

**Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza**  
**Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa**  
**Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji**

## **Załącznik nr 3**

do wniosku o przeprowadzenie postępowania w sprawie nadania stopnia  
doktora habilitowanego

### **Autoreferat**

**dr inż. Rafał Kluz**

**Rzeszów, dn. 25.07.2023 r**

## Spis treści

1.	Dane osobowe .....	3
2.	Posiadane dyplomy i stopnie naukowe .....	3
3.	Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu .....	3
4.	Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 Ustawy .....	4
5.	Aktywność naukowa realizowana w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej, w szczególności zagranicznej .....	47
6.	Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę .....	50
7.	Sumaryczne zestawienie dorobku naukowo–badawczego, popularyzatorskiego, dydaktycznego i organizacyjnego (po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych) .....	51

## 1. DANE OSOBOWE

*Imię i nazwisko:* Rafał Kluz  
*Stopień naukowy:* doktor nauk technicznych  
*Miejsce i adres zatrudnienia:*  
Politechnika Rzeszowska im. I. Łukasiewicza  
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa  
Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji  
al. Powstańców Warszawy 8  
35-959 Rzeszów  
*tel.* +48 17 865 2019, *fax.* +48 17 865 11 84  
*adres e-mail:* [rkkmiop@prz.edu.pl](mailto:rkkmiop@prz.edu.pl)

## 2. POSIADANE DYPLOMY I STOPNIE NAUKOWE

- 2002 r. – tytuł zawodowy – magister inżynier  
Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa  
Kierunek: Mechanika i Budowa Maszyn  
Specjalność: Organizacja i Zarządzanie w Przemysle
- 2007 r. – stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn  
Doktor nauk technicznych  
Politechnika Rzeszowska,  
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa,  
Specjalność: Budowa i eksploatacja maszyn,  
Temat rozprawy doktorskiej: „*Wpływ błędów elastycznego zrobotyzowanego systemu montażowego na montowalność cylindrycznych połączeń części maszyn*”  
Promotor: dr hab. inż. Wiktor Szabajkowicz (Politechnika Rzeszowska),  
Recenzenci: dr hab. inż. Piotr Łepkowski, prof. AGH, dr hab. inż. Mirosław Śmieszek, prof. PRz;

## 3. INFORMACJE O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU

- Od 1 października 2003 r. do 1 stycznia 2008 r.  
Asystent naukowo-dydaktyczny,  
Politechnika Rzeszowska,  
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa,  
Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji.
- Od 1 stycznia 2008 r. do dzisiaj  
Adiunkt naukowo-dydaktyczny,  
Politechnika Rzeszowska,  
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa,  
Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji.

#### 4. OMÓWIENIE OSIĄGNIĘĆ, O KTÓRYCH MOWA W ART. 219 UST. 1 PKT. 2 USTAWY

Jako osiągnięcie naukowe, stanowiące podstawę do wszczęcia postępowania habilitacyjnego, wynikające z art. 219 ust. 1 pkt.2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, przedstawiam cykl 10 publikacji powiązanych tematycznie, na który składa się monografia oraz dziewięć artykułów znajdujących się w bazie JCR.

##### 4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

**Analiza wpływu parametrów i błędów systemów montażowych na montowalność połączeń łączonych z luzem oraz zgrzewanych tarciovo z przemieszaniem**

##### 4.2. Wykaz prac naukowych dokumentujących osiągnięcia naukowe, stanowiące podstawę ubiegania się o stopień doktora habilitowanego

###### Monografia:

- H1. Kluz R.:** „Wyznaczanie i kształtowanie poziomu montowalności systemów montażowych”. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2023, ISBN 978-83-7934-350-8.  
**MNiSW: 80 pkt.**

###### Publikacje:

- H2. Kubit A.; Trzepieciński T.; Kluz R.; Ochalek K.; Słota J.:** “Multi-Criteria Optimisation of Friction Stir Welding Parameters for EN AW-2024-T3 Aluminium Alloy Joints”. *Materials* 2022, 15, 5428.  
**IF: 3.4, MNiSW: 140 pkt.**
- H3. Kluz R., Kubit A., Trzepieciński T., Faes, K., Bochnowski W.:** “A weighting grade-based optimization method for determining refill friction stir spot welding process parameters”. *JOURNAL OF MATERIALS ENGINEERING AND PERFORMANCE*, ISSN: 1059-9495, 2019.  
**IF: 1.652, MNiSW: 70 pkt.**
- H4. Kluz R., Kubit A., Trzepieciński T., Faes K.:** “Polyoptimisation of the refill friction stir spot welding parameters applied in joining 7075-T6 Alclad aluminium alloy sheets used in aircraft components”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 103, Issue 9–12, pp. 3443–3457, 2019.  
**IF: 2.75, MNiSW: 100 pkt.**
- H5. Kluz R., Kubit A., Trzepieciński T.:** “Investigations of temperature-induced errors of positioning of an industrial robot arm”, *JOURNAL OF MECHANICAL SCIENCE AND TECHNOLOGY*, ISBN/ISSN: 1738-494X, t.32, z.11, s.5421-5432, 2018.  
**IF: 1.221, MNiSW (lista A czasopism, 2018): 20pkt.**

- H6. Kluz R., Kubit A., Sęp J., Trzepieciński T.: „*Effect of temperature variation on repeatability positioning of a robot when assembling parts with cylindrical surfaces*”, MAINTENANCE AND RELIABILITY, ISBN/ISSN: 1507-2711, t.20, z.4, s.503-513 2018.  
IF: 1.806., MNiSW (lista A czasopism, 2018): 25pkt.
- H7. Kubit A., Kluz R., Ochalek K., Wydrzyński D., Trzepieciński T. „*Friction stir welding of 2024-T3 aluminium alloy sheet with sheet pre-heating*”, MATERIALI IN TEHNOLOGIJE, t.52, z.3, s.283-288, ISBN/ISSN: 1580-2949, 2018.  
IF: 0.714., MNiSW (lista A czasopism, 2018): 15pkt.
- H8. Kubit A., Kluz R., Trzepieciński T., Wydrzyński D., Bochnowski W.: „*Analysis of the mechanical properties and of micrographs of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminium sheets*”, ARCHIVES OF CIVIL AND MECHANICAL ENGINEERING, t.18, z.1, s.235-244, ISBN/ISSN: 1644-9665, 2018.  
IF: 2.846., MNiSW (lista A czasopism, 2018): 30pkt.
- H9. Kluz R., Trzepieciński T.: „*Analysis of the optimal orientation of robot gripper for an improved capability assembly proces*”, ROBOTICS AND AUTONOMOUS SYSTEMS, t.74, s.253-266, ISBN/ISSN: 0921-8890, 2015.  
IF: 1.618., MNiSW (lista A czasopism, 2018): 25pkt.
- H10. Kluz R., Trzepieciński T.: „*The repeatability positioning analysis of the industrial robot arm*”, ASSEMBLY AUTOMATION, t.34, z.3, s.285-295, ISBN/ISSN: 0144-5154, 2014.  
IF: 0.913, MNiSW (lista A czasopism, 2018): 20pkt.

Wymienione wyżej prace załączono do wniosku w pełnej ich wersji w formie załącznika nr VIII i IX: (załącznik nr VIII – „Monografia”, oraz załącznik nr IX – „Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych”), zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2b Ustawy.

#### 4.3. Omówienie celu i osiągniętych wyników prac naukowych oraz sposobu ich wykorzystania

Ważnym zadaniem z zakresu projektowania zautomatyzowanego systemu montażowego jest zapewnienie niezawodności i poprawności przebiegu realizowanych w nim procesów. Zastosowanie urządzeń i oprzyrządowania o wysokiej dokładności prowadzi do zwiększenia prawdopodobieństwa poprawnej realizacji procesu łączenia części, lecz zdecydowanie zwiększa ich koszt. Stosowanie więc zbyt precyzyjnych i skomplikowanych środków automatyzacji montażu może być wysoce nieekonomiczne i stawić pod znakiem zapytania opłacalność zautomatyzowania danego procesu. Rozwiązaniem przedstawionego problemu może być praca systemu z akceptowanym przez przedsiębiorstwo poziomem montowalności, bez zbędnego zawyżania dokładności stosowanego wyposażenia.

Dla każdego rodzaju połączeń można wyznaczyć warunki montowalności, których spełnienie umożliwi uzyskanie wysokiej niezawodności połączeń oraz pracy systemu montażowego. W przypadku połączeń pasowanych z luzem, które według kształtu powierzchni można podzielić na walcowe, płaskie oraz gwintowe, wymagania te dotyczą wzajemnego położenia części, natomiast w przypadku połączeń zgrzewanych tarciowo z przemieszaniem głównie parametrów ustawczych procesu. Warunki montowalności mogą być spełnione jedynie z określonym prawdopodobieństwem, uzależnionym od dokładności systemu montażowego. W związku z tym, z warunkami montowalności ściśle powiązane jest pojęcie montowalności. Pod pojęciem montowalność w montażu automatycznym należy rozumieć

prawdopodobieństwo poprawnego zmontowania części przychodzących do strefy łączenia przy jednoczesnym spełnieniu wymagań jakościowych i wydajnościowych [5]. Montowalność dotyczy połączeń, dla których wyznaczone zostaną warunki zapewniające prawidłowe ich połączenie (warunki montowalności), ale związana jest przede wszystkim z dokładnością systemu montażowego na którym części są łączone. W zależności od konfiguracji systemu montażowego można uzyskać różny poziom prawdopodobieństwa połączenia części, a w związku z tym różny poziom montowalności.

Głównym celem prowadzonych przeze mnie badań było opracowanie metod i narzędzi umożliwiających wyznaczenie wpływu parametrów i błędów systemów montażowych na montowalność (prawdopodobieństwo połączenia) połączeń o powierzchniach: walcowych, płaskich i gwintowych oraz montowalność (nośność i wariancję nośności) cienkościennych połączeń zgrzewanych tarciovo z przemieszaniem (punktowo i liniowo), charakteryzujących się dużą wrażliwością na błędy ustawienia parametrów procesu. Z założenia badania prowadziłem pod kątem możliwości wykorzystania opracowanych metod w praktyce przemysłowej. Dzięki nim projektanci systemów montażowych mogą określić rzeczywistą dokładność posiadanego wyposażenia i jego wpływ na przebieg procesu montażu oraz zaprojektować system w taki sposób, aby pracował na wymaganym poziomie montowalności.

Prowadzone przez mnie badania, zawarte w przedstawionym do oceny cyklu publikacji obejmują następujące zagadnienia:

- Badania dokładności robota montażowego i zdolności jakościowej procesu pozycjonowania.
- Modelowanie błędów robota i systemu montażowego.
- Modelowanie wpływu błędów systemów montażowych na prawdopodobieństwo połączenia części.
- Wyznaczanie optymalnego miejsca realizacji procesu łączenia części w przestrzeni roboczej stanowiska, zapewniającego najwyższy poziom montowalności połączeń o powierzchniach walcowych, gwintowych i płaskich.
- Wyznaczanie optymalnego kąta obrotu chwytaka, zapewniającego najwyższą zdolność jakościową procesu montażu części o powierzchniach walcowych i płaskich.
- Wyznaczenie i dobór dokładności oprzyrządowania stanowiska montażowego, zapewniającego wymagany poziom montowalności połączeń.
- Analizę wpływu parametrów procesu zgrzewania na montowalność (nośność i zdolność jakościową procesu) oraz właściwości struktury połączeń blach ze stopu aluminium EN AW-7075-T6 Alclad zgrzewanych metodą RFSSW (ang. Refill Friction Stir Spot Welding).
- Modelowanie wpływu błędów systemu montażowego na nośność połączeń zgrzewanych metodą RFSSW i dobór parametrów optymalnych z uwzględnieniem błędów ustawienia narzędzia.
- Analiza wpływu parametrów zgrzewania na montowalność (nośność i zdolność jakościową procesu) ze stopu aluminium 2024-T3 zgrzewanych metodą FSW (ang. Friction Stir Welding).
- Dobór optymalnych parametrów procesu zgrzewania połączeń zakładkowych metodą FSW z uwzględnieniem błędów zagłębienia narzędzia.

Przedstawiony przeze mnie wykaz prac stanowi jedynie część publikacji obejmujących tematycznie tytuł osiągnięcia naukowego. Są to publikacje, które prezentują najistotniejszy wkład w dyscyplinę inżynieria mechaniczna.

#### ***Badania dokładności robota montażowego i zdolności jakościowej procesu pozycjonowania***

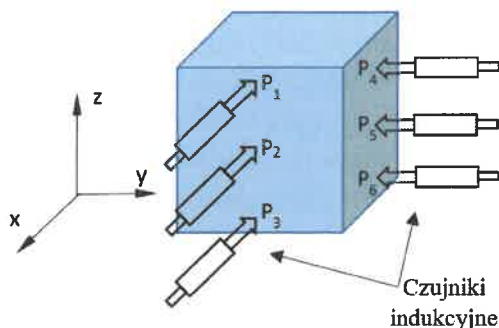
Do wyznaczenia prawdopodobieństwa połączenia części konieczna jest znajomość błędów generowanych na zautomatyzowanym stanowisku montażowym. Stąd też w pierwszej kolejności

dokonałem pomiaru i identyfikacji statystycznej błędów na dwóch stanowiskach montażowych zainstalowanych w laboratorium Politechniki Rzeszowskiej. Obiektem prowadzonych badań błędu powtarzalności pozycjonowania był sześćoosiowy robot przemysłowy M10iA firmy Fanuc oraz pięćoosiowy firmy Mitsubishi RV-M2. W pierwszy etapie badań przeprowadziłem pomiar błędu powtarzalności pozycjonowania robotów mającego główny wpływ na montowalność połączeń w kilku wybranych punktach. Analiza statystyczna wyników badań wykazała, że na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  wyniki podlegają rozkładowi normalnemu lub mogą być takim rozkładem aproksymowane. Wyniki badań porównywałem na podstawie autorskiej metody określania zdolności jakościowej procesu pozycjonowania  $MC_p$  [4]. Wykazałem, że zarówno w przypadku robota Mitsubishi RV-M2 jak i Fanuc M10iA wartości błędów powtarzalności pozycjonowania nie są takie same, lecz uzależnione są od wyboru miejsca pomiaru w przestrzeni roboczej. W przypadku robota RV-M2 wartość współczynnika zdolności procesu pozycjonowania kształtowała się w zakresie od  $MC_p = 1,26$  do  $MC_p = 1,71$ . Oznacza to, że w rozpatrywanym przypadku wybór odpowiedniego miejsca realizacji procesu daje możliwość zwiększenia zdolności procesu pozycjonowania o 44,44%, a w związku z tym również poziomu montowalności połączeń części maszyn. Podobną tendencję zaobserwowałem w przypadku robota Fanuc M10iA. W rozpatrywanych punktach przestrzeni robota wartość współczynnika zdolności jakościowej procesu pozycjonowania kształtowała się w zakresie od  $MC_p = 2,15$  do  $MC_p = 3,04$ .

W dalszej części badań przeprowadziłem badania wpływu prędkości efektora robota na zdolność jakościową procesu pozycjonowania. Uzyskane wyniki badań poddałem analizie statystycznej, w wyniku której ustaliłem że w przypadku robota Fanuc M10iA w zakresie prędkości od 60 do 300 mm/s wartość statystyki nie należała do zbioru krytycznego, tzn. nie było podstaw do odrzucenia hipotezy o równości wariancji. W wyniku wzrostu prędkości przesuwu do 700mm/s w pierwszym punkcie pomiaru zwiększeniu uległa wartość odchylenia standardowego błędu na kierunku osi x o 60% ( $\sigma_x = 0,0128\text{mm}$ ) i na osi y o 56,66% ( $\sigma_y = 0,0141\text{mm}$ ), natomiast w punkcie drugim odpowiednio o 64% na kierunku x i 68,88% na kierunku osi y. Wartość statystyki należała do zbioru krytycznego, zatem odrzucono hipotezę o równości wariancji błędów w obu populacjach. Wykazałem również że dla obu robotów przemysłowych niezależnie od wyboru punktu w przestrzeni roboczej i dla każdej zmiany prędkości ruchu chwytaka wzrost prędkości powoduje zmianę wartości średniej zmiennej losowej błędu robota. Pojawienie się błędów systematycznych powoduje zmniejszenie zdolności jakościowej procesu pozycjonowania robota. W przypadku robota Fanuc zwiększenie prędkości z 60 mm/s do 300 mm/s spowodowało zmniejszenie wskaźnika zdolności jakościowej procesu  $MC_p$  o 22,86% (z wartości  $MC_p = 2,58$  do  $MC_p = 1,99$ ) w pierwszym z analizowanych punktów oraz o 6,41% w punkcie drugim (z wartości  $MC_p = 2,78$  do  $MC_p = 2,60$ ). Dalszy wzrost prędkości najazdu do 700mm/min spowodował znaczący spadek zdolności jakościowej procesu pozycjonowania odpowiednio o 34,17% w punkcie pierwszym i o 47,07% w punkcie 2. Podobna sytuacja miała miejsce dla robota Mitsubishi. W pierwszym z analizowanych punktów wzrost prędkości z 31,7mm/s do 63,3mm/s skutkowało spadkiem wartości wskaźnika  $MC_p$  o 19,69% (z wartości  $MC_p = 2,64$  do  $MC_p = 2,12$ ). Przy prędkości 105,2mm/s odnotowano dalszy spadek zdolności jakościowej procesu o 33,01% ( $MC_p = 1,42$ ). W punkcie drugim przy wzroście prędkości z 31,7mm/s do 63,3mm/s współczynnik  $MC_p$  uległ zmniejszeniu z wartości  $MC_p = 2,24$  do  $MC_p = 1,70$  (o 21,42%) a przy prędkości 105,2mm/s uległ dalszemu zmniejszeniu o 35,22% do wartości  $MC_p = 1,14$ .

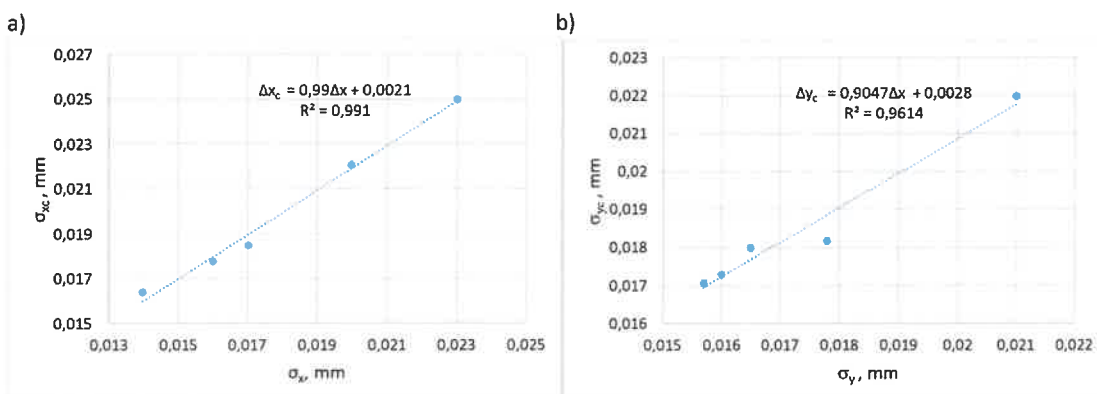
Prawidłowy przebieg procesu łączenia części o powierzchniach walcowych i gwintowych wymaga spełnienia warunków montowalności. Warunki te dotyczą względnego przemieszczenia oraz skręcenia osi łączonych części. Na podstawie analizy błędu orientacji robota Mitsubishi RV-M2 wykazałem, że błędy te w niewielkim stopniu wpływają na montowalność walcowych połączeń części maszyn. Dla każdego z analizowanych punktów pracy robota Mitsubishi RV-M2 maksymalne zaobserwowane wartości błędów kątowych były znacznie mniejsze od dopuszczalnego błędu skręcenia osi montowanych części uwarunkowanego liniowymi błędami powtarzalności pozycjonowania robota

( $\Delta\omega, \Delta\varphi \ll \gamma_{gr}$ ). Błąd ten jednak może powodować dodatkowe względne liniowe przemieszczenie osi łączonych części. W celu pomiaru błędu powtarzalności pozycjonowania robota z uwzględnieniem przemieszczenia osi części spowodowanej błędami orientacji, zaproponowałem autorską metodę pomiaru błędów polegającą na umieszczeniu czujników indukcyjnych w pionowych liniach na kierunku osi  $x$  i  $y$  (rys. 1). W ten sposób zarejestrowano maksymalną wartość błędu powtarzalności pozycjonowania, którą należy przyjąć przy montażu części o powierzchniach walcowych.



Rys 1. Układ czujników indukcyjnych przy pomiarze błędu zrobotyzowanego stanowiska montażowego [H1]

Wyniki pomiarów zmiennych losowych poddano weryfikacji statystycznej. Wyniki analizy wykazały, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o normalności badanych rozkładów. Analiza wyników pomiarów wykazała ponadto, że odchylenie standardowe błędu uwzględniającego uchyby kątowe jest w dużym stopniu skorelowane z wartością odchylenia standardowego błędu mierzonego w klasyczny sposób. Dla błędów na kierunku osi  $x$  współczynnik korelacji Pearsona wyniósł 0,995 (rys. 2a) natomiast na osi  $y$  0,980 (rys. 2b), co daje możliwość wyznaczenia wartości błędów z wykorzystaniem funkcji regresji przedstawionych na wykresach.



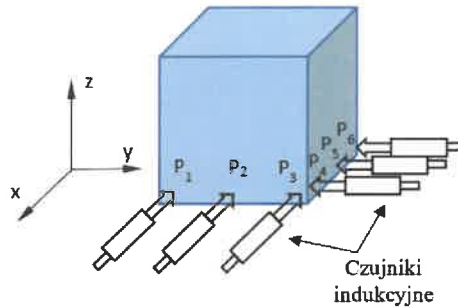
Rys. 2. Funkcja regresji opisująca zależność między odchyleniem standardowym błędu robota Mitsubishi RV-M2 z uwzględnieniem błędów orientacji i bez uwzględnienia a) dla osi  $x$ , b) dla osi  $y$  [H1]

Podobną tendencję można zauważyć w przypadku robota Fanuc M10iA. W każdym z analizowanych przypadków odnotowano zwiększoną wartość odchylenia standardowego. Błędy orientacji zmniejszają zdolność jakościową procesu pozycjonowania od 6,57% do 12,08% w zależności od punktu pomiaru błędu. Podobnie jak w przypadku robota Mitsubishi RV-M2 błędy te są silnie skorelowane liniowo z błędami mierzonymi w sposób klasyczny.

