIFA 3MZA2120,
- Szlifować bieżnię pomocniczą – obrabiarka RIFA 3MZA2216,
- Dogładszać bieżnię i bieżnię pomocniczą – obrabiarka RIFA 3MZA3316.



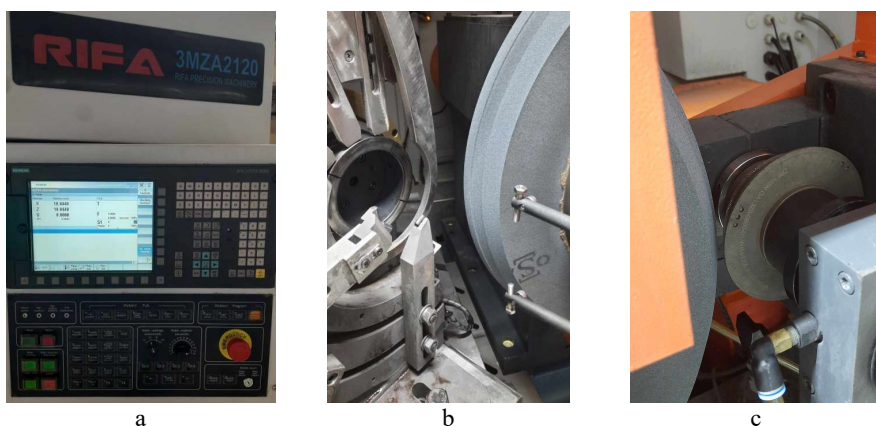
Rys. 82. Schemat ustawienia obrabiarek do szlifowania i dogładzania pierścienia wewnętrznego kołnierзовego

5.5.2.1. Szlifować profil z czołem oporowym i bieżnią zgrubnie

Pierwszą operacją szlifierską dla pierścienia wewnętrznego kołnierowego jest operacja szlifowania dwóch powierzchni walcowych, powierzchni czołowej oraz bieżni głównej. Przebieg procesu szlifowania oraz parametry skrawania zostały opisane w karcie operacyjnej (rys. 83). Powierzchnie bieżni głównej [D] oraz czoła kołnierza [C] służą jako bazy obróbcze. Operacja szlifowania prowadzona jest na obrabiarce RIFA 3MZA2120 (rys. 84). Obrabiarka ta posiada automatyczną wyważarkę do ściernicy, kontrolę czynną szlifowanej powierzchni, system detekcji początku szlifowania (akustyczny) oraz urządzenie do napędu rolki diamentowej. Obrabiarka została zakupiona według opracowanych przez FŁT Kraśnik warunków technicznych do zamówienia maszyn WTO-1256.

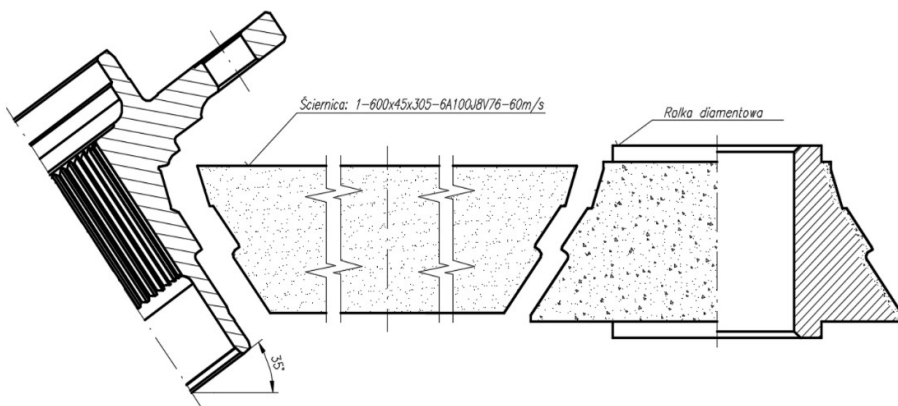
Rys. 83. Karta operacyjna obróbki szlifierskiej. Operacja – szlifować profil z czołem oporowym i fi bieżni zgrubnie

		Wydział:	Obrabiarka:	KARTA OPERACYJNA		Nr karty:
P-9		3MZA2120				
Sprawdziany parametr		Narzędzia pomiarowe		Dokument rejestracyjny	Nazwa części: Pierścień wewnętrzny z kołnierzem	Indeks części:
Oznaczenie	Wymiar	Cechy	Zęsatylność pomiarowa	Typ detalu:	ZPS-001A	S120
B	48,290 ^{+0.007} _{-0.007}	MC-551 MRH-675 JDC-115 JCP-993 JCP-1000 JK-1801	SCHEMAT N9)	Nazwa operacji:	Szlifować profil z czółem oporowym i Ø bieżni zgruba.	
VBs	0.006	JDC-115 JCP-993 JCP-1000 JK-1801	SCHEMAT	Klasy wartości parametrów technologicznych		
d3	Ø50.000 ^{+0.022} _{-0.010}	NRP-2 JAC-14 MRH-675 JCP-993 JCP-1000 JK-1801 JCH-259 JDD-435 JDD-415	SCHEMAT	Report: ☒ Krytyczna ☐ Ważna ☐ Drugorzędna (nie oznacza się)		
h1_d3	52.0	NRP-2 JAC-14 MRH-675 JCP-993 JCP-1000 JK-1801 JCH-259 JDD-435 JDD-415	SCHEMAT	Szkic operacji:		
h2_d3	64.0	NRP-2 JAC-14 MRH-675 JCP-993 JCP-1000 JK-1801 JCH-259 JDD-435 JDD-415	SCHEMAT			
Vd3sp	0.004	NRP-2 JAC-14 MRH-675 JCP-993 JCP-1000 JK-1801 JCH-259 JDD-435 JDD-415	SCHEMAT	Kąt skrętu wrzec. 35°		
Vd3mp	0.004	NRP-2 JAC-14 MRH-675 JCP-993 JCP-1000 JK-1801 JCH-259 JDD-435 JDD-415	SCHEMAT	Informacje dodatkowe:		
d4	Ø57.200 ^{+0.022} _{-0.010}	NRP-4 JAC-14 MRB-1015 JCP-995 JCP-1000 JCK-1801 JCH-260 JUD-436 JUD-400	SCHEMAT	- Warunki w zakresie wyglądu zewnętrznego wg WTL-10. - Użytkowanie narzędzi pomiarowych wg ITK-187. - Instrukcja organizacji stanowiska roboczego wg ITD-515. - Sposób reagowania wg IPN-23.6. - Obciążanie ściernic wg ITE-9. - Pierwszą i ostatnią sztukę sprawdzać wg IPN-36.		
h1_d4	3.5	M MHCC-NX K MRR-425	SCHEMAT	Pomiar i wzorcowanie z odwrotnością wskazań		
h2_d4	11.5					
Vd4mp	0.004					
Ra	0.63					
dBS	Ø58,924 ^{+0.008} _{-0.008}	S NRP-17 JAC-14 MXE-4 JCP-995 JCP-993 JCP-1000 JCP-1000 JK-1801 JDD-415	SCHEMAT			
h_dBS	25.403	S NRP-6 JAC-14 MRH-675 JCP-1023 JCP-993 JCP-1000 JK-1801 WMBO-S0.001/0.2 JDD-415	SCHEMAT			
VBDSsp	0.004	K MRR-425				
NB	+0.005 -0.005					
SdB	0,012					
KF	17°0'					
L_KF	8.0					
h1_KF	21.403					
h2_KF	29.403					
RadB	0.63					
Przypalenia szlifierskie	NIEDOPUSZCZALNE					
Oprzyskrzydowanie:						
Nazwa	Ilość	Cecha	Ilość			
Opór	W	SDC-3372	1			
Podpora wahlwa poprzeczna	W	SDC-3379	1			
Podpora skośna	W	SDC-3376	1			
Prowadnik łukowy	W	PSN-4362	1			
Podstawa łapy	W	PSN-4355	1			
Łapa odbierająca lewa	W	PSN-4356	1			
Łapa odbierająca prawa	W	PSN-4357	1			
Łapa podająca lewa	W	PSN-4358	1			
Łapa podająca prawa	W	PSN-4359	1			
Tuleja dystansowa prowadnika	W	PSN-4354	1			
Tuleja dystansowa	W	SEP-198	1			
Rollka diamentowa profilowa	W	SEO-115	1			
Naddatek na czole oporowym	mm	0.15				
Naddatek na Ø d3 i d4	mm	0.25				
Naddatek na Ø bieżni	mm	0.25				
Czas maszynowy	[min./szt]	0.916 (55s)				
Symbol zmiany				Treść zmiany		Podpis
Opracował, data i podpis:				Sprawdził, data i podpis:		Uprz. pomiarowe, data i podpis :



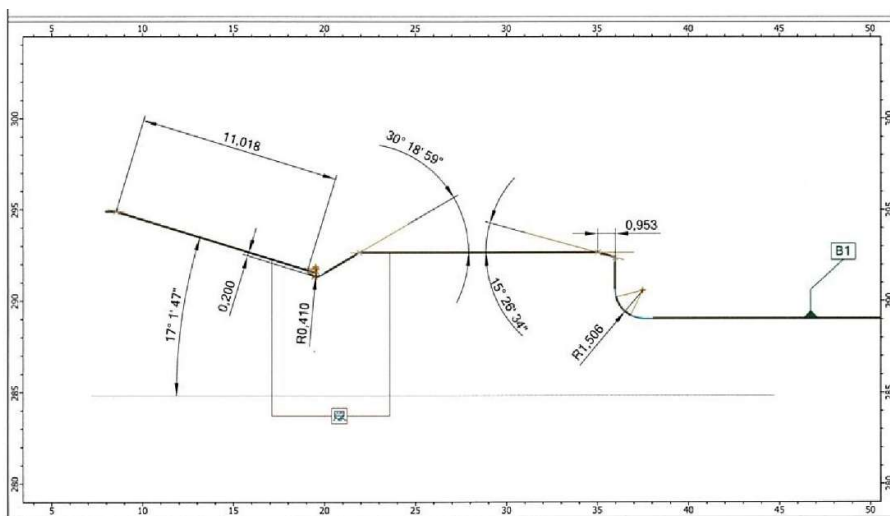
Rys. 84. Obrabiarka RIFA 3MZA2120: a) pulpit, b) widok strefy obróbczej - podpory, opór, końcówki oraz czujniki pomiarowe, ściernica c) widok strefy obróbczej - ściernica, rolka diamentowa profilowa

Z uwagi na kształt szlifowanej powierzchni, do kondycjonowania ściernicy używana jest rolka diamentowa kształtowa. Pierścień wewnętrzny kołnierzowy podczas operacji szlifowania będzie skrócony pod kątem 35° w stosunku do ściernicy. Kąt skrócenia wynika z konieczności szlifowania wzajemnie prostopadłych powierzchni. Schemat ustawienia pierścienia, ściernicy i rolki diamentowej przedstawia rysunek 85. Do operacji tej używana jest ściernica firmy Tyrolit o charakterystyce 6A100J8V76.



Rys. 85. Schemat ustawienia pierścienia, ściernicy oraz rolki diamentowej kształtowej

Po ustawieniu obrabiarki zgodnie z wytycznymi zawartymi w karcie technologicznej, przeprowadzono operację szlifowania pierścienia. Uzyskany profil poddano kontroli pod kątem zgodności z wymaganiami wymiarowymi określonymi w rysunku konstrukcyjnym oraz WTO-1256. Wyniki weryfikacji zarysu przedstawiono na rysunku 86. Wynik jest zgodny z wymaganiami zawartymi w WTO-1256 oraz rysunkiem konstrukcyjnym.



Rys. 86. Wynik pomiaru zarysu otrzymanego w wyniku szlifowania ściernicą przygotowaną przy użyciu rolki diamentowej profilowej SEO-115

5.5.2.2. Szlifować bieżnię wykańczająco

Drugim etapem szlifowania pierścienia wewnętrznego kołnierzego jest operacja szlifowania bieżni głównej. Przebieg procesu szlifowania oraz parametry skrawania zostały opisane w karcie operacyjnej (rys. 87). Powierzchnie bieżni głównej [D] oraz czoła kołnierza [C] pełnią funkcję baz obróbczych dla tej operacji. W związku ze zmianą bazy obróbczej względem bazy pomiarowej, tolerancja wymiaru uzyskanego w poprzedniej operacji ($B = 48,290 \pm 0,007$ mm) wpływa na zmniejszenie dopuszczalnej tolerancji wymiaru średnicy bieżni. Wartość tego wpływu została oszacowana na podstawie zależności geometrycznej:

$$\Delta = 0,014 \cdot 2 \operatorname{tg} 17^\circ \cong 0,0086 \text{ mm.}$$

W związku z powyższym, na szkicu karty operacyjnej wprowadza się dwa wymiary średnicy bieżni:

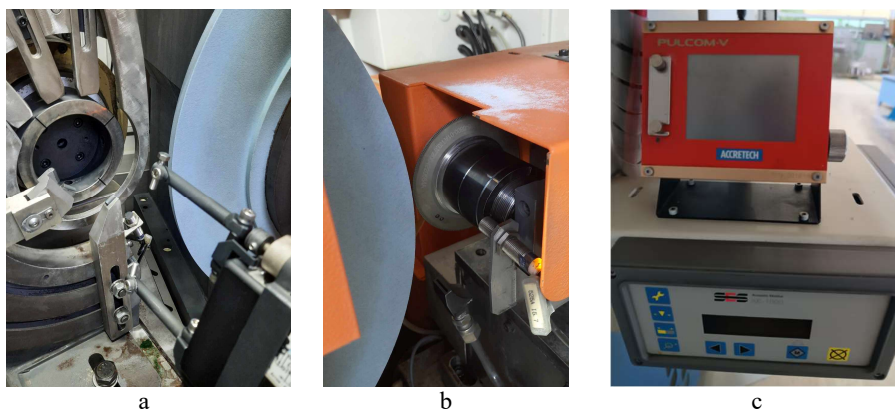
- dBS – wymiar średnicy bieżni odniesiony do bazy obróbczej, stosowany w trakcie realizacji procesu technologicznego, umożliwiający bezpośrednią kontrolę ustawienia i pracy obrabiarki;
- dBM (w obliczeniach zamienności częściowej oznaczany jako DBw1) – wymiar średnicy bieżni odniesiony do bazy pomiarowej, (tolerancja wymiaru dBM jest wynikiem sumy tolerancji średnicy dBS oraz wpływu tolerancji wymiaru B).

Proces szlifowania realizowany jest na szlifierce RIFA 3MZA2120 (rys. 88), wyposażonej w automatyczne urządzenie do wyważania ściernicy, system aktywnej kontroli szlifowanej powierzchni oraz napęd rolki diamentowej. Obrabiarka została zakupiona według opracowanych przez FŁT Kraśnik warunków technicznych do zamówienia maszyn WTO-1269. Z uwagi na wysoką dokładność obróbki, dużą stabilność czasową parametrów kondycjonowania oraz możliwość korekcji wartości wypukłości bieżni, w tej operacji do przygotowania ściernic została zastosowana rolka diamentowa trawersująca.

W operacji stosowana jest ściernica marki Tyrolit o charakterystyce 6A100J8V76.

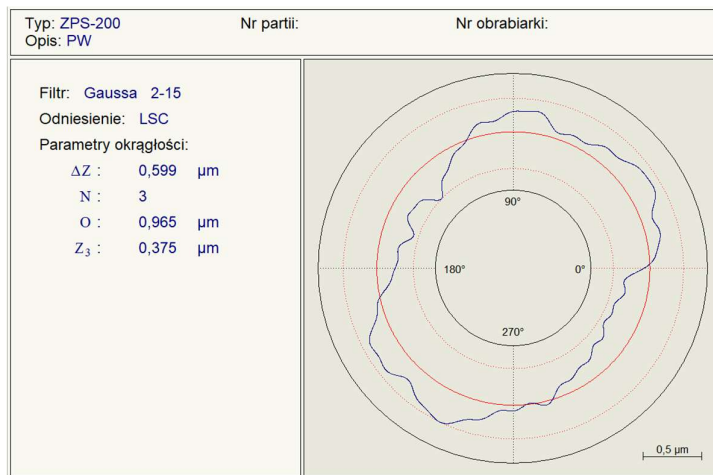
Rys. 87. Karta operacyjna obróbki szlifierskiej. Operacja – szlifować bieżnię
wykańczająco

Wydział: P-9		Obraziarka: 3MZA2120		KARTA OPERACYJNA		Nr zlecenia: _____					
Sprawdzany parametr		Narzędzia pomiarowe		Dokument rejestracyjny		Nazwa części: Pierścień wewnętrzny z kołnierzem		Indeks części:			
Oznaczenie		Wymiar		Cecha		Zęsatłowość pomiarów		Typ detalu: ZPS-001A		S087	
dBS h_dBS		Ø58,754 ^{+0.004} _{-0.014} 25,403		Karta autokontroli 1 szt/60min Wydruk pomiaru 2 szt/zm Nie rejestruje się 1 szt/60min		Nazwa operacji: Szlifować bieżnię wykańczającą.		Klasy ważności parametrów technologicznych ☒ Report ☒ Krytyczna ☐ Ważna ☐ Drugorzędna (nie oznacza się) Szkie operacji:			
VdBSsp		0.003									
NB		+0.002 -0.002									
SdB		0.008									
KF		17°0'0"									
L_KF		8.0									
h1_KF		21,403									
h2_KF		29,403									
PB		0.006±0.012									
Z3		2.0									
Ra		0.4									
dBM		Ø58,754 ⁺⁰ _{-0.018}									
h_dBM		22,887									
VdBSmp		0.003									
Przypalenie szlifierskie		NIEDOPUSZCZALNE		wg ITA-223		Informacje dodatkowe:		1. Warunki w zakresie wyglądu zewnętrznego wg WTL-10. 2. Użytkowanie narzędzi pomiarowych wg ITK-187. 3. Instrukcja organizacji stanowiska roboczego wg ITD-515. 4. Sposób reagowania wg IPs-23.6. 5. Obciążanie ściernic wg ITE-9. 6. Pierwszą i ostatnią sztukę sprawdzać wg IPs-36. N7) Niedopuszczalna liczba dominujących fal 21±1 (filtr Gaussa/2÷50/LSC)			
Opórkzqdowanie:		Nazwa		Rodz						Cecha	
Opór		W		SDC-3372		1		1			
Podpora wahlwa poprzeczna		W		SDC-3379		1		1			
Podpora skośna		W		SDC-3376		1		1			
Prowadnik łukowy		W		PSN-4362		1		1			
Podstawa łapy		W		PSN-4355		1		1			
Łapa odbierająca lewa		W		PSN-4356		1		1			
Łapa odbierająca prawa		W		PSN-4357		1		1			
Łapa podająca lewa		W		PSN-4358		1		1			
Łapa podająca prawa		W		PSN-4359		1		1			
Tuleia dystansowa przewodnika		W		PSN-4354		1		1			
Tuleia dystansowa		W		SEP-198		1		1			
Rolka diamentowa trawersująca		W		SEO-116		1		1			
Parametry skrawania: wg załącznika dla So-13190											
Naddatek na Ø bieżni [mm] 0.17											
Czas maszynowy [min./szt] 0.916 (55s)											
Ściernica: 600/400x20/12.5x305											
Symbol zmiany		Nr KZT		Treść zmiany		Data		Podpis			
Opracował, data i podpis:		Sprawdził, data i podpis:		Oprz. pomiarowe, data i podpis:							

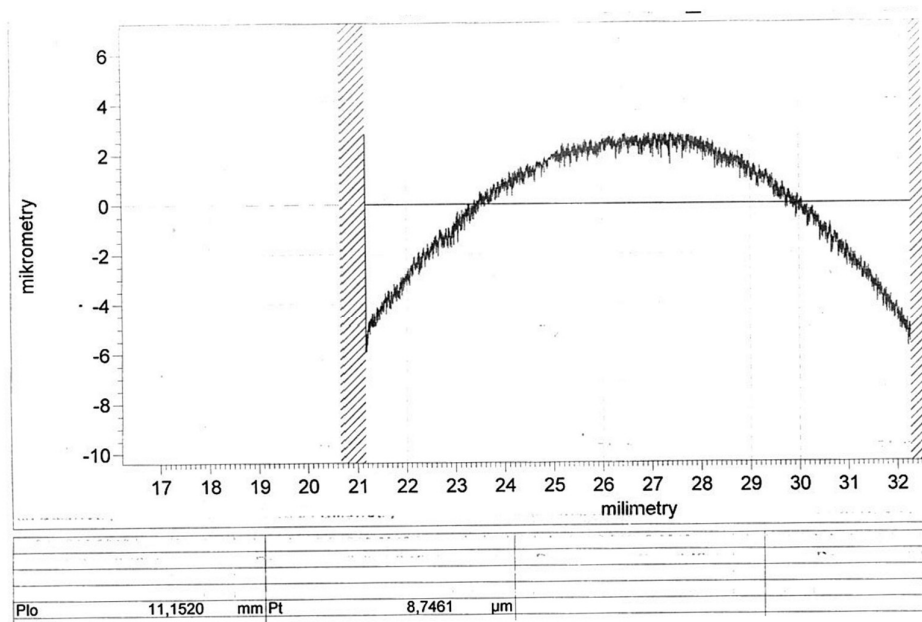


Rys. 88. Obrabiarka RIFA 3MZA2120: a) Widok strefy obróbczej - podpory, opór, końcówki oraz czujniki pomiarowe, ściernica b) widok strefy obróbczej - ściernica, rolka diamentowa trawersująca, c) widok pulpitów sterujących urządzenia do kontroli czynnej wymiaru oraz automatycznej wyważarki

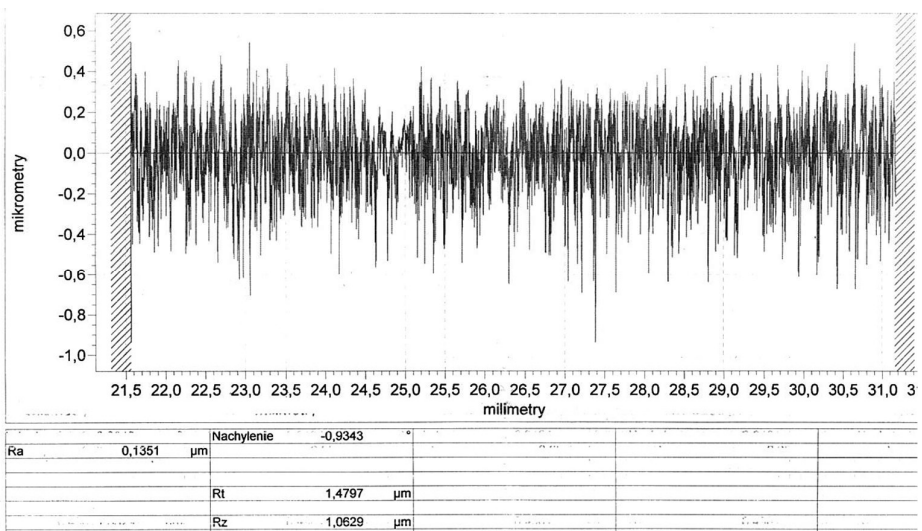
Po ustawieniu obrabiarki zgodnie z wytycznymi zawartymi w karcie operacyjnej, przeprowadzono operację szlifowania pierścienia. Uzyskany profil poddano kontroli pod kątem zgodności z wymaganiami wymiarowymi, określonymi w karcie. Wyniki pomiarów okrągłości, wypukłości i chropowatości bieżni przedstawiono na rysunkach 89÷91.



Rys. 89. Wyniki pomiaru okrągłości bieżni po szlifowaniu wykańczającym



Rys. 90. Zarys bieżni wraz z wartością wypukłości bieżni po szlifowaniu wykańczającym



Rys. 91. Wynik pomiaru chropowatości bieżni po szlifowaniu wykańczającym

5.5.2.3. Szlifować bieżnię pomocniczą

Trzecią operacją szlifierską dla pierścienia wewnętrznego kołnierzonego jest operacja szlifowania bieżni pomocniczej. Przebieg procesu szlifowania oraz parametry skrawania zostały opisane w karcie operacyjnej (rys. 92). Powierzchnie bieżni głównej [D] oraz czoła kołnierza [C] służą jako bazy obróbcze dla operacji. W związku ze zmianą bazy obróbczej względem bazy pomiarowej, tolerancja wymiaru uzyskanego w poprzedniej operacji ($B = 48,290 \pm 0,007$ mm) wpływa na zmniejszenie dopuszczalnej tolerancji wymiaru położenia bieżni pomocniczej. Wartość tego wpływu ma charakter liniowy i wynosi:

$$\Delta = \pm 0,007 \text{ mm.}$$

W związku z powyższym, na szkicu karty operacyjnej wprowadza się dwa wymiary położenia bieżni pomocniczej:

- a_{h_dBS} – wymiar położenia bieżni pomocniczej odniesiony do bazy obróbczej, stosowany w trakcie realizacji procesu technologicznego, umożliwiający bezpośrednią kontrolę ustawienia i pracy obrabiarki;
- aM_{h_dBM} (w obliczeniach zmienności częściowej oznaczany również jako $Lop1$) – wymiar położenia bieżni pomocniczej odniesiony do bazy pomiarowej (tolerancja parametru jest wynikiem sumy tolerancji położenia bieżni pomocniczej a_{h_dBS} oraz tolerancji wymiaru B).

Operacja szlifowania prowadzona jest na obrabiarce RIFA 3MZA2216 (rys. 93). Obrabiarka została zakupiona według opracowanych przez FŁT Kraśnik warunków technicznych do zamówienia maszyn WTO-1257. Obrabiarka ta posiada urządzenie do napędu rolki trawersującej. Do operacji tej używana jest ściernica firmy Saint-Gobain o charakterystyce 32A150J8VS3.