Inna sytuacja ma miejsce w przypadku montażu części o powierzchniach płaskich. W tym przypadku poprawny przebieg procesu łączenia części wymaga uwzględnienia dodatkowego przemieszczenia krawędzi części spowodowanego błędami orientacji. Błąd ten jest trudny do wyznaczenia analitycznego w warunkach przemysłowych, dlatego korzystniejszym rozwiązaniem jest jego pomiar. W tym celu opracowałem autorską metodę jego pomiaru polegającą na umieszczeniu

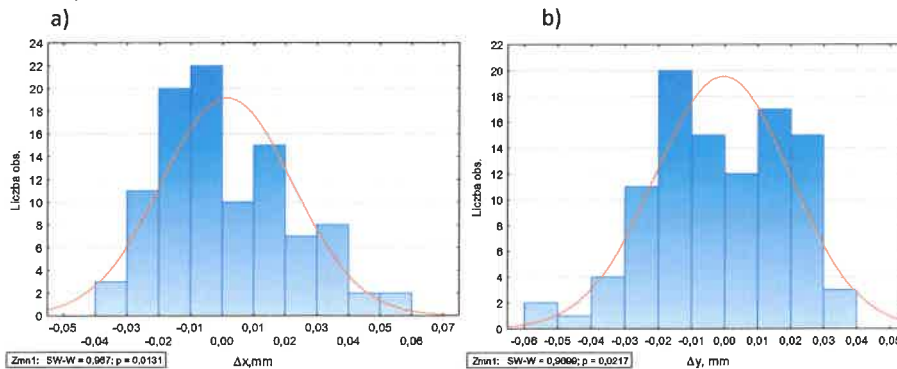


czujników indukcyjnych na krawędzi kostki pomiarowej na kierunku osi  $x$  i  $y$  (rys. 3). Należy przy tym zauważyć, że błąd ten podobnie jak błąd rejestrowany przy montażu części o powierzchniach walcowych nie jest błędem powtarzalności pozycjonowania według wymagań normy PN-EN ISO 9283: 2003. Ma na ogół inną wartość, gdyż w swej strukturze zawiera dodatkowe informacje związane z warunkami montowalności części, a jego interpretacja jest możliwa jedynie z punktu widzenia procesu łączenia części o typowych kształtach.



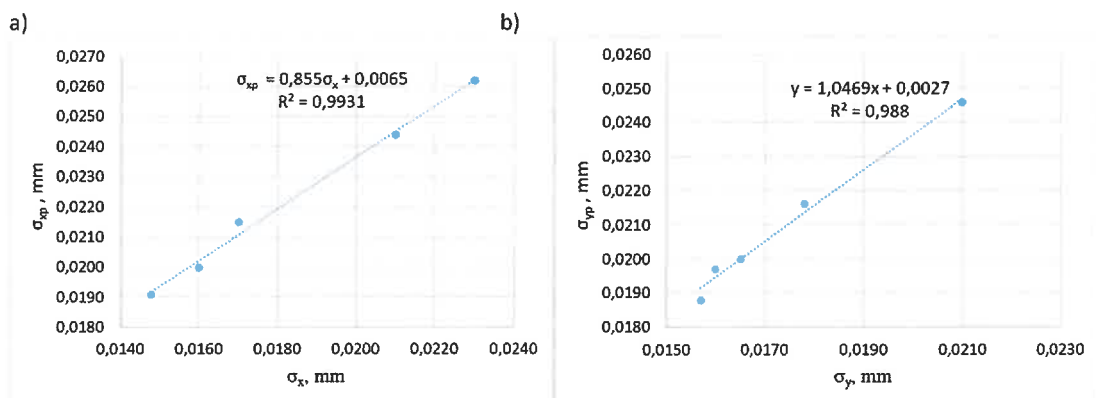
Rys. 3. Układ pomiarowy do pomiaru błędu orientacji części o powierzchniach płaskich [H1]

Wyniki pomiarów zmiennych losowych poddano weryfikacji statystycznej z wykorzystaniem testu normalności rozkładu Shapiro-Wilka. Analiza wyników badań wskazała, że przy rozstawie skrajnych czujników indukcyjnych wynoszącym 40mm nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o normalności badanych rozkładów. W dalszej kolejności weryfikowałem hipotezę o równości wariancji  $H: \sigma_1^2 = \sigma_{1p}^2$  wobec hipotezy alternatywnej  $K: \sigma_1^2 \neq \sigma_{1p}^2$ . Uzyskane wartości statystyki zawierały się w przedziale krytycznym, należało więc odrzucić hipotezę o równości wariancji. Analizując wykresy histogramów zmiennych losowych opisujących błędy robota (rys. 4) można zauważyć, że wyniki pomiarów są znacznie mniej skupione wokół wartości średniej. Potwierdzają to wartości współczynnika spłaszczenia, które dla każdej zmiennej losowej przyjmują wartości ujemne [H1]. Oznacza to, że zmienna losowa błędu robota, uwzględniająca wpływ błędów orientacji ma rozkład płatokurtyczny, w którym można zaobserwować większą liczbę wyników skrajnych, tzn. znacznie oddalonych od wartości średniej.



Rys. 4. Histogram zmiennej losowej błędu robota Mitsubishi RV-M2 zamieszczonych w tabeli 3.11, poz.1 a) na kierunku osi  $x$ , b) na kierunku osi  $y$  [H1]

W każdym z analizowanych przypadków uwzględnienie błędów orientacji obniża zdolność jakościową procesu pozycjonowania części o powierzchniach płaskich. W zależności od wyboru punktu pomiaru w przestrzeni roboczej stanowiska zaobserwowano obniżenie wartości wskaźnika zdolności jakościowej  $MC_p$  od 11,9% do nawet 21,05%. Wartość odchylenia standardowego błędu jest silnie skorelowana z odchyleniem standardowym błędu robota mierzonego w sposób klasyczny (rys. 5). Daje to możliwość oszacowania wartości odchylenia standardowego błędu dla połączeń na podstawie prostszej, klasycznej metody pomiaru błędów powtarzalności pozycjonowania.



Rys. 5. Zależność korelacyjna między wartością odchylenia standardowego błędu robota Mitsubishi RV-M2 mierzonego w sposób klasyczny i uwzględnieniem błędów orientacji a) dla osi x, b) dla osi y [H1]

Dla analizowanych zmiennych losowych wartości statystyki Shapiro-Wilka były zbliżone do wartości granicznych, przy których można uznać rozkłady za zbliżone do normalnych. W praktyce mogą jednak się zdarzyć części o długości przekraczającej 40mm. Dlatego w dalszej kolejności przeprowadziłem badania polegające na pomiarze błędu robota Fanuc M10iA na kierunku osi x, przy zwiększonej odległości między skrajnymi czujnikami pomiarowymi (w zakresie od 40mm do 100mm), symulując w ten sposób proces łączenia części o przedstawionym zakresie długości. Uzyskane wyniki poddałem weryfikacji statystycznej z wykorzystaniem testu normalności rozkładu Shapiro-Wilka. Przeprowadzona analiza wykazała, że dla części o długości od 50mm do 100 nie można przyjąć hipotezy o normalności rozkładów. W celu określenia właściwości zmiennej losowej błędu robota uwzględniającego błędy orientacji części, wyniki pomiarów poddałem analizie polegającej na ich dopasowaniu do najczęściej spotykanych rozkładów. Niestety na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  żaden z rozkładów nie wykazał zgodności z uzyskanymi wynikami. W związku z tym wykorzystałem regresję statystyczną do znalezienia przybliżonej gęstości prawdopodobieństwa.

W tym celu dokonałem standaryzacji zmiennej losowej błędu robota  $X$  do postaci  $(X-m)/\sigma_{xp}$  o dystrybuancie  $F(x)$  i funkcji gęstości  $f(x) = F'(x)$ . Funkcję gęstości rozwinąłem w szereg Grama-Chaliera:

$$f(x) = c_0 \varphi(x) + \frac{c_1}{1!} \varphi^{(1)}(x) + \frac{c_2}{2!} \varphi^{(2)}(x) + \dots, \quad (1)$$

gdzie  $\varphi(x)$  – funkcja gęstości prawdopodobieństwa rozkładu normalnego standaryzowanego,  $\varphi^{(i)}$  – pochodne  $i$ -tego rzędu funkcji  $\varphi(x)$ , natomiast  $c_v$  są stałymi współczynnikami, które można wyrazić za pomocą wielomianów Hermite'a:

$$c_v = (-1)^v \int_{-\infty}^{\infty} H_v(x) f(x) dx \quad (2)$$

Wielomiany Hermite'a są zdefiniowane równaniem (dla  $n = 0, 1, 2, \dots$ ):

$$\left(\frac{d}{dx}\right)^n \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) = (-1)^n H_n(x) \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \quad (3)$$

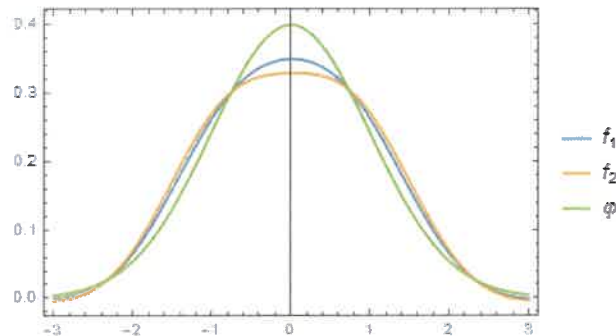
Współczynniki  $c_v$  w rozwinięciu Grama-Chaliera są wielomianami, w których wielkości stojące przy potęgach  $x$  są wyrażone przez momenty funkcji gęstości prawdopodobieństwa rozkładu błędu  $f(x)$ . Dla rozkładu standaryzowanego mają postać:

$$c_0 = 1, \quad c_1 = c_1 = 0, \quad c_3 = -\frac{\mu_3}{\sigma^3} = \gamma_1, \quad c_4 = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3 = \gamma_2, \\ c_5 = -\frac{\mu_5}{\sigma^5} + 10 \frac{\mu_3}{\sigma^3}, \quad c_6 = \frac{\mu_6}{\sigma^6} - 15 \frac{\mu_4}{\sigma^4} + 30 \quad (4)$$

gdzie  $\gamma_1$  i  $\gamma_2$  oznaczają współczynniki skośności i spłaszczenia zmiennej losowej błędu, natomiast  $\mu_\nu$  – momenty centralne rzędu  $\nu$

W wyniku przeprowadzonych badań wykazałem, że do wystarczająco dobrego przybliżenia rozkładu wystarczą momenty trzeciego, czwartego rzędu i piątego rzędu. Funkcję gęstości prawdopodobieństwa  $f(x)$  standaryzowanego rozkładu błędu wówczas można zapisać w następującej postaci (rys. 6):

$$f(x) = c_0 \varphi(x) - \frac{\gamma_1}{3!} \varphi^{(3)}(x) + \frac{\gamma_2}{4!} \varphi^{(4)}(x) + \left( \frac{\mu_6}{\sigma^6} - 15 \frac{\mu_4}{\sigma^4} + 30 \right) \frac{1}{5!} \varphi^{(5)}(x) \quad (5)$$



Rys. 6. Funkcje gęstości prawdopodobieństwa;  $\varphi$ - rozkładu normalnego,  $f_1$  – empirycznego dla  $L = 50\text{mm}$ ,  $f_2$  – empirycznego dla  $L=100\text{mm}$  [H1]

Przedstawione zagadnienie badania dokładności robota montażowego i zdolności jakościowej procesu pozycjonowania opisałem szerzej w pracy **H1**.

### **Modelowanie błędów robota i systemu montażowego**

Do wyznaczenia prawdopodobieństwa połączenia części i zagadnień optymalizacyjnych konieczny jest model zarówno błędu robota, jak i całego systemu montażowego. W tym celu opracowałem model oparty na strukturze kinematycznej robota korzystając z metody statystycznej linearyzacji bezpośredniej.

Podczas realizacji procesu montażu chwytak robota, w każdym momencie czasu, powinien zajmować określone położenie w przestrzeni, zadane zaprogramowanymi wartościami współrzędnych konfiguracyjnych  $q_i$ . Dowolną pozycję chwytaka można określić w przyjętym nieruchomym układzie współrzędnych poprzez pewną funkcję współrzędnych konfiguracyjnych:

$$\begin{aligned} X &= X(q_1, q_2, \dots, q_n), \\ Y &= Y(q_1, q_2, \dots, q_n), \\ Z &= Z(q_1, q_2, \dots, q_n) \end{aligned} \quad (6)$$

W rzeczywistości wartości współrzędnych konfiguracyjnych odtwarzane są z pewnymi błędami  $\Delta q_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), w rezultacie czego rzeczywiste położenie części odbiega od zaprogramowanego. Miarą rozrzutu położenia rzeczywistych uzyskanych w wyniku  $n$ -krotnie powtarzanego ruchu o tym samym kierunku do położenia zadanego jest tzw. powtarzalność pozycjonowania robota. Jeżeli błędy  $\Delta q_i$  zmiennych niezależnych  $q_i$  względem ich wartości nominalnych są zmiennymi losowymi i są statystycznie niezależne, to powtarzalność pozycjonowania można aproksymować normalną zmienną losową, będącą wektorem odchylenia położenia aktualnego od położenia nominalnego o parametrach określonych w następujący sposób:

$$\sigma_x = \left[ \left( \frac{\partial X}{\partial q_1} \right)^2 \sigma_{Q_1}^2 + \left( \frac{\partial X}{\partial q_2} \right)^2 \sigma_{Q_2}^2 + \dots + \left( \frac{\partial X}{\partial q_n} \right)^2 \sigma_{Q_n}^2 \right]^{0.5} \quad (7)$$

$$\sigma_y = \left[ \left( \frac{\partial Y}{\partial q_1} \right)^2 \sigma_{Q_1}^2 + \left( \frac{\partial Y}{\partial q_2} \right)^2 \sigma_{Q_2}^2 + \dots + \left( \frac{\partial Y}{\partial q_n} \right)^2 \sigma_{Q_n}^2 \right]^{0.5} \quad (8)$$

$$\sigma_z = \left[ \left( \frac{\partial Z}{\partial q_1} \right)^2 \sigma_{Q_1}^2 + \left( \frac{\partial Z}{\partial q_2} \right)^2 \sigma_{Q_2}^2 + \dots + \left( \frac{\partial Z}{\partial q_n} \right)^2 \sigma_{Q_n}^2 \right]^{0.5} \quad (9)$$

$$\rho_{xy} = \left[ \frac{\partial X}{\partial q_1} \frac{\partial Y}{\partial q_1} \sigma_{Q_1}^2 + \frac{\partial X}{\partial q_2} \frac{\partial Y}{\partial q_2} \sigma_{Q_2}^2 + \dots + \frac{\partial X}{\partial q_n} \frac{\partial Y}{\partial q_n} \sigma_{Q_n}^2 \right] \cdot (\sigma_x \cdot \sigma_y)^{-1} \quad (10)$$

$$\rho_{xz} = \left[ \frac{\partial X}{\partial q_1} \frac{\partial Z}{\partial q_1} \sigma_{Q_1}^2 + \frac{\partial X}{\partial q_2} \frac{\partial Z}{\partial q_2} \sigma_{Q_2}^2 + \dots + \frac{\partial X}{\partial q_n} \frac{\partial Z}{\partial q_n} \sigma_{Q_n}^2 \right] \cdot (\sigma_x \cdot \sigma_z)^{-1} \quad (11)$$

$$\rho_{yz} = \left[ \frac{\partial Z}{\partial q_1} \frac{\partial Y}{\partial q_1} \sigma_{Q_1}^2 + \frac{\partial Z}{\partial q_2} \frac{\partial Y}{\partial q_2} \sigma_{Q_2}^2 + \dots + \frac{\partial Z}{\partial q_n} \frac{\partial Y}{\partial q_n} \sigma_{Q_n}^2 \right] \cdot (\sigma_z \cdot \sigma_y)^{-1} \quad (12)$$

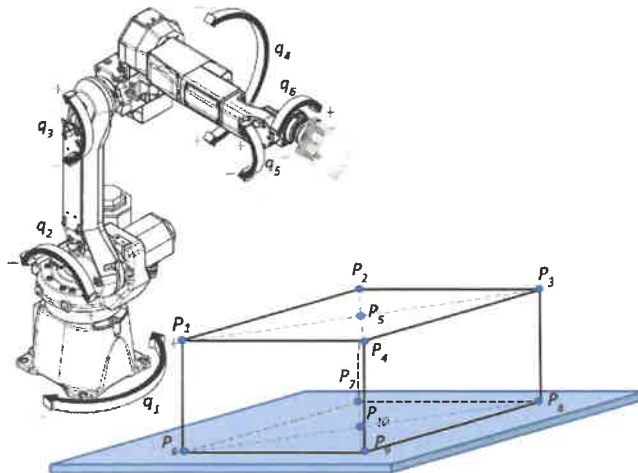
$\sigma_x$  – odchylenie standardowe składowej x wektora błędu,  
 $\sigma_y$  – odchylenie standardowe składowej y wektora błędu,  
 $\sigma_z$  – odchylenie standardowe składowej z wektora błędu,  
 $\rho_{xy}$  – współczynnik korelacji składowych x i y wektora błędu,  
 $\rho_{xz}$  – współczynnik korelacji składowych x i z wektora błędu,  
 $\rho_{yz}$  – współczynnik korelacji składowych y i z wektora błędu.

Przeprowadzone przeze mnie badania wykazały, że do wyznaczenia wartości odchyżeń standardowych zmiennych losowych błędu ustawienia współrzędnych konfiguracyjnych  $\sigma_{qi}$  należy dokonać pomiaru błędów robota w 10 punktach przestrzeni (rys. 7) a następnie na tej podstawie dopasować model do uzyskanych wyników. Wymaga to rozwiązania problemu optymalizacji z ograniczeniami. Zadanie to można przedstawić w następującej postaci:

$$\min f(\Sigma_{qi}) \quad (13)$$

$$\Sigma_{qi} = [\sigma_{q1}, \sigma_{q2}, \dots, \sigma_{qn}] \in Z = \{\Sigma: f_i(\sigma_{qi}) \geq 0, i = 1, \dots, n\} \quad (14)$$

gdzie:  $f_i: R^n \rightarrow R^n$ , dla  $i = 1, \dots, n$  – funkcje ograniczeń



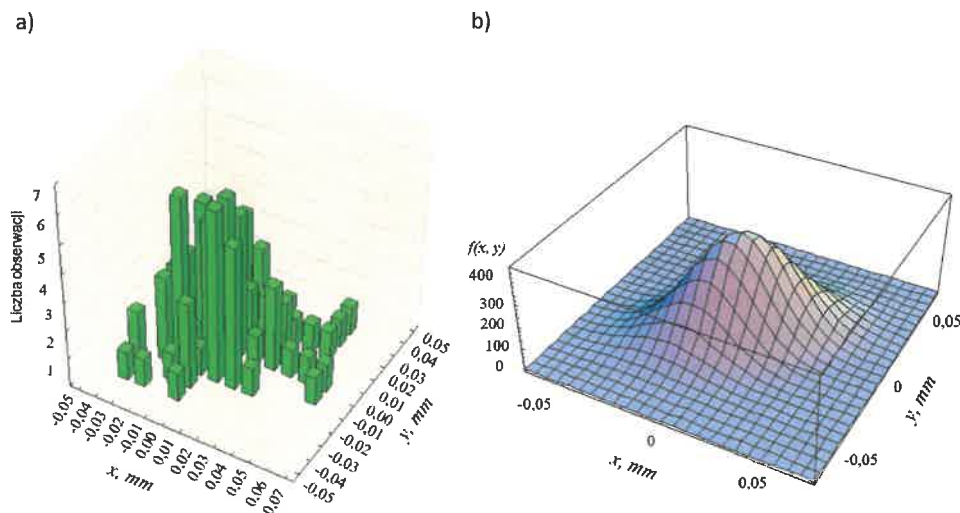
Rys. 7. Układ punktów pomiaru błędu robota [H1]

Funkcję celu zapewniającą optymalny dobór wartości odchyłeń standardowych  $\sigma_{q_i}$  współrzędnych  $q_i$  można przedstawić w następującej postaci:

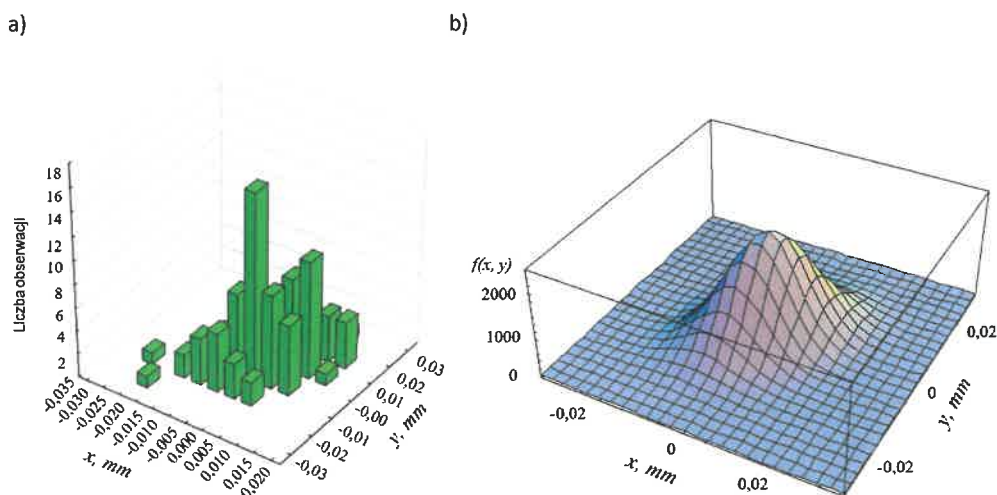
$$f(\Sigma_{q_i}) = \sum_{j=1}^m \left[ \left| \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial X}{\partial q_{ij}} \right)^2 \sigma_{q_i}^2 - \sigma_{x_j}^2 \right| + \left| \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial Y}{\partial q_{ij}} \right)^2 \sigma_{q_i}^2 - \sigma_{y_j}^2 \right| + \left| \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial Z}{\partial q_{ij}} \right)^2 \sigma_{q_i}^2 - \sigma_{z_j}^2 \right| + \left| \sum_{i=1}^n \frac{\partial X}{\partial q_{ij}} \frac{\partial Y}{\partial q_{ij}} \sigma_{q_i}^2 - cov(x, y)_j \right| + \left| \sum_{i=1}^n \frac{\partial Z}{\partial q_{ij}} \frac{\partial Y}{\partial q_{ij}} \sigma_{q_i}^2 - cov(z, y)_j \right| + \left| \sum_{i=1}^n \frac{\partial Z}{\partial q_{ij}} \frac{\partial X}{\partial q_{ij}} \sigma_{q_i}^2 - cov(z, x)_j \right| \right] \quad (15)$$

gdzie:  $j = 1, \dots, m$  – punkty pomiaru błędu robota,  $cov(x, y)$  – kowariancja między zmiennymi losowymi błędu robota na osi  $x$  i  $y$ ,  $cov(z, y)$  – kowariancja między zmiennymi losowymi błędu robota na osi  $z$  i  $y$ ,  $cov(z, x)$  – kowariancja między zmiennymi losowymi błędu robota na osi  $z$  i  $x$

Opracowana metoda umożliwia uzyskanie adekwatnego modelu matematycznego na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ . Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono przykładowe dwuwymiarowe histogramy zmiennych losowych opisujące błąd powtarzalności pozycjonowania robota Mitsubishi RV – M2 oraz Fanuc M10iA w wybranych (testowych) punktach oraz odpowiadające im wykresy gęstości prawdopodobieństwa uzyskane w sposób teoretyczny.



Rys. 8. Błąd powtarzalności pozycjonowania robota Mitsubishi RV- M2; a) histogram zmiennej losowej błędu uzyskany na podstawie danych eksperymentalnych, b) teoretyczny wykres funkcji gęstości [H10]



Rys. 9. Błąd powtarzalności pozycjonowania robota Fanuc M10iA; a) histogram zmiennej losowej błędu uzyskany na podstawie danych eksperymentalnych, b) teoretyczny wykres funkcji gęstości [H1]

Zgodnie z wymaganiami normy PN EN ISO 9283: 2003 badania powtarzalności pozycjonowania robota muszą być prowadzone w stabilnych warunkach dotyczących temperatury otoczenia. W rzeczywistych warunkach pracy robota temperatura otoczenia może ulegać zmianie, co ma bezpośredni wpływ na dokładność pozycjonowania robota.

Błąd wynikający ze zmiany temperatury może być kompensowany. Wymaga to jednak to jednak ciągłego monitorowania wartości temperatury. Jeżeli natomiast robot pracuje w warunkach, w których nie ma możliwości ustabilizowania temperatury otoczenia wówczas poprawka jest nieznana. Związaną z nią wartość błędu można wyznaczyć na podstawie przewidywanego przedziału, w którym poprawka jest zawarta, czyli przyjąć się, że błąd systematyczny może przyjmować wartość z przedziału  $\mu = 0 \pm \delta$ . W ten sposób można teoretycznie randomizować błąd systematyczny (temperaturowy).

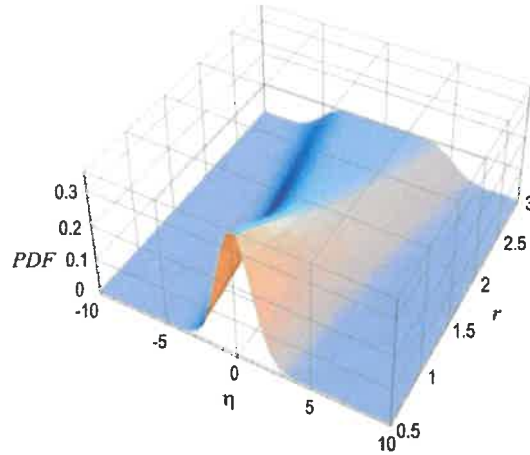
W wyniku przeprowadzonych badań wykazałem, że jeżeli istnieje jednakowe prawdopodobieństwo wystąpienia temperatury zarówno najniższej jak i najwyższej, to do uziarnienia błędu należy wykorzystać rozkład jednostajny. Sytuacja taka może mieć miejsce w przypadku, gdy nie nastąpi całkowita stabilizacja cieplna manipulatora. Splot rozkładu normalnego (powtarzalność) o funkcji gęstości  $f_{X_k}(x)$  i jednostajnego (błąd temperaturowy) o funkcji gęstości  $f_{X_t}(x)$  daje rozkład płasko-normalny. Funkcja gęstości tego rozkładu opisana jest zależnością:

$$PDF(\eta_x) = f_{X_k+X_t}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{X_t}(x) \cdot f_{X_k}(\zeta - x) \quad (16)$$

Funkcje gęstości tego rozkładu charakteryzują się na ogół stałą wartością w okolicach wartości oczekiwanej i zboczami opisanymi funkcją Gaussa (rys. 10). Zakres stałości funkcji gęstości zależy od parametru  $r$  rozkładu, który określa stosunek odchylenia standardowego  $\sigma_t$  jego składowej prostokątnej do odchylenia standardowego  $\sigma_k$  jego składowej normalnej:

$$r = \frac{\sigma_t}{\sigma_k} \quad (17)$$

$$PDF(\eta_x) = \frac{1}{2\sqrt{6\pi}r} \int_{\eta-\sqrt{3}+r}^{\eta+\sqrt{3}+r} \exp\left[-\frac{\zeta^2}{2}\right] d\zeta \quad (18)$$



Rys. 10. Funkcja gęstości rozkładu płasko-normalnego w zależności od współczynnika  $r$  [H6]

Na podstawie przeprowadzonych badań wykazałem, że jeżeli odchylenie standardowe  $\sigma_r$  błędu temperaturowego robota jest mniejsze lub równe wartości odchylenia standardowego  $\sigma_k$  błędu przypadkowego, to postać rozkładu płasko-normalnego jest zbliżona do rozkładu Gaussa. Można więc założyć iż błąd całkowity powtarzalności pozycjonowania można w tym przypadku aproksymować w postaci normalnego rozkładu gęstości prawdopodobieństwa.

Błąd położenia osi manipulowanej części jest zmienną losową uzależnioną od błędu powtarzalności robota montażowego i błędów powtarzalności urządzeń przyłączanych do jego końcówki (rys. 11). Typowymi urządzeniami wchodzącymi w skład wyposażenia technologicznego robotów montażowych są chwytaki oraz urządzenia do ich automatycznej wymiany. Błąd powtarzalności robota w płaszczyźnie prostopadłej do osi orientowanej części można scharakteryzować za pomocą dwuwymiarowej zmiennej losowej  $\eta_1(x_1, x_2)$  (w celu uproszczenia zapisu symbolicznego przyjąłem do dalszej analizy oznaczenia osi układu współrzędnych  $x, y$  i  $z$  jako  $x_1, x_2, x_3$ ) podlegającej prawu normalnego rozkładu prawdopodobieństwa, o gęstości prawdopodobieństwa  $f$  tej zmiennej określonej funkcją (19), o znanej macierzy wartości oczekiwanych  $\mu^T = [\mu_1, \mu_2]$  i macierzy kowariancji  $\Sigma$

$$f_{\mu, \Sigma}(X) = \frac{1}{2\pi\sqrt{|\Sigma|}} \exp\left[-\frac{1}{2}(x - \mu)^T \Sigma^{-1}(x - \mu)\right] \quad (19)$$

gdzie:  $\Sigma$  – macierz kowariancji

$\mu^T$  – macierz wartości oczekiwanych

Przeprowadzone przeze mnie badania wykazały, że błędy wprowadzane przez urządzenia przyłączane do końcówki robota montażowego na osi  $x_1$  i  $x_2$  są niezależne oraz podlegają prawu rozkładu Gaussa o parametrach w postaci macierzy kowariancji:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{x_1}^2 & cov(x_1, x_2) \\ cov(x_1, x_2) & \sigma_{x_2}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{x_1}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{x_2}^2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

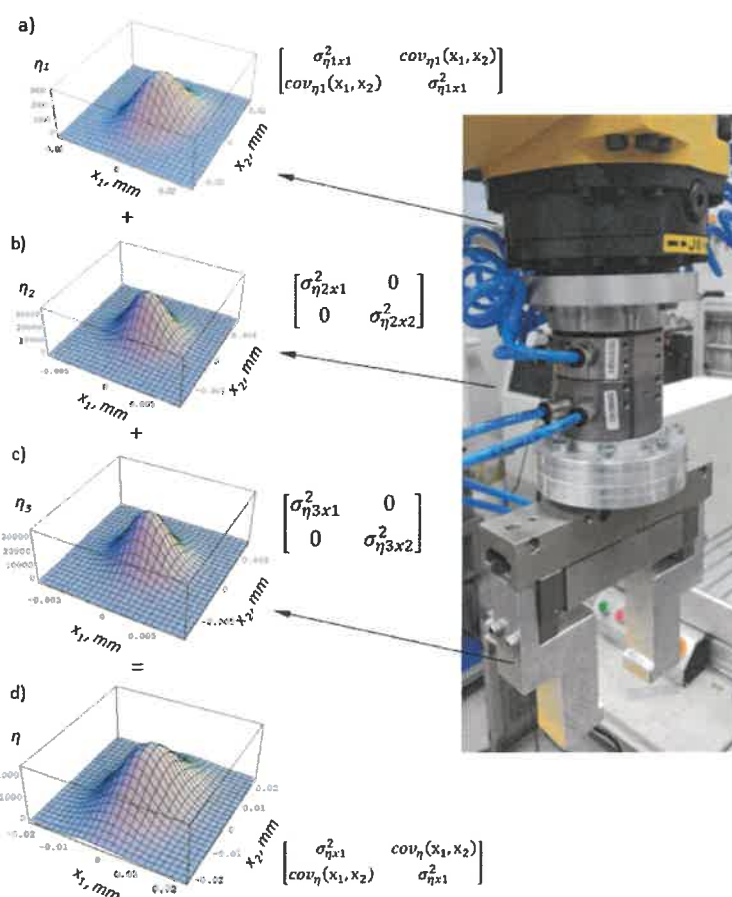
Jeżeli jednak błąd powtarzalności pozycjonowania robota  $\eta_1 = \eta_1(x_1, x_2)$ , jest wektorem losowym o macierzy kowariancji  $\Sigma_{\eta_1}$ , błąd powtarzalności pozycjonowania urządzenia do automatycznej wymiany narzędzi  $\eta_2 = \eta_2(x_1, x_2)$ , jest wektorem losowym o macierzy kowariancji  $\Sigma_{\eta_2}$ , błąd powtarzalności pozycjonowania chwytaka  $\eta_3 = \eta_3(x_1, x_2)$ , oraz wektory te  $(\eta_1, \eta_2, \eta_3)$  są niezależne stochastycznie, a  $\eta = \eta(x_1, x_2)$  jest ich sumą, to macierz kowariancji  $\Sigma_\eta$  wektora  $\eta$  jest równa sumie macierzy kowariancji wektorów  $\eta_1$  i  $\eta_2, \eta_3$ . Ponieważ wektory opisujące błędy położenia osi opisane są niezależnymi normalnymi rozkładami prawdopodobieństwa o parametrach  $N(\mu_{\eta_1}, \Sigma_{\eta_1}), N(\mu_{\eta_2}, \Sigma_{\eta_2}), N(\mu_{\eta_3}, \Sigma_{\eta_3})$  to ich sumę można z dostateczną dokładnością również przedstawić jako normalną zmienną losową o następujących parametrach:

$$N(\mu_\eta, \Sigma_\eta) = N(\mu_{\eta_1} + \mu_{\eta_2} + \mu_{\eta_3}, \Sigma_{\eta_1} + \Sigma_{\eta_2} + \Sigma_{\eta_3}) \quad (21)$$

gdzie:

- $\mu_{\eta_1}, \mu_{\eta_2}, \mu_{\eta_3}$  – macierze wartości oczekiwanych zmiennych losowych błędu robota, urządzenia do automatycznej wymiany narzędzi oraz chwytaka,
- $\Sigma_{\eta_1}, \Sigma_{\eta_2}, \Sigma_{\eta_3}$  – macierze kowariancji zmiennych losowych błędu robota, urządzenia do automatycznej wymiany narzędzi oraz chwytaka.

Na podstawie przedstawionego modelu wyznaczyłem parametry zmiennych losowych błędu powtarzalności pozycjonowania robota Mitsubishi RV-M2 wyposażonego w chwytak *HM 50* oraz robota Fanuc M10iA wyposażonego w chwytak *KGG80* oraz urządzenie do automatycznej wymiany narzędzi *SWS – 005* (rys. 11). Następnie uzyskane wyniki poddałem weryfikacji statystycznej. Weryfikowałem hipotezę o zgodności brzegowych rozkładów prawdopodobieństwa z rozkładami uzyskanymi teoretycznie z wykorzystaniem testu zgodności  $\lambda$  Kołmogorowa na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ . Wartość statystyki nie należała do zbioru krytycznego, w związku z tym nie było podstawo do odrzucenia hipotezy o zgodności parametrów rozkładów uzyskanych teoretycznie i na podstawie pomiarów. W zależności od konfiguracji oprzyrządowania robota wartość błędu między wynikami pomiaru i modelowania mieściła się w zakresie od 1,02% do 6,61% .



Rys. 11. Błędy urządzeń zamocowanych na kciści robota Fanuc M10iA: a) błąd robota Fanuc M10iA  $\eta_1$ , b) błąd urządzenia do automatycznej wymiany narzędzia SWS – 005  $\eta_2$ , c) błąd chwytaka KGG80  $\eta_2$  d) całkowity błąd powtarzalności pozycjonowania  $\eta$  [H1]

Przedstawione zagadnienie modelowania błędu robota i stanowiska montażowego opisałem szerzej w pracach **H1**, **H6** oraz **H10**

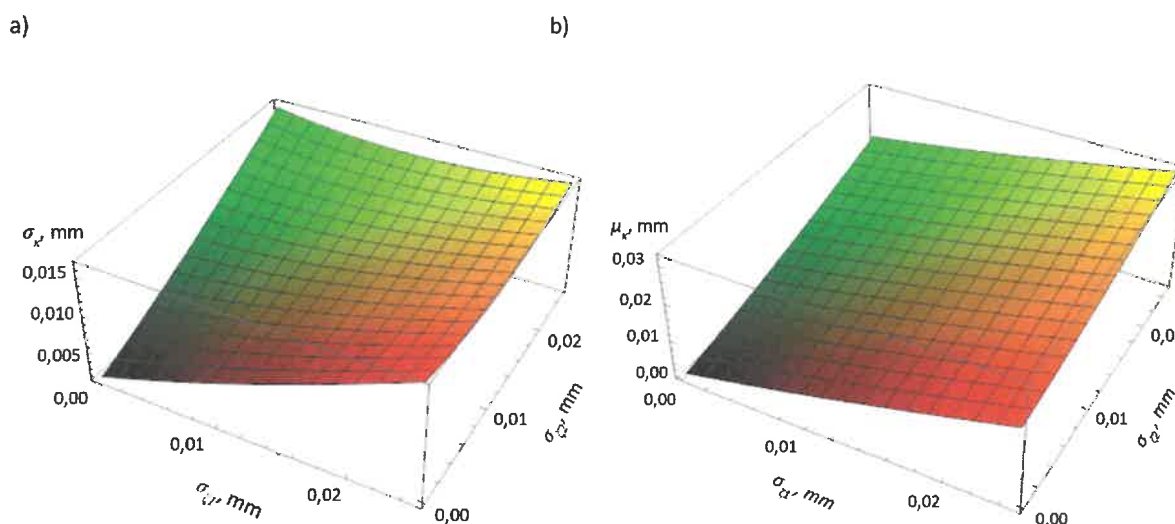


### Modelowanie wpływu błędów systemów montażowych na prawdopodobieństwo połączenia części

Prawdopodobieństwo połączenia części uzależnione jest od błędów systemu montażowego oraz tolerancji łączonych części. Jego znajomość umożliwia oszacowanie kosztów eksploatacji systemu montażowego oraz dobór oprzyrządowania o odpowiedniej dokładności. Prawdopodobieństwo połączenia części jest prawdopodobieństwem zdarzenia, że zmienna losowa opisująca luz połączenia ma wartość większą od zmiennej losowej błędu odległości między osiami  $\zeta$ . Zmienna  $\zeta$  stanowi dwuwymiarową zmienną losową w kartezjańskim układzie współrzędnych o brzegowych rozkładach normalnych  $\zeta_1$  i  $\zeta_2$ . Rozkład błędu odległości między osiami na płaszczyźnie  $\kappa$  ma zatem rozkład zbliżony do rozkładu Rayleigha. W miarę wzrostu dysproporcji między wartościami  $\sigma_{\zeta_1}$  i  $\sigma_{\zeta_2}$ , oraz wzrostem wartości współczynnika korelacji  $\rho$  między zmiennymi rozkład ten w coraz większym stopniu odbiega od rozkładu modelowego. Na podstawie symulacji numerycznych wyznaczyłem zależności umożliwiające wyznaczenie odchylenia standardowego  $\sigma_\kappa$  i wartości oczekiwanej  $\mu_\kappa$  rozkładu wektora błędu  $\kappa$  (rys. 12):

$$\begin{aligned} \sigma_\kappa = & 0.000620257 + 0.334982\sigma_{\zeta_1} + 9.89735\sigma_{\zeta_1}^2 - 40.2074\sigma_{\zeta_1}^3 + 0.334982\sigma_{\zeta_2} - \\ & 19.7359\sigma_{\zeta_1}\sigma_{\zeta_2} + 9.89735\sigma_{\zeta_2}^2 - 40.2074\sigma_{\zeta_2}^3 - 0.0184828\rho - 0.0607336\sigma_{\zeta_1}\rho - \\ & 0.0607336\sigma_{\zeta_2}\rho + 0.110561\rho^2 - 0.130165\rho^3 \end{aligned} \quad (22)$$

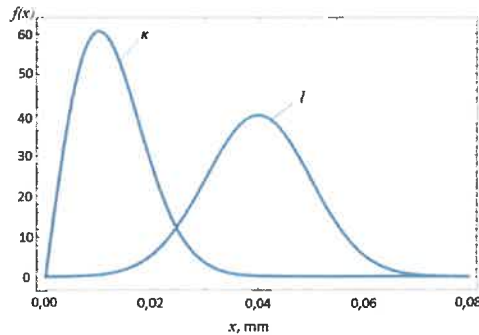
$$\begin{aligned} \mu_\kappa = & 0.000516154 + 0.668581\sigma_{\zeta_1} + 5.59601\sigma_{\zeta_1}^2 - 29.827\sigma_{\zeta_1}^3 + 0.558023\sigma_{\zeta_2} - \\ & 10.5539\sigma_{\zeta_1}\sigma_{\zeta_2} + 8.45501\sigma_{\zeta_2}^2 - 39.7228\sigma_{\zeta_2}^3 - 0.00297248\rho - 0.0713044\sigma_{\zeta_1}\rho - \\ & 0.00437978\sigma_{\zeta_2}\rho + 0.00981019\rho^2 - 0.00832343\rho^3 \end{aligned} \quad (23)$$



Rys. 12. Funkcje regresji parametrów rozkładu wektora błędu  $\kappa$ : a) odchylenia standardowego  $\sigma_\kappa$ , b) wartości oczekiwanej  $\mu_\kappa$  [H1]

Prawdopodobieństwo połączenia części jest prawdopodobieństwem zdarzenia, że różnica między wartością zmiennej losowej luzu połączenia  $0,5/$  i zmienną losową błędu  $\kappa$  (rys. 13) jest większa od zera ( $0,5/ - \kappa > 0$ ). W celu wyznaczenia prawdopodobieństwa należy wyznaczyć splot rozkładów lub aproksymować wynik w postaci rozkładu normalnego. W przypadku aproksymacji wynikiem rozkładem

normalnym prawdopodobieństwo połączenia części można wyznaczyć całkując uzyskaną funkcję gęstości w przedziale od 0 do nieskończoności.



Rys. 13. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa zmiennej losowej luzu połączenia l i wektora błędu  $\kappa$  [H1]

Na podstawie przeprowadzonych badań wykazałem, że aproksymacja wyniku kompozycji rozkładu  $0,5l$  i  $\kappa$  normalnym rozkładem gęstości prawdopodobieństwa umożliwia oszacowanie prawdopodobieństwa połączenia części z wartością błędu uzależnioną od ilorazu odchylenia standardowego luzu połączenia  $\sigma_l$  i wektora błędu  $\sigma_\kappa$  ( $k = \sigma_l / \sigma_\kappa$ ). W przypadku gdy odchylenie standardowe błędu ma wartość mniejszą lub równą odchyleniu standardowemu luzu połączenia ( $k \geq 1$ ), błąd między wynikami modelowania i wynikami licznych symulacji numerycznych nie przekracza 1,52%. Dla współczynnika  $k$  kształtującego się w zakresie od wartości 0,5 do 1 błąd nie przekracza 2,10%. Należy przy tym zauważyć, że wraz ze spadkiem wartości współczynnika  $k$  rośnie w kompozycji rozkładów udział zmiennej losowej błędu  $\kappa$ , który odbiega od rozkładu normalnego. Skutkuje to stopniowym wzrostem wartości błędu między wartością prawdopodobieństwa uzyskaną w drodze symulacji numerycznych a wynikami z modelowania, opartymi na normalnym rozkładzie gęstości prawdopodobieństwa.

Wyznaczenie rozkładu będącego kompozycją rozkładu Rayleigha i rozkładu normalnego jest zadaniem pracochłonnym, przy czym uzyskane wyniki nie można przedstawić w postaci prostej funkcji gęstości prawdopodobieństwa. Stawia to pod znakiem zapytania możliwość wykorzystania tej metody w rzeczywistych warunkach produkcyjnych. W celu uzyskania prostego rozwinięcia funkcji gęstości splotu rozkładów dokonałem standaryzacji uzyskanej zmiennej losowej do postaci  $(X-\mu_\kappa)/\sigma_\kappa$  o dystrybuancie  $F(x)$  i funkcji gęstości  $f(x) = F'(x)$  a następnie funkcję gęstości rozwinąłem w szereg:

$$f(x) = \varphi(x) + \sum_{i=1}^{\infty} (-1)^i \frac{b_{v,v+2} \varphi^{(v+2)}(x) + \dots + b_{v,3v} \varphi^{(3v)}(x)}{n^{v/2}} \quad (24)$$

gdzie  $\varphi(x)$  jest gęstością prawdopodobieństwa standaryzowanego rozkładu gaussowskiego, natomiast  $b$  jest niezależnym od  $n$  wielomianem.

Początkowe wyrazy tego rozwinięcia są następujące:

$$f(x) = \varphi(x) - \frac{1}{3!} \cdot \frac{\lambda_3}{n^2} \varphi^{(3)}(x) + \frac{1}{4!} \cdot \frac{\lambda_4}{n} \varphi^{(4)}(x) + \frac{10}{6!} \cdot \frac{\lambda_3^2}{n} \varphi^{(6)}(x) - \frac{1}{5!} \cdot \frac{\lambda_5}{n^2} \varphi^{(5)}(x) - \frac{35}{7!} \cdot \frac{\lambda_3 \lambda_4}{n^2} \varphi^{(7)}(x) - \frac{1280}{9!} \cdot \frac{\lambda_3^3}{n^2} \varphi^{(9)}(x) + \dots \quad (25)$$

Współczynniki zależności (24) można zastąpić momentami centralnymi  $\mu_v$  rzędu  $v$ , uzyskując szereg Edgewortha:

$$f(x) = \varphi(x) - \frac{1}{3!} \cdot \frac{\mu_3}{\sigma^3} \varphi^{(3)}(x) + \frac{1}{4!} \cdot \left( \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3 \right) \varphi^{(4)}(x) + \frac{10}{6!} \cdot \left( \frac{\mu_3}{\sigma^3} \right)^2 \varphi^{(6)}(x) - \frac{1}{5!} \cdot \left( \frac{\mu_5}{\sigma^5} - 10 \frac{\mu_3}{\sigma^3} \right) \varphi^{(5)}(x) - \frac{35}{7!} \cdot \frac{\mu_3}{\sigma^3} \left( \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3 \right) \varphi^{(7)}(x) - \frac{1280}{9!} \cdot \left( \frac{\mu_3}{\sigma^3} \right)^3 \varphi^{(9)}(x) + \dots \quad (26)$$

gdzie  $\varphi^{(i)}$  - pochodne i-tego rzędu funkcji gęstości prawdopodobieństwa standaryzowanego rozkładu gaussowskiego.