PBF		Wydział: P-9	Obrabliarka: 3MZA2216	KARTA OPERACYJNA		Nr karty:
Sprawdzony parametr		Narzędzia pomiarowe	Dokument rejestracyjny	Nazwa części: Pierścień wewnętrzny z kołnierzem	Indeks części:	
Oznaczenie	Wymiar	Cecha	Częstość pomiarów	Typ detalu: ZPS-001A	S076	
a	19,089 ^{+0.007} _{-0.007}	S NRP-13 SCHEMAT P MG-551 K MRH-675 K JDD-415	1	Nazwa operacji: Szlifować bieżnię pomocniczą.		
Sip	0,012		1	Klasy ważności parametrów technologicznych		
Nbp	±0.003	S NRP-8 SCHEMAT P MG-532 K MRH-675 K JCP-1008 K JCP-993 K JCP-1000 K JCP-1801 K JDD-415 K MHCC-XX	1	Report ☒ Krytyczna ☐ Ważna ☐ Drugorzędna (nie oznacza się)		
LKB	2,0		1	Szkic operacji:		
KB	17,43 ⁺²⁸		2			
h_dBM	22,887		2			
PBp	0.000÷0.002		2			
Ra	0.3	K MRH-425 M MHCC-XX	1			
aM	29,201 ^{+0.014} _{-0.014}	S NRP-7 SCHEMAT P MG-323 K MRH-675 K JCP-1021 K JCP-993 K JCP-1000 K JCP-1801 K JDD-400	0	Karta autokontroli		
h_dBM	22,887		1	1 szt/60min		
Przypalenia szliflerskie	NIEDOPUSZCZALNE		1	Wydruk pomiaru		
(B)	48,290 ^{+0.007} _{-0.007}	S NRP-2 SCHEMAT P MG-551 K MRH-675 K JDD-415 K JCP-993 K JCP-1000 K JCP-1801	0	2 szt/zm		
(VBs)	0.010		1	1 szt/60min		
Oprządkowanie:				wg ITA-223		
Nazwa				Idz	Cecha	Ilość
Opór				W	SDC-3372	1
Podpora wahlowa poprzeczna				W	SDC-3381	1
Podpora skośna				W	SDC-3375	1
Końcówka elektrowrzeciona				W	SOK-915	1
Śruba do końcówki				W	SRA-71	1
Podstawa łapy				W	PSN-4355	1
Łapa odbierająca lewa				W	PSN-4356	1
Łapa odbierająca prawa				W	PSN-4357	1
Łapa podająca lewa				W	PSN-4358	1
Łapa podająca prawa				W	PSN-4359	1
Prowadnik łukowy				W	PSN-4362	1
Tuleja dystansowa prowadnika				W	PSN-4354	1
Obciągacz diamentowy wielozłazny krążkowy				W	SEO-10	1
Parametry skrawania: wg załącznika dla So-13191						
Nadatek na ϕ bieżni pomocniczej				mm	0.15	
Czas maszynowy				[min./szt]	0.916 (55s)	
Informacje dodatkowe:						
1. Warunki w zakresie wyglądu zewnętrznego wg WTL-10. 2. Użytkowanie narzędzi pomiarowych wg ITK-187. 3. Instrukcja organizacji stanowiska roboczego wg ITD-515. 4. Sposób reagowania wg IPs-23.6. 5. Obciąganie ściernic wg ITE-6. 6. Pierwszą i ostatnią sztukę sprawdzać wg IPs-36. N5) Pomiar i wzorcowanie z odwrotnością wskazań.						
Ściernica: 150x10x32						
Symbol zmiany	Nr KZT	Treść zmiany			Data	Podpis
Opracował, data i podpis:		Sprawdził, data i podpis:		Uprz. pomiarowe, data i podpis:		

Rys. 92. Karta operacyjna obróbki szlifierskiej. Operacja – szlifować bieżnię pomocniczą



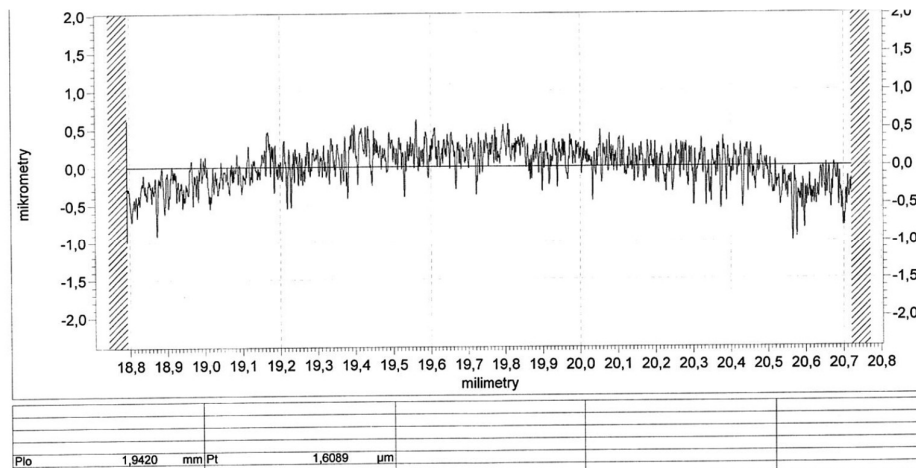
a



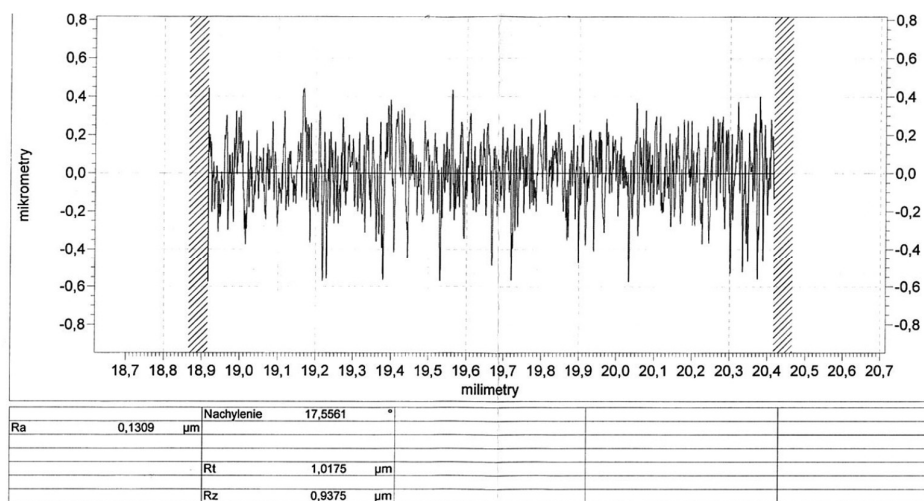
b

Rys. 93. Obrabiarka RIFA 3MZA2216: a) pulpit b) widok strefy obróbczej - ściernica, rolka diamentowa trawersująca, opór, podpory

Po ustawieniu obrabiarki zgodnie z wytycznymi zawartymi w karcie operacyjnej przeprowadzono operację szlifowania pierścienia. Uzyskany profil poddano kontroli pod kątem zgodności z wymaganiami wymiarowymi określonymi w karcie. Wyniki pomiarów wypukłości i chropowatości bieżni pomocniczej przedstawiono na rysunkach 94÷95.



Rys. 94. Zarys bieżni pomocniczej wraz z wartością wypukłości po szlifowaniu



Rys. 95. Wynik pomiaru chropowatości bieżni pomocniczej po szlifowaniu

5.5.2.4. Doglądać bieżnię i bieżnię pomocniczą

Czwartą operacją dla pierścienia wewnętrznego kołnierzewego jest operacja doglądania bieżni głównej i pomocniczej. Bazami dla tej operacji są powierzchnie czoła [C] oraz średnica zewnętrzna służąca do mocowania pierścienia ABS [D]. Podczas tej operacji doglądane są obie bieżnie jednocześnie. Przebieg procesu doglądania oraz parametry skrawania zostały opisane w karcie operacyjnej (rys. 96). Operacja doglądania prowadzona jest na obrabiarce RIFA 3MZA3316 (rys. 97). Obrabiarka została zakupiona według opracowanych przez FŁT Kraśnik warunków technicznych do zamówienia maszyn WTO-1258. Obrabiarka ta posiada dwa stanowiska obróbcze, z których pierwsze służy do doglądania bieżni głównej, a drugie do doglądania bieżni pomocniczej. Do operacji tej użyte będą dwa pilniki firmy Darmann o charakterystyce FA600-150FV51S.

Po ustawieniu obrabiarki zgodnie z wytycznymi zawartymi w karcie operacyjnej, przeprowadzono operację doglądania pierścienia. Uzyskany zarys poddano kontroli pod kątem zgodności z wymaganiami wymiarowymi określonymi w karcie. Wyniki pomiarów okrągłości, wypukłości i chropowatości bieżni głównej i pomocniczej przedstawiono na rysunkach 98÷102.

PBF		Wydział: P-9	Obrabiarka: 3MZA3316	KARTA OPERACYJNA		Nr karty:
Sprawdzany parametr		Narzędzia pomiarowe		Dokument rejestracyjny	Nazwa części: Pierścień wewnętrzny z kołnierzem	Indeks części:
Oznaczenie	Wymiar	Cecha		Częstotliwość pomiarów	Typ detalu:	
dBS	$\emptyset 58,754 \pm 0,013$ $-0,025$	S NRP-17 SCHEMAT		0	ZPS-001A	S015
h_dBS	25,403	P JAC-14		1		
VdBSsp	0.003	K MRH-675		1		
NB	$+0,002$ $-0,002$	K JCP-995		1		
SdB	0.008	K JCP-993		1		
KF	17,0°	K JCP-1000		1		
L_KF	8,0	K JCK-1801		1		
h1_KF	21,403	K JCK-1801		1		
h2_KF	29,403	K JDD-415		1		
a	19,089 $\pm 0,007$ $-0,007$	S NRP-13 SCHEMAT		0		
Sip	0,012	P JAC-14		1		
Nbp	$\pm 0,003$	K MRH-675		1		
L_KB	2,0	K JCP-1008		1		
KB	17,43° 28"	K JCP-993		1		
PB	0,006 $\pm 0,012$	K JCP-1000		1		
Z3	2.0	K JCK-1801		1		
W5	0.3	K JDD-415		1		
Ra	0.1	M MHCC-XX		0		
PBp	0,000 $\pm 0,002$	M MHCC-XX		0		
Ra1	0.2	M MHCC-XX		0		
dBM	$\emptyset 58,754 \pm 0,009$ $-0,029$	S NRP-5 SCHEMAT		0		
h_dBM	22,887	K JAC-14		1		
VdBMsp	0.003	K MRH-675		1		
aM	29,201 $\pm 0,014$ $-0,014$	K JCP-995		1		
Przypolenia szlifierskie	NIEDOPUSZCZALNE	K JCP-1000		1		
Ocena wzrokowa doglądania	Wymagana jednolita powierzchnia bieżni bez śladów poprzedniej obróbki.	K JCK-1801		1		
Parametry skrawania: wg załącznika dla So-13192		K JDD-400		1		
Nadadek na $\emptyset$ bieżni		mm		0.010		
Nadadek na $\emptyset$ bieżni pomocniczej		mm		0.000		
Czas maszynowy		[min./szt]		0.916 (55s)		
Symbol zmiany		Nr KZT		Treść zmiany		Podpis
Spracował, data i podpis:		Sprawdził, data i podpis:		Opzr. pomiarowe, data i podpis:		

Rys. 96. Karta operacyjna obróbki ścierniej. Operacja – doglądać bieżnię i bieżnię pomocniczą



a

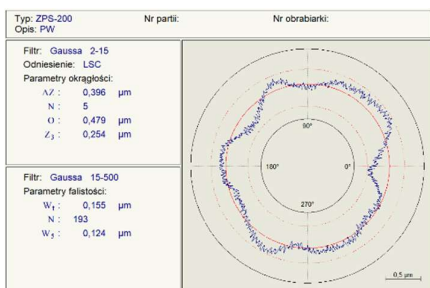


b

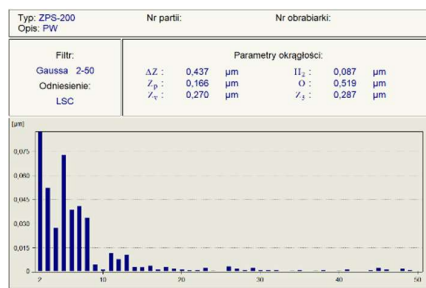


c

Rys. 97. Obrabiarka RIFA 3MZA3316: a) pulpita, b) widok strefy obróbczej bieżni głównej - głowica oscylacyjna wraz z osłką, opór, podpory, c) widok strefy obróbczej bieżni pomocniczej - głowica oscylacyjna wraz z osłką, opór, podpory, rolka kondycjonująca osłkę

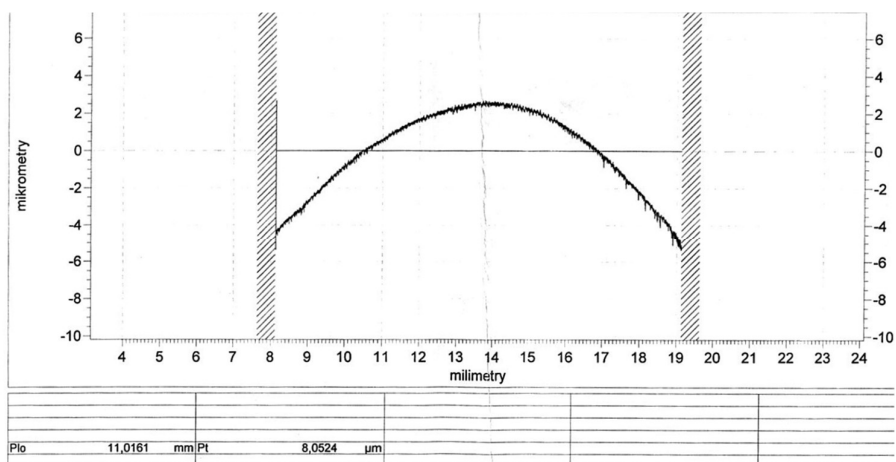


a

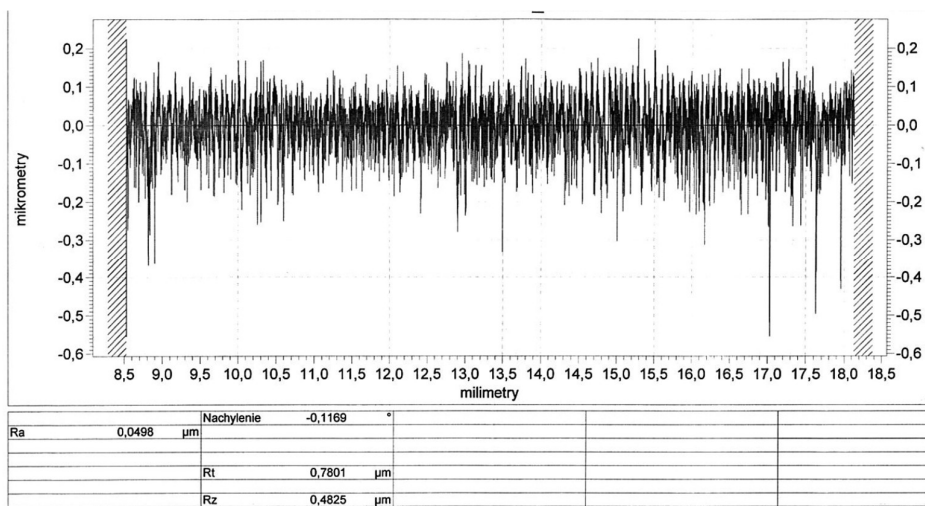


b

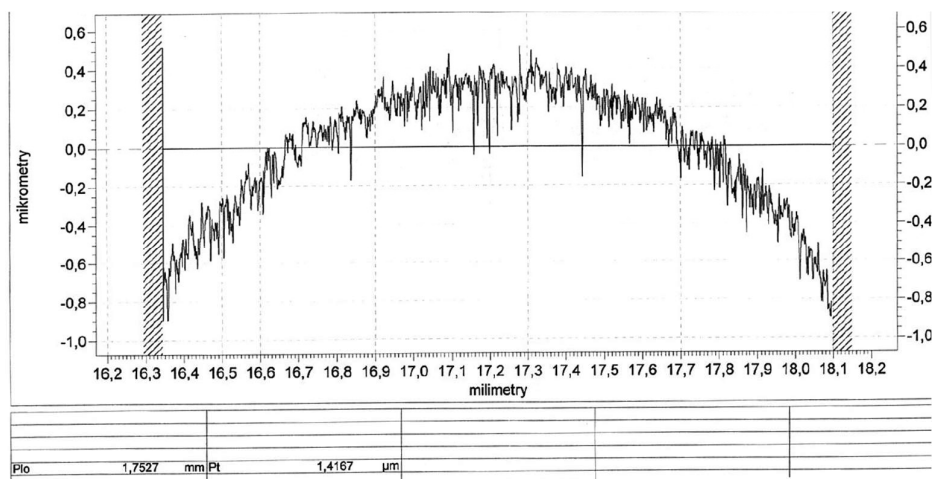
Rys. 98. Wynik pomiaru okrągłości bieżni po dogłębieniu: a) profil okrągłości powierzchni bieżni po dogłębieniu wraz z parametrami okrągłości i falistości, b) analiza harmoniczna profilu okrągłości bieżni po dogłębieniu (maksimum w paśmie 21 ± 1 harmonicznej jest niedopuszczalne)



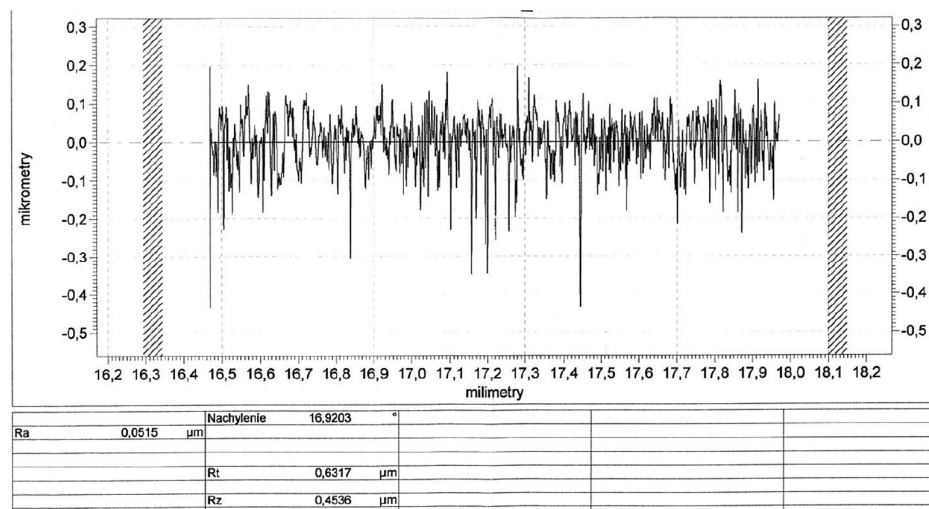
Rys. 99. Zarys bieźni głównej wraz z wartością wypukłości po dogłazaniu



Rys. 100. Wynik pomiaru chropowatości bieźni głównej po dogłazaniu



Rys. 101. Zarys bieżni pomocniczej wraz z wartością wypukłości po dogładzaniu



Rys. 102. Wynik pomiaru chropowatości bieżni pomocniczej po dogładzaniu

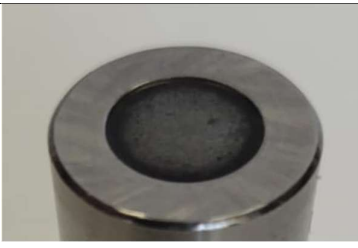
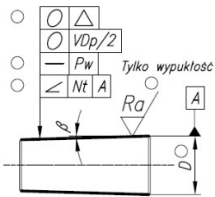
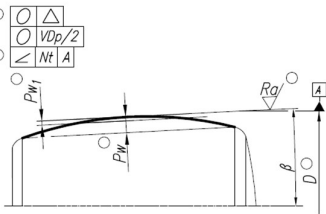
5.5.3. Obróbka wałeczka stożkowego

Wałeczek stożkowy stosowany w zespolonej piaście trzeciej generacji nie różni się konstrukcyjnie od elementów stosowanych w klasycznych łożyskach stożkowych. Dla danego zespołu łożysko-piasty dopuszczalny rozrzut średnic wałeczków w jednym łożysku nie może przekraczać 0,002 mm, co ma na celu zapewnienie wysokiej jednorodności współpracy elementów tocznych.

Proces wytwarzania wałeczków realizowany jest z wykorzystaniem standardowej technologii stosowanej w FŁT Kraśnik dla elementów tocznych o porównywalnych wymiarach oraz wymaganiach jakościowych. Produkcja odbywa się na zautomatyzowanej linii szlifierskiej przeznaczonej do obróbki wałeczków stożkowych. Poniżej przedstawiono kolejność operacji procesu technologicznego obróbki szlifierskiej wałeczka stożkowego ZPS-001A opisanego w karcie TPO Wz-00904 (tabela 11).

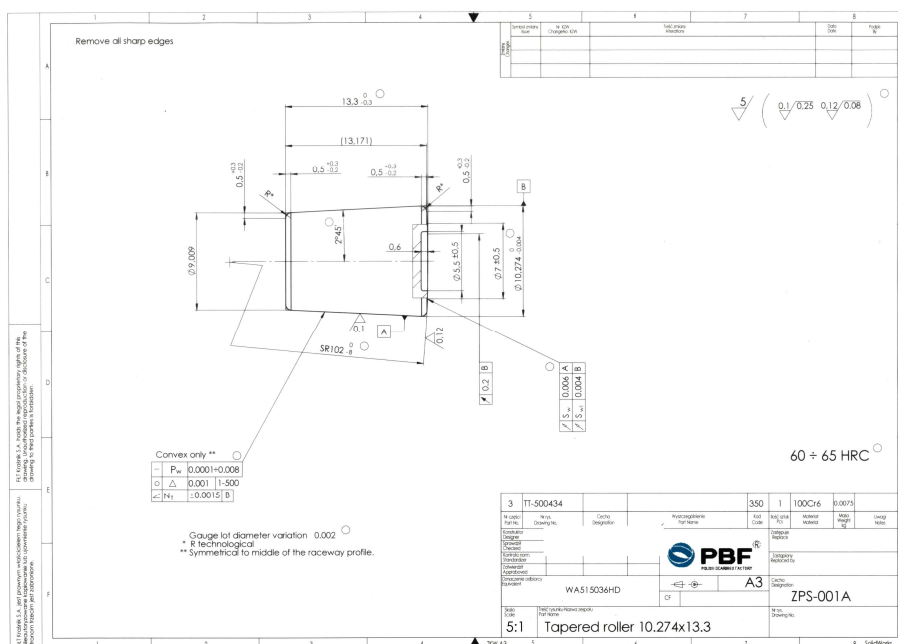
Tabela 11. Technologiczny przebieg obróbki szlifierskiej wałeczka stożkowego ZSPS-001A

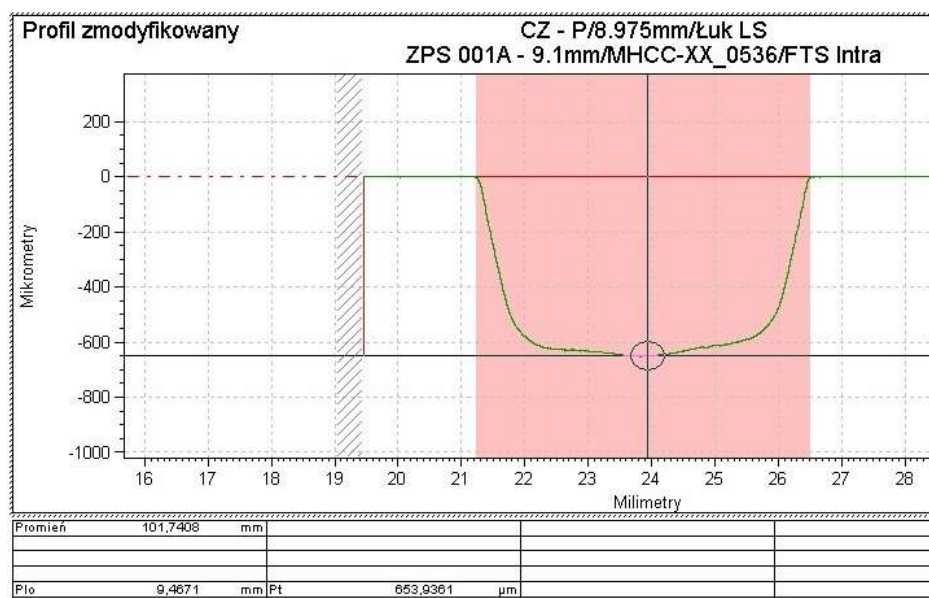
Nazwa operacji	Szkic	Nazwa stanowiska/zdjęcie
Szlifowanie średnicy zgr. (I przejście) Wo-06785		SWaAKM-25/M
Szlifowanie średnicy zgr. (II przejście) Wo-06683		SWaAKM-25/M
Szlifowanie czoła sferycznego Wo-06684		SWC-30

Kontrola wzrokowa powierzchni czoła sferycznego Wo-06685		Stanowisko do kontroli wzrokowej 
Szlifowanie średnicy wyk. Wo-06686		SWaAKM-25/M 
Dogładzanie Wo-06687		SM-468 
Kontrola wzrokowa powierzchni tocznej Wo-06688		Stanowisko do kontroli wzrokowej 
Pakowanie Wo-06689		AKC-29 

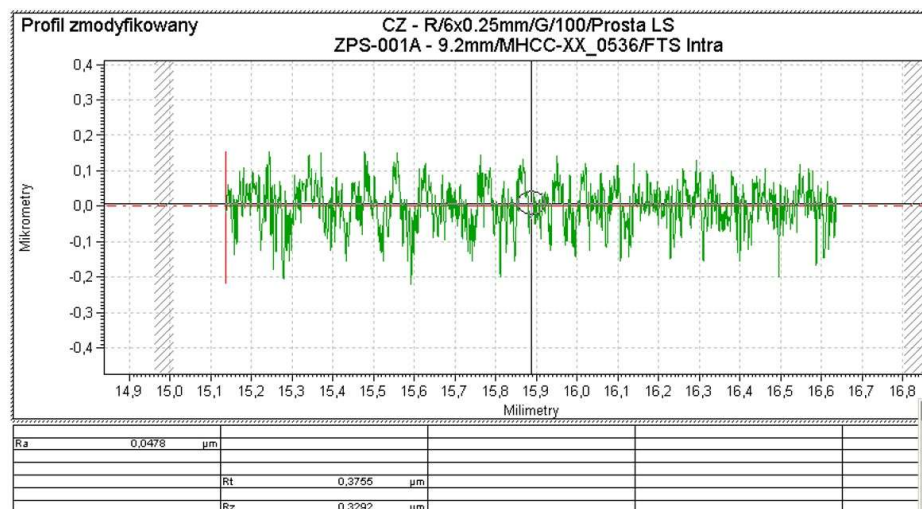
Proces został opracowany na podstawie analizy PFMEA, która z kolei została sporządzona w oparciu o identyfikację potencjalnych błędów procesu w kontekście wytwarzania wyrobu zgodnego z dokumentacją techniczną. Rysunek techniczny wałeczka stożkowego, stanowiącego element zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji, przedstawiono na rysunku 103.

Kluczową operacją kształtującą ostateczną geometrię powierzchni czoła sferycznego wałeczka stożkowego jest obróbka realizowana na obrabiarce typu SWC-30, zgodnie z kartą technologiczną Wo-06684. Do istotnych parametrów kontrolowanych w trakcie tej operacji należą między innymi: promień powierzchni czoła sferycznego ($SR = 102_{-8}$) oraz chropowatość powierzchni ($Ra \leq 0,12$). Wyniki pomiarów obu parametrów przedstawiono na rysunkach 104 oraz 105.



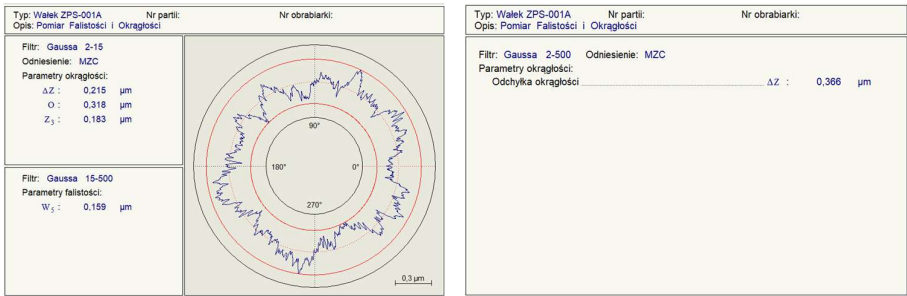


Rys. 104. Wynik pomiaru promienia czoła sferycznego wałeczka stożkowego ZPS-001A

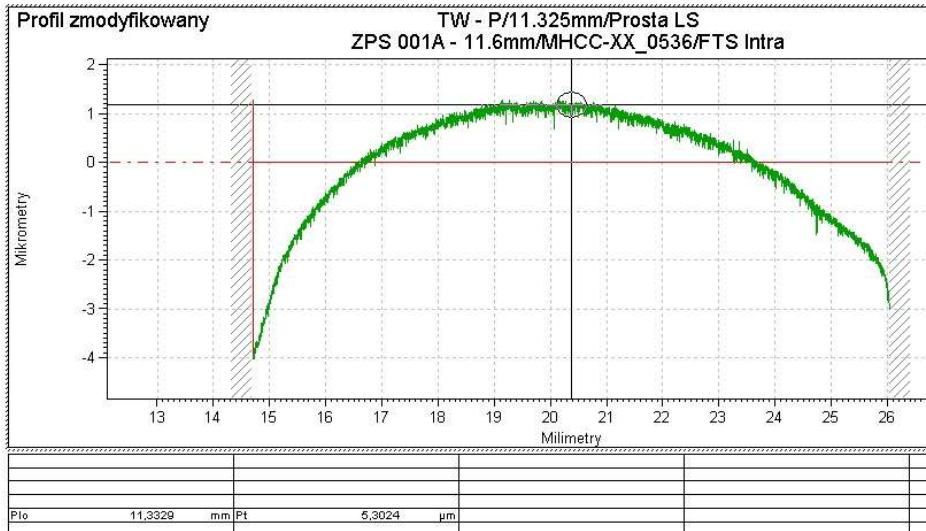


Rys. 105. Wynik pomiaru chropowatości czoła sferycznego wałeczka stożkowego ZPS-001A

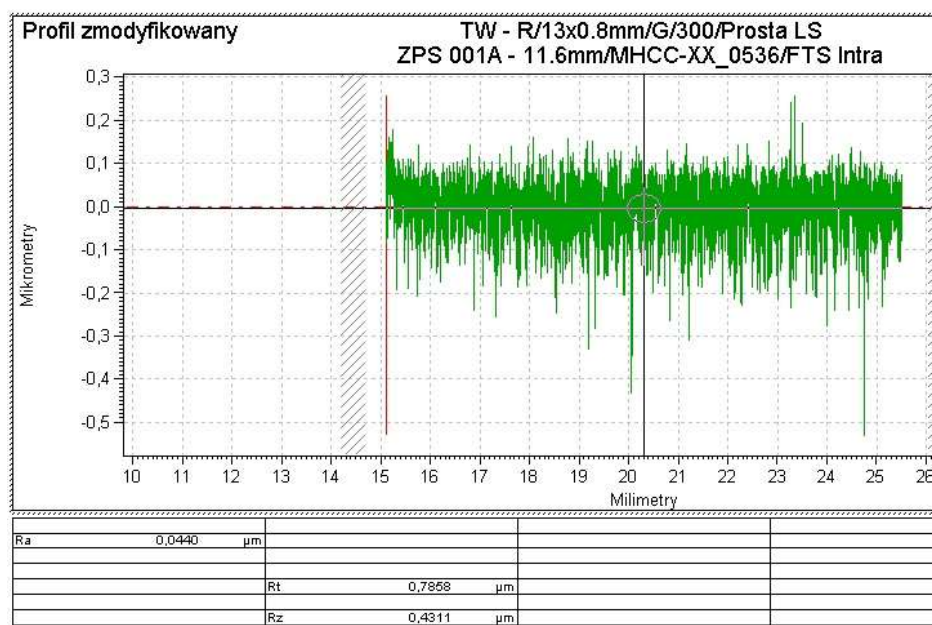
Operacjami, które nadają ostateczny kształt powierzchni tocznej są operacje szlifowania średnicy wyk. wg Wo-06686 oraz dogładzania wg Wo-06687. Podczas tych operacji uzyskiwane są ostateczne wartości średnicy (wałeczki są w grupach selekcyjnych co 0,002 mm), kąta powierzchni tocznej, okrągłości (rys. 106), wypukłości (rys. 107) i chropowatości (rys. 108).