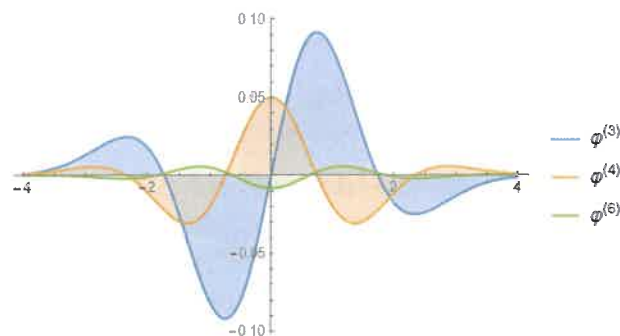
Przeprowadzone przeze mnie badania wykazały, że do wystarczająco dobrego przybliżenia rozkładu wystarczą momenty trzeciego i czwartego rzędu. Wprowadzając współczynniki skośności  $\gamma_1$  i spłaszczenia  $\gamma_2$  uzyskałem przybliżoną funkcję gęstości prawdopodobieństwa  $f(x)$  standaryzowanego rozkładu w postaci:

$$f(x) = \varphi(x) - \frac{\gamma_1}{3!} \varphi^{(3)}(x) + \frac{\gamma_2}{4!} \varphi^{(4)}(x) + \frac{\gamma_1^2}{6!} \varphi^{(6)}(x) \quad (27)$$

Prawdopodobieństwo połączenia części o powierzchniach walcowych można wyznaczyć rozwiązując całkę:

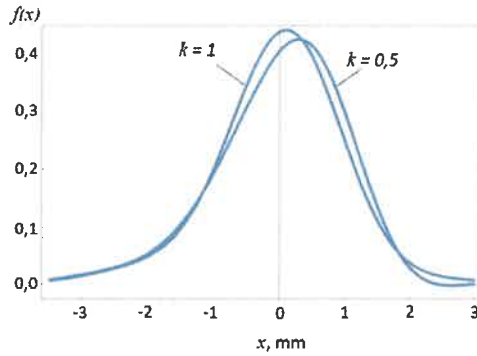
$$P = \int_{-\mu_\kappa/\sigma_\kappa}^{\infty} \varphi(x) - \frac{\gamma_1}{3!} \varphi^{(3)}(x) + \frac{\gamma_2}{4!} \varphi^{(4)}(x) + \frac{\gamma_1^2}{6!} \varphi^{(6)}(x) \quad (28)$$

Na rysunku 14 przedstawiono wykresy pochodnych  $\varphi^{(3)}$ ,  $\varphi^{(4)}$ ,  $\varphi^{(6)}$  ze współczynnikami liczbowymi występującymi w wyrażeniu (28). Krzywe odpowiadające  $\varphi^{(4)}$  i  $\varphi^{(6)}$  są symetryczne względem  $x = 0$ , natomiast trzecia pochodna  $\varphi^{(3)}$  wnosi do wyrażenia (28) element asymetrii, dając tym samym możliwość dokładnego opisu uzyskanych wyników i tym samym prawdopodobieństwa połączenia części.



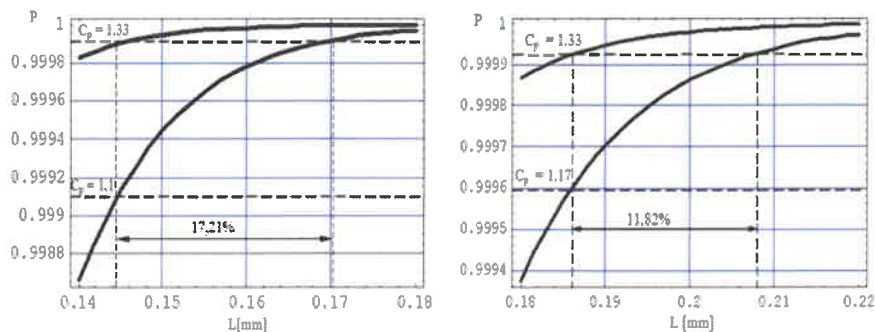
Rys. 14. Pochodne funkcji gęstości standaryzowanego rozkładu normalnego wraz ze współczynnikami równania [H1]

Oszacowanie funkcji gęstości prawdopodobieństwa wymaga znajomości współczynnika skośności i spłaszczenia rozkładu. W wyniku symulacji numerycznych ustaliłem że współczynnik skośności rozkładu uzależniony jest od wartości współczynnika  $k$  ( $\gamma_1 = 0,72 \cdot k - 1,02$ ). Współczynnik spłaszczenia rozkładu dla  $k \geq 0,75$  przyjmuje wartość  $\gamma_2 = 1$ , natomiast dla  $k < 0,75$  wartość  $\gamma_2 = 0,9$ . Przyjęcie ustalonych współczynników umożliwia wyznaczenie prawdopodobieństwa połączenia części, z błędem nie przekraczającym 0,046% dla wartości współczynnika  $k \geq 0,75$  oraz 0,072% dla  $k < 0,75$ . Na rysunku 15 przedstawiono przykładowe funkcje gęstości prawdopodobieństwa splotu rozkładu 0,5/ i  $\kappa$  dla wartości współczynnika  $k = 0,5$  oraz  $k = 1$ .



Rys. 15. Standaryzowana funkcja gęstości prawdopodobieństwa rozkładu splotu funkcji 0,5/ i  $\kappa$  [H1]

Wystąpienie zmian temperatury w trakcie realizacji procesu montażu prowadzi do zwiększenia błędu robota co skutkuje zmniejszeniem prawdopodobieństwa połączenia części i niezawodności całego procesu. W zależności od miejsca realizacji połączenia w przestrzeni roboczej stanowiska można uzyskać różną wartość prawdopodobieństwa połączenia części. W wyniku przeprowadzonych badań wykazałem, że zmiana temperatury powoduje obniżenie prawdopodobieństwa połączenia części a zatem również zdolności jakościowej procesu  $C_p$  od 12-17,8% (rys. 16).



Rys. 16. Wpływ zmian temperatury na prawdopodobieństwo połączenia części w dwóch punktach przestrzeni roboczej systemu montażowego [H6]

Dokładne wyznaczenie prawdopodobieństwa połączenia części o powierzchniach płaskich wymaga podobnego podejścia do modelowania, jak w przypadku części o powierzchniach walcowych.

Na podstawie przeprowadzonych badań wykazałem, że wyznaczenie prawdopodobieństwa dla tych połączeń wymaga wyznaczenia parametrów rozkładu wartości bezwzględnej wektora błędu odległości między osiami  $\kappa_{x1}$  i  $\kappa_{x2}$  z wykorzystaniem opracowanych przeze mnie zależności (22-23) a następnie wyznaczenia kompozycji rozkładów  $g(x_1) = 0,5I_{\kappa_{x1}} + \kappa_{x1}$  i  $g(x_2) = 0,5I_{\kappa_{x2}} + \kappa_{x2}$  w postaci szeregu Edgewortha:

$$f(x_1) = \varphi(x_1) - \frac{\gamma_{1x1}}{3!} \varphi^{(3)}(x_1) + \frac{\gamma_{2x1}}{4!} \varphi^{(4)}(x_1) + \frac{\gamma_{1x1}^2}{6!} \varphi^{(6)}(x_1) \quad (29)$$

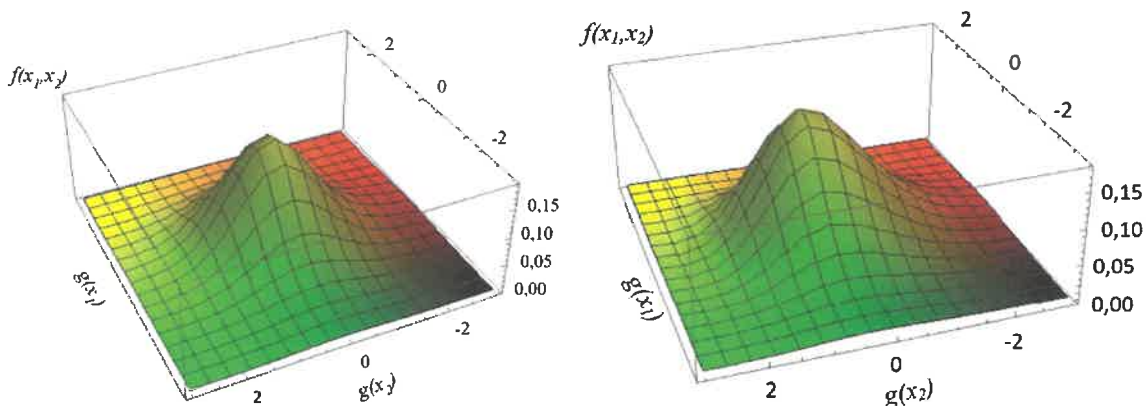
$$f(x_2) = \varphi(x_2) - \frac{\gamma_{1x2}}{3!} \varphi^{(3)}(x_2) + \frac{\gamma_{2x2}}{4!} \varphi^{(4)}(x_2) + \frac{\gamma_{1x2}^2}{6!} \varphi^{(6)}(x_2) \quad (30)$$

gdzie:  $\gamma_{1x1}, \gamma_{1x2}$  – współczynniki skośności rozkładu na kierunku osi  $x_1$  i  $x_2$ ,  
 $\gamma_{2x1}, \gamma_{2x2}$  – współczynniki spłaszczenia rozkładu na kierunku osi  $x_1$  i  $x_2$ ,  
 $f(x_1)$  – standaryzowana zmienna losowa rozkładu  $g(x_1)$ ,  
 $f(x_2)$  – standaryzowana zmienna losowa rozkładu  $g(x_2)$ .

Przedstawione rozkłady są niezależne statystycznie, w związku z tym można je przedstawić w postaci łącznego rozkładu gęstości prawdopodobieństwa  $f(x_1, x_2) = f(x_1) \cdot f(x_2)$  i wyznaczyć prawdopodobieństwo połączenia części rozwiązując całkę:

$$\int_{-\mu_{x1}/\sigma_{x1}}^{\infty} \int_{-\mu_{x2}/\sigma_{x2}}^{\infty} \left( \varphi(x_1) - \frac{\gamma_{1x1}}{3!} \varphi^{(3)}(x_1) + \frac{\gamma_{2x1}}{4!} \varphi^{(4)}(x_1) + \frac{\gamma_{1x1}^2}{6!} \varphi^{(6)}(x_1) \right) \cdot \left( \varphi(x_2) - \frac{\gamma_{1x2}}{3!} \varphi^{(3)}(x_2) + \frac{\gamma_{2x2}}{4!} \varphi^{(4)}(x_2) + \frac{\gamma_{1x2}^2}{6!} \varphi^{(6)}(x_2) \right) dx_1 dx_2 \quad (31)$$

Wykorzystanie opracowanego przeze mnie modelu daje możliwość wyznaczenia prawdopodobieństwa połączenia części z błędem nie przekraczającym 0,066% dla wartości współczynników  $k_{x1}, k_{x2} \geq 0,75$  oraz błędem nie przekraczającym 0,11% dla  $k_{x1}, k_{x2} < 0,75$ . Na rysunku 17 przedstawiono przykładowe funkcje gęstości prawdopodobieństwa splotu rozkładów  $g(x_1) = 0,5I_{x1} * K_{x1}$  i  $g(x_2) = 0,5I_{x2} * K_{x2}$ . Uzyskane funkcje gęstości prawdopodobieństwa, w miarę spadku wartości współczynników  $k_{x1}$  i  $k_{x2}$ , stają się coraz bardziej asymetryczne, co tłumaczy wzrost błędu wyznaczania prawdopodobieństwa połączenia części przy aproksymacji splotu rozkładem normalnym.



Rys. 17. Standaryzowana funkcja gęstości  $f(x_1, x_2)$  splotu rozkładów  $g(x_1)$  i  $g(x_2)$ : a) dla  $\gamma_{1x1} = \gamma_{1x2} = -0,3$ , b) dla  $\gamma_{1x1} = \gamma_{1x2} = -0,6$  [H1]

Przedstawione zagadnienie wyznaczania montowalności połączeń opisałem szerzej w pracach **H1** oraz **H6**

**Wyznaczanie optymalnego miejsca realizacji procesu łączenia części w przestrzeni roboczej stanowiska, zapewniającego najwyższy poziom montowalności połączeń o powierzchniach walcowych i płaskich**

Przeprowadzone przeze mnie badania wykazały, że błąd powtarzalności pozycjonowania robota przyjmuje różne wartości w przestrzeni roboczej. Przyjmując zatem maksymalną wartość błędu, podaną w specyfikacji technicznej, użytkownik nie wykorzystuje jego pełnego potencjału. Zadanie wyznaczania optymalnego miejsca w przestrzeni roboczej stanowiska montażowego polega na poszukiwaniu punktu, w którym robot generuje najmniejszą wartość błędu. W tym punkcie prawdopodobieństwo połączenia części przyjmuje wartość maksymalną. Funkcja celu uzależniona jest jedynie od wyboru miejsca realizacji połączenia w przestrzeni robota, charakteryzowanego zbiorem jego współrzędnych konfiguracyjnych (rys. 18):

$$\min f(Q) \quad (32)$$

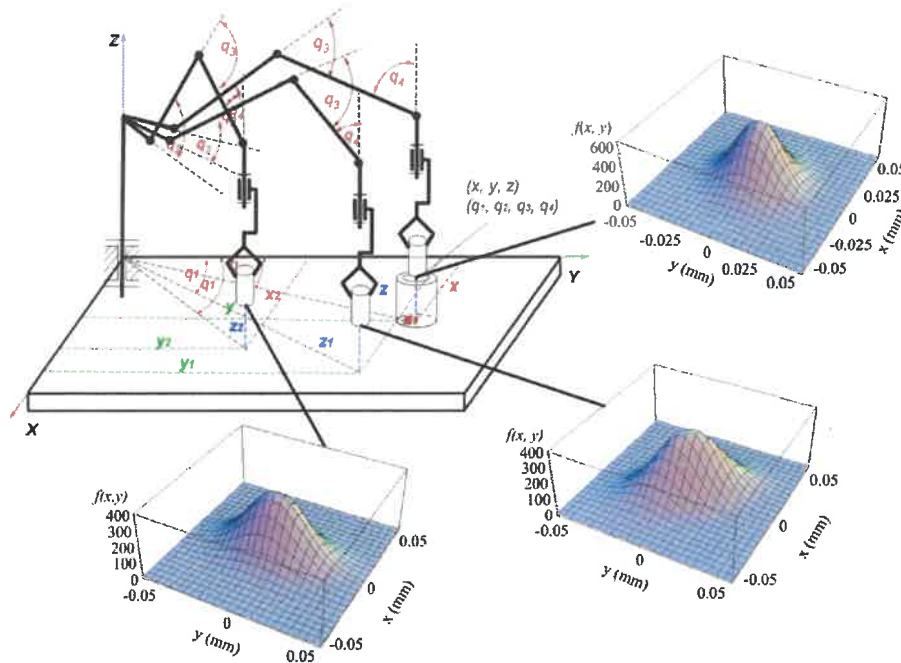
$$Q = [q_1, q_2, \dots, q_n] \in Z_M = \{Q : \psi_i(Q) \leq 0, i = 1, \dots, m\} \quad (33)$$

gdzie:  $f$  – funkcja celu. Jest to funkcja  $n$  – zmiennych, przekształcających  $n$ -wymiarową przestrzeń rzeczywistą  $R^n$  w zbiór liczb rzeczywistych  $R^1$ ,

$Q$  –  $n$ -wymiarowy wektor zmiennych decyzyjnych (współrzędnych konfiguracyjnych),

$Z_M$  – zbiór rozwiązań dopuszczalnych (zbiór możliwych do wygenerowania wartości współrzędnych konfiguracyjnych),

$\psi_i(Q)$  – funkcje ograniczające zbiór rozwiązań dopuszczalnych.



Rys. 18. Interpretacja graficzna wyznaczania optymalnego miejsca w przestrzeni stanowiska montażowego [H10]

W rozpatrywanym przypadku zmienne decyzyjne spełniają dodatkowe kryteria wynikające z konstrukcyjnych ograniczeń robota tzw. kryteria dopuszczalności i dlatego rozpatrywane zagadnienie jest zadaniem programowania matematycznego z ograniczeniami. Zadanie znalezienia rozwiązania optymalnego polega zatem na takim doborze wartości zmiennych decyzyjnych (współrzędnych konfiguracyjnych), aby przy spełnionych ograniczeniach funkcja celu osiągnęła wartość minimalną. Największy wpływ na przebieg procesu łączenia części o powierzchniach cylindrycznych i gwintowych mają błędy w płaszczyźnie prostopadłej do ich osi, dlatego jako funkcję celu przyjąłem błąd powtarzalności pozycjonowania robota w płaszczyźnie XY:

$$f(Q) = 3 \left( \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial X}{\partial q_i} \right)^2 \sigma_{q_i}^2 + \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial Y}{\partial q_i} \right)^2 \sigma_{q_i}^2 \right)^{0.5} \quad (34)$$

W przypadku montażu części o powierzchniach płaskich, tolerancja względnego przemieszczenia ich osi na kierunkach X i Y przyjętego układu współrzędnych na ogół nie jest jednakowa. W związku z tym za funkcję celu można przyjąć wartość odchylenia standardowego zmiennej losowej błędu  $\sigma_x$  lub  $\sigma_y$ . W trakcie prowadzonych badań założyłem, że tolerancja względnego przemieszczenia osi jest mniejsza na kierunku osi X i przyjąłem za funkcję celu wartość  $3\sigma_x$  określoną zależnością:

$$f(Q) = 3 \left( \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial X}{\partial q_i} \right)^2 \sigma_{q_i}^2 \right)^{0.5} \quad (35)$$

Zadanie doboru wartości współrzędnych konfiguracyjnych rozwiązałem dla robota Mitsubishi RV – M2 zainstalowanego na stanowisku montażowym. Dla potrzeb zadania założyłem, że montaż może odbywać się w pierwszej ćwiartce układu współrzędnych:  $200 \text{ mm} \leq X \leq 500 \text{ mm}$ ,  $200 \text{ mm} \leq Y \leq 500 \text{ mm}$ ,  $20 \text{ mm} \leq Z \leq 450 \text{ mm}$  oraz, że oś montowanej części powinna być prostopadła do płaszczyzny XY rozpatrywanego układu współrzędnych ( $\varphi = -1.57 \text{ rad}$ ).

Dla przyjętych ograniczeń i parametrów robota zamieszczonych w jego dokumentacji technicznej, wyznaczyłem minimalne wartości funkcji celu. Wyniosły one odpowiednio 0,063 mm dla połączeń o powierzchniach walcowych i gwintowych oraz 0,039 mm dla połączeń o powierzchniach płaskich. Uzyskane wyniki optymalizacji zweryfikowałem eksperymentalnie.

W celu określenia zakresu zmienności błędów w rozpatrywanej przestrzeni robota wyznaczyłem również maksymalne wartości funkcji (34) i (35). Wyniosły one odpowiednio 0,09 mm i 0,075 mm. Wykazałem w ten sposób, że wartość błędów może zmieniać się od 50-90% wartości błędu robota podanej w dokumentacji technicznej (0,1mm), w przypadku, gdy bierzemy pod uwagę błędy w płaszczyźnie XY oraz od 39-75% jeżeli tylko na kierunku osi X.

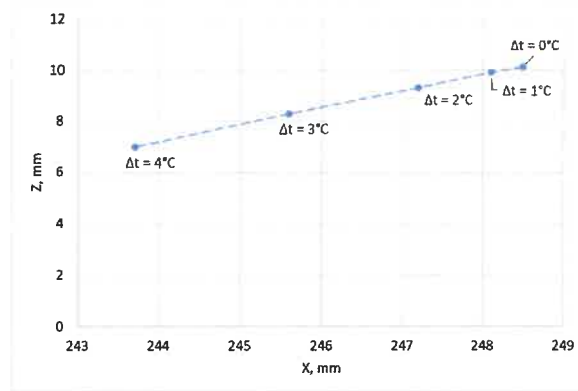
W przypadku pracy robota w niestabilizowanych warunkach dotyczących temperatury otoczenia znalezienie optymalnego miejsca realizacji procesu wymaga zmodyfikowania funkcji celu i uwzględnienia w niej zarówno błędów spowodowanych rozszerzalnością liniową ramion robota jak i błędów ustawienia współrzędnych konfiguracyjnych.

$$f(Q) = 3 \left( \left[ \frac{1}{\sqrt{3}} \sum_{i=1}^n \frac{\partial X}{\partial l_i} \cdot \Delta l_i \right]^2 + \sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial X}{\partial q_i} \right)^2 \cdot \sigma_{q_i}^2 \right)^{0.5} \rightarrow \min \quad (36)$$

$$f(Q) = 3 \left( \left[ \frac{1}{\sqrt{3}} \sum_{i=1}^n \frac{\partial Z}{\partial l_i} \cdot \Delta l_i \right]^2 + \sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial Z}{\partial q_i} \right)^2 \cdot \sigma_{q_i}^2 \right)^{0.5} \rightarrow \min \quad (37)$$

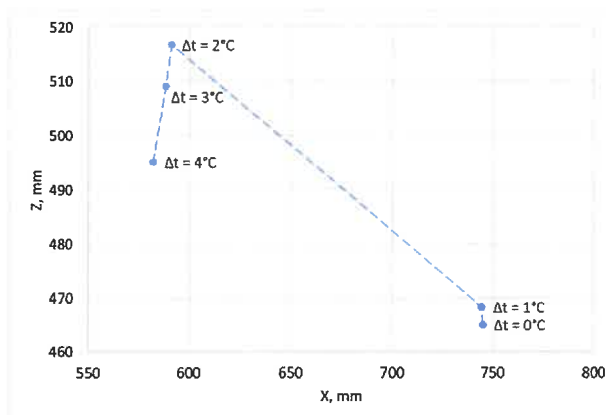
$$f(Q) = 3 \left[ \left( \left[ \frac{1}{\sqrt{3}} \sum_{i=1}^n \frac{\partial X}{\partial l_i} \cdot \Delta l_i \right]^2 + \sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial X}{\partial q_i} \right)^2 \cdot \sigma_{q_i}^2 \right) + \left( \left[ \frac{1}{\sqrt{3}} \sum_{i=1}^n \frac{\partial Z}{\partial l_i} \cdot \Delta l_i \right]^2 + \sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial Z}{\partial q_i} \right)^2 \cdot \sigma_{q_i}^2 \right) \right]^{0.5} \rightarrow \min \quad (38)$$

Na podstawie analizy uzyskanych wyników wykazałem, że optymalne miejsce realizacji zadań robota zmienia się wraz ze wzrostem temperatury otoczenia. W przypadku gdy wymagana jest dokładność robota na kierunku osi Z położenie optymalnego punktu zmienia się w niewielkim stopniu w kierunku początku przyjętego układu współrzędnych (rys. 19). Przyjęcie przez robota konfiguracji charakteryzowanej zbiorem współrzędnych konfiguracyjnych wyznaczonych w trakcie optymalizacji przy założeniu braku zmian temperatury otoczenia odpowiada najmniejszej wartości błędu powtarzalności pozycjonowania ( $\pm 0,0156 \text{ mm}$ ). Zakładając jednak możliwość pojawienia się zmian temperatury można na podstawie zaproponowanej przeze mnie metody wyznaczyć punkt w przestrzeni robota, w którym robot ma mniejszą wrażliwość na zmianę położenia efektora robota wywołanych zmianami temperatury. Ustawienie robota w tej pozycji związane jest z obniżeniem jego dokładności w stosunku do pozycji poprzedniej o 0,5% (przy założeniu pracy w ustabilizowanej temperaturze otoczenia). Gdy jednak temperatura ta będzie ulegała wahaniom, można w ten sposób zmniejszyć błąd robota w rozpatrywanej przestrzeni rozwiązań dopuszczalnych o 9,43%.



Rys. 19. Zmiana położenia optymalnego punktu w przestrzeni gdy wymagana jest dokładność na kierunku osi z [H5]

Podobna sytuacja ma miejsce w przypadku, gdy wymagana jest dokładność robota na kierunku osi x. Założenie możliwości pojawienia się zmian temperatury wiąże się koniecznością zmiany miejsca realizacji procesu (rys. 20). Ustawienie robota w punkcie wyznaczonym przy założeniu możliwości zmiany temperatury o 3C daje możliwość zmniejszenia błędu powtarzalności pozycjonowania robota o 20,35% (w stosunku do błędu odpowiadającego punktowi wyznaczonemu przy założeniu braku zmian temperatury). Należy przy tym wskazać, że uzyskane rozwiązania w dużej mierze zależą do przyjętego obszaru rozwiązań dopuszczalnych. Jego poszerzenie umożliwi wyznaczenie punktów o mniejszej wartości błędu powtarzalności pozycjonowania, lecz najczęściej punkty te nie są wygodne do prowadzenia procesu montażu.



Rys.20. Zmiana położenia optymalnego punktu w przestrzeni gdy wymagana jest dokładność na kierunku osi x [H5]

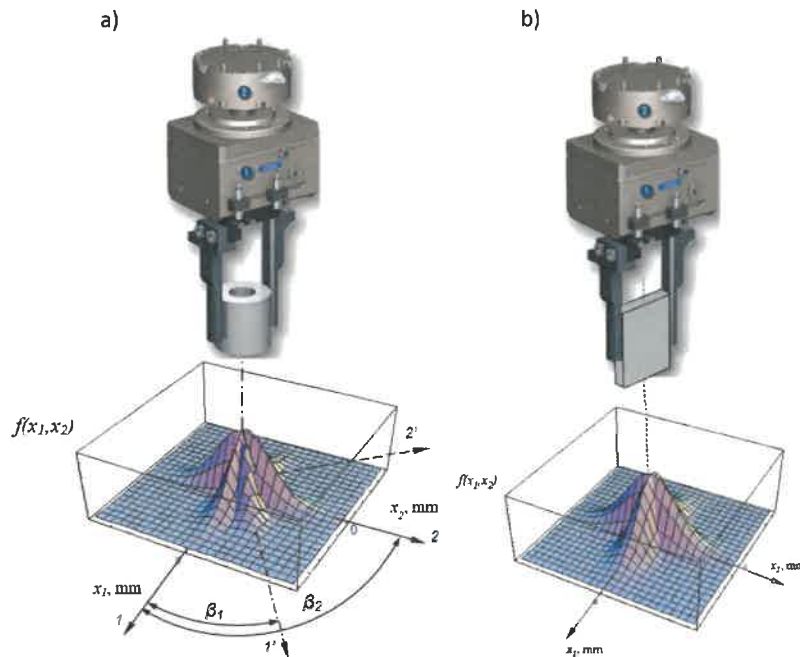
Przedstawione zagadnienie wyznaczania optymalnego miejsca w przestrzeni roboczej stanowiska montażowego zostały szerzej opisane w pracach **H5** oraz **H10**

### ***Wyznaczanie optymalnego kąta obrotu chwytaka, zapewniającego najwyższą zdolność jakościową procesu montażu części o powierzchniach walcowych i płaskich***

Typowe urządzenia wchodzące w skład wyposażenia technologicznego robotów montażowych wnoszą do procesu błędy, których parametry są ściśle określone (np. urządzenie do automatycznej wymiany narzędzi). Wyjątek stanowi jedynie chwytak robota, który może zostać obrócony o dowolny kąt wokół osi orientowanej części ( $\pm 180^\circ$ ). W większości przypadków błąd powtarzalności pozycjonowania chwytaka robota nie podlega kołowemu normalnemu rozkładowi prawdopodobieństwa, gdyż błędy generowane na kierunku ruchu szczęk chwytaka znacznie przewyższają błędy generowane na osi do niej prostopadłej (rys. 21). Otwiera to zatem dodatkową



możliwość zwiększenia prawdopodobieństwa połączenia maszyn, poprzez odpowiednią orientację chwytaka robota montażowego, zapewniającą najlepsze parametry procesu kojarzenia części oraz wymagany poziom montowalności połączeń, bez zbędnego zwiększania dokładności wyposażenia stanowiska.



Rys. 21. Zmiana parametrów zmiennej losowej błędu powtarzalności chwytaka na skutek obrotu kiści robota o kąt  $\beta$ : a) podczas montażu części o powierzchniach cylindrycznych, b) podczas montażu części o powierzchniach płaskich [H1]

W trakcie realizacji procesu montażu, kąt obrotu chwytaka robota przemysłowego  $\beta$  powinien mieć taką wartość, która zapewni najwyższe prawdopodobieństwo połączenia części. W przypadku połączeń o powierzchniach płaskich chwytak może zostać ustawiony w taki sposób, aby jego oś główna (na której chwytak generuje największe błędy) pokrywała się z osią  $x_1$  lub  $x_2$  przyjętego układu współrzędnych (rys. 21 b). Wymaga to rozwiązania całki (39) i wyznaczenia prawdopodobieństwa połączenia części dla obu kierunków ustawienia chwytaka i przyjęcia rozwiązania, gwarantującego największą wartość prawdopodobieństwa (poziom montowalności) a w związku z tym największą zdolności jakościową procesu.

$$P(\beta) = \int_{-0,5l_{x1}}^{0,5l_{x1}} \int_{-0,5l_{x2}}^{0,5l_{x2}} \frac{1}{2\pi\sqrt{|\Sigma_{cp} + \Sigma_c|}} \exp\left[-\frac{1}{2}(\zeta_p - \mu_{cp})^T (\Sigma_{cp} + \Sigma_c)^{-1} (\zeta_p - \mu_{cp})\right] d\zeta_{x1} d\zeta_{x2} \rightarrow \max \quad (39)$$

gdzie:

$\Sigma_{cp}$  – macierz kowariancji wektora błędu względnego przemieszczenia osi części o powierzchniach płaskich,

$\Sigma_c$  – macierz kowariancji wektora błędu powtarzalności pozycjonowania chwytaka,

$l_{x1}, l_{x2}$  – luz połączenia na kierunku osi  $x_1$  i  $x_2$ ,

$T$  – operacja matematyczna transponowania macierzy,

$\mu_{cp}$  – macierz wartości oczekiwanych wektora błędu względnego przemieszczenia osi części o powierzchniach płaskich,

W przypadku części o powierzchniach walcowych wyznaczenie optymalnego kąta obrotu chwytaka wymaga rozwiązania zagadnienia optymalizacji nieliniowej funkcji jednej zmiennej. W rozpatrywanym

przypadku funkcja celu jest wartością prawdopodobieństwa połączenia części czyli prawdopodobieństwem zdarzenia, że zmienna losowa opisująca odległość pomiędzy osiami łączonych części znajdzie się wewnątrz pewnego hipotetycznego cylindra o środku znajdującym się w punkcie nominalnym  $N$  i średnicy odpowiadającej luzowi  $l$  połączenia. Dla przedstawionego zagadnienia funkcja celu przyjmuje postać:

$$P(\beta) = \iint_{\zeta x_1^2 + \zeta x_2^2 \leq (0,5l)^2} \frac{1}{2\pi\sqrt{|\Sigma_\zeta + \Sigma_c|}} \exp\left[-\frac{1}{2}(\zeta - \mu_\zeta)^T (\Sigma_\zeta + \Sigma_c)^{-1} (\zeta - \mu_\zeta)\right] \zeta x_1 d\zeta x_2 \rightarrow \max \quad (40)$$

gdzie:

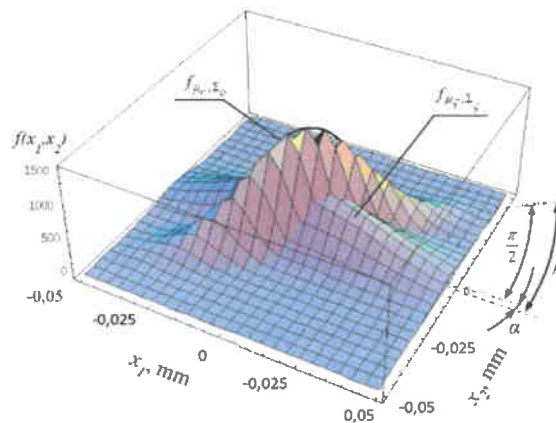
- $\Sigma_\zeta$  – macierz kowariancji wektora błędu względnego przemieszczenia osi kojarzonych elementów,
- $\Sigma_c$  – macierz kowariancji wektora błędu powtarzalności pozycjonowania chwytaka,
- $l$  – luz połączenia,
- $T$  – operacja matematyczna transponowania macierzy,
- $\mu_\zeta$  – macierz wartości oczekiwanych wektora błędu względnego przemieszczenia osi łączonych części.

W wyniku przeprowadzonych analiz wykazałem, że w przypadku, gdy w procesie montażu nie występują błędy systematyczne przedstawiona funkcja celu osiąga maksimum dla wartości kąta  $\beta$  określonej zależnością:

$$\beta = 0,5 \cdot \arctg\left(\frac{2 \operatorname{cov}_\zeta(x_1, x_2)}{\sigma_{\zeta x_1}^2 - \sigma_{\zeta x_2}^2}\right) + \frac{\pi}{2} = \alpha + \frac{\pi}{2} \quad (41)$$

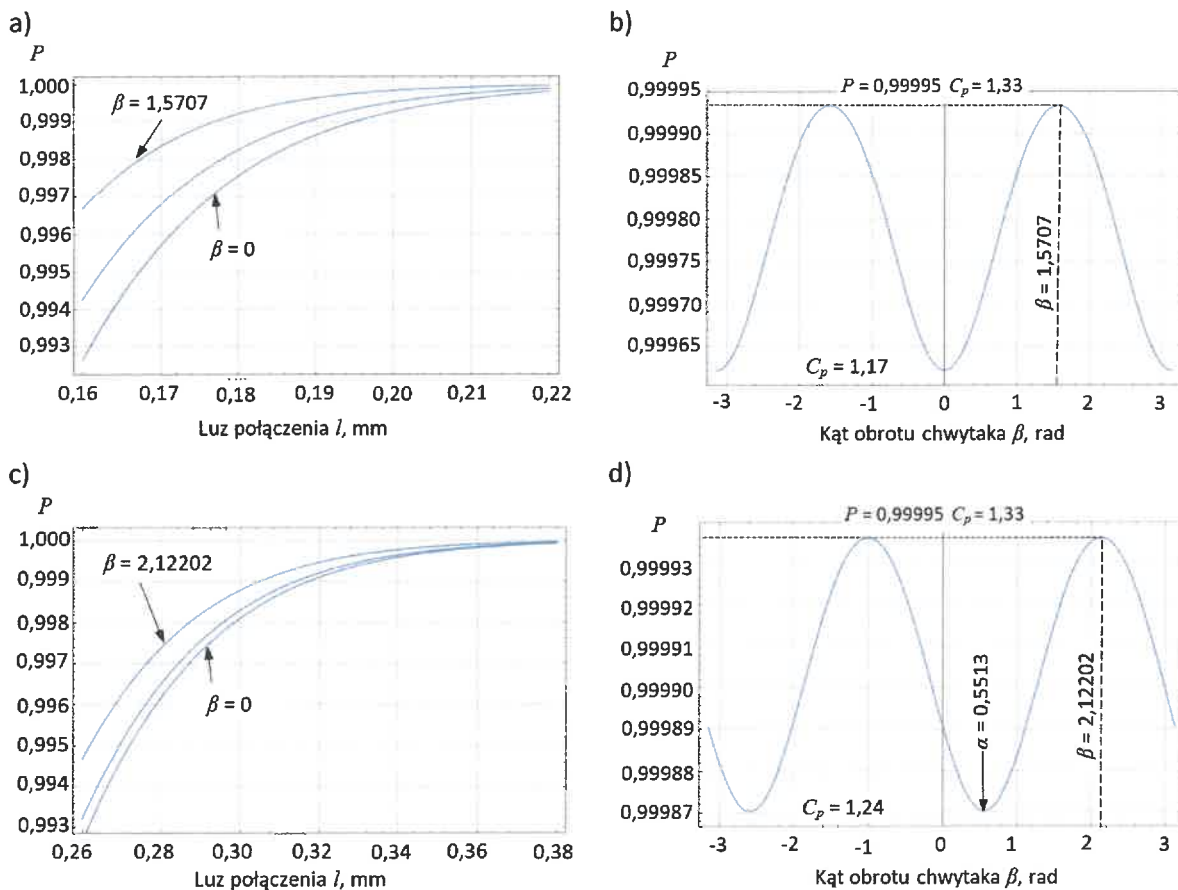
gdzie:  $\sigma_{\zeta x_1}^2, \sigma_{\zeta x_2}^2$  – wariancja składowych  $x_1$  i  $x_2$  wektora błędu względnego przemieszczenia osi części,  $\operatorname{cov}_\zeta(x_1, x_2)$  – kowariancja składowych  $x_1$  i  $x_2$  wektora błędu względnego przemieszczenia osi części.

Pierwszy człon zależności (41) odpowiada kątowi  $\alpha$  odchylenia osi głównych rozkładu zmiennej losowej odległości między osiami  $f_{\mu_\zeta, \Sigma_\zeta}$  (uwzględniającą wszystkie błędy generowane na stanowisku montażowym z wyjątkiem błędu chwytaka robota) od osi układu współrzędnych  $x_1, x_2$  (rys. 22). Zatem niezależnie od przyjętych wartości parametrów zmiennych losowych najlepsze parametry procesu kojarzenia, a zatem najwyższą wartość prawdopodobieństwa można uzyskać orientując chwytak pod kątem  $\pi/2$  rad w stosunku do osi głównych zmiennej losowej błędu odległości między osiami.



Rys. 22. Interpretacja kąta  $\alpha$  odchylenia osi głównych tensora kowariancji zmiennej losowej błędu odległości między osiami oraz optymalnego kąta obrotu chwytaka  $\beta$  [H9]

W ramach prowadzonych badań wykazałem, że poprzez zmianę kąta obrotu chwytaka można zwiększyć prawdopodobieństwo połączenia części, oraz wartość wskaźnika zdolności jakościowej procesu  $C_p$ . Wykazałem, że wzrost wartości wskaźnika uzależniony jest od wartości parametrów zmiennej losowej względnego przemieszczenia części. Przy parametrach:  $\sigma_{\zeta x1} = 0,025$  mm,  $\sigma_{\zeta x2} = 0,015$  mm,  $cov_{\zeta}(x_1, x_2) = 0,00072$  (rys. 23 a,b) obrót chwytaka o kąt  $\beta = 1,5707$  rad umożliwi zwiększenie wskaźnika  $C_p$  z wartości 1,17 do 1,33. Uzyskanie takiej wartości wskaźnika, w przypadku ustawienia chwytaka w skrajnie niekorzystnym położeniu możliwe byłoby jedynie kosztem zwiększenia dokładności wyposażenia stanowiska lub luzu połączenia o 19%. Przy nieznacznie większej wartości błędu względnego przemieszczenia części ( $\sigma_{\zeta x1} = 0,03$  mm,  $\sigma_{\zeta x2} = 0,04$  mm,  $cov_{\zeta}(x_1, x_2) = 0,00072$ ) odpowiednie ustawienie chwytaka umożliwi zwiększenie wskaźnika zdolności z wartości  $C_p = 1,24$  odpowiadającej wadliwości 0,012% do wartości  $C_p = 1,33$  (rys 23. c, d).



Rys. 23. Wpływu kąta obrotu chwytaka  $\beta$  i luzu  $l$  połączenia na prawdopodobieństwo montażu  $P$  części cylindrycznych: a, b) dla parametrów zmiennej losowej względnego przemieszczenia osi części:  $\sigma_{\zeta x1} = 0,025$  mm,  $\sigma_{\zeta x2} = 0,015$  mm c, d) dla parametrów zmiennej losowej względnego przemieszczenia osi części:  $\sigma_{\zeta x1} = 0,03$  mm,  $\sigma_{\zeta x2} = 0,04$  mm,  $cov_{\zeta}(x_1, x_2) = 0,00072$  [H9]

W każdym procesie po pewnym czasie pojawiają się błędy systematyczne, które prowadzą do zakłóceń jego przebiegu. Wykazałem, że znając kierunek na którym mogą pojawić się te błędy, można poprzez odpowiedni obrót chwytaka znacznie zmniejszyć ich wpływ na prawdopodobieństwo połączenia części a zatem zapewnić wymagany poziom montowalności połączeń. W tym jednak przypadku, nie można jednak jednoznacznie wyznaczyć optymalnego kąta obrotu chwytaka z uwagi na fakt, iż błędy powodujące zakłócenia przebiegu procesu mogą występować na różnych kierunkach. Wymaga to rozwiązania przedstawionego zagadnienia optymalizacji (40) indywidualnie dla każdego przypadku.

Z analizy uzyskanych rozwiązań wynika, iż pojawienie się błędów systematycznych w trakcie realizacji procesu zmienia wartość rozwiązania zależności (40). Obrócenie kiści chwytaka o wyznaczoną

wartość kąta prowadzi do nieznacznego zmniejszenia wartości wskaźnika  $C_p$  (6%), jeżeli w procesie nie pojawią się błędy systematyczne. Jednakże takie ustawienie chwytaka zmniejsza wrażliwość systemu na oddziaływanie błędów systematycznych. W rozpatrywanym przypadku pojawienie się tych błędów ( $\mu_{cx1} = 0,02$  mm,  $\mu_{cx2} = 0,04$ mm) wywołało zmniejszenie prawdopodobieństwa połączenia części z wartości 0,999963 do 0,99865, odpowiadającej wartości wskaźników  $C_p = 1,33$  i  $C_{pk} = 1$  (są to graniczne wartości wskaźników uznania zdatności procesu). Obrócenie kiści chwytaka o wartość kąta  $\beta = 1,5707$  rad (rys. 23 b) uzyskaną na podstawie równia (40) (wyznaczonego przy założeniu braku wystąpienia błędów systematycznych) skutkuje zmniejszeniem prawdopodobieństwa połączenia części do wartości 0,9955, dla którego wartości wskaźników zawierają się w przedziałach  $C_p < 1,33$  i  $C_{pk} < 1$ , charakteryzujących procesy niezdolne jakościowo.

Przedstawione zagadnienie wyznaczania optymalnego kąta obrotu chwytaka wraz z wynikami symulacji przedstawiłem w pracach **H9** oraz **H1**.

### **Wyznaczenie i dobór dokładności oprzyrządowania stanowiska montażowego, zapewniającego wymagany poziom montowalności połączeń**

Jednym z ważniejszych zadań podczas projektowania systemu montażowego jest wybór odpowiedniego robota oraz określenie dokładności jego oprzyrządowania [1, 3]. Budowa zrobotyzowanych systemów montażowych w oparciu o komponenty automatyzacji pozwala na łatwe dostosowanie produkcji do zmieniających się wymagań rynkowych. Z modułów budowane są systemy manipulacyjne do obsługi stanowisk montażowych, roboty przemysłowe, całe gniazda i linie produkcyjne. Wykorzystywane do budowy tych systemów elementy (manipulatory, pozycjonery, podajniki, paletyzatory, chwytaki, urządzenia do automatycznej wymiany chwytaków itp.) różnią się od siebie nie tylko wielkością, ale również dokładnością i ceną. Stosowanie zbyt precyzyjnych środków robotyzacji montażu może być wysoce nieekonomiczne, gdyż skutkuje gwałtownym wzrostem kosztów eksploatacji stanowiska. Dlatego opracowanie metodyki wyznaczania optymalnej konfiguracji wyposażenia i modułowego robota montażowego jest jednym z aktualnych zadań współczesnego przemysłu [3]. Wybór modułów i wyposażenia technologicznego stanowiska montażowego względem wymagań uwarunkowanych konkretną operacją montażu ma praktyczne znaczenie ze względu na minimalizację kosztów własnych wytwarzania wyrobu.

Opracowana autorska metoda wyznaczenia dokładności oprzyrządowania robota montażowego polega na poszukiwaniu minimum funkcji celu, zapewniającej w tym przypadku maksymalne zbliżenie prawdopodobieństwa połączenia części (poziomu montowalności) do wartości założonej  $P_z$ :

$$\min f(X) \tag{42}$$

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n] \in Z_R = \{X: v_i(X) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m\} \tag{43}$$

gdzie:

$v_i: R^n \rightarrow R^1$ , dla  $i = 1, \dots, m$  - funkcje ograniczeń

$f$  - funkcja celu. Jest to funkcja  $n$  - zmiennych, przekształcająca  $n$  wymiarową przestrzeń rzeczywistą  $R^n$  w zbiór liczb rzeczywistych  $R^1$ ,

$X$  - jest  $n$  wymiarowym wektorem zmiennych decyzyjnych (parametrów opisujących dokładność oprzyrządowania), czyli  $X \in Z_R$ .

$Z_R$  - jest zbiorem rozwiązań dopuszczalnych (zbiorem możliwych do wygenerowania wartości parametrów).

Funkcja celu zapewnia wygenerowanie takich wartości zmiennych decyzyjnych, które zapewnią wymagane prawdopodobieństwo połączenia części  $P_z$ , bez zbędnego zawyżania dokładność robota. Dla części o powierzchniach walcowych funkcja celu przyjmuje postać:

$$\left| P_z - \iint_{x_1^2 + x_2^2 \leq (0,5l)^2} \frac{1}{2\pi \sqrt{|\Sigma_{i=1}^n \Sigma_i|}} \exp \left[ -\frac{1}{2} (X - \mu_c)^T (\Sigma_c + \Sigma_c)^{-1} (X - \mu_c) \right] dx_1 dx_2 \right| \rightarrow \min \quad (44)$$

gdzie:  $\sum_{i=1}^n |\Sigma_i|$  stanowi sumę macierzy kowariancji zmiennych losowych opisujących błędy oprzyrządowania stanowiska: robota montażowego, urządzenia do automatycznej wymiany chwytaków, chwytaka, urządzenia orientującego część bazową.

Dla części o powierzchniach płaskich funkcja celu ma postać:

$$\left| P_z - \int_{-0,5l_{x_1}}^{0,5l_{x_1}} \int_{-0,5l_{x_2}}^{0,5l_{x_2}} \frac{1}{2\pi \sqrt{|\Sigma_{i=1}^n \Sigma_i|}} \exp \left[ -\frac{1}{2} (X_p - \mu_{c_p})^T (\Sigma_{c_p} + \Sigma_c)^{-1} (X_p - \mu_{c_p}) \right] dx_1 dx_2 \right| \rightarrow \min \quad (45)$$

Wyznaczenie minimum funkcji celu (44) i (45) zapewnia możliwość określenia dokładności urządzeń będących wyposażeniem stanowiska. Dokładność ta jest reprezentowana przez wartości wariancji błędu poszczególnych zmiennych losowych. Jeżeli podczas konfiguracji stanowiska zakłada się wykorzystane konkretnego oprzyrządowania, którego dokładność jest określona tzn. znane są elementy macierzy kowariancji (np. urządzenia do automatycznej wymiany chwytaka) to należy je włączyć do sumy macierzy kowariancji. W trakcie procesu optymalizacji wyznaczona zostanie dokładność pozostałego oprzyrządowania z uwzględnieniem dokładności wykorzystanego urządzenia.