Rys. 106. Wynik pomiaru okrągłości wałeczka stożkowego ZPS-001A



Rys. 107. Zarys tworzącej wałeczka stożkowego ZPS-001A wraz z wartością wypukłości po dogładzaniu



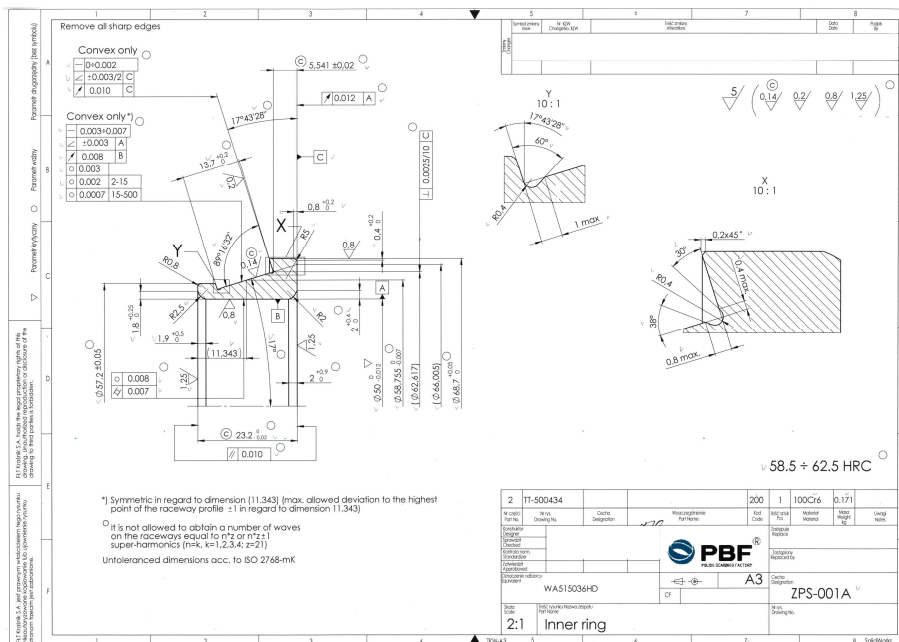
Rys. 108. Wynik pomiaru chropowatości tworzącej wałeczka stożkowego ZPS-001A

5.5.4. Pierścień wewnętrzny

W związku z minimalizacją kosztów produkcji, zdecydowano się na zakup pierścienia wewnętrznego gotowego do montażu. Podczas procesu uzgadniania warunków technicznych zezwolono na zmiany wymiarowe, które naniesiono na rysunek pierścienia. Zmiany dotyczyły między innymi wymiaru położenia i tolerancji bieżni pomocniczej oraz tolerancji szerokości pierścienia wewnętrznego. Wymiar położenia bieżni pomocniczej miał wartość $Lop2=17659\pm0,005$ mm, a mierzony był od małego czoła pierścienia. Po zmianie wymiaru położenia bieżni mierzony jest od dużego czoła i wynosi on $Lop2=5,541\pm0,02$ mm. Tolerancja szerokości pierścienia została zmniejszona z 0,04 mm do 0,02 mm. Rysunek 109 przedstawia pierścień wewnętrzny stożkowy ZPS-001A.

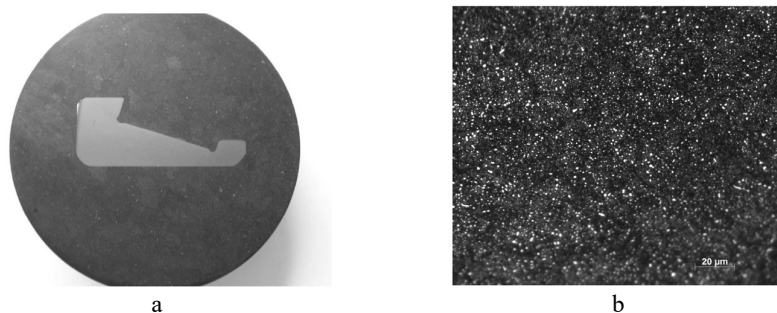
Każda dostawa materiału do FŁT Kraśnik jest sprawdzana pod kątem wymagań wymiarowych oraz materiałowych. Wynik badania materiałowego na sprawdzenie na zgodność z wymaganiami WTO-1057 oraz rysunku 109 przedstawiono poniżej. Do badań dostarczono zainkcludowaną próbkę pierścienia wewnętrznego ZPS-001A (rys. 110a). Na próbce dokonano pomiaru twardości w kilku punktach metodą Vickersa HV1. Twardość próbki wyniosła $742\div749$ HV. Wg rysunku TT-500436

wymagana twardość pierścienia to $58,5 \div 62,5$ HRC (co odpowiada wg tablic twardości $665 \div 760$ HV).



Rys. 109. Rysunek konstrukcyjny pierścienia wewnętrznego stożkowego zespolonej pałsty łożyskowej trzeciej generacji

Mikrostruktura pierścienia pod względem jakości martenzytu, rozłożenia i dyspersji węglików była zgodna z wymogami warunków technicznych. Wynik oceny przedstawiono w tabeli 12, a wygląd mikrostruktury na rysunku 110b.



Rys. 110. Pierścień wewnątrz stożkowy ZPS-001A: a) zainkludowana próbka, b) wygląd mikrostruktury

Próbkę poddano ocenie maksymalnych wtrąceń niemetalicznych oraz sprawdzono na spektrometrze gatunek materiału, który odpowiadał stali łożyskowej 100Cr6. Uzyskany wynik analizy składu chemicznego zestawiono w tabeli 13.

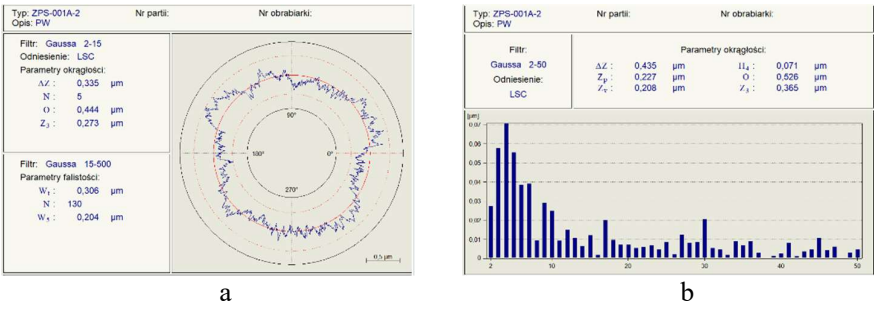
Tabela 12. Wynik oceny mikrostruktury

Parametr mikrostruktury	Wyniki oceny mikrostruktury
Martenzyt	4
Dyspersja węglików	4,4a
Siatka węglików	5,0
Segregacja węglików	6,0
Pasmowość węglików	7,1
Zawartość troostytu	nie stwierdzono

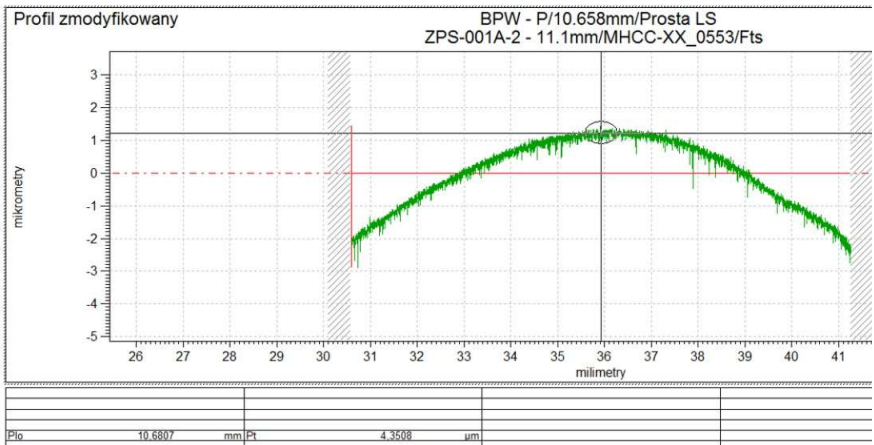
Tabela 13. Wyniki analizy składu chemicznego próbki pierścienia wewnętrznego

Pierwiastek	Wyniki analizy składu chemicznego próbki pierścienia wewnętrznego [%]
Węgiel (C)	0,99
Krzem (Si)	0,19
Mangan (Mn)	0,32
Chrom (Cr)	1,46
Fosfor (P)	0,002
Siarka (S)	0,011
Nikiel (Ni)	0,02
Molibden (Mo)	0,001
Miedź (Cu)	0,01
Aluminium(Al)	0,011
Tytan (Ti)	0,0014

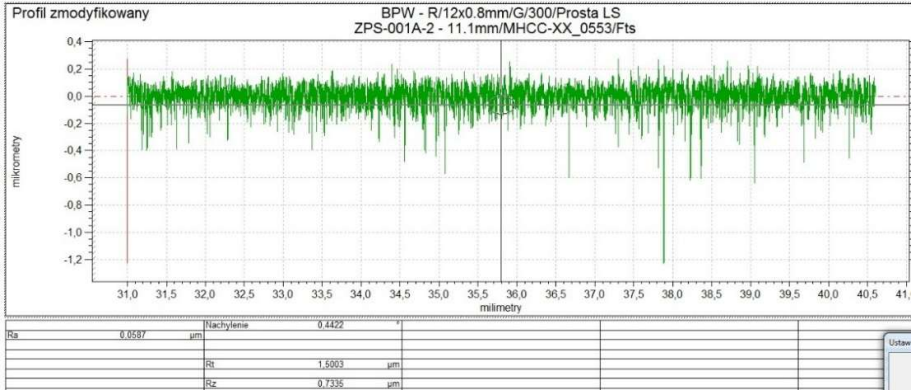
Wyniki pomiarów okrągłości, wypukłości i chropowatości bieżni głównej i pomocniczej przedstawiono na rysunkach 111÷115.



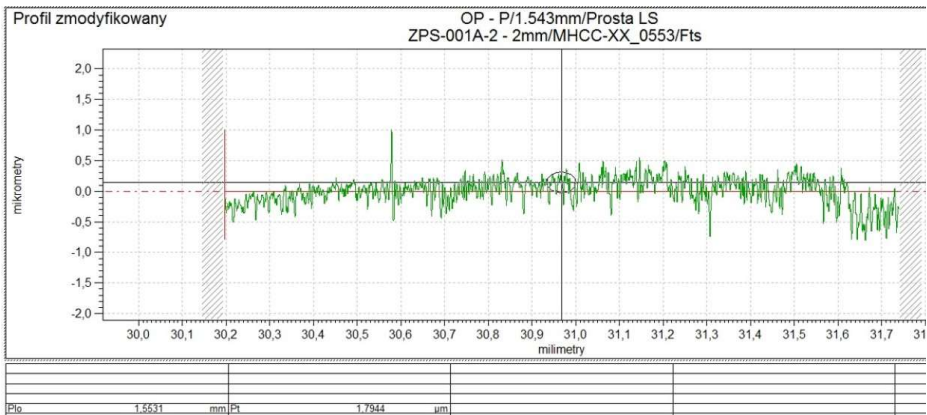
Rys. 111. Wynik pomiaru okrągłości bieżni, a) profil okrągłości powierzchni bieżni wraz z parametrami okrągłości i falistości, b) analiza harmoniczna profilu okrągłości bieżni (maksimum w paśmie 21 ± 1 harmonicznej jest niedopuszczalne)



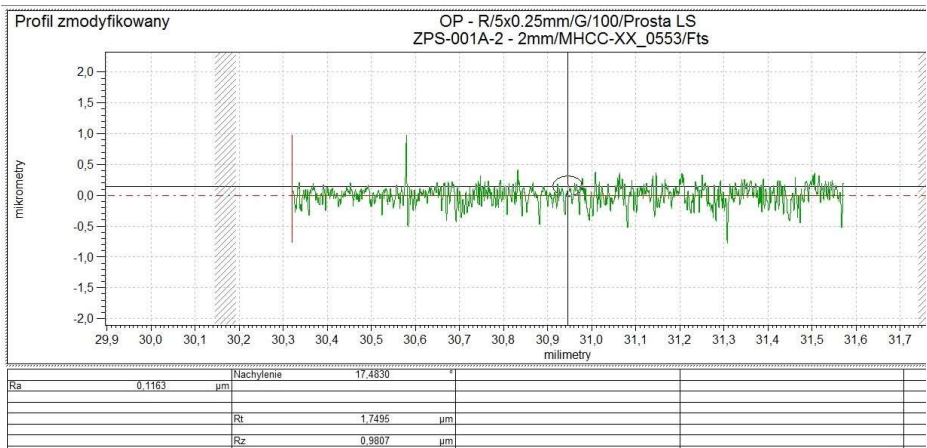
Rys. 112. Zarys bieżni głównej wraz z wartością wypukłości



Rys. 113. Wynik pomiaru chropowatości bieżni głównej



Rys. 114. Zarys bieżni pomocniczej wraz z wartością wypukłości



Rys. 115. Wynik pomiaru chropowości bieżni pomocniczej

5.6. Linia montażowa

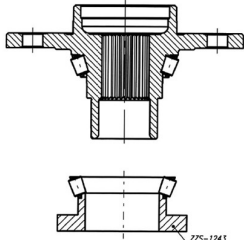
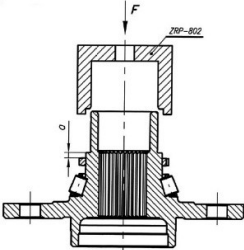
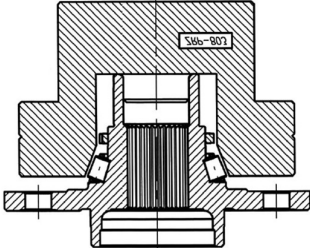
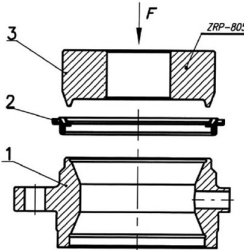
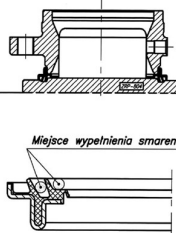
Linia montażowa, przeznaczona do montażu piasty łożyskowej trzeciej generacji, stanowi kluczowy element procesu produkcyjnego, wymagającego wysokiej precyzji, niezawodności oraz pełnej powtarzalności operacji. W odpowiedzi na rosnące wymagania jakościowe oraz konieczność optymalizacji kosztów, podjęto decyzję o zakupie nowoczesnych maszyn montażowych, umożliwiających automatyzację procesu oraz zapewniających kontrolę kluczowych parametrów montażowych. Kluczowymi operacjami w procesie montażu piasty łożyskowej są m.in. zawalcowanie

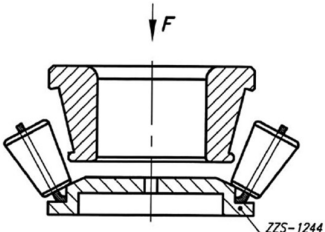
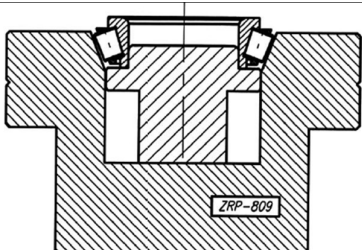
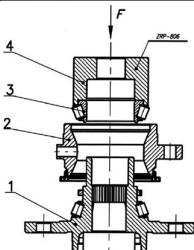
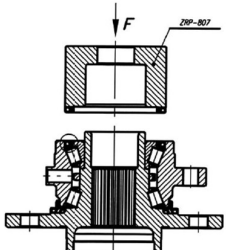
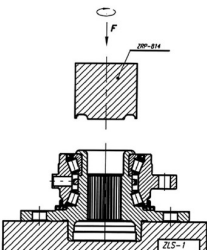
Do innych istotnych etapów montażu należą: stuprocentowa kontrola luzu wzdłużnego zespołu łożyskowego, montaż szpilek mocujących oraz instalacja i kontrola działania czujnika ABS. Każda z tych operacji ma krytyczne znaczenie dla poprawnego funkcjonowania zespołu piasty w warunkach eksploatacyjnych oraz dla spełnienia wymagań jakościowych i bezpieczeństwa w układzie jezdny pojazdu.

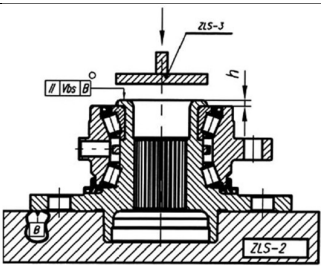
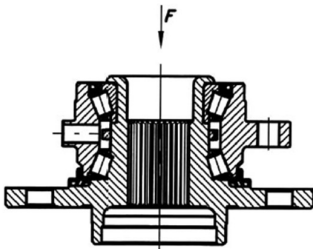
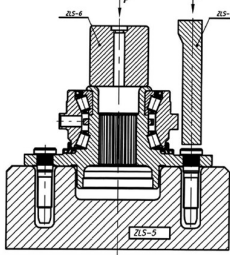
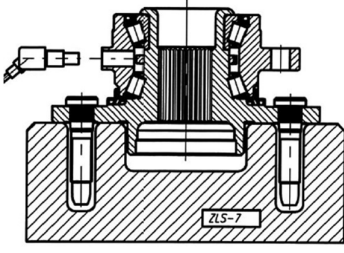
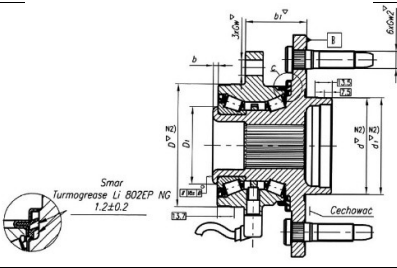
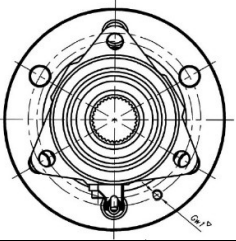
Jednym z głównych celów wdrożenia nowej linii było całkowite wyeliminowanie operacji selekcji pierścieni łożyskowych, która podnosiłaby koszty jednostkowe, a także wprowadzała zmienność i dezorganizację w przebiegu procesu montażu. Selekcję pierścieni łożyskowych wyeliminowano poprzez zastosowanie zasady zamienności częściowej, która pozwala na uzyskanie wymaganych parametrów montażowych bez konieczności indywidualnego dopasowywania komponentów. Rozwiązanie to znacząco uprościło proces, zwiększyło jego efektywność i przyczyniło się do poprawy jakości gotowego wyrobu. Technologiczny przebieg montażu opisano w karcie Mz-02785 i składa się on z następujących operacji przedstawionych w tabeli 14.

Tabela 14. Technologiczny przebieg montażu zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji ZSPS-001A

Nazwa operacji	Szkic	Nazwa stanowiska/ zdjęcie
Myć pierścienie Znakować pierścienie wewnętrzne kołnierze Mo-09693		APZ-12 

Montaż koszyka z wałeczkami na pierścień kołnierowy Mo-09694		Stół 
Wcisnąć pierścień impulsowy ABS Mo-09695		PXBc 
Smarować podzespół wewnętrzny z kołnierzem Mo-09696		UBC-6 
Wcisnąć uszczelkę na pierścień zewnętrzny Mo-09697		PXBc 
Smarować uszczelkę Mo-09698		UBC-6 

Montować pod- zespół we- wnętrzny Mo-09699		Stół 
Smarować pod- zespół we- wnętrzny Mo-09700		UBC-6 
Kompletować piastę Mo-09701		ACB-17 
Wcisnąć uszczelkę z od- rzutnikiem Mo-09702		PXBc 
Zawalcować koł- nierz Mo-09703 Urządzenie zaku- powe		YHBT-III-OFECT-A 

Sprawdzić wysokość oraz jakość zawalcowania kołnierza Mo-10165 Urządzenie zakupowe		YHBT-III-OFECT-A 
Sprawdzić luz osiowy Mo-09704 Urządzenie zakupowe		YHBT-III-NT-A 
Wcisnąć szpilki Mo-09705 Urządzenie zakupowe		YHBT-III-BP-A 
Wmontować czujnik ABS. Sprawdzić poprawność działania czujnika Mo-09706 Urządzenie zakupowe		YHBT-III-ST-A 
Kontrola ostateczna łożysk Mk-01100		

5.7. Wnioski

Opracowanie procesu technologicznego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji stanowiło istotny etap rozwoju technologicznego FŁT Kraśnik, ponieważ dotychczas tego typu wyrób nie był produkowany przez zakład. Wdrożenie nowego produktu wymagało opracowania dedykowanej technologii obróbki, adaptacji parku maszynowego oraz doboru odpowiednich parametrów procesowych. Zastosowanie dedykowanych metod pomiarowych oraz standardu IATF 16949 pozwoliło na zapewnienie wysokiej dokładności geometrycznej oraz powtarzalności wytwarzania. Uzyskane wyniki potwierdzają, że FŁT Kraśnik jest zdolne do realizacji złożonych procesów wytwórczych zgodnych z wymaganiami przemysłu motoryzacyjnego. Wdrożony proces technologiczny pozwolił nie tylko na osiągnięcie wysokiej dokładności geometrycznej i funkcjonalnej wyrobu, ale także na zwiększenie elastyczności produkcji oraz rozszerzenie portfolio FŁT Kraśnik o nowoczesne produkty odpowiadające aktualnym potrzebom rynku motoryzacyjnego.

ROZDZIAŁ VI

BADANIA STATYSTYCZNE

Wszystkie pomiary niezbędne do oceny wskaźników zdolności maszyn oraz przyrządów pomiarowych przeprowadzono w warunkach rzeczywistych, bezpośrednio na hali produkcyjnej. Pomiarów dokonywali pracownicy wydziału produkcyjnego odpowiedzialni za obsługę maszyn i urządzeń, wykorzystywanych w procesie wytwarzania pierścieni zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji. Wszystkie obliczenia statystyczne, obejmujące wyznaczenie wskaźników zdolności procesu, jak również analizę normalności rozkładów przy zastosowaniu testu Andersona-Darlinga, przeprowadzono z przyjęciem poziomu istotności $\alpha=0,05$, odpowiadającego przedziałowi ufności 95%. Do analizy wykorzystano oprogramowanie statystyczne MINITAB.

Ze względu na fakt, iż wszystkie maszyny wchodzące w skład linii szlifierskiej zostały pozyskane w drodze zakupu, zdecydowano się na wyznaczenie wartości tolerancji dla poszczególnych operacji technologicznych w oparciu o wyniki próbnej eksploatacji maszyn.

Badanie zdolności maszyny nawet w przypadku braku znanych tolerancji, jest możliwe do przeprowadzenia przy założeniu znanego wymiaru nominalnego oraz zastosowaniu odpowiednich statystycznych metod oceny zmienności procesu. Celem takiego badania jest oszacowanie, czy maszyna jest zdolna do stabilnej i powtarzalnej produkcji elementów mieszczących się w założonym przedziale tolerancji, który zostanie dobrany na podstawie wyników pomiarów w taki sposób, aby współczynniki zdolności maszyny C_m i C_{mk} przekraczały wartość referencyjną 1,67. Współrzędne środków pól tolerancji zostały obliczone (patrz rozdział 4.6), natomiast tolerancje (górną i dolną granicę) nie zostały jeszcze określone. W takim przypadku zastosowano tzw. odwrócone podejście do analizy zdolności maszyny – tolerancje są projektowane na podstawie wyników próbki produkcyjnej, przy jednoczesnym uwzględnieniu wymagań dotyczących minimalnych wartości wskaźników zdolności.

Przebieg badania przedstawia się w następujący sposób:

- pobranie próbki - wykonanie próbki o liczności $n=50$,
- obliczenia statystyczne - oblicza się średnią arytmetyczną $\bar{x}$ i odchylenie standardowe s . Ustala się minimalne wymagania dla współczynników zdolności:

$$Cm = \frac{T}{6s} \geq 1,67 \quad (51)$$

$$Cmk = \min[(USL - \bar{x}) / 3s; (\bar{x} - LSL) / 3s] \geq 1,67 \quad (52)$$

- dobór tolerancji - na podstawie obliczonego s i $\bar{x}$, wyznacza się wstępną szerokość tolerancji:

$$T = 6s \cdot 1,67 \quad (53)$$

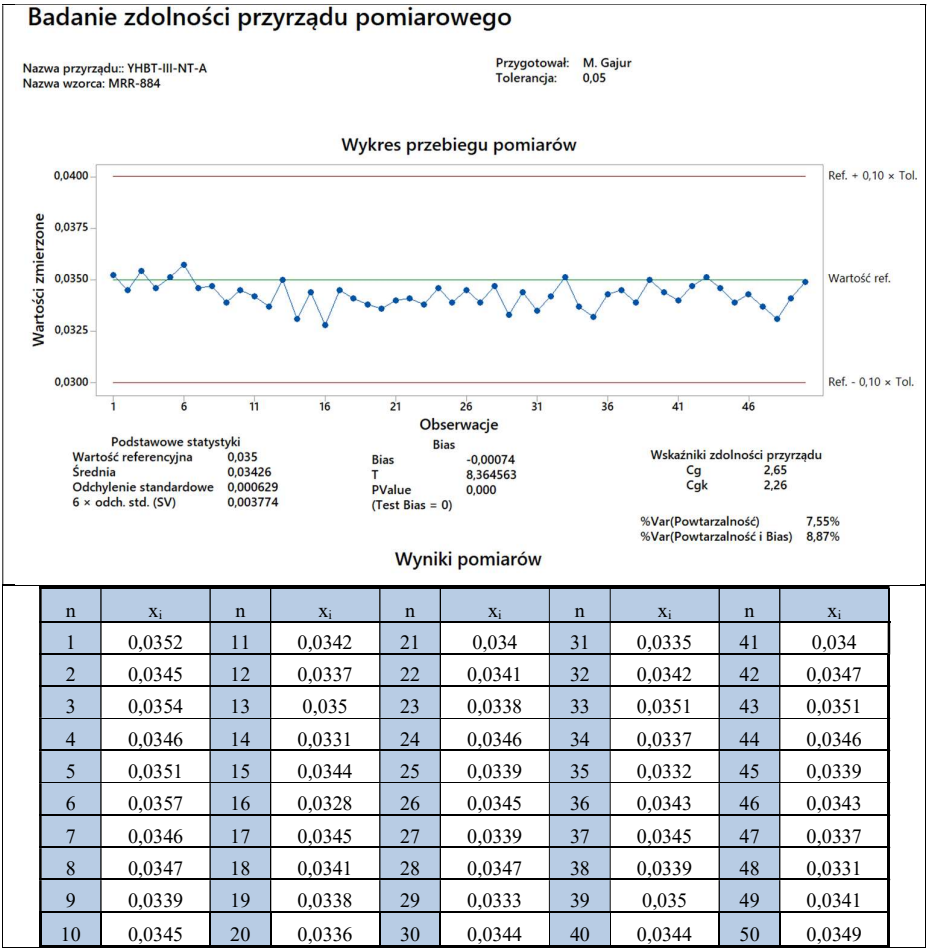
Uwzględniając niewyśrodkowanie ($\Delta = |\bar{x} - Mx|$; gdzie Mx - środek obszaru zmienności), wyznacza się wartość tolerancji:

$$T = 2 \cdot (3s \cdot Cmk + \Delta) \quad (54)$$

- Walidacja wyników - po ustaleniu granic tolerancji należy obliczyć współczynniki Cm i Cmk w odniesieniu do obliczonych granic i zweryfikować, czy spełniony jest warunek $Cm; Cmk \geq 1,67$. Dodatkowo należy przeanalizować histogram wyników oraz przeprowadzić test normalności, aby upewnić się, że założenia dotyczące rozkładu danych są spełnione.

Metoda ta pozwala na oszacowanie zdolności maszyny przy braku z góry ustalonych tolerancji, pod warunkiem odpowiednio dużej próbki i przyjęcia rygorystycznych kryteriów dla współczynników zdolności. Uwzględnienie niewyśrodkowania umożliwia precyzyjne dopasowanie tolerancji do rzeczywistych możliwości maszyny, minimalizując ryzyko produkcji wyrobów poza wymaganiami jakościowymi. Tym samym proces ten może być stosowany, szczególnie na etapie uruchamiania nowej maszyny lub procesu technologicznego, a także przy walidacji stabilności i powtarzalności produkcji w środowisku przemysłowym.

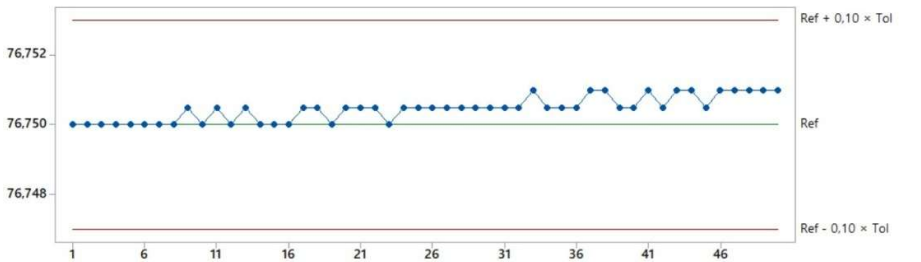
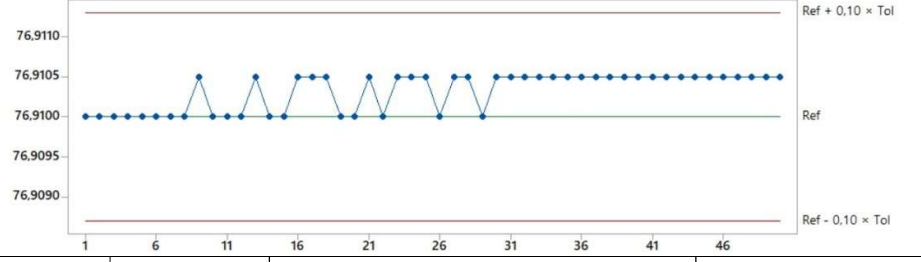
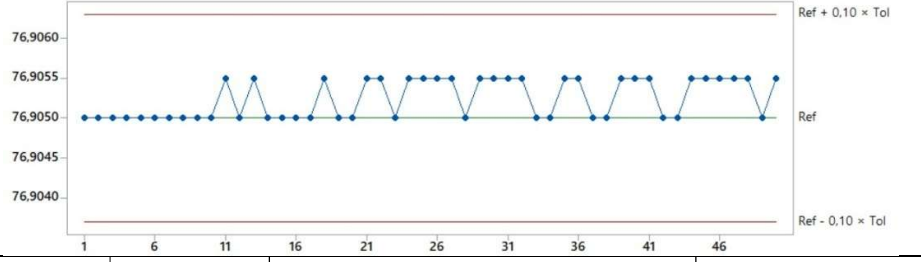
W pierwszej kolejności konieczne jest jednak przeprowadzenie analizy zdolności systemu pomiarowego, a także sporządzenie budżetu niepewności pomiarowej. Tylko wiarygodny i zwalidowany system pomiarowy zapewnia, że wyznaczone współczynniki zdolności maszyn odnoszą się do rzeczywistych właściwości procesu, a nie do błędów metrologicznych.

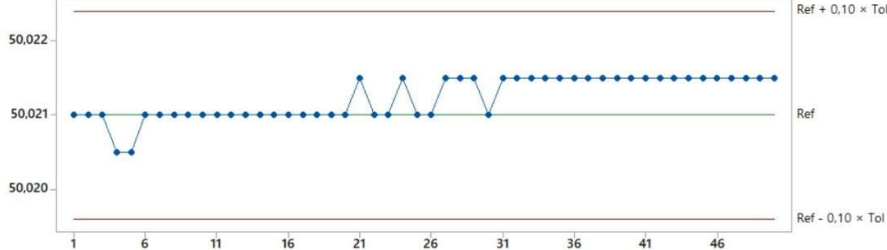
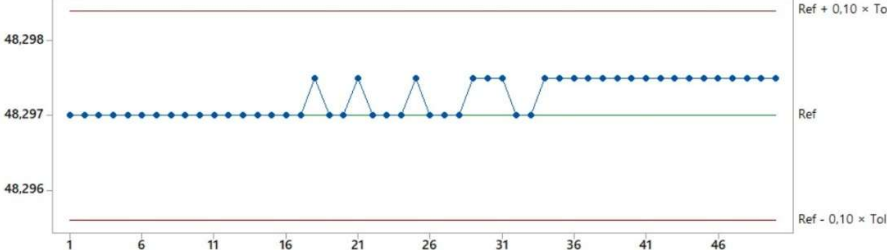
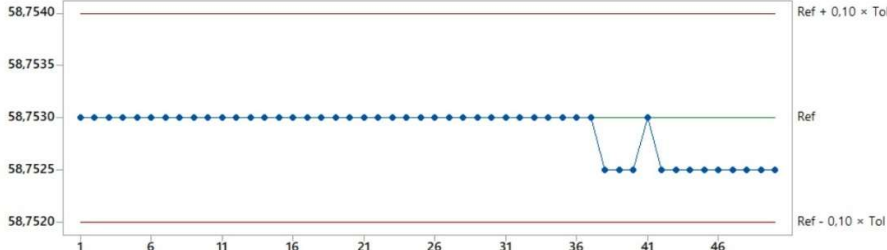


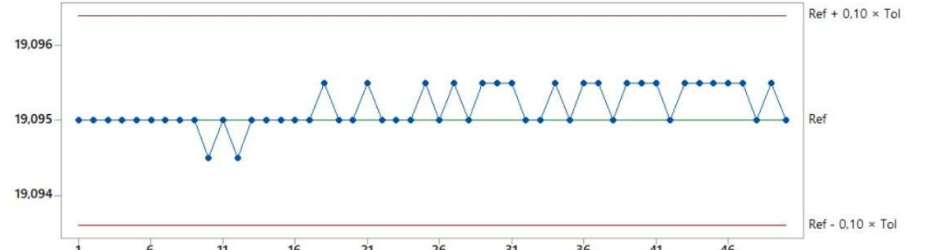
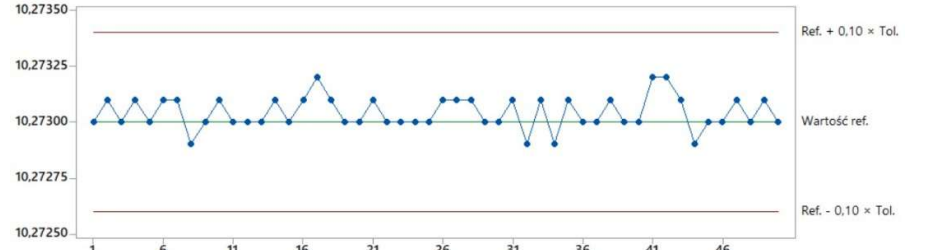
Rys. 117. Raport z badania zdolności przyrządu pomiarowego

Tabela 15. Skrócone wyniki badania zdolności przyrządów pomiarowych

Raport z badania zdolności przyrządu pomiarowego		Tolerancja		0,020
Nazwa przyrządu	MG-122	Mikrokator	Millimess 1000A	
Nazwa wzorca	MRB-519	Wartość referencyjna	90,021	
Średnia	90,02056	Odchylenie std.	0,00031	
Bias	-0,00044	Kryterium oceny	Cgk ≥ 1,33	

			
Cg	2,76	%Var (Powtarzalność)	7,24%
Cgk	2,34	%Var (Powtarzalność i Bias)	8,55%
Raport z badania zdolności przyrządu pomiarowego		Tolerancja	0,013
Nazwa przyrządu	MG-142	Mikrokator	Millimess 1000A
Nazwa wzorca	MRD-881	Wartość referencyjna	76,910
Średnia	76,91032	Odchylenie std.	0,00024
Bias	0,00032	Kryterium oceny	Cgk $\geq$ 1,33
			
Cg	1,79	%Var (Powtarzalność)	11,19%
Cgk	1,35	%Var (Powtarzalność i Bias)	14,84%
Raport z badania zdolności przyrządu pomiarowego		Tolerancja	0,013
Nazwa przyrządu	MG-142	Mikrokator	Millimess 1000A
Nazwa wzorca	MRD-881	Wartość referencyjna	76,905
Średnia	76,90524	Odchylenie std.	0,00025
Bias	0,00024	Kryterium oceny	Cgk $\geq$ 1,33
			
Cg	1,72	%Var (Powtarzalność)	11,65%
Cgk	1,40	%Var (Powtarzalność i Bias)	14,28%
Raport z badania zdolności przyrządu pomiarowego		Tolerancja	0,014
Nazwa przyrządu	MG-551	Mikrokator	Millimess 1000A

Nazwa wzorca	MRH-675	Wartość referencyjna	50,021
Średnia	50,02123	Odchylenie std.	0,00029
Bias	0,00023	Kryterium oceny	$Cgk \geq 1,33$
			
Cg	1,61	%Var (Powtarzalność)	12,40%
Cgk	1,35	%Var (Powtarzalność i Bias)	14,84%
Raport z badania zdolności przyrządu pomiarowego		Tolerancja	0,014
Nazwa przyrządu	MG-551	Mikrokator	Millimess 1000A
Nazwa wzorca	MRH-675	Wartość referencyjna	48,297
Średnia	48,29723	Odchylenie std.	0,00025
Bias	0,00023	Kryterium oceny	$Cgk \geq 1,33$
			
Cg	1,85	%Var (Powtarzalność)	10,79%
Cgk	1,55	%Var (Powtarzalność i Bias)	12,91%
Raport z badania zdolności przyrządu pomiarowego		Tolerancja	0,010
Nazwa przyrządu	JAC-14	Mikrokator	Millimess 1000A
Nazwa wzorca	MRH-675	Wartość referencyjna	58,753
Średnia	58,75288	Odchylenie std.	0,00022
Bias	-0,00012	Kryterium oceny	$Cgk \geq 1,33$
			
Cg	1,55	%Var (Powtarzalność)	12,94%

Cgk	1,36	%Var (Powtarzalność i Bias)	14,71%
Raport z badania zdolności przyrządu pomiarowego		Tolerancja	0,014
Nazwa przyrządu	MG-551	Mikrokator	Millimess 1000A
Nazwa wzorca	MRH-675	Wartość referencyjna	19,095
Średnia	19,09517	Odchylenie std.	0,00028
Bias	0,00017	Kryterium oceny	Cgk $\geq$ 1,33
			
Cg	1,67	%Var (Powtarzalność)	11,94%
Cgk	1,47	%Var (Powtarzalność i Bias)	13,59%
Raport z badania zdolności przyrządu pomiarowego		Tolerancja	0,004
Nazwa przyrządu	MG-292+IBR-MECC	Czujnik indukcyjny	MDKA-GT2T
Nazwa wzorca	MRF-1201	Wartość referencyjna	10,273
Średnia	10,27304	Odchylenie std.	0,00007
Bias	-0,00004	Kryterium oceny	Cgk $\geq$ 1,33
			
Cg	1,82	%Var (Powtarzalność)	12,94%
Cgk	1,63	%Var (Powtarzalność i Bias)	14,71%

6.2. Budżet niepewności

Każdy prawidłowo wykonany pomiar powinien cechować się spójnością, wiarygodnością i użytecznością. Spójność pomiarowa zapewnia powiązanie wyniku pomiaru z odniesieniem, którym jest definicja jednostki miary.

Przewodnik "PKN-ISO/IEC Guide 99 Międzynarodowy słownik metrologii. Pojęcia podstawowe i ogólne terminy z nimi związane (VIM)" [N14] nie podaje definicji terminu: "*wiarygodny wynik pomiaru*". Pod tym terminem należy rozumieć, że

jest to taki wynik, w którego przedziale $x \pm U$ (gdzie: x – wartość wielkości zmierzona, U – niepewność pomiaru rozszerzona), znajduje się wartość wielkości prawdziwa, czyli jest to wynik, do którego można mieć zaufanie.

Za użyteczny wynik pomiaru uznajemy wynik, który może posłużyć do podjęcia określonej decyzji. Jedynie wyniki pomiarów wiarygodne i użyteczne mogą być podstawą wnioskowania o zgodności lub jej braku ze specyfikacją.

Niezbędnym elementem zapewnienia spójności, wiarygodności i użyteczności pomiaru jest rzetelne oszacowanie jego niepewności. Prawidłowe oszacowanie niepewności pomiaru związane jest z identyfikacją potencjalnych źródeł błędów, które będą wносиły największy udział do budżetu niepewności.

W języku polskim słowo "*niepewność*" oznacza brak pewności, wątpliwość i stąd w szerokim znaczeniu w metrologii można przyjąć, że "*niepewność pomiaru*" oznacza wątpliwość, co do wartości wyniku pomiaru.

Definicja formalna terminu "*niepewność pomiaru*" zawarta w PKN-ISO/IEC Guide 99:2010 jest następująca:

Niepewność pomiaru to nieujemny parametr charakteryzujący rozproszenie wartości wielkości przyporządkowany do menzurandu, obliczony na podstawie uzyskanej informacji.

W Przewodniku GUM zostały sformułowane założenia, że niepewność pomiaru utworzona jest z szeregu składowych, które można podzielić na dwie kategorie, w zależności od przyjętej metody obliczeniowej. Metoda typu *A* polega na analizie statystycznej serii obserwacji. Metoda typu *B* polega na analizie innej niż statystyczna, opartej na dostępnej wiedzy o pomiarze. Stosowane jest tu podejście probabilistyczne, polegające na przypisaniu określonego rozkładu prawdopodobieństwa i wyznaczeniu niepewności w postaci parametru takiego rozkładu, którym jest odchylenie standardowe. Łącząc niepewności standardowe obliczone metodami typu *A* i *B* zgodnie z zasadą składania wariancji, otrzymujemy niepewność złożoną. Powiększając niepewność złożoną o określony współczynnik otrzymujemy w wyniku niepewność rozszerzoną, którą można związać z wynikiem pomiaru.

Pierwszym niezbędnym krokiem podczas szacowania niepewności jest zbudowanie modelu pomiaru, który będzie jednoznacznie określał menzurand, czyli wielkość podlegającą pomiarowi. Przyjmuje się, że menzurand traktowany jako wielkość wyjściowa, opisywany jest za pomocą liniowej funkcji pomiaru w postaci:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (55)$$

Argumentami tej funkcji są wielkości wejściowe, stanowiące poszczególne składowe niepewności. Z każdą z takich składowych należy związać niepewność standardową, którą wyraża się za pomocą odchylenia standardowego. W przypadku zastosowania metody typu *A* jest to odchylenie standardowe eksperymentalne średniej, obliczane na podstawie próby losowej. W sytuacji braku możliwości, w konkretnym przypadku, wykonania serii obserwacji, istnieje możliwość zastosowania estymaty połączonej odchylenia standardowego, obliczonej na podstawie kilku serii wcześniej przeprowadzonych pomiarów. W przypadku metody typu *B* jest to odchylenie standardowe rozkładu przypisanego wielkości wejściowej na podstawie dostępnych informacji uzyskanych z literatury, czy z wcześniejszych doświadczeń. Metoda typu *B* wykorzystywana jest we wszystkich przypadkach, kiedy nie jest możliwe, albo jest nieuzasadnione stosowanie analizy statystycznej wyników obserwacji. Niezbędnymi informacjami są tu dwa elementy: zakres zmienności wielkości wejściowej oraz charakter (rodzaj) rozkładu prawdopodobieństwa tej zmiennej. Spośród wielu dostępnych rozkładów prawdopodobieństwa, najczęściej wykorzystywane są symetryczne rozkłady względem osi y , takie jak: rozkład normalny, rozkład trójkątny, rozkład jednostajny oraz rozkłady antymodalne typu *V* lub *U*. W przypadku dwóch dominujących wielkości wejściowych o rozkładzie jednostajnym, niekiedy korzysta się z rozkładu trapezowego.

Teoretyczną podstawę tworzenia budżetów niepewności pomiaru stanowi centralne twierdzenie graniczne rachunku prawdopodobieństwa, które mówi, że suma znacznej liczby zmiennych losowych o dowolnych rozkładach prawdopodobieństwa, daje w wyniku zmienną losową o rozkładzie normalnym. Ponadto parametry tego rozkładu: wartość oczekiwaną i odchylenie standardowe można obliczyć, jeżeli znane są wartości oczekiwane $E(X_i)$ i wariancje $V(X_i)$ sumowanych zmiennych losowych z zależności:

$$\mu = \sum_{i=1}^n E(x_i) \quad (56)$$

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n V(x_i)} \quad (57)$$

Przytoczone centralne twierdzenie graniczne wymaga znacznej liczby zmiennych losowych. W praktyce, zwłaszcza sumowane wariancje są wartościami tego samego rzędu, wystarczy kilka zmiennych losowych, aby rozkład wielkości wyjściowej był zbliżony do rozkładu normalnego. Występujące we wzorze na odchylenie standardowe wielkości wyjściowej sumowanie geometryczne odchyłeń standardowych wielkości wejściowych powoduje, że składowe, których odchylenia standardowe są małe w porównaniu z innymi, można zaniedbać, ponieważ w niewielkim stopniu będą wpływały na wynik obliczeń.

Formuła na złożoną standardową niepewność pomiaru, wynikająca z prawa propagacji niepewności, przy założeniu, że wielkości wejściowe nie są ze sobą skorelowane i nie ma znaczącej nieliniowości funkcji pomiaru, ma postać:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)} \quad (58)$$

Zastosowana formuła powstała na bazie rozwinięcia funkcji w szereg Taylora o wyrazach pierwszego rzędu zawierających pochodne cząstkowe, które nazywane są współczynnikami wrażliwości. W przypadku znaczącej nieliniowości funkcji pomiaru oraz w przypadku gdy wielkości wejściowe są ze sobą skorelowane przedstawiona formuła przyjmuje bardziej złożoną postać. Dokument JCGM 104:2009 [JCGM1] przedstawia metody analityczne możliwe do zastosowania w sytuacji gdy wszystkie wielkości wejściowe mają rozkłady normalne, identyczne rozkłady jednostajne lub występują wyłącznie dwa czynniki o różnych rozkładach jednostajnych.

Niezbędnym elementem wyniku pomiaru jest określenie przedziału jego zmienności nazywanego przedziałem rozszerzenia. Przedział ten jest wyznaczany przez odpowiednio powiększoną standardową niepewność złożoną z wykorzystaniem współczynnika rozszerzenia. Jest to niepewność rozszerzona U , która jest zalecaną miarą niepewności związaną z wynikiem pomiaru. Współczynnik rozszerzenia k określany jest na podstawie rozkładu prawdopodobieństwa menzurandu i przyjętej wartości prawdopodobieństwa rozszerzenia p [66]. Najczęściej przyjmuje się $p = 95\%$.

6.2.1. Budżet pomiaru metodą porównawczą

Obliczenia budżetu niepewności przedstawiono dla pomiaru średnicy bieżni pierścienia wewnętrznego kołnierзовego. Średnica mierzonego pierścienia w temperaturze odniesienia opisana jest równaniem:

$$D_{Bw1} = D_S + \delta D_D + \delta D + \delta l_C - D \cdot (\bar{\alpha} \cdot \delta t + \delta \alpha \cdot \Delta \bar{t}) - \delta l_V \quad (59)$$

gdzie:

D_{Bw1}	średnica mierzonego pierścienia w temperaturze odniesienia 20°C,
D_S	średnica pierścienia wzorcowego w temperaturze odniesienia 20°C,
δD_D	zmiana średnicy pierścienia wzorcowego od ostatniego wzorcowania spowodowana dryftem,
δD	zmierzona różnica średnicy pierścienia mierzonego i wzorcowego,
δD_C	poprawka na błąd wskazań mikrokatora,
D	średnica nominalna pierścienia odniesienia,
$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_X + \alpha_S}{2}$	wartość średnia współczynników rozszerzalności cieplnej materiału pierścienia odniesienia i mierzonego,
$\delta t = t_X - t_S$	różnica temperatur pierścienia odniesienia i mierzonego,
$\delta \alpha = \alpha_X - \alpha_S$	różnica współczynników rozszerzalności cieplnej pierścienia odniesienia i mierzonego,
$\Delta \bar{t} = \frac{t_X + t_S}{2} - t_0$	odchylenie średniej temperatury pierścienia odniesienia i mierzonego od temperatury odniesienia.

- **Pierścień wzorcowy (D_S):** Nominalna średnica pierścienia wzorcowego wynosi 58,753 mm. Średnica pierścienia wzorcowego została zmierzona na współrzędnościowej maszynie pomiarowej Leitz PMM o MPEE = 0,6 + L/600. Według świadectwa wzorcowania przeprowadzonego przez laboratorium akredytowane WMP spełnia wymagania specyfikacji. Dla mierzonej średnicy dopuszczalny błąd wynosi MPEE = 0,697 μm.

Przyjmując rozkład prostokątny:

$$u(D_S) = \frac{697}{\sqrt{3}} = 402 \mu\text{m}$$

- **Dryf wzorca** (δl_D): Czasowy dryf pierścienia wzorcowego oszacowano przez analogię na podstawie zależności podanej dla płytek wzorcowych klasy 2 w pkt.6.2.4 normy PN-EN ISO 3650:2000 [N13]:

$$\delta D_D = \pm(0,05 \mu m + 0,5 \cdot 10^{-6} \cdot D)$$

Najbardziej prawdopodobna wartość dryfu wynosi zero, a dla przyjętego trójkątnego rozkładu prawdopodobieństwa niepewność standardowa będzie wynosić:

$$u(\delta D_D) = 20 \text{ nm}$$

- **Mikrokrator** (δD_C): Biorąc pod uwagę świadectwo wzorcowania mikrokratora Millimess 1000A firmy Mahr o zakresie pomiarowym $\pm 120 \mu m$:

Wartości odchyłek ze świadectwa wzorcowania wynoszą:

- Rozstęp odchyłek $f_e = 0,5 \mu m$
- Całkowity rozstęp odchyłek $f_{ges} = 0,65 \mu m$
- Rozstęp odchyłek w częściowym zakresie $10 \mu m$ $f_i = 0,1 \mu m$
- Powtarzalność $f_w = 0,1 \mu m$

Przyjmując, że różnica średnic pierścienia wzorcowego i pierścienia wzorcowanego nie przekracza $10 \mu m$ do obliczeń została przyjęta wartość $f_t = 0,1 \mu m$ oraz rozkład prostokątny:

$$u_1 = \frac{300}{\sqrt{3}} = 173 \text{ nm}$$

- **Poprawki ze względu na temperaturę**

$$-D \cdot (\bar{\alpha} \cdot \delta t + \delta \alpha \cdot \Delta \bar{t}):$$

$$\checkmark \quad -D \cdot (\bar{\alpha} \cdot \delta t)$$

Założenia:

$$D = 58,753 \text{ mm}$$

$$\bar{\alpha} = 11,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\delta t = \pm 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Rozkład prostokątny

$$u(\delta t) = \frac{0,1}{\sqrt{3}} = 0,0577 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Współczynnik wrażliwości:

$$\frac{\partial D}{\partial \delta t} = -D\bar{\alpha} = -58,753 \text{ mm} \cdot 11,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} = -676 \text{ nm}^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\checkmark \quad -L \cdot (\delta\alpha \cdot \Delta\bar{t})$$

Założenia:

$$D = 58,753 \text{ mm}$$

$$\alpha_x = (11,5 \pm 1,0) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad \text{Rozkład prostokątny}$$

$$\alpha_s = (11,5 \pm 1,0) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad \text{Rozkład prostokątny}$$

$$\Delta\bar{t} = \pm 4^\circ\text{C} \quad \text{Rozkład prostokątny}$$

$$\text{Estymata } \delta\alpha = 0$$

$$\text{Estymata } \Delta\bar{t} = 0$$

$\delta\alpha$ – rozkład wynika ze splotu dwóch rozkładów prostokątnych o szerokości połówkowej:

$1,0 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, w wyniku otrzymujemy rozkład trójkątny o szerokości połówkowej: $2,0 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

$$u(\Delta\bar{t}) = \frac{2}{\sqrt{3}} = 2,309 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$u(\delta\alpha) = \frac{2 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{6}} = 0,816 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Najlepszą wartością oszacowaną dla różnicy liniowych współczynników rozszerzalności cieplnej $\delta\alpha$ i odchylenia średniej temperatury pomiaru od temperatury odniesienia $\Delta\bar{t}$ jest zero. Dlatego, przy szacowaniu składników niepewności, należy brać pod uwagę wyrazy drugiego rzędu:

$$u^2(\delta\alpha \cdot \Delta\bar{t}) = u^2(\delta\alpha) \cdot u^2(\Delta\bar{t})$$

$$u^2(\delta\alpha) = 0,656 \cdot 10^{-1}$$

$$u^2(\Delta\bar{t}) = 5,333$$

$$u^2(\delta\alpha \cdot \Delta\bar{t}) = u^2(\delta\alpha) \cdot u^2(\Delta\bar{t}) = 3,498 \cdot 10^{-1}$$

$$u(\delta\alpha \cdot \Delta\bar{t}) = 1,87 \cdot 10^{-6}$$

Współczynnik wrażliwości:

$$\frac{\partial D}{\partial(\delta\alpha \cdot \Delta\bar{t})} = -D = -58,753 \text{ mm}$$

- **Pomiary (δD):** Założono połączoną estymatę odchylenia standardowego uzyskaną z wcześniejszych pomiarów (ocena zdolności systemu pomiarowego):

$$s_p(\delta D) = 200 \text{ nm}$$

Niepewność standardowa przy założeniu, że przeprowadzane są trzy pomiary wynosi:

$$u(\delta D) = s(\delta\bar{D}) = \frac{200 \text{ nm}}{\sqrt{3}} = 115 \text{ nm}$$

Do celów sporządzenia budżetu niepewności założono:

$$\delta\bar{D} = 0 \text{ mm}$$

- **Budżet niepewności (D_X):**

Budżet niepewności pomiaru średnicy bieżni pierścienia wewnętrznego kołnierowego przedstawiono w tabeli 16.

Niepewność rozszerzona dla współczynnika rozszerzenia $k = 2$ wynosi:

$$U = k \cdot u(l_X) = 2 \cdot 468 = 936 \text{ nm}$$

Na podstawie rozszerzonych niepewności pomiarowych poszczególnych ogniw składowych, z uwzględnieniem odpowiednich współczynników wpływu, wyznaczono rozszerzoną niepewność ogniw składowych dla obliczania luzu wzdłużnego, która wynosi $U=2993 \text{ nm}$.

Wartości niepewności rozszerzonych dla ogniw składowych oraz luzu wzdłużnego zamieszczono w tabeli 17.

Tabela 16. Składniki budżetu niepewności pomiarowej średnicy bieżni pierścienia wewnętrznego kołnierzewego

Symbol wiel.	Estymata wielkości	Niepewność std.	Rozkład prawdopodobieństwa	Wsp. wiaryzalności	Udział niepewności
D_S	58,753 mm	402 nm	Prostokątny	1,0	402 nm
δD_D	0 mm	20 nm	Trójkątny	1,0	20 nm
δD	0,000 mm	115 nm	Normalny	1,0	115 nm
δD_C	0 mm	173 nm	Prostokątny	1,0	173 nm
δt	0 °C	0,0577 °C	Prostokątny	-676 nm°C ⁻¹	-39 nm
$\delta \alpha \cdot \Delta \bar{t}$	0	$1,87 \cdot 10^{-6}$	-	-58,756	-110 nm
D_{Bw1}	50,753 mm	Niepewność złożona:			468 nm

Tabela 17. Wartości niepewności rozszerzonych pomiaru

Parametr mierzony	Niepewność rozszerzona U [nm]
DBz1; DBz2	999
DBw1	936
dw	947
Lop1	896
DBw2	936
dp	948
Lop2	874
DWs1; DWs2	726
Lo – Luz wzdłużny obliczeniowy	2993
Lo – Luz wzdłużny zmierzony (urządzenie YHBT-III-NT-A)	3000

Należy podkreślić, że wraz ze wzrostem niepewności pomiarowej koszty realizacji samego pomiaru zazwyczaj maleją, jednak równocześnie rosną koszty potencjalnych błędnych decyzji wynikających z obniżonej wiarygodności uzyskanych rezultatów. Na podstawie wieloletnich doświadczeń w dziedzinie pomiarów wielkości geometrycznych przyjęto, iż połowa wartości niepewności powinna stanowić około 0,1t. W sytuacjach, gdy zastosowanie odpowiednio precyzyjnego, a zarazem

kosztownego wyposażenia pomiarowego nie jest możliwe, dopuszcza się jednak mniej rygorystyczny warunek w postaci $U/T \leq 0,2$ [15].