Przedstawione zagadnienie wyznaczania dokładności oprzyrządowania zostało dokładniej opisane w pracy H1

### **Analiza wpływu parametrów zgrzewania na montowalność oraz właściwości struktury połączeń blach ze stopu aluminium EN AW-7075-T6 Alclad zgrzewanych metodą RFSSW**

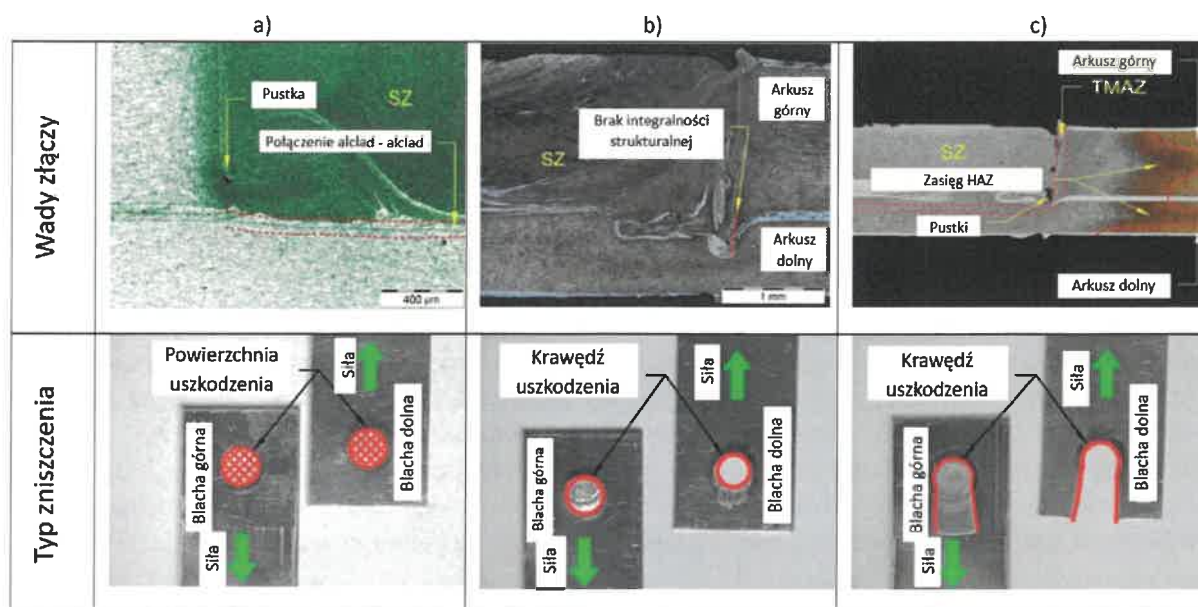
Według Department for Business, Energy and Industrial Strategy (BEIS) transport generuje 26% emisji gazów cieplarnianych w Wielkiej Brytanii. Podobna tendencja występuje w większości krajów rozwiniętych [11]. The International Council on Clean Transportation wykazała, że ograniczenie emisji CO<sub>2</sub> generowanego przez środki transportu do poziomu 95g/km, można osiągnąć poprzez obniżenie ich masy [7, 11]. Stopy Al-Cu-Mg będące podstawą budowy statków powietrznych są trudno spawalne, dlatego w metodach tarciovych upatruje się możliwości ich łączenia [2, 9]. W związku z tym celem prowadzonych przez mnie badań było opracowanie modelu matematycznego wpływu parametrów procesu zgrzewania metodą RFSSW na montowalność (nośność i wariancję nośności) połączeń zakładkowych wykonanych ze stopu aluminium EN AW-7075-T6 Alclad o grubościach 1,6 mm oraz 0,8 mm, wykorzystywanego powszechnie w konstrukcjach lotniczych.

W trakcie prób zgrzewania dokonywałem zmian: prędkości obrotowej narzędzia  $x_1$  (2000; 2400; 2800 obr/min), wartości zagłębienia narzędzia  $x_2$  (1,3; 1,5; 1,7; 1,9mm) oraz czasu zgrzewania  $x_3$  (1,5; 2,5; 3,5).

Na podstawie badań nośności połączeń, w próbie statycznego ścinania przy zastosowaniu przyrządu wymuszającego czysty stan ścinania, wykazałem, że największą nośność połączenia uzyskać można dla maksymalnego zagłębienia narzędzia o wartości 1,5 mm. Wartość ta zwraca uwagę,

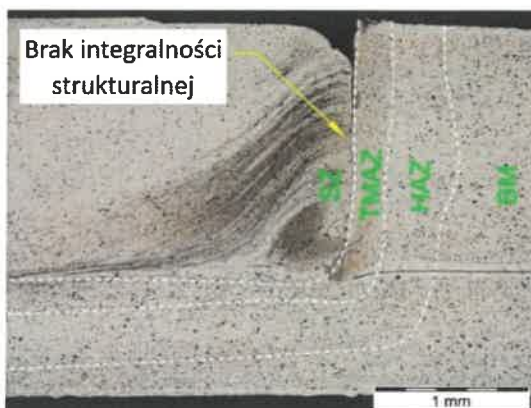
ponieważ w rozważanym pakiecie łączonych blach, górna z nich ma grubość 1,6 mm, a zatem najkorzystniejsze właściwości wytrzymałościowe wykazałem dla wariantu, w którym nie dochodzi do mechanicznej penetracji narzędzia w strukturze obydwu blach, a połączenie wytworzone zostało poprzez przemiany termomechaniczne. Pozostałe parametry, tj. prędkość obrotowa oraz czas zgrzewania determinują wytworzenie odpowiedniej ilości ciepła na skutek tarcia. W wyniku tego montowalność tych połączeń uzależniona jest w dużej mierze od błędów ustawienia parametrów procesu, zwłaszcza zagłębienia narzędzia.

Podczas statycznej próby ścinania złączy zaobserwowałem trzy typy zniszczeń próbek. W przypadku zastosowania prędkości obrotowej 2800 obr/min i czasu zgrzewania w przedziale <1,5; 2,5> zaobserwowałem III typ zniszczenia próbek charakteryzujący się oddzieleniem fragmentów dolnej blachy (rys. 24c)



Rys. 24. Typy zniszczenia próbek wykonywanych metodą RFSSW [H4]

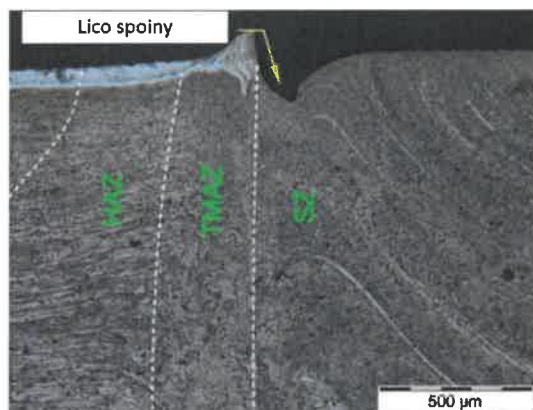
Zgrzeina powstała w wyniku wymieszania materiału podstawowego (BM) zbudowana jest z trzech części (rys. 25): jądra spoiny, karbu strukturalnego będącego skutkiem pracy tulei oraz trzech stref metalurgicznych: strefy mieszania (SZ), strefy ciepło-plastycznej (TMAZ) oraz strefy wpływu ciepła (HAZ). Jądro zgrzeiny ma strukturę drobnoziarnistą o lepszych właściwościach mechanicznych w porównaniu do materiału rodzimego, świadcząca o wystąpieniu procesu rekrytalizacji wywołanej wysoką temperaturą i ciśnieniem. Powierzchnia czoła zgrzeiny charakteryzuje się licznymi nierównościami, będącymi skutkiem nalepiania się uplastycznionego materiału na narzędziu roboczym.



Rys. 25. Spoina wykonana przy parametrach  $x_1=2000\text{obr/min}$ ,  $x_2=1,50\text{mm}$  i  $x_3=1,5\text{s}$  [H4]

Drugi typ zniszczeń zaobserwowałem w przypadku niskich prędkości obrotowych narzędzia ( $x_1 = 2000\text{obr/min}$ ), krótkich czasów wykonania zgrzeiny (1,5s), oraz większym zagłębieniu narzędzia (1,7mm, 1,9mm). Zmniejszenie zagłębienia narzędzia (1,3mm) prowadziło do I typu zniszczenia blach charakteryzującego się płaszczyną zniszczenia odpowiadającą przekrojowi złącza (rys. 24a). W obu przypadkach złącza wykonane przy podanych parametrach charakteryzowały się najniższą nośnością spowodowaną istnieniem karbu strukturalnego na obwodzie zgrzeiny. Obecność wyraźnego karbu strukturalnego świadczy o zbyt szybkim zagłębieniu się tulei w materiał, która zamiast uplastycznienia materiału powoduje jego częściowe wykrawanie, natomiast temperatura powstająca w dalszej części procesu prowadząca do procesu rekrytalizacji powoduje jedynie częściową odbudowę materiału. Pozostający w ten sposób carb obniża nośność połączeń.

Lico zgrzeiny RFSSW charakteryzuje się dużą chropowatością wynikającą z pracy narzędzia, którego powierzchnia jest niejednorodna na skutek adhezji uplastycznionego materiału (ryc. 26). Strefa wpływu ciepła rozciąga się od karbu strukturalnego w kierunku materiału blachy. Szerokość tej strefy zależy od czasu trwania procesu zgrzewania. Jego wydłużenie prowadzi do wzrostu temperatury wewnątrz spoiny i rozchodzenia się ciepła w każdym kierunku. Świadczy o tym powiększona strefa wpływu ciepła na krawędziach spoiny oraz pełniejsza odbudowa materiału w obszarze przetopu tulei. Dyfuzja ciepła zachodzi również w obszarze spodu zgrzeiny, prowadząc do złączenia blach.



Rys. 26. Spoina wykonana przy parametrach  $x_1=2800\text{obr/min}$ ,  $x_2=1,50\text{mm}$  i  $x_3=1,5\text{s}$  [H4]

W konstrukcjach lotniczych równie ważnym parametrem obok siły, decydującym o jakości połączenia jest odchylenie standardowe uzyskiwanych wyników. Mniejsza wartość odchylenia związana jest z większą powtarzalnością procesu, która znajduje swoje odzwierciedlenie w niezawodności pracy konstrukcji.

W wyniku prowadzonych badań wykazałem, że wzrost prędkości obrotowej narzędzia powoduje również wzrost temperatury w obrębie złącza prowadząc do lepszego uplastycznienia materiału i wzrostu wytrzymałości połączenia. Jednocześnie zauważyłem zwiększenie podatności narzędzia do zabrudzenia. W trakcie prób ze zwiększonymi prędkościami obrotowymi uplastyczniony materiał nalepiał się na elementy robocze narzędzia powodując konieczność jego częstego czyszczenia, zwiększając pracochłonność procesu. Nalepiony materiał utrudniał również uzyskanie założonej głębokości pracy narzędzia, w wyniku czego uzyskiwano znacznie większy rozrzut wyników badań niż, w przypadku złączy wykonywanych przy niższej prędkości obrotowej.

Na podstawie wyników badań opracowałem i zweryfikowałem statystycznie, na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  model opisujący wpływ parametrów procesu zgrzewania na nośność  $F(X)$  i odchylenie standardowe rozrzutu procesu wykonywania złączy  $\sigma_F(X)$ :

$$F(X) = 10878,1 - 18,751x_1 - 0,0054x_1^2 + 2,34 \cdot 10^{-6}x_1^3 + 9753,3x_2 + 28,62x_1x_2 - 0,004x_1^2x_2 - 14944,4x_2^2 - 2,87x_1x_2^2 + 1921x_2^3 - 4329,6x_3 + 8,87x_1x_3 - 0,0019x_1^2x_3 - 3808,3x_2x_3 + 1187,5x_2^2x_3 - 1153,15x_3^2 + 164,087x_3^3 \quad (46)$$

$$\sigma_F(X) = -8585,36 - 1,0813x_1 + 0,0000838x_1^2 + 6,304 \cdot 10^{-8}x_1^3 + 18367,7x_2 + 0,1364x_1x_2 - 10739,6x_2^2 + 2094,91x_2^3 - 63,958x_3 + 0,0164x_3 + 9,791x_3^2 \quad (47)$$

Przedstawione zagadnienia wpływu parametrów procesu zgrzewania na montowalność połączeń i budowę zgrzeiny zostały szerzej opisane w pracach H4 oraz H8

### **Modelowanie wpływu błędów systemu montażowego na nośność połączeń zgrzewanych metodą RFSSW i dobór parametrów optymalnych z uwzględnieniem błędu ustawienia narzędzia**

Zapewnienie wymaganego poziomu montowalności połączeń gwarantującego nie tylko dużą nośność połączeń, lecz również wysoką stabilność procesu, charakteryzującego się możliwie najniższą wartością wariancji uzyskiwanych wyników wymaga przeprowadzenia optymalizacji wielokryterialnej procesu i znalezienia rozwiązania kompromisowego spełniającego przedstawione warunki.

Dla zapisania problemu wielokryterialnego przyjąłem oznaczenia:

- $D \subset R^m$  – zbiór rozwiązań dopuszczalnych – zakres parametrów ustawczych procesu,
  - $z = (z_1, z_2, \dots, z_m) \in D$  – rozwiązanie dopuszczalne,
  - $f_i : D \rightarrow R$  –  $i$ -ta funkcja celu ( $i = 1, 2, \dots, k$ ),
  - $\phi(z) = (f_1(z), f_2(z))$  – funkcja celu zagadnienia wielokryterialnego.
- Zagadnienie optymalizacji wielokryterialnej doboru parametrów procesu można zapisać w postaci:

$$\begin{cases} f_1(z) = W_F(x) \rightarrow \max, \\ f_2(z) = W_\sigma(x) \rightarrow \min, \\ z \in D \end{cases} \quad (48)$$

Zagadnienie jednokryterialne

$$f_i(z) \rightarrow \text{ekstremum}, z \in D \quad (49)$$

jest  $i$ -tym zagadnieniem cząstkowym, natomiast wektor  $z^{io} \in D$ , w którym  $i$ -ta funkcja celu osiąga poszukiwane ekstremum –  $i$ -tym rozwiązaniem cząstkowym.

Najczęściej rozwiązanie idealne zagadnienia (48) nie jest osiągalne, co oznacza, że w zbiorze rozwiązań dopuszczalnych  $D$  nie istnieje wektor  $z^o$ , dla którego wszystkie funkcje celu osiągają poszukiwane ekstremum. Dlatego przy rozwiązaniu przedstawionego zagadnienia poszukiwałem rozwiązań efektywnych. Celem opracowanej przeze mnie metodyki było wybranie ze zbioru rozwiązań efektywnych jednego rozwiązania, zwanego rozwiązaniem kompromisowym. Do rozwiązania przedstawionego zagadnienia wykorzystałem programowanie celowe. W programowaniu celowym głównymi parametrami sterującymi są poziomy aspiracji traktowane jako cele do osiągnięcia (nośność i odchylenie standardowe nośności) dla poszczególnych funkcji oceny. Dla każdej funkcji oceny  $f_i(z)$  założyłem poziom aspiracji  $a_i$ . Dla każdego rozwiązania dopuszczalnego  $z \in D$  określone są wówczas odchylenia w dół i w górę wartości funkcji oceny od poziomów aspiracji, odpowiednio jako:

$$d_i^- = (a_i - f(z_i)) \quad (50)$$

$$d_i^+ = (f(z_i) - a_i) \quad (51)$$

Za rozwiązanie optymalne dla przedstawionego problemu uznaje się rozwiązanie dopuszczalne minimalizujące odchylenia od poziomów aspiracji. Jako funkcję osiągnięcia przyjąłem ważoną sumę odchylen:

$$g(d^-, d^+) = \sum_{i=1}^m (u_i d_i^- + u_i d_i^+) \quad (52)$$



gdzie  $u_i$  są nieujemnymi wagami odpowiadającymi poszczególnym odchyleniom.

Odchylenia wprowadziłem do modelu programowania celowego za pomocą dodatkowego układu równań celowych:

$$\begin{aligned} f(z_i) + d_i^- + d_i^+ &= a_i \\ d_i^- &\geq 0, \quad d_i^+ \geq 0 \\ d_i^- \cdot d_i^+ &= 0 \end{aligned} \tag{53}$$

gdzie  $d_i^-, d_i^+$  są nieujemnymi zmiennymi stanu wyrażającymi odpowiednio odchylenie w dół i w górę aktualnej wartości  $i$ -tej funkcji oceny od odpowiedniego poziomu aspiracji  $a_i$ . Do znalezienia rozwiązania kompromisowego zastosowałem metodę ważenia ocen zmiennych celowych. Zagadnienie przyjmie więc postać:

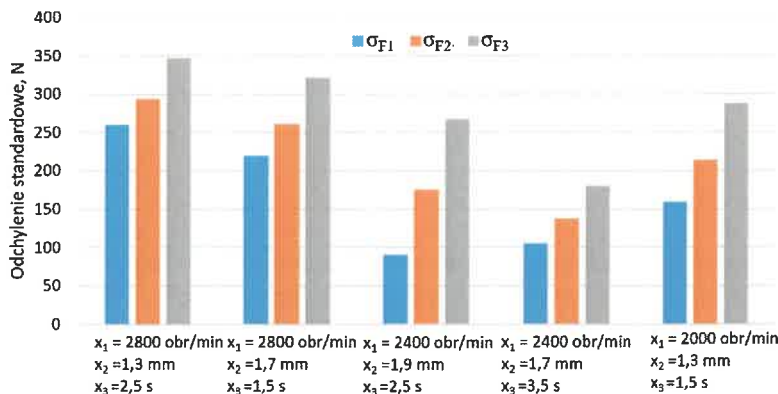
$$\begin{cases} u_1 \cdot (d_1^+ + d_1^-) + u_2 \cdot (d_2^+ + d_2^-) \rightarrow \min \\ W_F(x) + d_1^+ - d_1^- = a_1 \\ W_\sigma(x) + d_2^+ - d_2^- = a_2 \\ 2000 \leq x_1 \leq 2800 \\ 1.3 \leq x_2 \leq 1.9 \\ 1.5 \leq x_3 \leq 3.5 \\ d_1^+ \cdot d_1^- = 0 \\ d_2^+ \cdot d_2^- = 0 \\ x_1, x_2, x_3 \geq 0 \\ d_1^+, d_1^-, d_2^+, d_2^- \geq 0. \end{cases} \tag{54}$$

Opracowana przeze mnie metoda umożliwia wyznaczenie parametrów ustawczych procesu zgrzewania zapewniających wymagany poziom montowalności połączeń tzn. spełniających wymagania narzucone przez konstruktora i zarazem zapewniających wymaganą zdolność jakościową procesu.

Postać rozwiązania (54) zależy od przyjętej wartości wag  $u_i$ , oraz przyjętych poziomów aspiracji  $a_i$ . W trakcie obliczeń założyłem, że nośność połączenia jest ważniejsza od wariancji procesu ( $u_1 = 0,6, u_2 = 0,4$ ). W pierwszym etapie obliczeń przyjąłem poziom aspiracji dotyczący nośności połączenia wynoszący  $a_1 = 7300\text{N}$  oraz wariancji procesu  $a_2 = 100\text{N}$ . Uzyskałem rozwiązanie nieznacznie odbiegające od wymaganych poziomów, zapewniające uzyskanie nośności połączenia na poziomie  $7299\text{N}$  przy odchyleniu standardowym  $112,31\text{N}$ . Zmniejszenie poziomu aspiracji dotyczącego nośności połączenia do wartości  $7200\text{N}$  zapewni rozwiązanie ( $x_1 = 2182 \text{ obr/min}, x_2 = 1,7 \text{ mm}, x_3 = 3,5 \text{ s}$ ) znacznie bardziej zbliżone do wymagań. W rozpatrywanym przypadku nośność połączenia odbiegała od założonej o  $0,0027\text{N}$ , natomiast odchylenie standardowe o  $0,149\text{N}$ .

W trakcie normalnej eksploatacji stanowiska do zgrzewania punktowego, wraz ze wzrostem liczby wykonanych zgrzein zwiększa się podatność narzędzia do zabrudzeń. Uplastyczniony materiał nalepia się na elementy robocze narzędzia, pogarszając warunki pracy ruchomych elementów. Nalepiony materiał utrudnia uzyskanie założonej głębokości pracy a powierzchnia czoła zgrzeiny zawiera coraz więcej nierówności. W celu sprawdzenia, czy zaistniała sytuacja wpływa na nośność połączenia wykonałem złącza z parametrami procesu przyjętymi podczas pierwszego etapu badań o liczności próbki  $n = 10$ . Badania przeprowadziłem po wykonaniu 200 i 400 kolejnych zgrzein. Następnie przeprowadziłem badania nośności połączeń w próbie statycznego ścinania. Na podstawie uzyskanych wyników w wyniku uśrednienia wyznaczyłem nośność połączeń oraz odchylenie standardowe rozrzutu wyników (rys. 27). Uzyskane wyniki badań poddałem weryfikacji statystycznej, które wykazały że wzrost liczby wykonanych złączy nie wpływa w istotny sposób na nośność połączenia, lecz prowadzi do

zwiększenia wariacji rozrzutu nośności, obniżając w ten sposób poziom montowalności systemu montażowego.

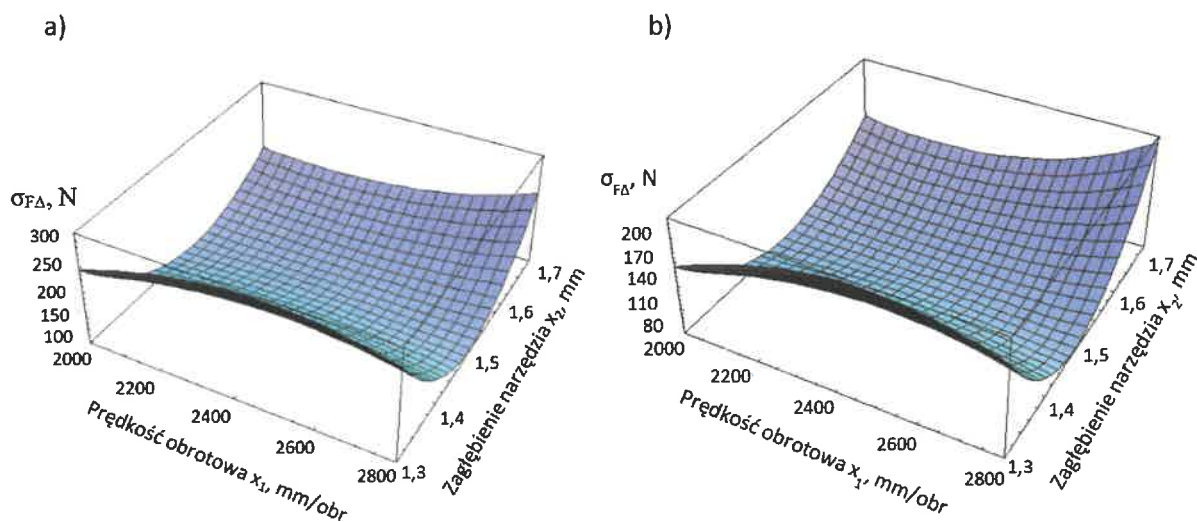


Rys. 27. Odchylenie standardowe nośności połączeń uzyskane po wykonaniu 200 ( $\sigma_{F2}$ ) oraz 400 ( $\sigma_{F3}$ ) kolejnych zgrzein [H1]

W wyniku przeprowadzonych badań wykazałem, że wraz ze wzrostem ilości wykonywanych złączy błąd ustawienia prędkości obrotowej i czasu nie ulga istotnym zmianom i nie wpływa w znaczący sposób na nośność uzyskiwanych połączeń. Wyjątek w tym względzie stanowi parametr opisujący zagłębienie narzędzia. Jego wzrost skutkuje wzrostem całkowitego odchylenia standardowego nośności połączenia i może przyczynić się do obniżenia zdolności jakościowej procesu. Wykazałem, że wartość odchylenia standardowego nośności połączeń spowodowanego błędem zagłębienia narzędzia  $\sigma_{F\Delta}$  można przedstawić za pomocą zależności:

$$\sigma_{F\Delta} = [(9753,29 + 28,626x_1 - 0,004263x_1^2 - 29888,9x_2 - 5,75521x_1x_2 + 5763,89x_2^2 - 3808,33x_3 + 2375x_2x_3) \sigma_{x_2}^2]^{0,5} \quad (55)$$

Niezależnie od przyjętej prędkości obrotowej narzędzia, odchylenie standardowe nośności osiąga największą wartość przy głębokości  $x_2 = 1,3$ mm, następnie w miarę wzrostu zagłębienia narzędzia ulega zmniejszeniu osiągając wartość minimalną przy  $x_2 = 1,5$ mm a następnie gwałtownie wzrasta (rys 28).



Rys. 28. Wpływ parametrów procesu zgrzewania na wartość odchylenia standardowego nośności połączenia  $\sigma_{F\Delta}$ , a) dla czasu zgrzewania  $x_3 = 1,5$  s, b) dla czasu zgrzewania  $x_3 = 3,5$ s [H1]

W celu zapewnienia wymaganej montowalności połączeń konieczne jest zatem włączenie do procesu optymalizacji dodatkowego kryterium wynikającego z błędu zagłębienia narzędzia i wyznaczenie parametrów optymalnych. Dobór ten musi gwarantować nie tylko dużą nośność połączeń, lecz również wysoką stabilność procesu, charakteryzującego się możliwie najniższą wartością odchylenia standardowego uzyskiwanych wyników.

Zagadnienie optymalizacji wielokryterialnej doboru parametrów procesu można zapisać w postaci,

$$\begin{cases} f_1(z) = F(X) \rightarrow \max, \\ f_2(z) = \sigma_F(X) \rightarrow \min, \\ f_3(z) = \sigma_{F\Delta}(X) \rightarrow \min \\ z \in D \end{cases} \quad (56)$$

Zagadnienie jednokryterialne

$$f_i(z) \rightarrow \text{ekstremum}, z \in D \quad (57)$$

jest  $i$ -tym zagadnieniem cząstkowym, natomiast wektor  $z^{i0} \in D$ , w którym  $i$ -ta funkcja celu osiąga poszukiwane ekstremum –  $i$ -tym rozwiązaniem cząstkowym. Wektor:

$$\varphi^o = (f_1(z^{10}), f_2(z^{20}), f_3(z^{30})) \quad (58)$$

to wektor zwany rozwiązaniem idealnym (utopijnym) w przestrzeni ocen, natomiast:

$$z^o = (z^{10}, z^{20}, z^{30}) \quad (59)$$

rozwiązaniem idealnym zagadnienia (58).

Zbiór rozwiązań efektywnych najczęściej zawiera wiele rozwiązań. Dlatego celem przedstawionego zagadnienia było wybranie ze zbioru rozwiązań efektywnych jednego rozwiązania, zwanego rozwiązaniem kompromisowym (kompromisowo-optymalnym). W tym celu sprowadziłem zagadnienie do postaci jednokryterialnej, z funkcją skalaryzującą  $s: R^k \rightarrow R$  w postaci:

$$\max(s(f_1(z), f_2(z), f_3(z)): z \in D) \quad (60)$$

Skalaryzację zagadnienia przeprowadziłem z wykorzystaniem metody ważenia ocen. Przyjąłem wartości wag  $u_i > 0$  poszczególnych kryteriów  $f_i$  (spełniające warunek  $u_1 + u_2 + u_3 = 1$ ), a następnie wyznaczyłem rozwiązanie optymalne zagadnienia (61).

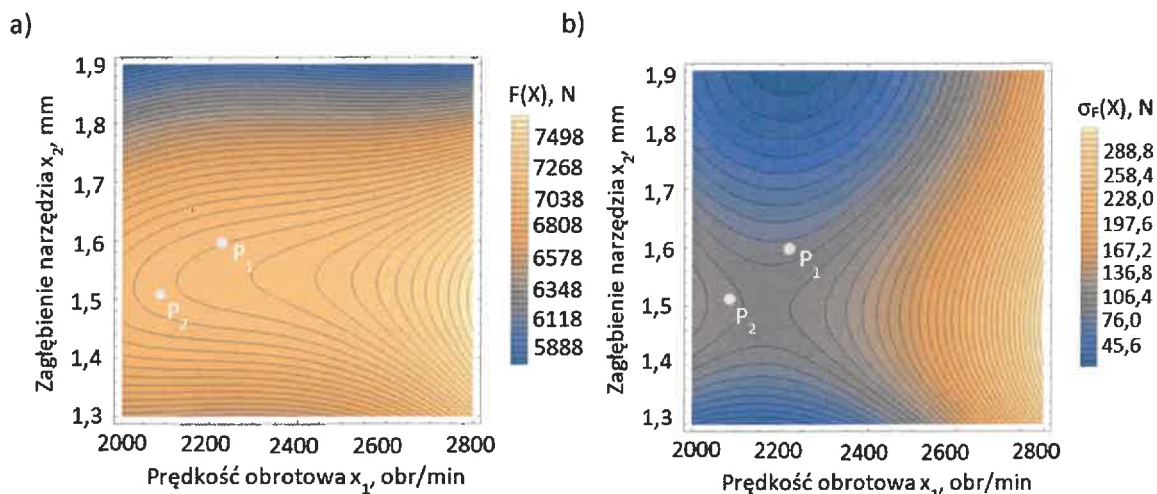
$$\max(\sum_{i=1}^k u_i f_i(z) : z \in D) \quad (61)$$

Utworzenie funkcji  $\varphi(z) = \sum_{i=1}^k u_i f_i(z)$  jest możliwe tylko wtedy, gdy wszystkie funkcje celu wyrażone są w takich samych jednostkach i skalach wartości. Ponieważ w rozpatrywanym przypadku funkcje celu wyrażone były w różnych skalach wartości, przeprowadziłem ich transformację do postaci bezwymiarowej w postaci:

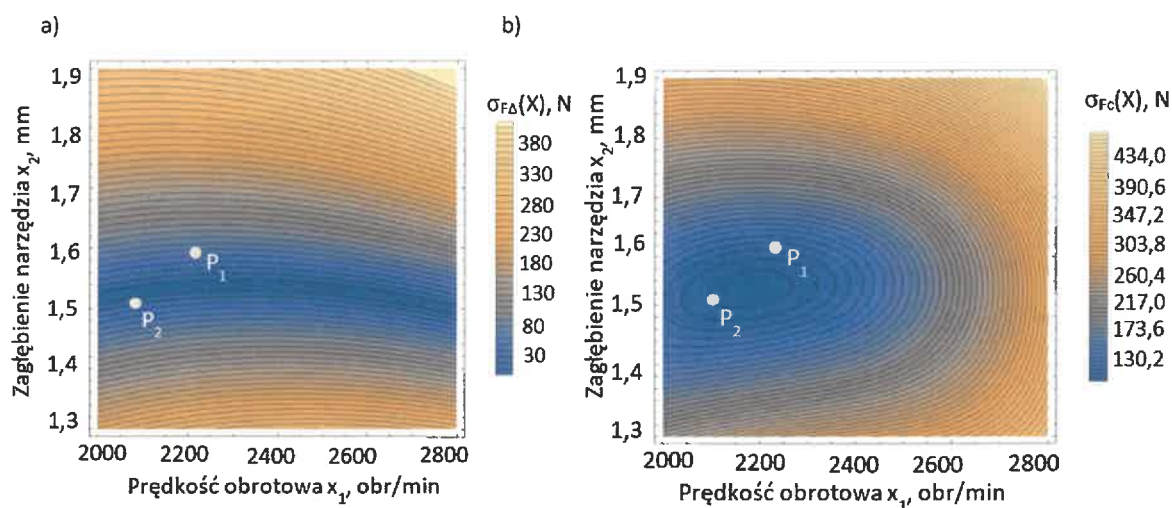
$$f_i^u(z) = \frac{f_k(z) - \min(f_k(x): x \in D)}{\max(f_k(x): x \in D) - \min(f_k(x): x \in D)} \quad (62)$$

Tak zdefiniowane funkcje celu  $f_i^u$  przyjmują dla  $z \in D$  wartości z przedziału  $[0, 1]$  i są bezwymiarowe.

Rozwiązanie optymalne zagadnienia (62) jest rozwiązaniem efektywnym zagadnienia wielokryterialnego. Postać rozwiązania zależy od przyjętej wartości wag  $u_i$ . W przypadku przyjęcia jednakowych wartości wag ( $u_i = 0,5$ ), bez uwzględnienia funkcji opisującej odchylenie standardowe nośności połączenia wynikającego z błędu ustawienia głębokości narzędzia, funkcja osiąga maksimum dla prędkości obrotowej  $x_1 = 2229$  obr/min., zagłębienia narzędzia  $x_2 = 1,60$  mm oraz czasu zgrzewania  $x_3 = 2,02$  s. Odpowiada to nośności połączenia 7071,5 N (punkt  $P_1$ , rys. 29a) i odchyleniu standardowemu rozrzutu wyników wynoszącemu 86,22 N (rys. 29 b). Wykonywanie zgrzein w dłuższym czasie prowadzi do zanieczyszczenia narzędzia, w wyniku którego, przy tych parametrach należy spodziewać się w konsekwencji rozrzutu uzyskiwanych wyników na poziomie 139,6 N, tzn. większym od wyznaczonego o 61,91%. Uwzględnienie w procesie optymalizacji odchylenia standardowego nośności połączenia spowodowanego błędem ustawienia narzędzia, będącego przy aktualnym rozwoju technologii zgrzewania RFSSW nieodzownym czynnikiem procesu, umożliwia wygenerowanie innego rozwiązania zagadnienia (punkt  $P_2$ ). W tym przypadku funkcja celu osiąga maksimum dla prędkości obrotowej  $x_1 = 2100$  obr/min., zagłębienia narzędzia  $x_2 = 1,51$  mm oraz czasu zgrzewania  $x_3 = 2,02$  s. Przeprowadzenie procesu z tak wyznaczonymi parametrami umożliwia uzyskanie średniej wartości nośności połączenia 7117 N. Na początkowym etapie zgrzewania należy się spodziewać w tym przypadku rozrzutu procesu na poziomie 96,4 N (rys. 29 a), a więc większym od wartości uzyskanej w rozwiązaniu pierwszym ( $P_1$ ) o 11,8%. Wzrost odchylenia standardowego spowodowanego błędami ustawienia narzędzia do wartości 0,049 mm powoduje wzrost odchylenia nośności połączenia do wartości 96,7 N (rys. 30 b), a więc jedynie o 0,31%. Zastosowanie parametrów zgrzewania procesu z rozwiązania pierwszego wiązałoby się w tym przypadku ze wzrostem wartości odchylenia rozrzutu o 61,9% prowadząc do zmniejszenia poziomu montowalności połączeń. Uwzględnienie dodatkowej zmiennej w procesie wyznaczania optymalnych parametrów procesu daje zatem możliwość doboru parametrów zapewniających wymaganą nośność połączenia, przy możliwie najmniejszym rozrzucie uzyskiwanych wyników, ale jednocześnie najmniej wrażliwych na błąd ustawienia narzędzia.



Rys. 29. Wpływ prędkości obrotowej i zagłębienia narzędzia, przy czasie zgrzewania  $x_3 = 2,02$  s na a) nośność połączenia  $F(X)$ , b) odchylenie standardowe rozrzutu procesu  $\sigma_F(X)$  [H1]



Rys. 30. Wpływ prędkości obrotowej i zagłębienia narzędzia, przy czasie zgrzewania  $x_3 = 2,02s$  na a) odchylenie standardowe nośności połączenia  $\sigma_{Fd}(X)$  b) całkowite odchylenie standardowe nośności połączenia  $\sigma_{Fc}(X)$  [H1]

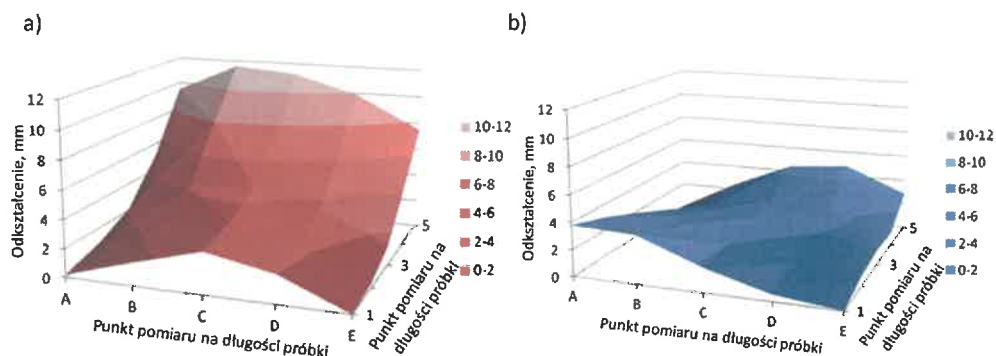
Przedstawione zagadnienia modelowania wpływu parametrów zgrzewania na montowalność połączeń zgrzewanych metodą RFSSW i doboru parametrów optymalnych zostały opisane w pracach H1, H3 oraz H4

### ***Analiza wpływu parametrów zgrzewania na montowalność połączeń (nośność i zdolność jakościową procesu) ze stopu aluminium 2024-T3 zgrzewanych metodą FSW***

Zgrzewanie tarciove z przemieszaniem FSW (ang. Friction Stir Welding) jest jedną z najnowocześniejszych metod łączenia metali i ich stopów w stanie stałym (w temperaturach niższych od temperatury topnienia łączonego materiału). Jest szczególnie przydatna do łączenia materiałów, które w rozumieniu tradycyjnych technologii są trudno spawalne, jak na przykład stale i wysoko wytrzymałe stopy aluminium, miedzi i tytanu, a także niektóre stopy niklu, cyrkonu i miedzi. Obecnie trwają intensywne badania nad wdrożeniem tej technologii w przemyśle lotniczym ze względu na możliwość zapewnienia złączy o wysokiej nośności przy jednoczesnej szczelności połączeń, czego nie zapewniają tradycyjne połączenia nitowane.

Przedmiotem prowadzonych przeze mnie badań było zapewnienie poziomu montowalności połączeń zakładkowych i doczołowych wykonanych ze stopu aluminium 2024-T3. Badania procesu doczołowego zgrzewania blach przeprowadziłem na uniwersalnej frezarce pionowej. Ponieważ w przemyśle lotniczym szczególnie ważne jest opracowanie technologii zmniejszającej odkształcenia występujące podczas zgrzewania blach cienkościennych, przy zachowaniu dużej wytrzymałości złącza, do badań zaprojektowano i wykonano uchwyt z płytą umożliwiającą wstępne podgrzanie łączonych blach. Badania przeprowadziłem z wykorzystaniem planu statycznego trójpoziomowego kompletnego, na podstawie którego opracowałem adekwatny model matematyczny. W ramach prowadzonych badań wykazałem, że najwyższą nośność połączenia (wynoszącą 84,38% siły potrzebnej do zniszczenia próbki z materiału rodzimego) można uzyskać dla prędkości obrotowej narzędzia 1200 obr/min i prędkości posuwu 60 mm/min. Dla parametrów procesu zapewniających uzyskanie najwyższej nośności połączenia przeprowadziłem dodatkowe badania ze wstępnym podgrzaniem blach (rys. 31).

Badania wykazały, że podgrzewanie wstępne blach cienkościennych zgrzewanych tarciove z przemieszaniem prowadzi do obniżenia wielkości powstałych odkształceń. W przypadku przeprowadzonych badań wstępne podgrzanie blach umożliwiło zmniejszenie ich odkształcenia o 57,62%.



Rys. 31. Wykres odkształceń blach powstałych podczas procesu FSW: a) bez podgrzewania, b) z podgrzaniem do temperatury 200°C [H7]

Badania procesu zgrzewania blach zakładkowych przeprowadziłem na 3 osiowej frezarce HAAS TM1P. Do procesu zgrzewania wykorzystałem narzędzie 10-K-4-Z-F-B firmy Einsal o średnicy kołnierza 10mm i średnicy trzpienia 3 mm. Badania zgrzewania przeprowadziłem z wykorzystaniem planu statycznego trójpoziomowego kompletnego PS/DK 3<sup>3</sup>, przy zmianie zagłębienia narzędzia  $x_1$  ( 1,1mm, 1,5mm, 1,9mm), prędkości posuwu  $x_2$  (200mm/min, 300mm/min, 400mm/min) oraz prędkości obrotowej narzędzia  $x_3$  (800 obr/min, 1200 obr/min, 1600 obr/min).

Na podstawie przeprowadzonych badań opracowałem adekwatny model matematyczny (na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ ) w postaci funkcji regresji opisującej wpływ parametrów ustawczych procesu na nośność połączenia oraz odchylenie standardowe nośności połączenia w postaci:

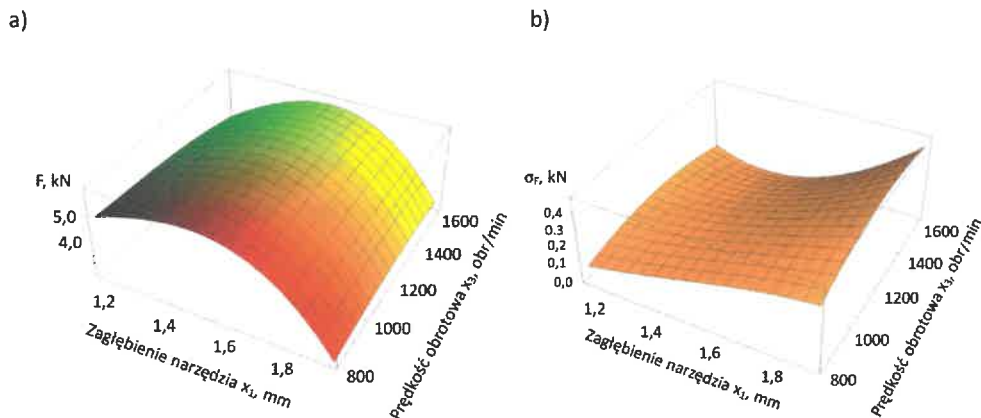
$$W_F(x) = b_0 + b_1^{(1)}x_1 + b_2^{(1)}x_2 + b_3^{(1)}x_3 + b_{12}^{(1)}x_1x_2 + b_{13}^{(1)}x_1x_3 + b_{23}^{(1)}x_2x_3 + b_{12}^{(2)}x_1^2x_2 + b_{21}^{(2)}x_2^2x_1 + b_{13}^{(2)}x_1^2x_3 + b_{23}^{(2)}x_2^2x_3 + b_{11}^{(2)}x_1^2 + b_{22}^{(2)}x_2^2 + b_{33}^{(2)}x_3^2 + b_{111}^{(3)}x_1^3 + b_{222}^{(3)}x_2^3 + b_{333}^{(3)}x_3^3 \quad (63)$$

Wartości współczynników dla funkcji regresji opisujących nośność połączenia  $F(x)$  i odchylenie standardowe procesu  $\sigma_F(x)$  podano w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości współczynników równań regresji  $F(x)$  i  $\sigma_F(x)$

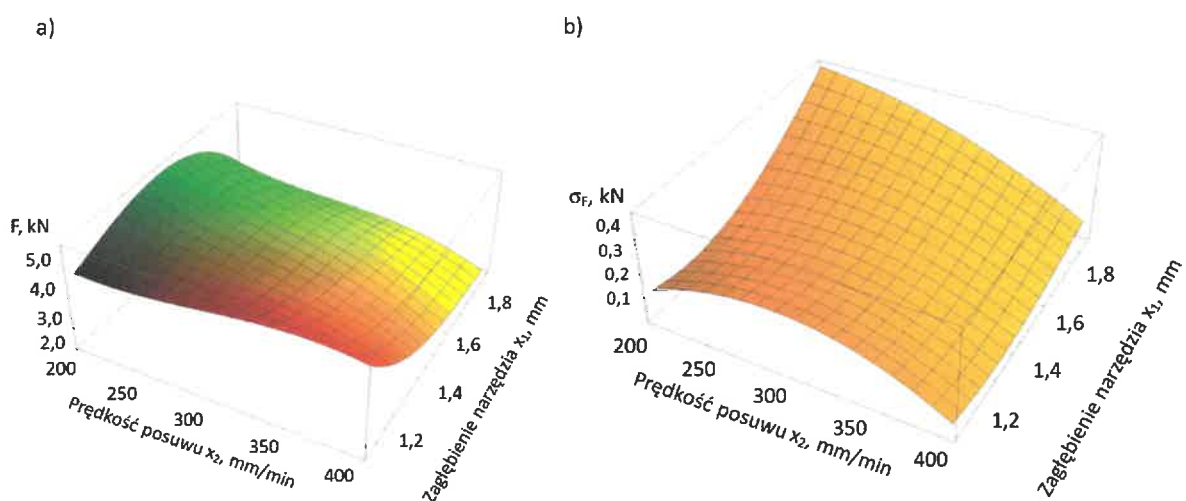
Współczynnik	$F(x)$	$\sigma_F(x)$
$b_0$	-17,4188	-2,41201
$b_1^{(1)}$	21,4528	1,62391
$b_2^{(1)}$	0,12861	-0,00248
$b_3^{(1)}$	-0,00091	0,004926
$b_{12}^{(1)}$	-0,24367	-0,001336
$b_{13}^{(1)}$	0,00720	-0,004807
$b_{23}^{(1)}$	-0,000049	$3,5818 \cdot 10^{-6}$
$b_{12}^{(2)}$	0,08203	-0,00211
$b_{21}^{(2)}$	-0,000023	$9,964 \cdot 10^{-6}$
$b_{13}^{(2)}$	0,00197	0,001643
$b_{23}^{(2)}$	-	$-3,006 \cdot 10^{-8}$
$b_{32}^{(2)}$	-	$6,0817 \cdot 10^{-9}$
$b_{11}^{(2)}$	8,3457	0,84206
$b_{22}^{(2)}$	0,000278	0,000013
$b_{33}^{(2)}$	$1,51 \cdot 10^{-6}$	$-1,688 \cdot 10^{-6}$
$b_{111}^{(3)}$	-7,1218	-0,40246
$b_{222}^{(3)}$	$-4,34 \cdot 10^{-7}$	-
$b_{333}^{(3)}$	-	-

W przypadku funkcji regresji opisującej nośność połączenia błąd średniokwadratowy między wynikami uzyskanymi w wyniku badań i modelowania matematycznego wyniósł 4,05%. Funkcja ta osiąga wartość maksymalną 5,71kN przy zagłębieniu narzędzia  $x_1 = 1,48\text{mm}$ , prędkości posuwu  $x_2 = 200\text{mm/min}$  i prędkości obrotowej narzędzia  $x_3 = 1303\text{obr/min}$  (rys. 32)



Rys. 32. Funkcja regresji dla prędkości posuwu  $x_1=200\text{mm/min}$  a) nośności połączenia, b) odchylenia standardowego [H2]

Na podstawie badań wykazałem, że przy prędkości obrotowej  $x_3 = 1303\text{obr/min}$  nośność połączenia ulega zmniejszeniu wraz ze wzrostem prędkości posuwu (rys. 33). Spadkowi ulega również wartość odchylenia standardowego. Przy prędkości posuwu  $x_2 = 200$  obr/min występuje lokalne maksimum funkcji regresji nośności połączenia (5,71kN). W tym przypadku zarówno zwiększenie jak i zmniejszenie zagłębienia narzędzia powoduje spadek nośności połączenia. Wzrost zagłębienia powoduje dodatkowo gwałtowny wzrost odchylenia standardowego zmniejszającego stabilność procesu zgrzewania. Przy prędkości posuwu  $x_2 = 400$  mm/min największą nośność połączenia można uzyskać przy zagłębieniu narzędzia  $x_1 = 1,1$  mm. Wzrost zagłębienia narzędzia skutkuje w tym przypadku obniżeniem wytrzymałości połączeń.