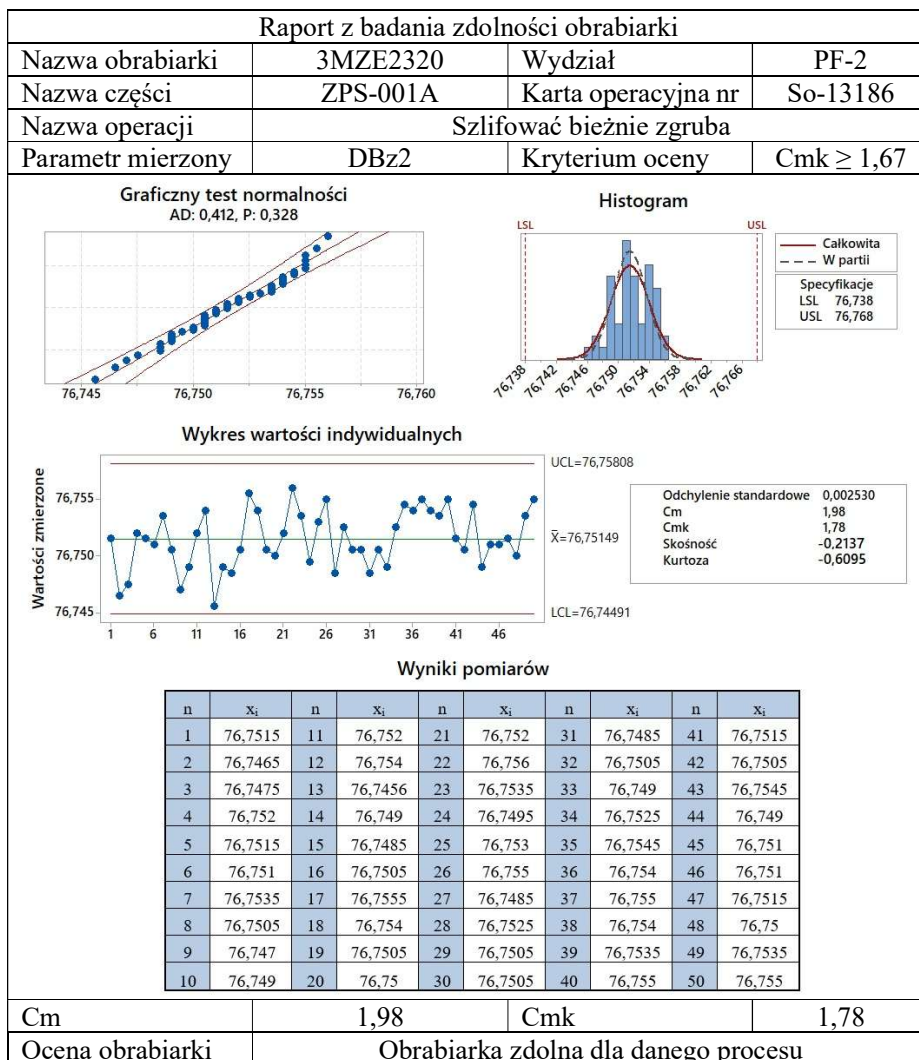
6.3. Badania wskaźników zdolności C_m , C_{mk} maszyn obróbki ścierniej

Poniżej przedstawiono wyniki badań wskaźników zdolności maszyn do obróbki ścierniej zakupionych do produkcji zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji oraz obrabiarek, na których uzyskiwane są kluczowe wymiary dla luzu wzdłużnego piasty. Obliczenia wskaźnika zdolności maszyny przedstawiono dla operacji zgrubnego szlifowania bieżni oraz parametru DBz2.

W celu przeprowadzenia badania obrabiarka została uprzednio rozgrzana oraz ustawiona na wymiar odpowiadający środkowi obszaru zmienności, wynoszący $DBz2 = 76,753$ mm. Następnie szlifowaniu zgrubnemu bieżni poddano 50 szt. pierścieni zewnętrznych. Pierścienie pomierzono, a z uzyskanych wyników wyliczono s i $\bar{x}$. W kolejnym kroku obliczono niewyśrodkowanie Δ . Dane podstawiono do wzoru (na T) i obliczono wymaganą najmniejszą wartość tolerancji, tak aby $C_{mk} \geq 1,67$.

$$T = 2 \cdot (3s \cdot C_{mk} + \Delta) = 2 \cdot (3 \cdot 0,00253 \cdot 1,67 + 0,00151) = 0,0284 \text{ mm}$$

Następnym krokiem było wykonanie obliczeń wskaźników zdolności C_m , C_{mk} dla tolerancji $T=0,030$ mm. Wyniki badania zdolności maszyny przedstawiono na rysunku 118.

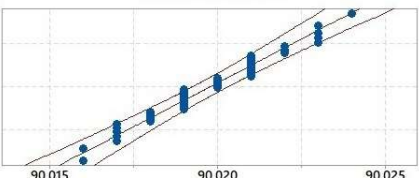
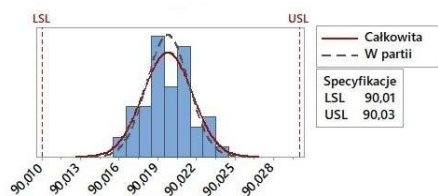


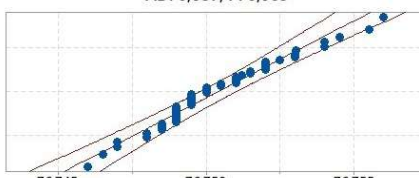
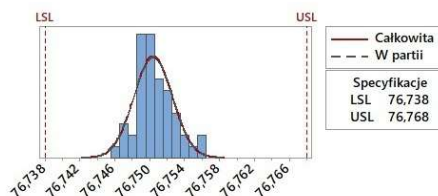
Rys. 118. Raport z badania zdolności obrabiarki

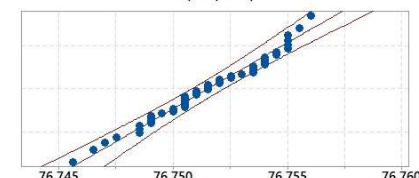
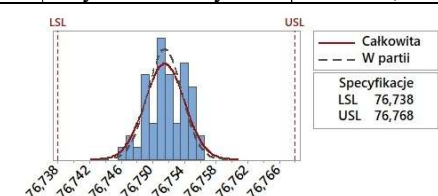
6.3.1. Badania wskaźników zdolności maszyn Cm, Cmk dla obrabiarek do obróbki pierścienia zewnętrznego

Skrócone wyniki badań zdolności obrabiarek dla wybranych parametrów przedstawiono w tabeli 18.

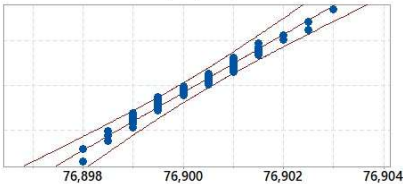
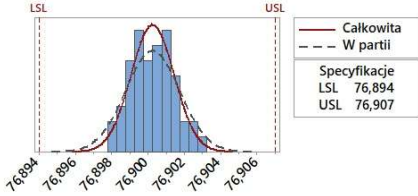
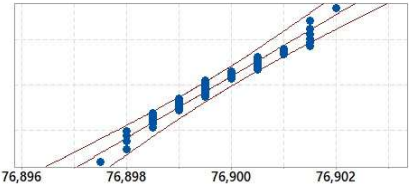
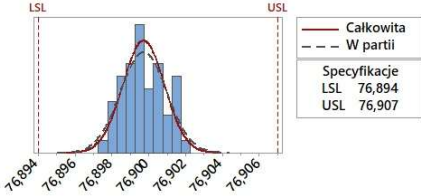
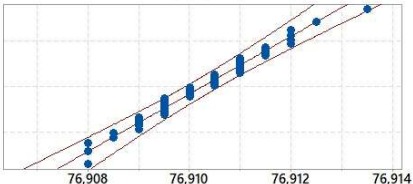
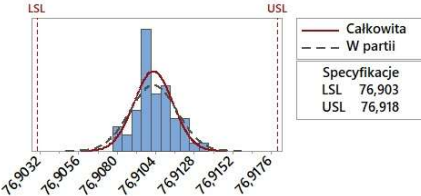
Tabela 18. Skrócone wyniki badań zdolności obrabiarek do obróbki pierścienia zewnętrznego

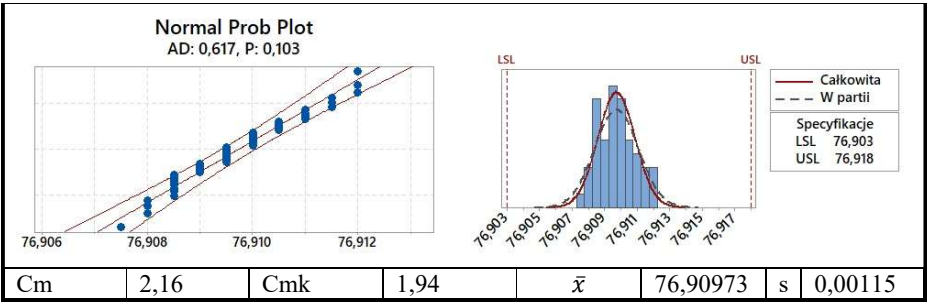
Raport z badania zdolności obrabiarki						
Nazwa obrabiarki		3MZEY1320		Wydział		PF-2
Nazwa części		ZPS-001A		Karta operacyjna nr		So-13185
Nazwa operacji		Szlifować fi zew. i czoło				
Parametr mierzony		D1		Kryterium oceny		Cmk ≥ 1,67
AD: 0,729, P: 0,054  LSL USL  — Całkowita - - - W partii Specyfikacje LSL 90,01 USL 90,03						
Cm	1,73	Cmk	1,69	$\bar{x}$	90,01976	s 0,00192

Raport z badania zdolności obrabiarki						
Nazwa obrabiarki		3MZE2320		Wydział		PF-2
Nazwa części		ZPS-001A		Karta operacyjna nr		So-13186
Nazwa operacji		Szlifować bieżnie zgrubnie				
Parametr mierzony		DBz1		Kryterium oceny		Cmk ≥ 1,67
AD: 0,687, P: 0,069  LSL USL  — Całkowita - - - W partii Specyfikacje LSL 76,738 USL 76,768						
Cm	2,25	Cmk	1,86	$\bar{x}$	76,75038	s 0,00222

Raport z badania zdolności obrabiarki						
Nazwa obrabiarki		3MZE2320		Wydział		PF-2
Nazwa części		ZPS-001A		Karta operacyjna nr		So-13186
Nazwa operacji		Szlifować bieżnie zgrubnie				
Parametr mierzony		DBz2		Kryterium oceny		Cmk ≥ 1,67
AD: 0,412, P: 0,328  LSL USL  — Całkowita - - - W partii Specyfikacje LSL 76,738 USL 76,768						
Cm	1,98	Cmk	1,78	$\bar{x}$	76,75149	s 0,00253

Raport z badania zdolności obrabiarki						
Nazwa obrabiarki		3MZE2320		Wydział		PF-2

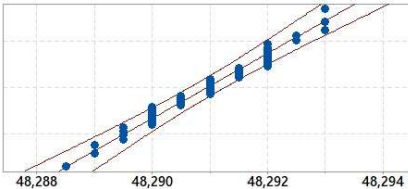
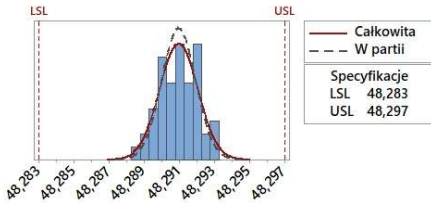
Nazwa części	ZPS-001A	Karta operacyjna nr	So-13187
Nazwa operacji	Szlifować bieżnie wykańczająco		
Parametr mierzony	DBz1	Kryterium oceny	Cmk $\geq 1,67$
AD: 0,472, P: 0,235  			
Cm	1,81	Cmk	1,74
$\bar{x}$	76,90025	s	0,00117
Raport z badania zdolności obrabiarki			
Nazwa obrabiarki	3MZE2320	Wydział	PF-2
Nazwa części	ZPS-001A	Karta operacyjna nr	So-13187
Nazwa operacji	Szlifować bieżnie wykańczająco		
Parametr mierzony	DBz2	Kryterium oceny	Cmk $\geq 1,67$
AD: 0,701, P: 0,063  			
Cm	1,9	Cmk	1,67
$\bar{x}$	76,89972	s	0,00114
Raport z badania zdolności obrabiarki			
Nazwa obrabiarki	3MZE3420	Wydział	PF-2
Nazwa części	ZPS-001A	Karta operacyjna nr	So-13188
Nazwa operacji	Dogładzać bieżnie		
Parametr mierzony	DBz1	Kryterium oceny	Cmk $\geq 1,67$
AD: 0,452, P: 0,262  			
Cm	2,04	Cmk	1,97
$\bar{x}$	76,91026	s	0,00123
Raport z badania zdolności obrabiarki			
Nazwa obrabiarki	3MZE3420	Wydział	PF-2
Nazwa części	ZPS-001A	Karta operacyjna nr	So-13188
Nazwa operacji	Dogładzać bieżnie		
Parametr mierzony	DBz2	Kryterium oceny	Cmk $\geq 1,67$

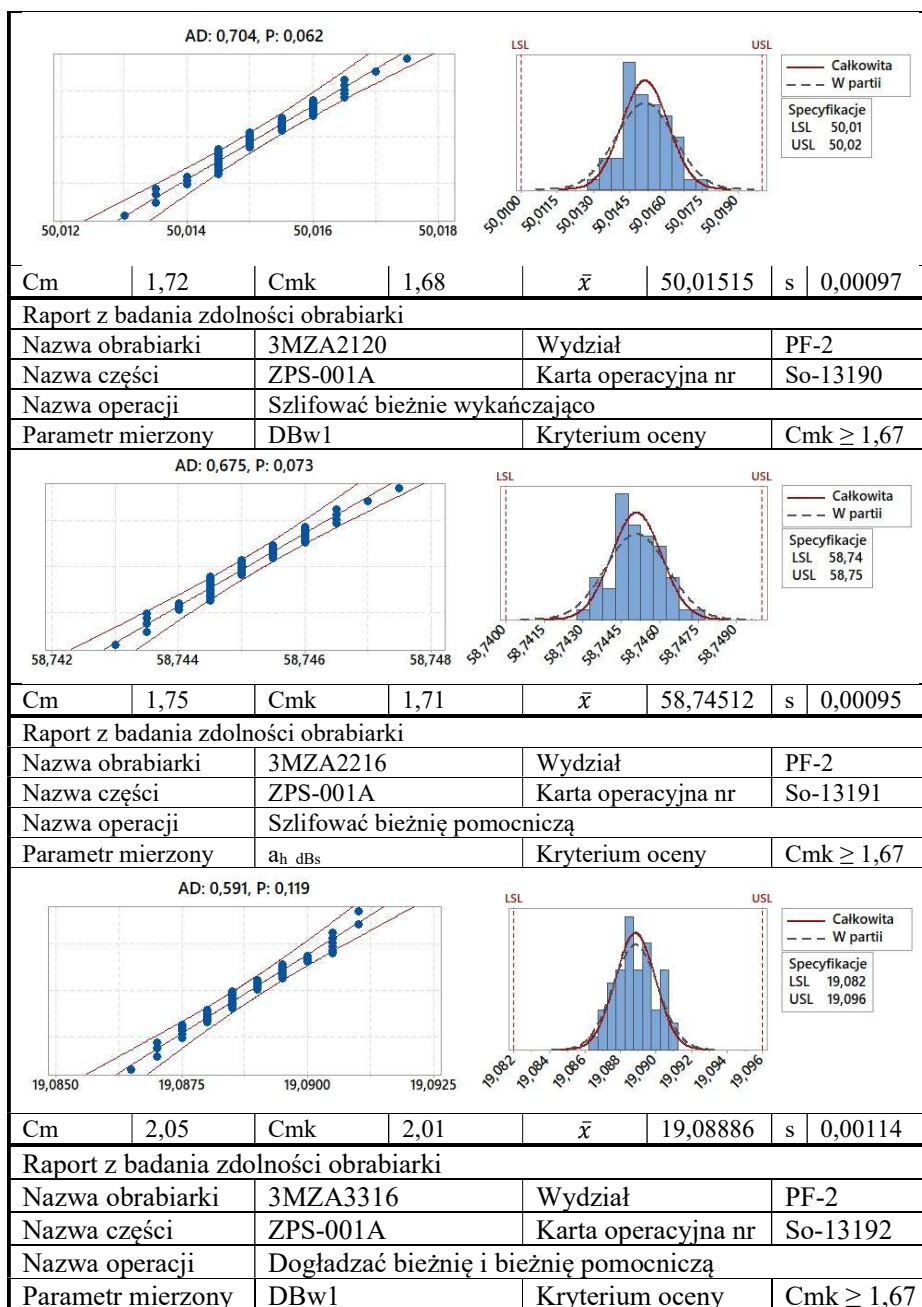


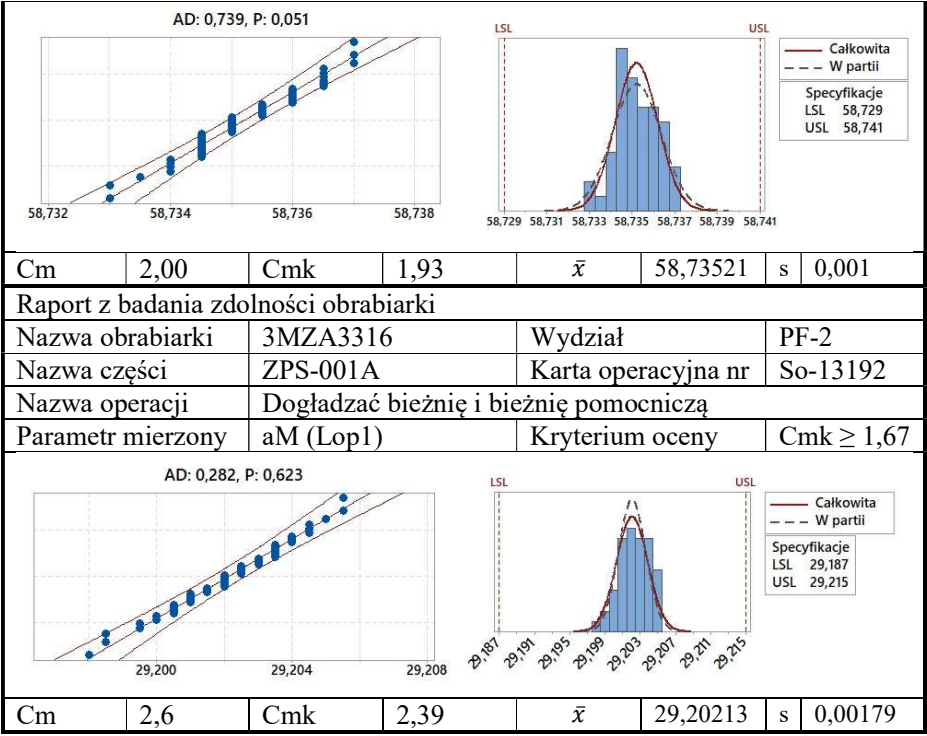
6.3.2. Badania wskaźników zdolności maszyn Cm, Cmk dla obrabiarek do obróbki pierścienia wewnętrznego kołnierzewego

Skrócone wyniki badań zdolności obrabiarek dla wybranych parametrów przedstawiono w tabeli 19.

Tabela 19. Skrócone wyniki badań zdolności obrabiarek do obróbki pierścienia wewnętrznego kołnierzewego

Raport z badania zdolności obrabiarki							
Nazwa obrabiarki	3MZA2120	Wydział	PF-2				
Nazwa części	ZPS-001A	Karta operacyjna nr	So-13189				
Nazwa operacji	Szlifować profil z czołem oporowym i fi bieżni zgrubnie						
Parametr mierzony	B	Kryterium oceny	Cmk ≥ 1,67				
AD: 0,593, P: 0,118  							
Cm	2,12	Cmk	1,83	$\bar{x}$	48,29095	s	0,00011
Raport z badania zdolności obrabiarki							
Nazwa obrabiarki	3MZA2120	Wydział	PF-2				
Nazwa części	ZPS-001A	Karta operacyjna nr	So-13189				
Nazwa operacji	Szlifować profil z czołem oporowym i fi bieżni zgrubnie						
Parametr mierzony	d3	Kryterium oceny	Cmk ≥ 1,67				

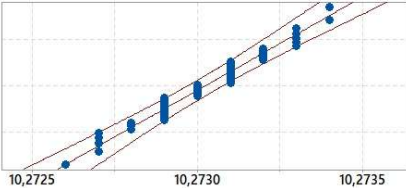
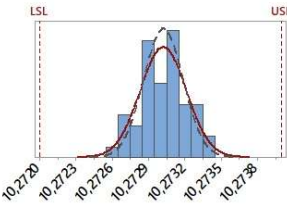




6.3.3. Badanie wskaźników zdolności Cm, Cmk dla obrabiarki SM-468

Skrócony wynik badania zdatności obrabiarki dla parametru średnicy bieżni (badania dokonano w oparciu o grupę selekcyjną wałeczka 0 μm ; -2 μm) przedstawiono w tabeli 20.

Tabela 20. Skrócony wyniki badania zdolności obrabiarki SM-468

Raport z badania zdolności obrabiarki			
Nazwa obrabiarki	SM-468	Wydział	PF-2
Nazwa części	ZPS-001A	Karta operacyjna nr	Wo-06687
Nazwa operacji	Dogładzanie		
Parametr mierzony	D	Kryterium oceny	Cmk $\geq 1,67$
AD: 0,729, P: 0,054   — Całkowita - - - W partii Specyfikacje LSL 10,272 USL 10,274			
Cm	1,73	Cmk	1,69
		$\bar{x}$	1,27302
		s	0,00019

6.3.4. Analiza tolerancji wymiarów składowych łańcucha wymiarowego luzu wzdłużnego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji dla zamienności częściowej

Na podstawie przeprowadzonej analizy minimalnych wartości tolerancji, ukierunkowanej na zapewnienie zgodności z wymaganymi wskaźnikami zdolności procesu Cm oraz Cmk, określono dopuszczalne zakresy tolerancji dla poszczególnych wymiarów ogniw składowych luzu wzdłużnego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji. Analiza ta miała na celu zapewnienie stabilności procesu oraz spełnienie wymagań jakościowych związanych z funkcjonalnością zespołu łożyskowego. Ustalono wartości tolerancji dla poszczególnych wymiarów elementów składowych determinujących luz wzdłużny w zespolonej piaście łożyskowej trzeciej generacji:

$$DBz1=DBz2= 76,903^{+0,015}_0 \text{ mm}$$

$$DBw1= 58,754^{+0,009}_{-0,029} \text{ mm, tolerancja uwzględnia zmianę pow. bazowej}$$

$$DBw2=58,755^{+0}_{-0,007} \text{ mm}$$

$$DWs1=DWs2=10,274^{+0}_{-0,004} \text{ mm}$$

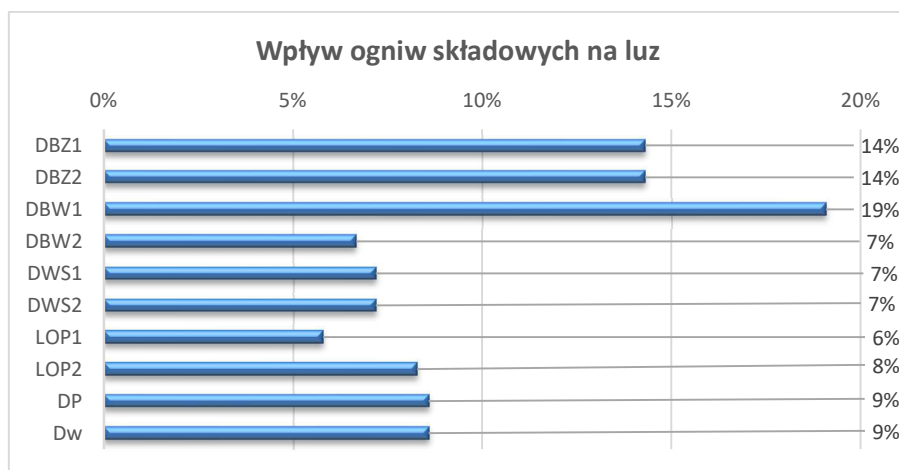
$$Lop1=29,201^{+0,014}_{-0,014} \text{ mm, tolerancja uwzględnia zmianę pow. bazowej}$$

$$Lop2=17,659^{+0,01}_{-0,03} \text{ mm}$$

$$Dp=50^{+0}_{-0,012} \text{ mm}$$

$$Dw=50^{+0,022}_{+0,010} \text{ mm}$$

Wykres procentowego wpływu ogniw składowych na luz wzdłużny przedstawiono na rysunku 119.



Rys. 119. Wykres procentowego wpływu ogniw składowych na luz wzdłużny – metoda odwróconego badania wskaźników C_m , C_{mk}

W odniesieniu do uzyskanych pól tolerancji dokonano weryfikacji spełnienia wymagań dotyczących relacji między niepewnością pomiaru a tolerancją. Wyniki zestawione w tabeli 21 wskazują, że większość zastosowanych przyrządów spełnia standardowe kryterium $U/T \leq 0,1$. W przypadku przyrządów przeznaczonych do pomiaru średnicy wałeczka stożkowego oraz średnicy bieżni głównej pierścienia wewnętrznego spełnione zostało kryterium warunkowe, określone jako $U/T \leq 0,2$.

Tabela 21. Weryfikacja spełnienia kryterium U/T dla przyrządów pomiarowych

Parametr mierzony	Tolerancja T [mm]	Niepewność rozszerzona U [nm]	Relacja U/T
DBz1; DBz2	0,015	999	0,067
DBw1	0,020	936	0,047
dw	0,012	947	0,079
Lop1	0,028	896	0,032
DBw2	0,007	936	0,134
dp	0,012	948	0,079
Lop2	0,040	874	0,022
DWsl; DWs2	0,004	726	0,182
Lo – Luz wzdłużny obliczeniowy	0,050	2993	0,060
Lo – Luz wzdłużny zmierzony (urządzenie YHBT-III-NT-A)	0,050	3000	0,060

W analizie tolerancji wymiarowych ogniów składowych determinujących luz wzdłużny zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji, niezbędne jest uwzględnienie również tolerancji geometrycznych, takich jak odchyłki kształtu i położenia. Parametry te mogą istotnie wpływać na rzeczywisty rozkład luzu wzdłużnego, zwłaszcza w kontekście złożonych warunków montażu i wzajemnych oddziaływań elementów konstrukcyjnych.

Jednakże ze względu na znaczną liczbę elementów składowych, precyzyjne określenie ilościowego wpływu poszczególnych tolerancji geometrycznych na całkowity luz wzdłużny jest utrudnione. Złożoność układu powoduje, że wpływ może być trudny do oszacowania przy użyciu klasycznych metod analitycznych.

W związku z powyższym, dla pełnej oceny wpływu tolerancji geometrycznych uzyskiwanych w procesie technologicznym, zasadne jest przeprowadzenie badań eksperymentalnych. Uwzględnienie tych czynników pozwala na bardziej realistyczną ocenę zdolności funkcjonalnej zespołu oraz optymalizację założeń konstrukcyjnych i technologicznych. W przeprowadzonej analizie przyjęto założenie, iż wpływ geometrycznych odchyłek na zmianę luzu wzdłużnego zespolonej piasty łożyskowej będzie reprezentowany przez wartość równą połowie maksymalnej tolerancji kołowości lub połowie tolerancji bicia wzdłużnego, w zależności od charakterystyki danego ogniwa składowego luzu. Takie podejście umożliwia uproszczoną, lecz inżyniersko uzasadnioną estymację wpływu błędów geometrycznych na końcową wartość luzu wzdłużnego zespołu. Obliczenia wpływu tolerancji ogniów składowych oraz tolerancji geometrycznych przedstawiono w tabeli 22. Wartość tolerancji ogniwa zamykającego wynosi $49,7\ \mu\text{m}$ (wymaganie $\leq 50\ \mu\text{m}$).

Tabela 22. Arkusz kalkulacyjny Excel – wyliczenie ogniwa zamykającego dla tolerancji ogniw składowych określonych w wyniku przeprowadzania badań zdolności obrabiarek Cm, Cmk oraz uwzględniających wpływ tolerancji geometrycznych

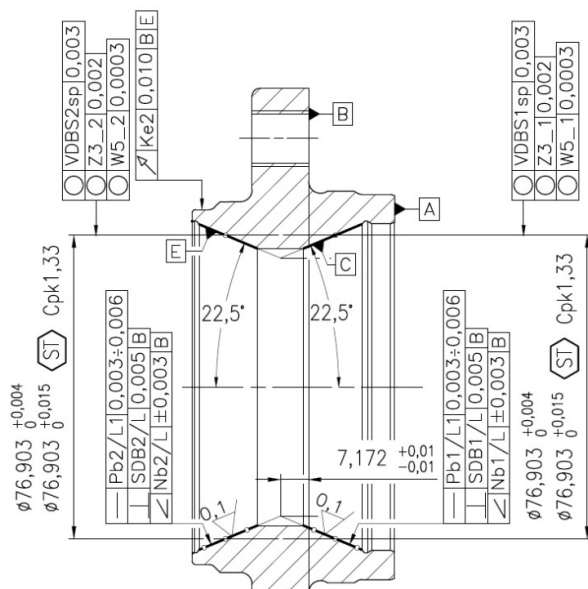
$=PIERWIASTEK(POTĘGA(C30;2)*POTĘGA(D30;2)+POTĘGA(C30;2)*POTĘGA(E30;2)+POTĘGA(C30;2)*POTĘGA(F30;2)+POTĘGA(C30;2)*POTĘGA(G30;2)+POTĘGA(C31;2)*POTĘGA(H30;2)+POTĘGA(C31;2)*POTĘGA(I30;2)+POTĘGA(C32;2)*POTĘGA(J30;2)+POTĘGA(C32;2)*POTĘGA(K30;2)+POTĘGA(C33;2)*POTĘGA(L30;2)+POTĘGA(C33;2)*POTĘGA(M30;2))+PIERWIASTEK(POTĘGA(C35;2)*POTĘGA(D35;2)+POTĘGA(C35;2)*POTĘGA(E35;2)+POTĘGA(C35;2)*POTĘGA(F35;2)+POTĘGA(C35;2)*POTĘGA(G35;2)+POTĘGA(C36;2)*POTĘGA(H35;2)+POTĘGA(C36;2)*POTĘGA(I35;2)+POTĘGA(C37;2)*POTĘGA(J35;2)+POTĘGA(C37;2)*POTĘGA(K35;2)+POTĘGA(C38;2)*POTĘGA(L35;2)+POTĘGA(C38;2)*POTĘGA(M35;2))$													
C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	
	DBZ1	DBZ2	DBW1	DBW2	DWS1	DWS2	LOP1	LOP2	Dp	Dw	TN	TN^2	
1,207	15	15	20	7	4	4	28	40	12	12	126,5	43,3	
2,272													
0,262											145,5	49,7	
0,905													
	DBZ1	DBZ2	DBW1	DBW2	DWS1	DWS2	LOP1	LOP2	Dp	Dw	TN	TN^2	
1,207	1,5	1,5	1,5	1,5	0,5	0,5	6	6	4	3	19,0	6,4	
2,272													
0,262													
0,905													

Na rysunku 120 przedstawiono pierścień zewnętrzny piasty z wymiarem średnicy bieżni $\varnothing 76,903$ mm. Zaznaczono dwie wartości tolerancji: mniejszą – obowiązującą w przypadku zamienności całkowitej, oraz większą – stosowaną przy zamienności częściowej. Tego rodzaju zapis stosowany jest w celu jednoznacznego określenia nie tylko wymaganej dokładności wykonania wymiaru, ale również zapewnienia stabilności i powtarzalności procesu produkcyjnego. Wymaganie minimalnej wartości Cpk stanowi kryterium jakości, które gwarantuje, że zdecydowana większość wyrobów mieści się w zadanym polu tolerancji.

Dodatkowo należy podkreślić, że wprowadzenie tego typu oznaczeń ma istotne znaczenie w kontekście stosowania zasady zamienności częściowej. Pozwala ono bowiem na wyznaczenie tolerancji końcowej całego ogniwa zamykającego z uwzględnieniem statystycznego rozkładu błędów wykonania poszczególnych elementów. Dzięki temu możliwe jest zredukowanie nadmiernie rygorystycznych wymagań dla pojedynczych części przy jednoczesnym zachowaniu odpowiedniej dokładności i funkcjonalności zespołu jako całości.

Norma PN-EN ISO 18391:2016 [N15], dotycząca specyfikacji populacji, definiuje zasady wyrażania specyfikacji odnoszących się do populacji wyrobów. Choć norma nie narzuca sposobu obliczania tolerancji, umożliwia formalne ujęcie założeń

statystycznych związanych z charakterystykami populacji, co współgra z koncepcyjnym zastosowaniem wskaźników zdolności procesu, takich jak C_p , C_{pk} , w kontekście zamienności i tolerancji końcowej zespołu.



Rys. 120. Pierścień zewnętrzny piasty o średnicy bieżni $\varnothing 76,903$ z dwiema wartościami tolerancji: mniejszą – obowiązującą w przypadku zamienności całkowitej oraz większą – stosowaną dla zamienności częściowej wraz z wymaganym wskaźnikiem zdolności procesu $C_{pk} \geq 1,33$, zgodnie z PN-EN ISO 18391:2016

6.4. Pomiar luzu wzdłużnego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji

Celem pomiaru luzu jest weryfikacja i potwierdzenie wartości luzu wynikowego, uzyskanego w sposób doświadczalny, poprzez porównanie go z wartością obliczoną na podstawie wcześniej wyprowadzonego wzoru. Weryfikacja ta ma na celu ocenę zgodności rzeczywistego zachowania badanego zespołu z przewidywaniami teoretycznymi wynikającymi z modelu obliczeniowego. Analiza różnic pomiędzy wartościami zmierzonymi, a wartościami obliczonymi pozwala określić dokładność przyjętego modelu, uwzględnić wpływ tolerancji wykonania elementów. Uzyskane wyniki stanowią podstawę do dalszej interpretacji przyczyn ewentualnych rozbieżności i mogą służyć do kalibracji parametrów modelu matematycznego, co w konsekwencji umożliwia zwiększenie precyzji prognozowania luzu wzdłużnego w zespolonych

piastach łożyskowych trzeciej generacji. Pomiar luzu wzdłużnego wykonano w dwóch etapach. Pierwszy pomiar przeprowadzono po zmontowaniu zespołów piast łożyskowych, przed wykonaniem operacji zawalcowania kołnierza. Drugi pomiar zrealizowano po zakończeniu procesu zawalcowania. Wyniki obu serii pomiarowych, obejmujące wartości luzu wzdłużnego, a także wartość luzu oszacowanego na podstawie obliczeń teoretycznych, zestawiono w tabeli 23. Do montażu piast zastosowano wałeczki z pierwszej grupy selekcyjnej, obejmującej zakres tolerancji średnicy (0; -0,002 mm) względem wymiaru nominalnego. Do obliczeń przyjęto średnią wartość średnicy wałeczka, odpowiadającą wartości arytmetycznej dla podanego przedziału tolerancji. Widok zmontowanych zespolonych piast łożyskowych przed zawalcowaniem kołnierza przedstawiono na rysunku 121a, natomiast kompletne zespoły piast, przygotowane do procesu pakowania, zobrazowano na rysunku 121b.



Rys. 121. Zmontowane zespolone piasty łożyskowe trzeciej generacji: a) przed zawalcowaniem kołnierza, b) przygotowane do pakowania

Tabela 23. Wyniki pomiarów luzu wzdłużnego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji

Lp.	Wyniki pomiaru luzu [mm]			Luz obliczeniowy [mm]
	Luz przed zawalcowaniem	Luz po zawalcowaniu	Zmiana luzu po zawalcowaniu	
1	0,0215	0,0225	0,001	0,0227
2	0,0246	0,0257	0,0011	0,0271
3	0,0136	0,0143	0,0007	0,0146
4	0,0162	0,0156	-0,0006	0,0185

5	0,0148	0,0165	0,0017	0,0182
6	0,0189	0,0193	0,0004	0,0230
7	0,0187	0,0194	0,0007	0,0207
8	0,0241	0,023	-0,0011	0,0240
9	0,0179	0,0198	0,0019	0,0217
10	0,0221	0,0228	0,0007	0,0240
11	0,0187	0,0176	-0,0011	0,0177
12	0,0195	0,0187	-0,0008	0,0211
13	0,0203	0,0193	-0,001	0,0214
14	0,0181	0,0179	-0,0002	0,0196
15	0,0154	0,0147	-0,0007	0,0160
16	0,0165	0,0149	-0,0016	0,0181
17	0,0197	0,0183	-0,0014	0,0211
18	0,0202	0,0194	-0,0008	0,0206
19	0,0189	0,0173	-0,0016	0,0215
20	0,0219	0,0208	-0,0011	0,0209
21	0,0221	0,0203	-0,0018	0,0243
22	0,0229	0,0217	-0,0012	0,0242
23	0,0246	0,025	0,0004	0,0258
24	0,0256	0,0249	-0,0007	0,0268
25	0,0197	0,0182	-0,0015	0,0211
26	0,0292	0,0284	-0,0008	0,0309
27	0,0165	0,0183	0,0018	0,0162
28	0,0166	0,0152	-0,0014	0,0182
29	0,0172	0,0167	-0,0005	0,0190
30	0,0201	0,0194	-0,0007	0,0232
31	0,0143	0,0135	-0,0008	0,0164
32	0,0186	0,0179	-0,0007	0,0205
33	0,0224	0,0219	-0,0005	0,0246
34	0,0146	0,0137	-0,0009	0,0174
35	0,0187	0,0175	-0,0012	0,0214
36	0,0164	0,0143	-0,0021	0,0177
37	0,0219	0,0207	-0,0012	0,0243
38	0,0122	0,0118	-0,0004	0,0145
39	0,0176	0,0156	-0,002	0,0198
40	0,0184	0,0163	-0,0021	0,0193
41	0,0171	0,0159	-0,0012	0,0182

42	0,0225	0,0213	-0,0012	0,0249
43	0,0153	0,0147	-0,0006	0,0164
44	0,0201	0,0223	0,0022	0,0213
45	0,0208	0,0196	-0,0012	0,0230
46	0,0242	0,0228	-0,0014	0,0237
47	0,0149	0,0132	-0,0017	0,0162
48	0,0111	0,0109	-0,0002	0,0130
49	0,0156	0,0149	-0,0007	0,0175
50	0,0221	0,021	-0,0011	0,0227
$\bar{x}$	0,0191	0,01851	-0,00058	0,0207

6.4.1. Analiza uzyskanych wyników

Przeprowadzona analiza obejmuje ocenę zdolności procesu na podstawie serii 50 kolejnych pomiarów, odnoszących się do wyrobu podlegającego kontroli jakości. Próbkę były montowane i mierzone w sposób sekwencyjny, co powoduje, że uzyskany zbiór danych nie stanowi w pełni reprezentatywnej próby. Należy pamiętać, że pytanie, na które odpowiada karta kontrolna, jest całkowicie zależne od planu próbkowania.

Przyjęto granice specyfikacji na poziomie $LSL = 0,00$ mm oraz $USL = 0,05$ mm. Rozkład wyników pomiarowych został zweryfikowany za pomocą testu normalności Andersona–Darlinga, którego wynik ($AD=0,191$, $p=0,893$) nie daje podstaw do odrzucenia hipotezy o normalności rozkładu. Wysoka wartość p potwierdza, że dane są zgodne z założeniem rozkładu normalnego, co umożliwia zastosowanie klasycznych metod oceny zdolności procesu.

Histogram przedstawia rozkład zmierzonych wartości wraz z krzywą dopasowaną do modelu normalnego. Analiza graficzna potwierdza, że rozkład jest symetryczny z nieznaczną tendencją do skośności prawostronnej, co potwierdza obliczona wartość skośności (0,3013). Wartość kurtozy (-0,1405) wskazuje na rozkład zbliżony do normalnego, nieco spłaszczony względem niego, jednak bez wpływu na interpretację wyników.

Dla tego rodzaju danych, przy zastosowaniu kart ruchomego rozstępu, odchylenie standardowe krótkoterminowe oblicza się zgodnie ze wzorem [64]:

$$\sigma_{krótkoterminowe} = \frac{\overline{MR}}{d_2} \quad (60)$$

Tak obliczone odchylenie standardowe wyniosło $\sigma_{\text{krótkoterminowe}}=0,0034$ mm, dla którego wskaźniki zdolności procesu wyniosły $C_p = 2,45$ oraz $C_{pk}=1,81$. Wskaźnik C_p informuje o potencjalnej zdolności procesu, zakładając jego idealne wycentrowanie. Wartość znacznie przekraczająca 1,33 świadczy o tym, że szerokość rozkładu jest znacznie mniejsza od pola tolerancji. Wskaźnik C_{pk} , który dodatkowo uwzględnia położenie średniej względem granic tolerancji, osiągnął wartość 1,81, co wskazuje, że proces nie jest dobrze wycentrowany ale nie generuje istotnej liczby braków. Liczba wyrobów niespełniających wymagań specyfikacyjnych, wyrażona wskaźnikiem PPM, wynosi zaledwie 0,03, co w praktyce oznacza brak znaczących niezgodności.

W ujęciu długoterminowym, obejmującym większą zmienność procesową, odchylenie standardowe wzrosło do 0,0038 mm, a wskaźniki P_p i P_{pk} osiągnęły wartości odpowiednio 2,21 i 1,64. Spadek wartości względem wskaźników krótkoterminowych jest naturalny i wynika z dodatkowych źródeł zmienności pojawiających się w dłuższym horyzoncie czasowym, jednak w dalszym ciągu wartości te przekraczają minimalne wymagania przemysłowe, potwierdzając stabilność i wysoką zdolność procesu. Wskaźnik PPM w ujęciu długoterminowym wynosi 0,45, co również jest wartością marginalną.

Karty kontrolne I-MR, obejmujące wykres wartości indywidualnych oraz wykres ruchomego rozstępu, dostarczają informacji o bieżącej stabilności procesu. Średnia wartość pomiarów wynosi 0,0185 mm, a wszystkie punkty mieszczą się w granicach kontrolnych ($UCL = 0,02872$ mm, $LCL = 0,0083$ mm) bez obserwacji trendów wskazujących na dryf procesu lub występowanie przyczyn specjalnych. Wartość średniego ruchomego rozstępu wynosi 0,0038 mm, przy górnej granicy kontrolnej $UCL=0,0125$ mm i dolnej granicy $LCL=0$ [N6]. Brak przekroczeń granic kontrolnych w karcie MR potwierdza, że zmienność pomiędzy kolejnymi pomiarami jest stabilna.

Podsumowując, badany proces charakteryzuje się bardzo wysoką zdolnością, zarówno w ujęciu krótkoterminowym, jak i długoterminowym, a uzyskane wartości wskaźników C_p , C_{pk} , P_p i P_{pk} znacznie przewyższają wartości, które były zakładane. Proces jest stabilny i generuje znikomy odsetek wyrobów niespełniających wymagań. Wyniki te świadczą o stabilnym procesie i braku istotnych czynników zakłócających, co potwierdza, że proces jest pod kontrolą statystyczną i jest w pełni zdolny do spełniania założonych kryteriów jakościowych. Uzyskane wartości wskaźników zdolności procesu są na tyle wysokie, że pomimo zastosowania 50-elementowej próbki, której pomiary realizowano w sposób sekwencyjny, można

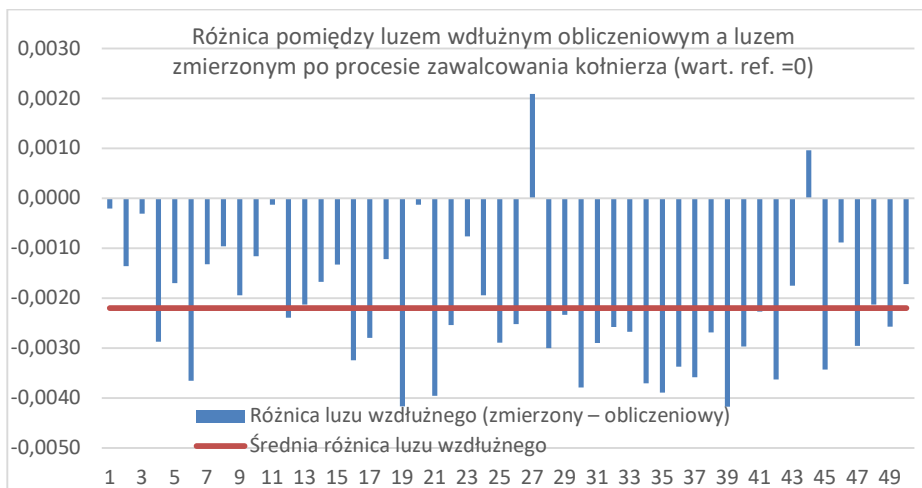
oczekiwać, iż wskaźniki zdolności procesu w ujęciu długoterminowym będą spełniały wymaganie $Cpk \geq 1,33$.

Otrzymane wyniki wskaźników zdolności procesów Cpk i Ppk różnią się od wartości Cp i Pp . Wartości te zostały bowiem otrzymane w wyniku przeprowadzenia montażu piast z jedną (skrajną) grupą selekcyjną wałeczków, co spowodowało zawyżenie wartości otrzymanych wskaźników Cp i Pp oraz zaniżenie wartości wskaźników Cpk oraz Ppk (poprzez przesunięcie wartości średniej). Założona obliczona wartość średnia luzu to $Lo=0,025$ mm, natomiast wartość średnia luzu dla wałeczków z grupy pierwszej grupy selekcyjnej (0; -0,002) wynosi $Lo=0,0205$ mm. Raport z badania zdolności procesu przedstawiono w tabeli 24.

Tabela 24. Raport z badania zdolności procesu

Raport z badania zdolności procesu											
Nazwa obrabiarki	YHBT-III-NT-A	Wydział	PF-2								
Nazwa części	ZPS-001A	Karta operacyjna nr	Mo-09704								
Nazwa operacji	Sprawdzić luz osiowy (po zawalcowaniu)										
Parametr mierzony	Lo	Kryterium oceny	Cpk/Ppk ≥ 1,33								
Histogram Całkowita --- W partii Specyfikacje LSL 0,00 USL 0,05 Graficzny test normalności AD: 0,191, P: 0,893 Wykres wartości indywidualnych UCL=0,02872 X̄=0,01851 LCL=0,00830 Część do części Odchylenie std. 0,003403 Cp 2,45 Cpk 1,81 PPM 0,03 W partii Odchylenie std. 0,003769 Pp 2,21 Ppk 1,64 PPM 0,45 Wykres ruchomego rozstępu UCL=0,01254 M̄R=0,00384 LCL=0 Skośność 0,3013 Kurtoza -0,1405 <tr><td>Cp</td><td>2,45</td><td>Cpk</td><td>1,81</td></tr><tr><td>Pp</td><td>2,21</td><td>Ppk</td><td>1,64</td></tr>				Cp	2,45	Cpk	1,81	Pp	2,21	Ppk	1,64
Cp	2,45	Cpk	1,81								
Pp	2,21	Ppk	1,64								

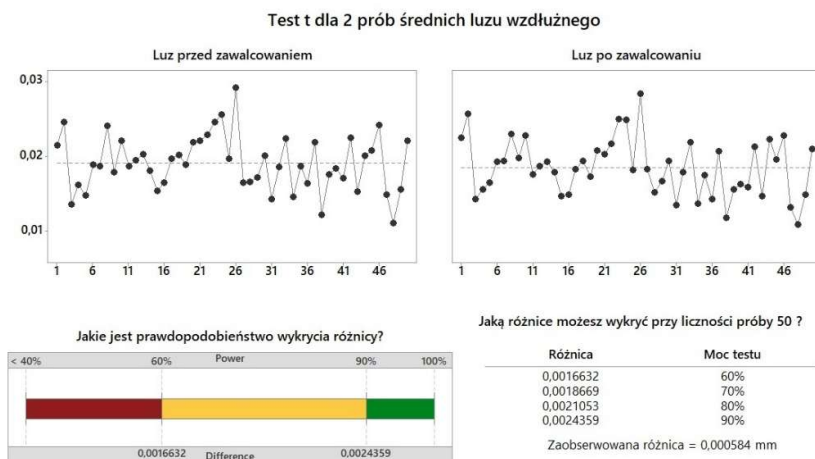
Kolejnym etapem analizy było porównanie wartości oczekiwanej (obliczonej) luzu wzdłużnego z wartością luzu uzyskanego w wyniku pomiaru zmontowanych piast. Wartość średnia luzu wzdłużnego uzyskana podczas pomiarów wyniosła $\overline{Lo}=0,0185$ mm i była mniejsza od średniego luzu wzdłużnego obliczonego ($\overline{Lo}=0,0207$ mm) o 0,0022 mm. Różnica ta może być spowodowana błędem systematycznym, niedoszacowaniem wpływu odchyłek błędów kształtu, bicia, tolerancji kątów bieżni, jak również faktem, że do obliczeń przyjęto średni wymiar wałeczków (średnica wałeczków stożkowych ma największą wartość współczynnika wpływu na luz wzdłużny piasty). Różnicę pomiędzy wartością oczekiwaną luzu wzdłużnego a wartością zmierzoną przedstawiono na rysunku 122. Analiza danych wskazuje, że największe odchylenia od średniej wartości zmierzonego luzu wzdłużnego występują w przypadku pomiarów piast oznaczonych numerami 27 oraz 44. W obu przypadkach uzyskano wartości luzu wzdłużnego większe od wartości obliczeniowych, co może być konsekwencją błędów powstałych w trakcie realizacji lub zapisu pomiarów.



Rys. 122. Różnica pomiędzy wartością oczekiwaną luzu wzdłużnego (linia zerowa) a wartością otrzymaną w wyniku pomiaru

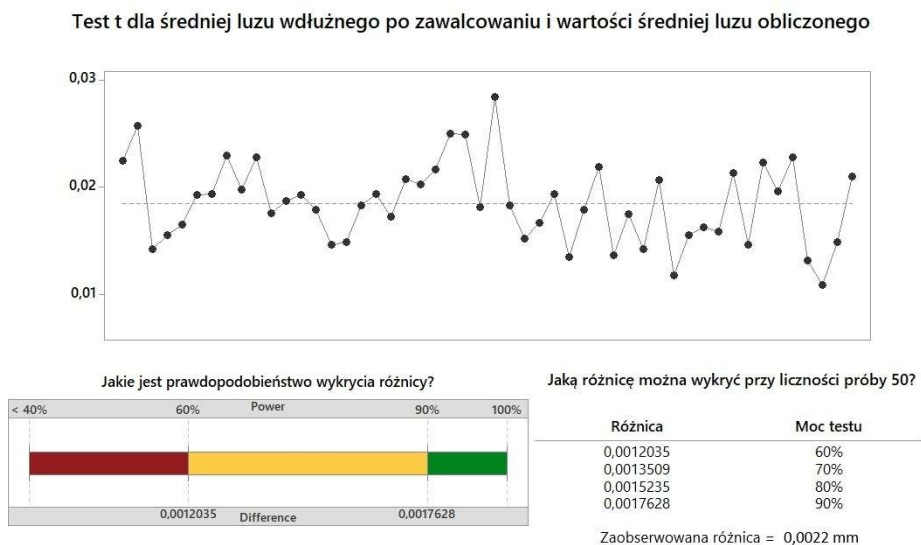
W programie MINITAB przeprowadzono analizę statystyczną w celu oceny różnic pomiędzy wynikami luzu wzdłużnego przed zawalcowaniem i po zawalcowaniu (rys. 123). Wyniki testu wskazują, że brak jest statystycznych podstaw do

stwierdzenia istotnych rozbieżności pomiędzy badanymi wartościami, a zaobserwowana różnica pomiędzy średnimi wynosi 0,0006 mm.



Rys. 123. Porównanie wartości średnich luzów wzdłużnych przed i po zawalcowaniu kołnierza. Prawdopodobieństwo wykrycia różnicy

W kolejnej analizie porównano różnicę pomiędzy luzem wzdłużnym zmierzonym po procesie zawalcowania kołnierza a wartością luzu obliczeniowego (rys. 124). Celem było sprawdzenie, czy obserwowana różnica ma charakter losowy, czy też jest statystycznie istotna. Przeprowadzony test wykazał, że średnia różnica wynosząca 0,0022 mm nie jest wynikiem przypadkowych odchyleń pomiarowych, lecz stanowi efekt istotny statystycznie.



Rys. 124. Porównanie wartości luzów wzdłużnych po zawalcowaniu kołnierza i luzu obliczeniowego. Prawdopodobieństwo wykrycia różnicy

6.5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania statystyczne, zrealizowane w warunkach produkcyjnych potwierdzają zdolność i stabilność procesu wytwarzania zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji. Wyniki MSA spełniły przyjęte kryteria, co wraz z przygotowanym budżetem niepewności i regułą U/T, zapewnia wiarygodność oceny zdolności obrabiarek i procesów. W oparciu o „odwrócone” badanie zdolności maszyn zaprojektowano tolerancje dla kluczowych wymiarów tak, aby spełnić wymagania $C_m, C_{mk} \geq 1,67$, a walidacja na rzeczywistych danych potwierdziła zgodność przyjętych założeń z uzyskiwanymi rozkładami i poziomami zmienności. Uzyskane wyniki pomiarów wykazały zgodność wartości rzeczywistych z założeniami teoretycznymi, co świadczy o prawidłowości opracowanego modelu oraz właściwym doborze parametrów technologicznych. Zaobserwowane odchylenia pomiędzy wartościami obliczeniowymi a rzeczywistymi mogą wynikać z wpływu nieuwzględnionych czynników geometrycznych i montażowych, które nie zostały w pełni ujęte w modelu obliczeniowym. Otrzymane rezultaty potwierdzają, że proces spełnia wymagania stabilnej produkcji seryjnej, zapewniając wysoką jakość, powtarzalność oraz zgodność z wymaganiami konstrukcyjnymi.

ROZDZIAŁ VII

WNIOSKI KOŃCOWE

Zrealizowana praca pozwoliła na sformułowanie niżej podanych wniosków:

1. Wnioski dotyczące analizy konstrukcji piasty łożyskowej z uwzględnieniem optymalizacji tolerancji:
 - Zespolone piasty łożyskowe znajdują coraz szersze zastosowanie w konstrukcjach pojazdów samochodowych, co jest wynikiem rozwoju technologii łożyskowych oraz dążenia producentów do zwiększenia integracji funkcjonalnej elementów układu jezdnego. Ich rosnąca popularność wynika z przewagi nad tradycyjnymi węzłami łożyskowymi, obejmującej zarówno aspekty ekonomiczne, jak i eksploatacyjne. Rozwiązania te charakteryzują się niższymi kosztami wytwarzania, uproszczoną procedurą montażu oraz poprawą kluczowych parametrów użytkowych. W porównaniu z klasycznymi rozwiązaniami, zastosowanie piast zespolonych pozwala na integrację większej liczby funkcji w jednym zespole oraz redukcję masy układu.
 - Opracowanie modelu matematycznego luzu wzdłużnego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji umożliwiło jednoznaczną identyfikację ogniw składowych łańcucha wymiarowego oraz określenie ich indywidualnego wpływu na luz wzdłużny. Analiza modelu pozwoliła na wyznaczenie współczynników wrażliwości poszczególnych ogniw, co stworzyło podstawę do opracowania optymalnych zakresów tolerancji wymiarowych, zapewniających spełnienie wymagań konstrukcyjnych i eksploatacyjnych przy jednoczesnej możliwości optymalizacji kosztów wytwarzania.
2. Wnioski dotyczące zastosowanych obrabiarek w procesie technologicznym:
 - W wyniku zastosowania zasady zamienności częściowej przy oczekiwanym wskaźniku zdolności procesu C_p oraz C_{pk} na poziomie co najmniej 1,33, możliwe było istotne rozszerzenie dopuszczalnych odchyłek wymiarowych dla ogniw składowych. Analiza statystyczna wykazała, że przy zachowaniu wymaganego poziomu zdolności produkcyjnej, tolerancje poszczególnych elementów mogły zostać zwiększone niemal trzykrotnie w porównaniu z wartościami początkowymi.
 - Zastosowanie odwróconego podejścia w analizie zdolności maszyn umożliwiło określenie optymalnych wartości tolerancji, uwzględniających faktyczne możliwości technologiczne posiadanego parku maszynowego. W przeciwieństwie do klasycznej metody, w której tolerancje projektowe definiuje się

niezależnie od potencjału maszyn, przyjęte rozwiązanie polegało na dostosowaniu wymagań tolerancyjnych do realnych parametrów osiąganych w procesach wytwórczych. Przeprowadzona analiza pozwoliła na precyzyjne wyznaczenie tolerancji procesowych, które gwarantowały realizację założeń zamienności częściowej przy jednoczesnym zachowaniu wymaganego poziomu wskaźników zdolności procesu C_p , C_{pk} . Dzięki temu możliwe było optymalne wykorzystanie możliwości zakupionych maszyn, zwiększenie efektywności produkcji oraz redukcja ryzyka przekroczenia dopuszczalnych odchylek wymiarowych, bez obniżenia jakości wyrobu finalnego.

3. Wnioski wynikające z przeprowadzonych badań statystycznych:

- Przeprowadzona analiza statystyczna potwierdziła zdolność procesu. Uzyskane wartości wskaźników zdolności procesu, tj. $P_p=2,21$ oraz $P_{pk}=1,64$, wskazują na istotny potencjał badanego procesu produkcyjnego. Należy jednak podkreślić, że przedstawione wyniki nie odzwierciedlają pełnego zakresu zmienności procesu, gdyż do montażu zastosowano wyłącznie jedną grupę selekcyjną wałeczków o wymiarach nominalnych w przedziale $(0;-0,002)$. Takie zawężenie zmienności skutkowało przesunięciem średniej wartości w kierunku mniejszego luzu wzdłużnego, co z kolei spowodowało obniżenie wartości wskaźnika P_{pk} , przy jednoczesnym zwiększeniu wartości wskaźnika P_p . Sposób pobierania próbek do badania wskaźnika zdolności procesu nie był właściwy, gdyż zastosowano procedurę odpowiadającą próbkowaniu przeznaczonemu do oceny zdolności maszyny. W konsekwencji uzyskane wyniki obejmują zawężony zakres potencjalnej zmienności procesu. Niemniej jednak, otrzymane wartości stanowią wiarygodną podstawę do stwierdzenia, że w warunkach produkcji seryjnej wskaźniki C_p i C_{pk} będą utrzymywać się na poziomie powyżej 1,33.
- Analiza porównawcza wartości obliczonego i zmierzonego luzu wzdłużnego wykazała, że średnia wartość zmierzonego luzu po procesie zawałcowania była mniejsza od wartości oczekiwanej o około 0,0022 mm. Zaobserwowana różnica może wynikać z występowania błędu systematycznego oraz niedoszacowania wpływu takich czynników, jak odchyłki kształtu elementów, bicie promieniowe, tolerancje kątów bieżni, a także fakt, iż w obliczeniach przyjęto średni wymiar wałeczków, pomijając ich rzeczywisty rozkład wymiarów. Rzeczywisty wpływ wymiarów wałeczków jest trudny do oszacowania ze względu na ilość elementów tocznych (piasta zawiera 42 wałeczki stożkowe). Czynniki te mogły wpłynąć na obniżenie uzyskanej wartości luzu w stosunku do wartości teoretycznej. Badania przeprowadzone na większej populacji

próbek umożliwią weryfikację, czy zaobserwowany trend utrzyma się w szerszym zakresie danych.

4. Wnioski ostateczne zmierzające do obniżenia kosztów produkcji:

- Rozszerzenie pól tolerancji dla podzespołów zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji umożliwiło wyeliminowanie operacji selekcji, której realizacja wiązałaby się ze zwiększeniem pracochłonności procesu wytwórczego. Wymagałaby ona dodatkowych stanowisk pomiarowych dedykowanych do operacji selekcji, jak również specjalistycznego wyposażenia pomiarowego, które musiałoby podlegać bieżącemu nadzorowi metrologicznemu i okresowej weryfikacji. Istotnym problemem eksploatacyjnym byłyby także tzw. „końcówki partii” - elementy pozbawione odpowiedniej grupy selekcyjnej, uniemożliwiającej ich prawidłowy montaż w zespole.
- Eliminacja operacji selekcji pierścieni przeznaczonych do montażu zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji pozwoliła na redukcję kosztów montażu o 8%.

PODSUMOWANIE

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

- Przeprowadzono szczegółową analizę rysunku konstrukcyjnego piasty łożyskowej trzeciej generacji (FŁT Kraśnik S.A.) z uwzględnieniem wymagań wymiarowych, tolerancji oraz powiązań geometrycznych, co pozwoliło na ocenę wpływu rozwiązań konstrukcyjnych na montaż, ustawienie napięcia wstępnego oraz spełnienie wymagań jakościowych i eksploatacyjnych.
- Opracowano model umożliwiający analizę wpływu odchyłek wymiarowych elementów składowych na wartość luzu wzdłużnego, co stało się podstawą do optymalizacji montażu, zapewnienia prawidłowego napięcia wstępnego oraz oceny możliwości zastosowania zamienności częściowej w celu redukcji kosztów.
- Przeprowadzono obliczenia dla ustalonych łańcuchów wymiarowych w kontekście modelu luzu wzdłużnego, określając wpływ odchyłek na luz łożysk oraz możliwości redukcji kosztów wytwarzania przy zachowaniu wymaganych parametrów eksploatacyjnych.
- Porównano tolerancje wynikające z zasady zamienności częściowej z wartościami przyjętymi w dokumentacji technicznej, wskazując obszary, w których możliwe było bezpieczne rozszerzenie tolerancji bez wpływu na luz wzdłużny i charakterystykę pracy zespołu.

- Ustalono kolejność operacji dla elementów piasty, uwzględniając wymagania konstrukcyjne, tolerancje i właściwości materiałów, ze szczególnym naciskiem na etapy wpływające na luz wzdłużny.
- Określono optymalne powierzchnie bazowe i wymagania dla maszyn wytwarzających pierścienie łożyskowe, zapewniając dokładność pozycjonowania, minimalizację błędów i utrzymanie wymaganych tolerancji.
- Zaplanowano operacje cieplne, tokarskie, frezarskie i szlifierskie, dobierając parametry obróbki minimalizujące odkształcenia i zapewniające zgodność z wymaganiami konstrukcyjnymi; określono zestaw narzędzi pomiarowych do bieżącej kontroli jakości.
- Wykonano analizę powtarzalności i dokładności maszyn w odniesieniu do wymiarów krytycznych, wyznaczono ostateczne tolerancje ogniów składowych, a następnie zrealizowano montaż próbnej serii 50 sztuk piast, potwierdzając zasadność przyjętych założeń oraz wskazując obszary dalszej optymalizacji.

Realizacja celów szczegółowych pracy pozwoliła na osiągnięcie głównego celu pracy: opracowanie nowej technologii wytwarzania oraz modelu matematycznego łańcuchów wymiarowych, umożliwiającego wyznaczenie tolerancji wykonania wymiarów wynikowych. Opracowanie modeli dla zamienności pełnej i częściowej przy określonym poziomie prawdopodobieństwa oraz przeprowadzenie analizy wpływu tych rozwiązań na możliwość rozszerzenia tolerancji i redukcję kosztów produkcji.

Przedstawione w niniejszej rozprawie wnioski, a także realizacja głównego celu pracy poprzez osiągnięcie założonych celów szczegółowych, stanowią podstawę do potwierdzenia prawdziwości tezy badawczej sformułowanej w rozdziale 3.2.:

Opracowanie nowej technologii wytwarzania oraz budowa modelu matematycznego łańcuchów wymiarowych umożliwia ustalenie tolerancji wykonania przyjętych wymiarów wynikowych. Zastosowanie zamienności częściowej pozwala na rozszerzenie tolerancji i zmniejszenie kosztów wytwarzania.

Zdobyta wiedza oraz przeprowadzone analizy pozwoliły na opracowanie metodyki, stanowiącej solidne podstawy do dalszej optymalizacji i rozwoju, wspierającej przyszłe implementacje piast i pokrewnych rozwiązań konstrukcyjnych o różnicowanych wymaganiach technicznych.

LITERATURA

- [1] Adamczak S.: Pomiary geometryczne powierzchni: zarysy kształtu, falistość i chropowatość, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2008.
- [2] Adamczak S.: Metrologia geometryczna powierzchni technologicznych: zarysy kształtu, falistość, mikro- i nanochropowatość, Wydanie I, PWN, Warszawa, 2023.
- [3] Adamczak S., Gajur M., Kuźmicki K.: Metrological problems during mounting of bearings in machines. *Mechanik*, (11): 38–41, 2022.
- [4] Adamczak S., Gajur M., Kuźmicki K.: Projektowanie, budowa i eksploatacja maszyn – cz. III, in: *Ewolucja rozwiązań konstrukcyjnych węzłów łożyskowych kół pojazdów samochodowych*, Politechnika opolska, Szklarska Poręba: 7-14, 2024.
- [5] Adamczak S., Gajur M., Kuźmicki K.: A Mathematical Model of the Dimensional Chain for a Generation 2 Wheel Hub Unit. *Strojnicki vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, 71(1–2): 44–50, 2025.
- [6] Adamczak S., Gajur M., Kuźmicki K.: Technological problems in the manufacture of bearing hubs. *Mechanik*, (12): 6–8, 2025.
- [7] Adamczak S., Kuźmicki K., Gajur M.: Use of product geometry specifications in the design of 3rd generation combined bearing hubs. *Transportation Research Procedia*, 74: 480–485, 2023.
- [8] Adamczak S., Makiela W.: *Metrologia w budowie maszyn: zadania z rozwiązaniami*, Wyd. 2 zm, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2007.
- [9] Adamczak S., Zmarzły P.: Influence of raceway waviness on the level of vibration in rolling-element bearings. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 65(4): 541–551, 2017.
- [10] Ahmed M., Baqqar M., Gu F., Ball A. D.: Fault detection and diagnosis using Principal Component Analysis of vibration data from a reciprocating compressor, in: *Proceedings of 2012 UKACC International Conference on Control*, IEEE, Cardiff, United Kingdom: 461–466, 2012.
- [11] Ahmed M., Gu F., Ball A.: Feature Selection and Fault Classification of Reciprocating Compressors using a Genetic Algorithm and a Probabilistic Neural Network. *Journal of Physics: Conference Series*, 305:1–12, 2011.
- [12] Ambrożkiewicz B., Przystupa K., Wnuk S.: Influence of roundness deviation value on bearing vibration level. *AUTOBUSY – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*, 19(12): 277–281, 2018.
- [13] Ameta G., Davidson J. K., Shah J. J.: Using Tolerance-Maps to Generate Frequency Distributions of Clearance and Allocate Tolerances for Pin-Hole Assemblies. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 7(4): 347–359, 2007.
- [14] Antoni J.: The spectral kurtosis: a useful tool for characterising non-stationary signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(2): 282–307, 2006.

-
- [15] Arendarski J.: Niepewność pomiarów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2003.
 - [16] Aswad M. F., Mohammed A. J., Faraj S. R.: Induction Surface Hardening: a review. *Journal of Physics: Conference Series*, 1973(1): 012087, 2021.
 - [17] Atef M. M., Khair-Eldeen W., Yan J., Nassef M. G. A.: Investigating the Combined Effect of Multiple Dent and Bump Faults on the Vibrational Behavior of Ball Bearings. *Machines*, 10(11): 1062, 2022.
 - [18] Automotive Industry Action Group (AIAG): Statistical Process Control (SPC) Reference Manual, Second Edition.
 - [19] Automotive Industry Action Group (Southfield), ed.: Podręcznik FMEA: analiza rodzaju i skutków błędu: FMEA konstrukcji: FMEA procesu: uzupełniające FMEA do monitorowania i odpowiedzi systemu, Wydanie pierwsze, czerwiec 2019, Team Prevent Poland Sp. z o.o, Pszczyna, 2019.
 - [20] Avila Rondón R. L., Rodríguez R. P., Cordovés García A., Avila Alfaro R. P., Mendoza Núñez Z., Seañez De Villa J. M., Estévez Parra E., Rodríguez Ramírez Y.: Tolerances Modeling in Assemblies: An Approach Based on Graphs. *Advanced Materials Research*, 902: 378–384, 2014.
 - [21] Babiarz R., Żyłka Ł., Płodzień M., Sułkowicz P.: Monitoring the condition of the grinding wheel CFG with the use of acoustic signals. *Mechanik*, (8–9): 708/1-708/3, 2015.
 - [22] Bak M., Libera M., Jósko M.: WPŁYW WARUNKÓW SMAROWANIA NA ZMIANY STRUKTURY GEOMETRYCZNEJ POWIERZCHNI ELEMENTÓW ŁOŻYSK TOCZNYCH. *TRIBOLOGIA*. Politechnika Poznańska, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, (4): 11–16, 2012.
 - [23] Barglik J.: Induction hardening of steel elements with complex shapes. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, 1(4): 53–56, 2018.
 - [24] Barglik J.: Induction surface hardening - comparison of different methods. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, 1(7): 8–13, 2018.
 - [25] Beaucaire P., Gayton N., Duc E., Dantan J.-Y.: Statistical Tolerance Analysis of a Mechanism with Gaps based on System Reliability Methods. *Procedia CIRP*, 10: 2–8, 2013.
 - [26] Brian Rowe W.: Rounding and stability in centreless grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 82–83:1–10, 2014.
 - [27] Burakowski T., Wierzchoń T.: Inżynieria powierzchni metali: podstawy, urządzenia, technologie, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1995.
 - [28] Carlisle R. P.: Scientific American inventions and discoveries: all the milestones in ingenuity - from the discovery of fire to the invention of the microwave oven, Wiley, Hoboken, NJ, 2004.
 - [29] Chen G., Wang B., Mao F.: Effects of raceway roundness and roller diameter errors on clearance and runout of a cylindrical roller bearing. *Proceedings of*

- the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 227(3): 275–285, 2013.
- [30] Cichosz P.: Narzędzia skrawające, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2006.
 - [31] Corrado A., Polini W., Moroni G.: Manufacturing signature and operating conditions in a variational model for tolerance analysis of rigid assemblies. *Research in Engineering Design*, 28(4): 529–544, 2017.
 - [32] Cui Q., Ding H., Cheng K.: An analytical investigation on the workpiece roundness generation and its perfection strategies in centreless grinding. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 229(3): 409–420, 2015.
 - [33] Dantan J.-Y., Gayto N., Etienne A., Jawad Qureshi A.: Mathematical issues in mechanical tolerance analysis, in: : 1–12, Le Mont Dore, 2012.
 - [34] Dantan J.-Y., Homri L.: Overview of mathematical concepts for tolerance analysis. *Procedia CIRP*, 129: 73–78, 2024.
 - [35] Dietrich E., Schulze A., Wojtas Z.: Metody statystyczne w kwalifikacji środków pomiarowych maszyn i procesów produkcyjnych, Notika System, Warszawa, 2000.
 - [36] FAG: Łożyska toczne. Katalog WL 41 520/2PLA, FAG, 1997.
 - [37] Felix A., Melkote S. N.: Effect of Workpiece Flatness and Surface Finish on the Holding Force of a Magnetic Chuck. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 121(4): 811–814, 1999.
 - [38] Furukawa K.: 2.5TH Generation Double-Row Tapered Roller Bearing Hub Unit for SUVs and Pickup Trucks. *JTEKT ENGINEERING JOURNAL*, (1009E): 49–53, 2012.
 - [39] Gawlik E., Gil S.: Koncepcja systemu oceny technologiczności konstrukcji części maszyn i zespołów maszynowych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Mechanika*, z. 83[279](1): 239–249, 2011.
 - [40] George D., Mallery P.: *IBM SPSS Statistics 27 Step by Step: A Simple Guide and Reference*, 17th ed., Routledge, New York, 2021.
 - [41] Goka E., Beaurepaire P., Homri L., Dantan J.-Y.: Probabilistic-based approach using Kernel Density Estimation for gap modeling in a statistical tolerance analysis. *Mechanism and Machine Theory*, 139: 294–309, 2019.
 - [42] Goka E., Homri L., Beaurepaire P., Dantan J.-Y.: Statistical Tolerance Analysis of Over-Constrained Mechanical Assemblies With Form Defects Considering Contact Types. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 19(2): 021010, 2019.
 - [43] Gunduz A., Dreyer J. T., Singh R.: Effect of bearing preloads on the modal characteristics of a shaft-bearing assembly: Experiments on double row angular contact ball bearings. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 31: 176–195, 2012.
 - [44] Harris T. A., Kotzalas M. N.: *Essential Concepts of Bearing Technology*, 0 ed., CRC Press, 2006.

-
- [45] Hebda M., Wachal A.: Trybologia, pierwsze, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1980.
 - [46] Homri L., Beaurepaire P., Dumas A., Goka E., Gayton N., Dantan J.-Y.: Statistical Tolerance Analysis Technique for Over-constrained Mechanical Systems. *Procedia CIRP*, 75: 232–237, 2018.
 - [47] Homri L., Teissandier D., Ballu A.: Tolerance analysis by polytopes: Taking into account degrees of freedom with cap half-spaces. *Computer-Aided Design*, 62:1 12–130, 2015.
 - [48] Hou A., Parker L. C., Harris W. E., Wilman D. J.: STATISTICAL TOOLS FOR CLASSIFYING GALAXY GROUP DYNAMICS. *The Astrophysical Journal*, 702(2): 1199–1210, 2009.
 - [49] Humienny Z.: Language of geometrical product specifications – a mysterious and unknown whether second native language of each engineer?. *Mechanik*, (7): 18–23, 2020.
 - [50] Humienny Z., Kiszka K.: *Metrologia i zamienność*, Politechnika Warszawska, 2011.
 - [51] Humienny Z., Kiszka K., Białas S., eds.: *Metrologia z podstawami specyfikacji geometrii wyrobów (GPS)*, Wydanie II zmienione, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2021.
 - [52] Imou A., Takano T.: Tube Forming Simulation in a Generation 4 Hub joint. *NTN Technical Review*, (75): 42–45, 2007.
 - [53] Jakubiec W., Malinowski J.: *Metrologia wielkości geometrycznych*, Wyd. 4 zm, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2004.
 - [54] Jakubowicz M., Jakubek B., Smulek W.: Comparison of rolling bearings’ diagnosing methods – procedures of damage introduction. *Vibrations in Physical Systems*, (29): 1–8, 2018.
 - [55] Janecki D., Cedro L., Zwierzchowski J.: Separation Of Non-Periodic And Periodic 2D Profile Features Using B-Spline Functions. *Metrology and Measurement Systems*, 22(2): 289–302, 2015.
 - [56] Jemielniak K.: *Obróbka skrawaniem: podstawy, dynamika, diagnostyka*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2018.
 - [57] Jezierski J.: *Analiza tolerancji i zamienności części maszyn*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1973.
 - [58] Jezierski J.: *Analiza tolerancji i niedokładności pomiarów w budowie maszyn, trzecie*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2003.
 - [59] Jezierski J., ed.: *Analiza tolerancji w konstrukcji i technologii maszyn: zbiór zadań*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2010.
 - [60] Kaczor J.: EFFECT OF TAPERED ROLLER BEARINGS PRELOAD ON BEARING SYSTEM DURABILITY. *Tribologia*, 298(4): 15–26, 2022.
 - [61] Krężolek D.: Weryfikacja testów zgodności na rynku metali szlachetnych. (219): 53–64, 2015.

-
- [62] Kubátová D., Melichar M., Kutlwašer J.: Evaluation of Repeatability and reproducibility of CMM equipment. *Procedia Manufacturing*, 13: 558–564, 2017.
 - [63] Kukielka L.: *Podstawy badań inżynierskich*, Wydaw. Naukowe PWN, Warszawa, 2002.
 - [64] Kwilinski A., Kardas M.: Enhancing Process Stability and Quality Management: A Comprehensive Analysis of Process Capability Indices. *Virtual Economics*, 6(4): 73–92, 2023.
 - [65] Lawrowski Z.: *Tribologia: tarcie, zużywanie i smarowanie, pierwsze*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1993.
 - [66] Lisowski M.: *Podstawy metrologii*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2011.
 - [67] Liu J., Yan Z., Shao Y.: An investigation for the friction torque of a needle roller bearing with the roundness error. *Mechanism and Machine Theory*, 121: 259–272, 2018.
 - [68] Lu X., Xie X.: Multi-objective structural optimization of hub unit bearing using response surface methodology and genetic algorithm. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 8(3): 1–10, 2014.
 - [69] Maciejczyk A., Zdziennicki Z.: ŁOŻYSKOWANIE PIAST KÓŁ POJAZDÓW. *Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*, (3): 1593–1599, 2013.
 - [70] Meller E., Preihs J.: *Ćwiczenia z analizy tolerancji maszyn*, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2006.
 - [71] Nagarajan L., Mahalingam S. K., S A., Natarajan E. P.: A Novel Methodology for Simultaneous Minimization of Manufacturing Objectives in Tolerance Allocation of Complex Assembly. 2021.
 - [72] Nam C., Lee M., Eom J., Choi M., Joun M.: Finite Element Analysis Model of Rotary Forging for Assembling Wheel Hub Bearing Assembly. *Procedia Engineering*, 81: 2475–2480, 2014.
 - [73] Numata T.: Latest Technical Trends regardnig Hub Unit Bearing. *Koyo Engineering Journal English Edition*, (168E): 8–13, 2005.
 - [74] Pawar S. Y., Chavan H. A., Chavan S. P.: TOLERANCE STACK UP ANALYSIS USING VISUALIZATION VSA. *International Journal of Advanced Engineering Technology*, :169–175, 2011.
 - [75] Płaska S.: *Wprowadzenie do statystycznego sterowania procesami technologicznymi*, Wydaw. Politechniki Lubelskiej, Lublin, 2000.
 - [76] POLÁK P., DRLÍČKA R., ŽITŇANSKÝ J.: CAPABILITY ASSESSMENT OF MEASURING EQUIPMENT USING STATISTIC METHOD. *Management Systems in Production Engineering*, (4(16)): 184–186, 2014.
 - [77] Polini W., Corrado A.: A Geometric Model for Tolerance Analysis with Manufacturing Signature and Operating Conditions:. *International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering*, 9(3): 1–13, 2019.

-
- [78] Rajashekharaiiah J.: Six sigma benchmarking of process capability analysis and mapping of process parameters. *Journal of Operations and Supply Chain Management*, 9(2): 60–71, 2016.
 - [79] Sahani A. K., Jain P. K., Sharma Satish C.: Geometrical Tolerance Stack Up Techniques, in: Katalinic B., Tekic Z. (Eds.), *DAAAM International Scientific Book*, 1st ed., : 857–872, DAAAM International Vienna, 2013.
 - [80] Sakamoto J.: Trends and New Technologies of Hub Unit Bearings. *Motion & Control. NSK Technical Journal*, (17): 2–9, 2015.
 - [81] Sałaciński T.: Analiza zdolności narzędzi i systemów pomiarowych. *Inżynieria Maszyn*, 17(2): 74–83, 2012.
 - [82] Sałaciński T.: SPC - statistical process control, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, Warszawa, 2015.
 - [83] Sałaciński T.: Supervision of metal cutting technology processes with use of metrology and SPC and MSA systems. *Mechanik*, (8–9): 728/533-728/541, 2015.
 - [84] Shibata K., Norimatsu T.: Technical Trends in Axle Bearings and the Development of Related Products. *NTN Technical Review*, (75): 29–35, 2007.
 - [85] Simion C.: Capability studies, helpful tools in process quality improvement. *MATEC Web of Conferences*, 121: 05008, 2017.
 - [86] Takahashi K., Suzuki D., Nagamoto T.: Effect of Axial Clearance on Rolling Element Load of Double Row Tapered Roller Bearings. *QR of RTRI*, (3): 196–201, 2019.
 - [87] Teissandier D., Delos V.: Operations on polytopes: application to tolerance analysis, in: : 1–10, Enschede, The Netherlands, 1999.
 - [88] Thanedar A., Dongre G. G., Singh R., Joshi S. S.: Surface integrity investigation including grinding burns using barkhausen noise (BNA). *Journal of Manufacturing Processes*, 30: 226–240, 2017.
 - [89] Toda K., Kashiwagi S., Mitarai T.: Development of Hub Units with Shaft Clinching for Automotive Wheel Bearings. *Koyo Engineering Journal English Edition*, (158E): 26–30, 2001.
 - [90] Tuan N. A.: Multi-Objective Optimization of Process Parameters to Enhance Efficiency in the Shoe-Type Centerless Grinding Operation for Internal Raceway of Ball Bearings. *Metals*, 11(6): 893, 2021.
 - [91] Tuan N. A.: The Effects of Process Parameters on Workpiece Roundness in the Shoe-Type Centerless Grinding Operation for Internal Raceway of Ball Bearings. *Coatings*, 13(11): 1864, 2023.
 - [92] Umaras E., Barari A., Horikawa O., Tsuzuki M. S. G.: Dimensional Tolerances in Mechanical Assemblies: A Cost-Based Optimization Approach. *Applied Sciences*, 13(16): 9202, 2023.
 - [93] VDA 4: Podstawy, analizy ryzyka, metody, modele procesów. Kształtowanie procesu i nadzór nad procesem w aspekcie ekonomicznym. Wydanie drugie, zmienione i rozszerzone.

- [94] Wieczorowski M., Pawlus P., Gapiński B.: Perspectives of modern metrology. *Mechanik*, (12): 767–773, 2019.
- [95] Wierzcholski K.: PROBABILISTYCZNE STUDIUM ZATARCIA ŁOŻYSK ŚLIZGOWYCH I TOCZNYCH. *TRIBOLOGIA*, (4): 199–206, 2015.
- [96] Wrzochal M., Adamczak S., Piotrowicz G., Wnuk S.: Industrial Experimental Research as a Contribution to the Development of an Experimental Model of Rolling Bearing Vibrations. *Strojnicki vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, 68(9): 552–559, 2022.
- [97] Wrzochal M., Piotrowicz G., Adamczak S., Wnuk S.: Vibration Measurement Trends in the Bearing Industry, in: Katalinic B. (Ed.), *DAAAM International Scientific Book*, 1st ed., : 171–180, DAAAM International Vienna, 2021.
- [98] Zhang B., Gan Z., Yang Y., Howes T. D.: Workholding Stability in Shoe Centerless Grinding. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 121(1): 41–48, 1999.
- [99] Zhang H., Lieh J., Yen D.: Dynamic performance of shoe centreless grinding. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 218(8): 939–947, 2004.
- [100] Zhang H., Lieh J., Yen D., Song X., Rui X.: Geometry Analysis and Simulation in Shoe Centerless Grinding. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 125(2): 304–309, 2003.
- [101] Zhou S. S., Gartner J. R., Howes T. D.: On the Relationship between Setup Parameters and Lobing Behavior in Centerless Grinding. *CIRP Annals*, 45(1): 341–346, 1996.
- [102] Zmarzły P.: Mathematical model of the impact assessment of roughness and waviness deviations of races surfaces of rolling bearings on the level of generated vibration. *Mechanik*, (1): 35–37, 2019.

NORMY

- [N1] IATF 16949:2016 - wersja polska. STANDARD SYSTEMU ZARZĄDZANIA JAKOŚCIĄ W PRZEMYSLE MOTORYZACYJNYM. Wymagania względem systemów zarządzania jakością dla produkcji seryjnej oraz produkcji części serwisowych w przemyśle motoryzacyjnym.
- [N2] PN-EN ISO 10012:2004 - wersja polska. Systemy zarządzania pomiarami - Wymagania dotyczące procesów pomiarowych i wyposażenia pomiarowego
- [N3] PN-EN ISO 9000:2015 - wersja polska. Systemy zarządzania jakością - Podstawy i terminologia
- [N4] PN-EN ISO 9001:2015-10 - wersja polska. Systemy zarządzania jakością - Wymagania
- [N5] ISO 22514-2:2017– wersja angielska. Metody statystyczne w zarządzaniu procesami. Zdolność i wydajność. Część 2: Zdolność procesowa i wydajność modeli procesów zależnych od czasu

- [N6] ISO 7870-2 – wersja angielska. Karty kontrolne – Część 2: Karty kontrolne Shewharta
- [N7] PN-EN ISO 8015:2012 - wersja polska. Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Podstawy. Pojęcia, zasady i reguły
- [N8] ISO 492:2014 – wersja angielska. Łożyska toczne – Łożyska promieniowe – Tolerancje wymiarowe i geometryczne
- [N9] PN-EN ISO 1101:2017 wersja polska. Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) - Tolerancje geometryczne - Tolerancje kształtu, kierunku, położenia i bicia
- [N10] PN-EN ISO 14405-1:2016-12 - wersja polska. Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) - Tolerowanie wymiarów - Część 1: Wymiary liniowe wewnętrzne lub zewnętrzne
- [N11] PN-EN ISO 12181-1:2012 - wersja polska. Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) - Okrągłość - Część 1: Terminologia i parametry okrągłości.
- [N12] PN-EN ISO 12181-2:2012 - wersja polska. Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) - Okrągłość - Część 2: Operatory specyfikacji.
- [N13] PKN-ISO/IEC Guide 99 Międzynarodowy słownik metrologii. Pojęcia podstawowe i ogólne terminy z nimi związane (VIM)
- [N14] PN-EN ISO 3650:2000 - wersja polska. Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) - Wzorce długości - Płytki wzorcowe
- [N15] PN-EN ISO 18391:2016 - wersja polska. Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Specyfikacja populacji

DOKUMENTY JCGM

- [JCGM1] JCGM 104:2009 Opracowanie danych pomiarowych – Wprowadzenie do „Przewodnika po wyrażaniu niepewności pomiaru” oraz do powiązanych dokumentów (ang. Evaluation of measurement data - An introduction to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” and related documents) GUM

STRONY INTERNETOWE

- [S1] <https://asaip.psu.edu/>
- [S2] <https://www.6sigma.us>

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 1. Zespół dwóch łożysk stożkowych piasty koła naczepy samochodu ciężarowego [5]	14
Rys. 2. Specjalna nakrętka łożyskowa: 1 – nakrętka, 2 – sprężyna talerzowa, 3 – podkładka zębata [4]	15
Rys. 3. a) Zespółona piasta łożyskowa pierwszej generacji, b) łożysko kulkowe skośne dwurzędowe: 1 – pierścień zewnętrzny, 2 – pierścień wewnętrzny, 3 – uszczelka	16
Rys. 4. Zespółona piasta drugiej generacji: 1 – pierścień zewnętrzny z kołnierzem, 2 – pierścienie wewnętrzne, 3 – uszczelka [4]	18
Rys. 5. Zespółona piasta trzeciej generacji: 1 – pierścień zewnętrzny kołnierzowy, 2 – pierścień wewnętrzny kołnierzowy, 3 – standardowy pierścień łożyskowy, wewnętrzny, 4 – element toczny – wałeczek stożkowy [4]	19
Rys. 6. a) Zespółona piasta łożyskowa trzeciej generacji z wielowypustowym mechanizmem sprzęgającym, b) kielich półosi: 1 – kołnierzowy pierścień zewnętrzny, 2 – kołnierzowy pierścień wewnętrzny z wieńcem zębatym, 3 – kielich półosi z wieńcem zębatym [5]	20
Rys. 7. Zespółona piasta czwartej generacji [68]	20
Rys. 8. Schemat łańcuchów wymiarowych płaskich: a) z ogniwami równoległymi, b) z ogniwami nierównoległymi	22
Rys. 9. Schemat zintegrowanego podejścia do kwalifikacji pomiarów, maszyn i procesów technologicznych [82]	30
Rys. 10. Histogram rozkładu normalnego lub bardzo zbliżonego do rozkładu normalnego	36
Rys. 11. Wynik graficznego testu normalności rozkładu normalnego	37
Rys. 12. Zespółona piasta łożyskowa trzeciej generacji z wykorzystaniem konstrukcji łożysk stożkowych. 1 – pierścień zewnętrzny, 2 – pierścień wewnętrzny, 3 – element toczny – wałeczek stożkowy, 4 – kosz, 5 – pierścień wewnętrzny kołnierzowy, 6 – uszczelka z deflektorem, 7 – uszczelka, 8 – czujnik, 9 – śruba piasty, 10 – pierścień impulsowy	50
Rys. 13. Rysunek łożyska stożkowego wykonany z wykorzystaniem modyfikatorów ISO GPS [FŁT]	52
Rys. 14. Możliwości wyboru modyfikatorów wg normy ISO 14405-1 w oprogramowaniu pomiarowym PC-Dmis CAD++ 2025.1 (materiał udostępniony przez firmę HEXAGON)	53
Rys. 15. a) Specyfikacja tolerancji bicia osiowego powierzchni czołowej piasty łożyskowej trzeciej generacji; b) pole tolerancji w postaci pierścienia cylindrycznego o wysokości $T=0,05$ mm, którego oś pokrywa się z osią obrotu elementu. Zakres wymiarowy powierzchni objętej kontrolą został określony jako szerokość czoła $L=50$ mm [6]	54
Rys. 16. Pierścień zewnętrzny zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji. Parametry wpływające na luz wzdłużny piasty	56

Rys. 17. Pierścień wewnętrzny zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji. Parametry wpływające na luz wzdłużny piasty	57
Rys. 18. Pierścień wewnętrzny kołnierzowy zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji. Parametry wpływające na luz wzdłużny piasty	57
Rys. 19. Wałeczek stożkowy zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji	58
Rys. 20. Schemat wymiarowy zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji....	60
Rys. 21. Schemat łańcucha wymiarowego.....	61
Rys. 22. Wpływ zmiany położenia bieżni pomocniczej na luz zespolonej piasty łożyskowej. L_o – luz osiowy, L_r – luz promieniowy, α – kąt bieżni pierścienia zewnętrznego kołnierzowego, φ – kąt bieżni pierścienia wewnętrznego	62
Rys. 23. a) Współrzędnościowa maszyna pomiarowa Leitz PMM, b) pierścień wewnętrzny kołnierzowy z wciśniętym pierścieniem wewnętrznym oraz rozwałcowanym kołnierzem	63
Rys. 24. a) Schemat wyznaczania średniego promienia zarysu bieżni. b) Wpływ odchyłek kątowych bieżni i tworzącej wałeczka stożkowego na zmianę średnicy bieżni z uwzględnieniem promienia zarysu bieżni R_b	67
Rys. 25. Wykres procentowego wpływu ogniw składowych na luz wzdłużny – metoda jednakowej tolerancji	69
Rys. 26. Wykres procentowego wpływu ogniw składowych na luz wzdłużny – metoda jednakowej klasy tolerancji	71
Rys. 27. Wykres procentowego wpływu ogniw składowych na luz wzdłużny – metoda jednakowego wpływu.....	72
Rys. 28. Wykres procentowego wpływu ogniw składowych na luz wzdłużny – metoda minimum kosztów	73
Rys. 29. Wykres procentowego wpływu ogniw składowych na luz wzdłużny dla zamienności częściowej – metoda jednakowej tolerancji.....	76
Rys. 30. Wykres procentowego wpływu ogniw składowych na luz wzdłużny dla zamienności częściowej – metoda jednakowej klasy tolerancji	77
Rys. 31. Wykres procentowego wpływu ogniw składowych na luz wzdłużny dla zamienności częściowej – metoda jednakowego wpływu	78
Rys. 32. Wykres procentowego wpływu ogniw składowych na luz wzdłużny dla zamienności częściowej – metoda minimum kosztów.....	80
Rys. 33. Wykres procentowego wpływu ogniw składowych na luz wzdłużny dla zamienności częściowej – tolerancje określone przez konstruktora	81
Rys. 34. Formularz kluczowych charakterystyk produktu (SCIF) dla zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji	87
Rys. 35. Rysunek otoczki pierścienia zewnętrznego zintegrowanej piasty łożyskowej trzeciej generacji	90
Rys. 36. Rysunek otoczki pierścienia wewnętrznego kołnierzowego zintegrowanej piasty łożyskowej trzeciej generacji	91
Rys. 37. Obrabiarka KDVM1000LA - zakupiona do celów uruchomienia produkcji zespolonej piasty łożyskowej.....	92

Rys. 38. Karta operacyjna obróbki tokarskiej pierścienia zewnętrznego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji	93
Rys. 39. Pierwsza strona karty operacyjnej obróbki tokarskiej pierścienia wewnętrznego kołnierзовego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji	94
Rys. 40. Obrabiarka QTS-350 – MAZAK QUICK TURN SMART 350.....	94
Rys. 41. Karta operacyjna kucia wałeczka stożkowego	95
Rys. 42. a) Maszyna do hartowania indukcyjnego firmy SAET posiadająca dwa stanowiska do hartowania pierścienia zewnętrznego oraz pierścienia wewnętrznego kołnierзовego, b) induktor pierścienia zewnętrznego.....	98
Rys. 43. Karta technologiczna obróbki cieplnej pierścienia zewnętrznego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji	98
Rys. 44. Wynik badań pomiaru twardości pierścienia zewnętrznego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji	100
Rys. 45. Wygląd mikrostruktury a) warstwy utwardzonej próbki pierścienia zewnętrznego (1000x), b) rdzenia próbki pierścienia zewnętrznego (1000x), c) wygląd próbki	101
Rys. 46. Spektrometr SPECTROLAB LAVM12	101
Rys. 47. Karta technologiczna obróbki cieplnej pierścienia wewnętrznego kołnierзовego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji.....	102
Rys. 48. a) Układ stanowiska roboczego maszyny do hartowania indukcyjnego firmy SAET, obejmujący system mocowania oraz induktor do obróbki pierścienia wewnętrznego kołnierзовego, b) przekrój pierścienia wewnętrznego kołnierзовego z uwidocznioną strefą zahartowaną	103
Rys. 49. Wynik badań pomiaru twardości pierścienia wewnętrznego kołnierзовego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji, strona 1	104
Rys. 50. Wynik badań pomiaru twardości pierścienia wewnętrznego kołnierзовego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji, strona 2.....	105
Rys. 51. Wygląd mikrostruktury a) warstwy utwardzonej próbki pierścienia wewnętrznego kołnierзовego (1000x), b) rdzenia próbki pierścienia wewnętrznego kołnierзовego (1000x), c) wygląd próbki.....	105
Rys. 52. Karta technologiczna obróbki cieplnej wałeczka stożkowego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji	107
Rys. 53. Wynik badania metalograficznego oraz pomiaru twardości wałeczka stożkowego ZPS-001A	108
Rys. 54. Karta technologiczna obróbki tokarskiej pierścienia wewnętrznego kołnierзовego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji.....	109
Rys. 55. Widok podpór oraz elektromagnetycznego oporu, a) obrabiarka 3MZEY1320, b) obrabiarka 3MZE2320	112
Rys. 56. a) Pomieszczenie trawialni z infrastrukturą do wykrywania przypaleń szlifierskich, b) powierzchnie pierścienia zewnętrznego kołnierзовego poddane trawieniu – brak przypaleń szlifierskich, c) powierzchnie pierścienia wewnętrznego poddane trawieniu – brak przypaleń szlifierskich.....	113

Rys. 57. Schemat ustawienia obrabiarek do szlifowania i dogładzania pierścienia zewnętrznego	114
Rys. 58. Karta operacyjna obróbki szlifierskiej. Operacja – szlifować fi zewnątrz i czoło.....	116
Rys. 59. Załącznik do karty operacyjnej szlifowania czoła i fi zewnątrz, określający parametry obróbki.....	117
Rys. 60. Obrabiarka RIFA 3MZEY1320: a) pulpit, b) widok strefy obróbczej - ściernica podpory, opór, c) widok strefy obróbczej - ściernica, rolka kondycjonująca profilowa.....	118
Rys. 61. Wymagania stawiane pierścieniom zewnętrznym zawarte w WTO-1263: a) przed operacją szlifowania fi zewnątrz i czoła, b) po operacji szlifowania fi zewnątrz i czoła	118
Rys. 62. Schemat ustawienia pierścienia, ściernicy oraz rolki diamentowej dla operacji szlifowania fi zewnątrz i czoła.....	119
Rys. 63. Wynik pomiaru zarysu otrzymanego w wyniku szlifowania ściernicą przygotowaną przy użyciu rolki diamentowej profilowej SEO-113.....	120
Rys. 64. Karta operacyjna obróbki szlifierskiej. Operacja – szlifować bieżnie zgrubnie	121
Rys. 65. Obrabiarka RIFA 3MZE2320. a) pulpit, b) widok strefy obróbczej - podpory, opór, końcówki oraz czujniki pomiarowe c) widok strefy obróbczej - ściernica, rolka diamentowa profilowa.....	122
Rys. 66. Schemat ustawienia pierścienia zewnętrznego, ściernic oraz rolki diamentowej kształtowej.....	122
Rys. 67. Karta operacyjna obróbki szlifierskiej. Operacja – szlifować bieżnie wykańczająco (parametry oznaczone jako DBS1 oraz DBS2 w obliczeniach zamienności oznaczone są jako DBz1 i DBz2)	123
Rys. 68. Schemat ustawienia pierścienia, ściernic oraz rolki trawersującej SEO-116	124
Rys. 69. Wyniki pomiarów okrągłości bieżni po szlifowaniu wykańczającym: a) bieżnia nr 1, b) bieżnia nr 2	124
Rys. 70. Zarys bieżni wraz z wartością wypukłości bieżni nr 1 po szlifowaniu wykańczającym.....	125
Rys. 71. Wynik pomiaru chropowatości bieżni nr 1 po szlifowaniu wykańczającym	125
Rys. 72. Zarys bieżni wraz z wartością wypukłości bieżni nr 2 po szlifowaniu wykańczającym.....	126
Rys. 73. Wynik pomiaru chropowatości bieżni nr 2 po szlifowaniu wykańczającym	126
Rys. 74. Karta operacyjna obróbki szlifierskiej. Operacja – dogładszać bieżnie..	128
Rys. 75. Obrabiarka RIFA 3MZE3420: a) pulpit, b) widok strefy obróbczej - podpory, opór, głowica oscylacyjna wraz z osłką, rolki dociskowe.....	129
Rys. 76. Wynik pomiaru okrągłości bieżni nr 1 po dogładzaniu: a) profil okrągłości powierzchni bieżni po dogładzaniu wraz z parametrami okrągłości i falistości,	

b) analiza harmoniczna profilu okrągłości bieżni po dogładzaniu (maksimum w paśmie 21 ± 1 harmonicznej jest niedopuszczalne)	130
Rys. 77. Wynik pomiaru okrągłości bieżni nr 2 po dogładzaniu: a) profil okrągłości powierzchni bieżni po dogładzaniu wraz z parametrami okrągłości i falistości, b) analiza harmoniczna profilu okrągłości bieżni po dogładzaniu (maksimum w paśmie 21 ± 1 harmonicznej jest niedopuszczalne)	130
Rys. 78. Zarys bieżni wraz z wartością wypukłości bieżni nr 1 po dogładzaniu.	130
Rys. 79. Wynik pomiaru chropowatości bieżni nr 1 po szlifowaniu wykańczającym	131
Rys. 80. Zarys bieżni wraz z wartością wypukłości bieżni nr 2 po dogładzaniu.	131
Rys. 81. Wynik pomiaru chropowatości bieżni nr 2 po szlifowaniu wykańczającym	132
Rys. 82. Schemat ustawienia obrabiarek do szlifowania i dogładzania pierścienia wewnętrznego kołnierзовego	133
Rys. 83. Karta operacyjna obróbki szlifierskiej. Operacja – szlifować profil z czołem oporowym i fi bieżni zgrubnie	134
Rys. 84. Obrabiarka RIFA 3MZA2120: a) pulpit, b) widok strefy obróbczej - podpory, opór, końcówki oraz czujniki pomiarowe, ściernica c) widok strefy obróbczej - ściernica, rolka diamentowa profilowa	135
Rys. 85. Schemat ustawienia pierścienia, ściernicy oraz rolki diamentowej kształtowej	135
Rys. 86. Wynik pomiaru zarysu otrzymanego w wyniku szlifowania ściernicą przygotowaną przy użyciu rolki diamentowej profilowej SEO-115	136
Rys. 87. Karta operacyjna obróbki szlifierskiej. Operacja – szlifować bieżnię wykańczająco	138
Rys. 88. Obrabiarka RIFA 3MZA2120: a) Widok strefy obróbczej - podpory, opór, końcówki oraz czujniki pomiarowe, ściernica b) widok strefy obróbczej - ściernica, rolka diamentowa trawersująca, c) widok pulpitów sterujących urządzenia do kontroli czynnej wymiaru oraz automatycznej wyważarki	139
Rys. 89. Wyniki pomiaru okrągłości bieżni po szlifowaniu wykańczającym	139
Rys. 90. Zarys bieżni wraz z wartością wypukłości bieżni po szlifowaniu wykańczającym	140
Rys. 91. Wynik pomiaru chropowatości bieżni po szlifowaniu wykańczającym	140
Rys. 92. Karta operacyjna obróbki szlifierskiej. Operacja – szlifować bieżnię pomocniczą	142
Rys. 93. Obrabiarka RIFA 3MZA2216: a) pulpit b) widok strefy obróbczej - ściernica, rolka diamentowa trawersująca, opór, podpory	143
Rys. 94. Zarys bieżni pomocniczej wraz z wartością wypukłości po szlifowaniu	143
Rys. 95. Wynik pomiaru chropowatości bieżni pomocniczej po szlifowaniu	144
Rys. 96. Karta operacyjna obróbki ściernej. Operacja – dogładzać bieżnię i bieżnię pomocniczą	145

Rys. 97. Obrabiarka RIFA 3MZA3316: a) pulpit, b) widok strefy obróbczej bieżni głównej - głowica oscylacyjna wraz z osełką, opór, podpory, c) widok strefy obróbczej bieżni pomocniczej - głowica oscylacyjna wraz z osełką, opór, podpory, rolka kondycjonująca osełkę	146
Rys. 98. Wynik pomiaru okrągłości bieżni po doglądaniu: a) profil okrągłości powierzchni bieżni po doglądaniu wraz z parametrami okrągłości i falistości, b) analiza harmoniczna profilu okrągłości bieżni po doglądaniu (maksimum w paśmie 21 ± 1 harmonicznej jest niedopuszczalne)	146
Rys. 99. Zarys bieżni głównej wraz z wartością wypukłości po doglądaniu	147
Rys. 100. Wynik pomiaru chropowatości bieżni głównej po doglądaniu	147
Rys. 101. Zarys bieżni pomocniczej wraz z wartością wypukłości po doglądaniu	148
Rys. 102. Wynik pomiaru chropowatości bieżni pomocniczej po doglądaniu ..	148
Rys. 103. Rysunek konstrukcyjny wałeczka stożkowego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji	151
Rys. 104. Wynik pomiaru promienia czoła sferycznego wałeczka stożkowego ZPS-001A	152
Rys. 105. Wynik pomiaru chropowatości czoła sferycznego wałeczka stożkowego ZPS-001A	152
Rys. 106. Wynik pomiaru okrągłości wałeczka stożkowego ZPS-001A	153
Rys. 107. Zarys tworzącej wałeczka stożkowego ZPS-001A wraz z wartością wypukłości po doglądaniu	153
Rys. 108. Wynik pomiaru chropowatości tworzącej wałeczka stożkowego ZPS-001A	154
Rys. 109. Rysunek konstrukcyjny pierścienia wewnętrznego stożkowego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji	155
Rys. 110. Pierścień wewnątrz stożkowy ZPS-001A: a) zainkludowana próbka, b) wygląd mikrostruktury	155
Rys. 111. Wynik pomiaru okrągłości bieżni, a) profil okrągłości powierzchni bieżni wraz z parametrami okrągłości i falistości, b) analiza harmoniczna profilu okrągłości bieżni (maksimum w paśmie 21 ± 1 harmonicznej jest niedopuszczalne)	157
Rys. 112. Zarys bieżni głównej wraz z wartością wypukłości	157
Rys. 113. Wynik pomiaru chropowatości bieżni głównej	157
Rys. 114. Zarys bieżni pomocniczej wraz z wartością wypukłości	158
Rys. 115. Wynik pomiaru chropowatości bieżni pomocniczej	158
Rys. 116. Specjalna podstawka pomiarowa JDD-413: a) rysunek, b) z pierścieniem zewnętrznym na przyrządzie do pomiaru średnicy MG-122, c) z wzorcem MRD-881 na przyrządzie do pomiaru średnicy bieżni MG-142	166
Rys. 117. Raport z badania zdolności przyrządu pomiarowego	167
Rys. 118. Raport z badania zdolności obrabiarki	181
Rys. 119. Wykres procentowego wpływu ogniw składowych na luz wzdłużny – metoda odwróconego badania wskaźników C_m , C_{mk}	188

Rys. 120. Pierścień zewnętrzny piasty o średnicy bieżni $\varnothing 76,903$ z dwiema wartościami tolerancji: mniejszą – obowiązującą w przypadku zmienności całkowitej oraz większą – stosowaną dla zmienności częściowej wraz z wymaganym wskaźnikiem zdolności procesu $Cpk \geq 1,33$, zgodnie z PN-EN ISO 18391:2016	191
Rys. 121. Zmontowane zespolone piasty łożyskowe trzeciej generacji: a) przed zawalcowaniem kołnierza, b) przygotowane do pakowania.....	192
Rys. 122. Różnica pomiędzy wartością oczekiwaną luzu wzdłużnego (linia zerowa) a wartością otrzymaną w wyniku pomiaru	197
Rys. 123. Porównanie wartości średnich luzów wzdłużnych przed i po zawalcowaniu kołnierza. Prawdopodobieństwo wykrycia różnicy	198
Rys. 124. Porównanie wartości luzów wzdłużnych po zawalcowaniu kołnierza i luzu obliczeniowego. Prawdopodobieństwo wykrycia różnicy	199

SPIS TABEL

Tabela 1. Wymagane wskaźniki Cm, Cmk w zależności od wielkości próby i przedziału ufności [92]	35
Tabela 2. Zależność pomiędzy odchyleniem standardowym, ilością sztuk wadliwych na milion, zdolnością procesu oraz procentem sztuk zgodnych ze specyfikacją.....	42
Tabela 3. Wyniki pomiarów zmiany wymiaru bieżni pierścienia wewnętrznego w wyniku ciasnego pasowania.....	63
Tabela 4. Arkusz kalkulacyjny Excel – wyliczenie ogniwa zamykającego.....	73
Tabela 5. Zestawienie wyników tolerancji ogni w składowych dla zamienności całkowitej.....	74
Tabela 6. Arkusz kalkulacyjny Excel – wyliczenie ogniwa zamykającego dla zamienności częściowej	79
Tabela 7. Arkusz kalkulacyjny Excel – wyliczenie ogniwa zamykającego dla tolerancji ogni w składowych określonych przez konstruktora	80
Tabela 8. Zestawienie wyników tolerancji ogni w składowych dla zamienności częściowej oraz określonej przez konstruktora.....	82
Tabela 9. Wyniki analizy składu chemicznego próbki pierścienia zewnętrznego	102
Tabela 10. Wyniki analizy składu chemicznego próbki pierścienia wewnętrznego kołnierzonego.....	106
Tabela 11. Technologiczny przebieg obróbki szlifierskiej wałeczka stożkowego ZSPS-001A	149
Tabela 12. Wynik oceny mikrostruktury	156
Tabela 13. Wyniki analizy składu chemicznego próbki pierścienia wewnętrznego	156
Tabela 14. Technologiczny przebieg montażu zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji ZSPS-001A.....	159
Tabela 15. Skrócone wyniki badania zdolności przyrządów pomiarowych	168
Tabela 16. Składniki budżetu niepewności pomiarowej średnicy bieżni pierścienia wewnętrznego kołnierzonego	179
Tabela 17. Wartości niepewności rozszerzonych pomiaru.....	179
Tabela 18. Skrócone wyniki badań zdolności obrabiarek do obróbki pierścienia zewnętrznego	182
Tabela 19. Skrócone wyniki badań zdolności obrabiarek do obróbki pierścienia wewnętrznego kołnierzonego	184
Tabela 20. Skrócone wyniki badania zdolności obrabiarki SM-468	187
Tabela 21. Weryfikacja spełnienia kryterium U/T dla przyrządów pomiarowych	188
Tabela 22. Arkusz kalkulacyjny Excel – wyliczenie ogniwa zamykającego dla tolerancji ogni w składowych określonych w wyniku przeprowadzania badań zdolności obrabiarek Cm, Cmk oraz uwzględniających wpływ tolerancji geometrycznych.....	190

Tabela 23. Wyniki pomiarów luzu wzdłużnego zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji.....	192
Tabela 24. Raport z badania zdolności procesu	196

STRESZCZENIE

Analiza kształtowo-wymiarowa i powierzchniowa innowacyjnej technologii zespolonych piast samochodowych z łożyskiem tocznym

W rozprawie przedstawiono kompleksową analizę oraz opracowanie nowej technologii wytwarzania zespolonej piasty łożyskowej trzeciej generacji, obejmującą zarówno aspekty konstrukcyjne, jak i technologiczne, ze szczególnym uwzględnieniem zagadnień związanych z tolerancjami wykonania oraz optymalizacją luzu wzdłużnego. W części wprowadzającej scharakteryzowano kolejne generacje piast łożyskowych, omawiając ich ewolucję konstrukcyjną, rozwiązania technologiczne oraz korzyści ekonomiczne i eksploatacyjne wynikające z ich zastosowania. Przedstawiono również wpływ tych rozwiązań na usprawnienie procesów montażowych i ograniczenie ryzyka awarii w warunkach eksploatacji.

W dalszej części pracy zaprezentowano aktualny stan wiedzy w zakresie teorii i praktyki dotyczącej łańcuchów wymiarowych, wraz z metodami obliczeń deterministycznych i probabilistycznych, uwzględniających zasady zamienności pełnej i częściowej przy określonym poziomie prawdopodobieństwa spełnienia wymagań konstrukcyjnych. Omówiono także metody badania zdolności przyrządów pomiarowych oraz maszyn, wskazując ich znaczenie dla stabilności procesu i jakości wyrobu.

Na tym tle sformułowano cel główny oraz cele szczegółowe pracy, a następnie przeprowadzono szczegółową analizę rysunku konstrukcyjnego piasty, identyfikując wymiary krytyczne wpływające na luz wzdłużny. Opracowano model matematyczny łańcucha wymiarowego luzu wzdłużnego, pozwalający na określenie współczynników wpływu poszczególnych ogniw na wartość luzu oraz na wyznaczenie tolerancji dla wariantów zamienności pełnej i częściowej. Uzyskane wyniki porównano z tolerancjami przyjętymi w dokumentacji technicznej, co umożliwiło wskazanie potencjalnych możliwości optymalizacji wymiarowej w kontekście jakości i kosztów produkcji.

Kolejne rozdziały poświęcono szczegółowemu opisowi procesu technologicznego wytwarzania piasty, obejmującemu dobór materiałów, operacje obróbki skrawaniem, cieplnej i ściernej, a także proces montażu. Uwzględniono przy tym parametry obróbkowe i dobór narzędzi pomiarowych zapewniających kontrolę wymiarów krytycznych. Szczególną uwagę zwrócono na etapy produkcji mające bezpośredni wpływ na wartość luzu wzdłużnego. Przeprowadzono badania zdolności maszyn oraz przyrządów pomiarowych, a także analizę budżetu niepewności pomiarów.

Wyniki pomiarów luzu wzdłużnego w wyprodukowanych piastach poddano analizie statystycznej, potwierdzając zdolność procesu do spełnienia wymagań

konstrukcyjnych oraz poprawność przyjętych założeń technologicznych. W podsumowaniu wykazano, że rozszerzenie pól tolerancji podzespołów piasty łożyskowej trzeciej generacji pozwoliło wyeliminować czasochłonną operację selekcji elementów, co uprościło proces wytwórczy i obniżyło koszty montażu o 8%.

SUMMARY

Shape, dimensional, and surface analysis of the innovative technology for combined automotive hubs with rolling bearings

The dissertation presents a comprehensive analysis and development of a new technology for manufacturing third-generation composite bearing hubs, covering both design and technological aspects, with particular emphasis on issues related to manufacturing tolerances and longitudinal clearance optimisation. The introductory part characterises successive generations of bearing hubs, discussing their design evolution, technological solutions and the economic and operational benefits resulting from their use. The impact of these solutions on improving assembly processes and reducing the risk of failure under operating conditions is also presented.

The rest of the paper presents the current state of knowledge in the theory and practice of dimensional chains, along with deterministic and probabilistic calculation methods, taking into account the principles of full and partial interchangeability at a specified level of probability of meeting design requirements. Methods for testing the capabilities of measuring instruments and machines are also discussed, highlighting their importance for process stability and product quality.

Against this background, the main objective and specific objectives of the work were formulated, followed by a detailed analysis of the hub design drawing, identifying the critical dimensions affecting longitudinal clearance. A mathematical model of the longitudinal clearance dimension chain was developed, allowing the determination of the coefficients of influence of individual links on the clearance value and the determination of tolerances for full and partial interchangeability variants. The results obtained were compared with the tolerances adopted in the technical documentation, which made it possible to identify potential opportunities for dimensional optimisation in terms of quality and production costs.

The following chapters are devoted to a detailed description of the technological process of hub production, including the selection of materials, machining, heat treatment and abrasive operations, as well as the assembly process. The machining parameters and the selection of measuring tools ensuring the control of critical dimensions were taken into account. Particular attention was paid to the production stages that have a direct impact on the longitudinal clearance value. The capabilities of the machines and measuring instruments were tested, and the measurement uncertainty budget was analysed.

The results of longitudinal clearance measurements in the manufactured hubs were subjected to statistical analysis, confirming the ability of the process to meet

the design requirements and the correctness of the adopted technological assumptions. In summary, it was demonstrated that extending the tolerance ranges of third-generation bearing hub components eliminated the time-consuming process of selecting components, which simplified the manufacturing process and reduced assembly costs by 8%.