Rys. 33. Funkcja regresji dla prędkości obrotowej narzędzia  $x_3=1303\text{obr/min}$ . a) nośności połączenia, b) odchylenia standardowego [H2]

**Przedstawione zagadnienia wpływu parametrów procesu zgrzewania na montowalność połączeń wykonanych metodą FSW przedstawiłem w pracy H2 oraz H7**

### **Dobór optymalnych parametrów procesu zgrzewania połączeń zakładkowych metodą FSW z uwzględnieniem błędu zagłębienia narzędzia**

W celu zmniejszenia wahań zagłębienia narzędzia w zautomatyzowanych systemach montażowych prowadzone są badania nad wykorzystaniem sterowania adaptacyjnego do korygowania trajektorii ruchu narzędzia na podstawie sygnałów z czujników siły [6]. System taki znacznie zmniejsza wahania zagłębienia narzędzia, jednak nie niweluje go w zupełności [8, 12]. Podobna sytuacja może się pojawić również w przypadku niewystarczającej sztywności uchwytu obróbkowego. Zagłębienie narzędzia może wówczas ulegać zmianom i prowadzić do zmian nośności połączenia na kierunku przemieszczania się narzędzia. Na podstawie przeprowadzonych badań wykazałem, że wartość wariancji nośności połączenia wynikającego z niedokładności ustawienia głębokości narzędzia można opisać równaniem:

$$\sigma_{F\Delta}^2 = (21,4528 + 16,6915x_1 - 21,3656x_1^2 - 0,24367x_2 + 0,16407x_1x_2 - 0,0000238x_2^2 + 0,007202x_3 - 0,003959x_1x_3)\sigma_{x1} \quad (63)$$

W celu zapewnienia wymaganego poziomu montowalności połączeń, konieczny jest dobór optymalnych parametrów procesu zgrzewania. Dobór ten musi gwarantować nie tylko dużą nośność połączeń, lecz również wysoką stabilność procesu, charakteryzującego się możliwie najniższą wartością odchylenia standardowego uzyskiwanych wyników. Nie bez znaczenia ma w tym przypadku również pracochłonność wykonywania złączy. Na podstawie opracowanych modeli przeprowadziłem optymalizację wielokryterialną procesu i znalazłem rozwiązanie kompromisowe spełniające przedstawione warunki.

Zagadnienie optymalizacji wielokryterialnej doboru parametrów procesu można zapisać w postaci:

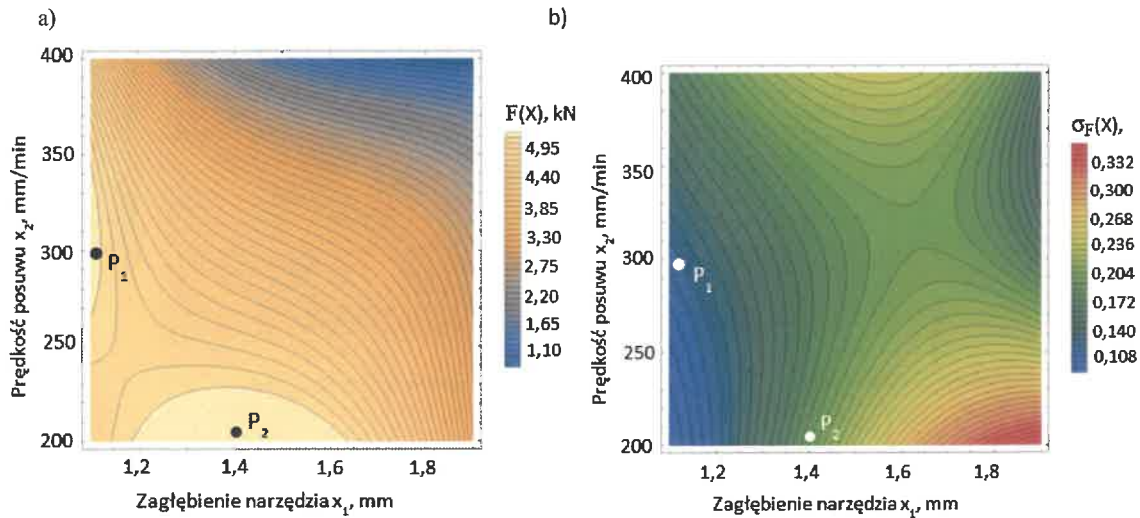
$$\begin{cases} f_1(z) = F(x) \rightarrow \max, \\ f_2(z) = \sigma_F(x) \rightarrow \min, \\ f_3(z) = \sigma_{F\Delta}(x) \rightarrow \min \\ f_4(z) = t(x) \rightarrow \min \\ z \in D \end{cases} \quad (64)$$

Podobnie jak w przypadku zgrzewania punktowego skalaryzację zagadnienia przeprowadziłem z wykorzystaniem metody ważenia ocen. Przyjąłem wartości wag  $u_i > 0$  poszczególnych kryteriów  $f_i$  (spełniając warunek  $u_1 + u_2 + u_3 + u_4 = 1$ ), a następnie sprowadziłem funkcje do postaci bezwymiarowej i wyznaczyłem rozwiązanie optymalne zagadnienia (64).

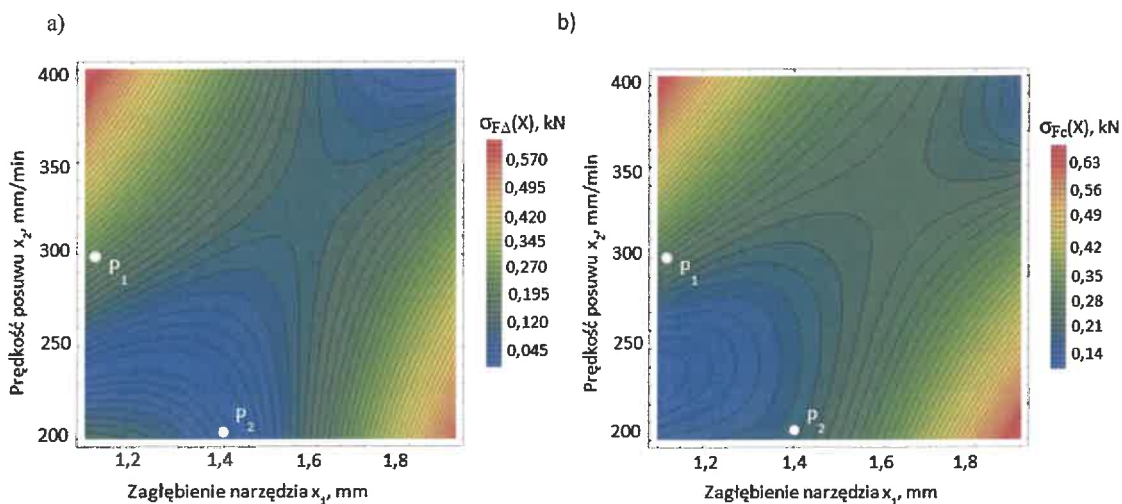
W przypadku, gdy sztywność układu nie pozwala na istotną zmianę głębokości pracy narzędzia, w procesie optymalizacji można przyjąć, że waga kryterium  $u_3 = 0$  ( $u_1 = u_2 = u_4 = 0,33$ ). Funkcja celu w tym przypadku osiągam maksimum przy zagłębieniu narzędzia  $x_1 = 1,1\text{mm}$ , prędkości posuwu  $x_2 = 296\text{ mm/min}$  i prędkości obrotowej  $x_3 = 800\text{ obr/min}$ . Zastosowanie przedstawionych parametrów zapewnia możliwość uzyskania nośności połączeń o średniej wartości  $5,36\text{kN}$  (punkt 1, rys. 34) przy odchyleniu standardowym  $\sigma_F = 0,07\text{kN}$ . Realizacja procesu z przedstawionymi parametrami na stanowisku o zmniejszonej sztywności, prowadzącej do pojawienia się błędu zagłębienia narzędzia na poziomie  $\sigma_{x1} = 0,05\text{mm}$  wiązałaby się ze znacznie większym całkowitym rozrzutem nośności spoiny  $\sigma_c = 0,23\text{kN}$  (rys. 35), co skutkowałoby zmniejszeniem zdolności jakościowej procesu. Uwzględnienie w procesie optymalizacji pojawienia się dodatkowego błędu ( $u_1 = u_2 = u_3 = u_4 = 0,25$ ) umożliwia wygenerowanie nowego rozwiązania zagadnienia. W tym przypadku funkcja celu osiąga wartość maksymalną przy zagłębieniu narzędzia  $x_1 = 1,4\text{mm}$ , prędkości posuwu  $x_2 = 200\text{ mm/min}$  i prędkości obrotowej  $x_3 = 800\text{ obr/min}$ , zapewniając uzyskanie nośności połączenia na poziomie  $5,52\text{kN}$  przy odchyleniu standardowym  $\sigma_F = 0,15\text{kN}$  (punkt 2, rys 34). Należy przy tym zauważyć, że minimalna



nośność spoiny ( $\bar{F} - 3\sigma_F$ ) zarówno w pierwszym rozwiązaniu ( $F_{min} = 5,15\text{kN}$ ) oraz drugim ( $F_{min} = 5,07\text{N}$ ) kształtują się na bardzo podobnym poziomie. Jest to możliwe na skutek zmniejszenia prędkości posuwu, prowadzącego do większej akumulacji ciepła w procesie zgrzewania, umożliwiając tym sposobem częściowe skompensowanie zmian głębokości pracy narzędzia.



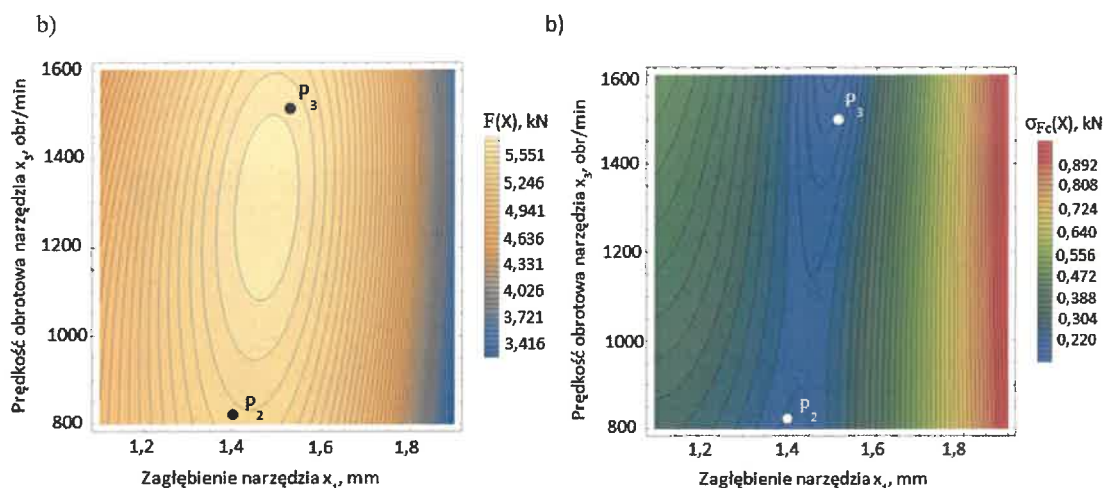
Rys. 34. Wpływ prędkości posuwu i zagłębienia narzędzia, przy prędkości obrotowej  $x_3 = 800$  obr/min na a) nośność połączenia  $F(X)$ , b) odchylenie standardowe rozrzutu procesu  $\sigma_F(X)$  [H1]



Rys. 35. Wpływ prędkości posuwu i zagłębienia narzędzia, przy prędkości obrotowej  $x_3 = 800$  obr/min na a) odchylenie standardowe nośności połączenia  $\sigma_{F_A}(X)$  b) całkowite odchylenie standardowe nośności połączenia  $\sigma_{F_c}(X)$  [H1]

Przeprowadzenie procesu zgrzewania, przy założeniu wystąpienia błędu zagłębienia narzędzia na poziomie  $\sigma_{x1} = 0,10\text{mm}$  wymaga ponownego wyznaczenia parametrów ustawczych procesu w drodze optymalizacji wielokryterialnej. Funkcja celu osiąga w tym przypadku wartość maksymalną przy zagłębieniu narzędzia  $x_1 = 1,49\text{mm}$ , prędkości posuwu  $x_2 = 200\text{mm/min}$  i prędkości obrotowej  $x_3 = 1507$  obr/min (punkt 3, rys. 36). Zapewnia to uzyskanie nośności spoiny na poziomie  $5,66\text{kN}$  przy odchyleniu standardowym  $\sigma_c = 0,192\text{kN}$ . Utrzymanie minimalnej nośności spoiny na podobnym poziomie ( $F_{min} =$

5,08N) jest w tym przypadku możliwe, dzięki zwiększeniu głębokości pracy narzędzia oraz zwiększeniu jego prędkości obrotowej.



Rys. 36. Wpływ prędkości posuwu i zagłębienia narzędzia, przy prędkości posuwu  $x_2 = 200$  mm/min na a) nośność połączenia  $F(X)$ , b) ochylenie standardowe rozrzutu procesu  $\sigma_F(X)$

Źródło: opracowanie własne [H1]

Problematykę wyznaczania optymalnych parametrów zgrzewania połączeń wykonywanych metodą FSW szczegółowo opisałem w pracy H1 oraz H2

## Literatura

- [1] Hagemann S., Stark R.: "An optimal algorithm for the robotic assembly system design problem: An industrial case study". CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology (31): 500-513, 2020.
- [2] Haghshenas M., Gerlich A.P. „Joining of automotive sheet materials by friction-based welding methods: A review”. Engineering Science and Technology, an International Journal, 21 (2018), pp. 130–148.
- [3] Jiang J., Yao L., Huang Z., Yu G., Wang L., Bi Z.: „The state of the art of search strategies in robotic assembly”. Journal of Industrial Information Integration (26) 100259, 2022.
- [4] Kluz R.: „Wyznaczanie zdolności jakościowej zrobotyzowanego stanowiska montażowego”. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, z.4, s.135-144, 2011.
- [5] Łunarski J.: „Problemy montowalności maszyn w montażu automatycznym”. Technologia i Automatyzacja Montażu 1: 4-5, 2017.
- [6] Mendes N., Neto P. and Loureiro A. „Robotic friction stir welding aided by hybrid force/motion control”. Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA), Barcelona, Spain , pp. 1-4, 2014.
- [7] Mishra R.S., Ma Z.Y. „Friction stir welding and processing”. Materials Science and Engineering: R: Reports, 50, (2005), pp. 1-78.
- [8] Qin, J., L'eonard, F., and Abba, G. „Real-Time Trajectory Compensation in Robotic Friction Stir Welding Using State Estimators”. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 24(6), 2207–2214, 2016.

- [9] Shen Z, Yang X, Zhang Z., Cui L., Li T. „*Microstructure and failure mechanisms of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminum alloy joints*”. *Materials and Design* 44 (2013), pp. 476–486.
- [10] Statistical Release: National Statistics, 2018 UK Greenhouse Gas Emissions, Provisional Figures. Department for Business, Energy & Industrial Strategy, 28 March 2019.
- [11] [www.europarl.europa.eu](http://www.europarl.europa.eu), Comparative study on the differences between the EU and US legislation on emission in the automotive sector, Study by EMIS Committee.
- [12] Xiao J., Wang M., Liu H., Liu S., Zhao H., Gao J. „*A constant plunge depth control strategy for robotic FSW based on online trajectory generation*”. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 80, 102479, 2023.

Za moje najważniejsze osiągnięcia naukowe uważam:

- Opracowanie modelu matematycznego błędów robota z uwzględnieniem warunków montowalności, pracującego w ustabilizowanych i zmiennych warunkach dotyczących temperatury otoczenia wraz z metodyką umożliwiającą dopasowanie modelu do uzyskanych wyników badań zapewniającą możliwość uzyskania adekwatnego modelu matematycznego.
- Opracowanie modelu matematycznego umożliwiającego wyznaczenie całkowitego błędu systemu montażowego oraz błędu względnego przemieszczenia osi łączonych części, umożliwiającego wyznaczenie prawdopodobieństwa połączenia części oraz dobór dokładności oprzyrządowania technologicznego systemu montażowego.
- Opracowanie metodyki wyznaczania prawdopodobieństwa połączenia części o powierzchniach walcowych, gwintowych i płaskich, dzięki której istnieje możliwość oszacowania kosztów eksploatacji stanowiska montażowego na etapie jego projektowania.
- Opracowanie autorskiej metody wyznaczania optymalnego miejsca połączenia części w przestrzeni roboczej stanowiska montażowego, zapewniającej najwyższy poziom montowalności połączeń o powierzchniach płaskich i walcowych.
- Wykazanie, że poprzez odpowiedni obrót chwytaka robota można zwiększyć zdolność jakościową procesu montażu oraz zmniejszyć wrażliwość systemu na skutki pojawienia się błędów systematycznych, będących nieodłącznym elementem procesu.
- Opracowanie metodyki wyznaczania dokładności oprzyrządowania systemu montażowego zapewniającego wymagany poziom montowalności systemu (prawdopodobieństwa połączenia części), bez zbędnego zawyżania dokładności wyposażenia a w związku z tym jego kosztów.
- Przeprowadzenie analizy wpływu parametrów procesu zgrzewania RFSSW montowalność i wady strukturalne zgrzein oraz wyznaczenie parametrów optymalnych na podstawie autorskiej metody opartej na optymalizacji wielokryterialnej zapewniających uzyskanie wymaganej nośności zgrzein i stabilności procesu
- Opracowanie modelu wpływu błędów systemu montażowego na nośność połączeń zgrzewanych metodą RFSSW oraz wyznaczenie parametrów optymalnych z uwzględnieniem błędu ustawienia narzędzia, umożliwiających wydłużenie czasu jego eksploatacji.
- Określenie wpływu parametrów procesu zgrzewania metodą FSW na montowalność cienkościennych połączeń ze stopu aluminium 2024-T3 oraz opracowanie adekwatnych modeli matematycznych.
- Wyznaczenie na podstawie autorskiej metody optymalnych parametrów procesu zgrzewania prowadzonego w warunkach zapewniających możliwość utrzymywania stabilnych parametrów procesu oraz z uwzględnieniem skutków pojawienia się błędów zagłębienia narzędzia.
- Współautorstwo 35 artykułów naukowych o tematyce dotyczącej wyznaczania i kształtowania poziomu montowalności połączeń, z czego 9 artykułów opublikowanych w czasopiśmie

znajdujących się w bazie JCR, 9 artykułów w czasopiśmie indeksowanym w bazie Web of Science oraz 17 artykułów w czasopiśmie wymienionych w części B wykazu czasopiśmie MNiSW.

#### 4.4. Kierunki dalszych badań

Rozwój przemysłu 4.0 wiąże się z wprowadzeniem do procesu montażu coraz nowocześniejszego oprzyrządowania, charakteryzującego się większą precyzją oraz nowoczesnych systemów sterowania. Systemy te, wykorzystujące sztuczną inteligencję oraz systemy wizyjne znacząco zmniejszają błędy generowane przez urządzenia wykonawcze stanowisk montażowych. Ze względu na pojawienie się dodatkowego czynnika, korygującego położenie chwytaka robota należy przypuszczać, że błędy powtarzalności pozycjonowania części mogą nie podlegać rozkładowi normalnemu. Wyznaczenie poziomu montowalności połączeń w takich systemach wymaga przeprowadzenia dalszych badań, mających na celu identyfikację rozkładów gęstości prawdopodobieństwa, którym błędy te mogą podlegać. Na podstawie uzyskanych wyników konieczne będzie opracowanie nowych modeli wpływu tych błędów na prawdopodobieństwo połączenia części.

W przypadku połączeń zgrzewanych tarciowo z przemieszaniem istotnym zagadnieniem związanym z zapewnieniem ich wymaganego poziomu montowalności, jest kwestia zużycia narzędzia w trakcie procesu zgrzewania. Uplastyczniony metal zanieczyszcza narzędzie adhezyjnie, przyczyniając się do jego szybszego zużycia a tym samym do zmiany geometrii narzędzia. Wywołana zmiana geometrii narzędzia prowadzi z kolei do powstawania wad strukturalnych zgrzeiny powodujących zmniejszenie nośności połączenia. W ramach przyszłych badań planuję przeprowadzenie analizy wpływu parametrów procesu na nośność spoiny w całym okresie eksploatacji pracy narzędzia. Celem prowadzonych badań będzie opracowanie modelu umożliwiającego dobór parametrów procesu dostosowanych do zmian geometrii narzędzia spowodowanych zużyciem. Wydaje się bowiem, że niewielkie zmiany geometrii narzędzia mogą być kompensowane zmianą parametrów ustawczych procesu. Umożliwi to zapewnienie zdolności jakościowej procesu w całym okresie eksploatacji pracy narzędzia oraz jego ewentualne wydłużenie.

#### 4.5. Pozostałe osiągnięcia naukowo – badawcze (po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych)

Po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych, nadanego uchwałą Rady Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej z dnia 14.11.2007r., obszar moich zainteresowań naukowych w początkowej fazie stanowiły zagadnienia związane z robotyzacją procesów technologicznych. W związku z tym podjąłem realizację prac badawczych związanych z zapewnieniem wydajności i zdolności jakościowej zrobotyzowanych procesów odlewania. Prowadziłem także badania dotyczące obróbki laserowej powierzchni z wykorzystaniem robota przemysłowego.

Zajmuję się również badaniami związanym ze zwiększeniem wydajności i efektywności systemów montażowych. Do optymalizacji działania systemów montażowych wykorzystuję wybrane metody balansowania linii produkcyjnych. Efektywność pracy systemów analizuję na podstawie opracowanych modeli matematycznych opartych na rachunku prawdopodobieństwa i statystyce matematycznej. W swoich badaniach skupiam się również na problematyce symulacji przebiegu procesów w systemach montażowych oraz na projektowaniu stanowisk montażowych nie tylko zautomatyzowanych lecz również manualnych dla osób z ograniczoną sprawnością ruchową.

Zajmuję się także badaniami nad poprawą właściwości połączeń zgrzewanych liniową metodą tarciową z przemieszaniem oraz spawanych. Podstawowe techniki stosowane do poprawy właściwości, to pneumokulowanie oraz nagniatanie hydrostatyczne. W swoich badaniach koncentruję się na opracowaniu modeli matematycznych wpływu parametrów procesu nagniatania na wybrane

właściwości warstwy wierzchniej połączeń. Uzyskane modele wykorzystuję do wyznaczenia optymalnych parametrów procesu, zapewniających najkorzystniejsze właściwości połączeń.

Realizuję również prace badawcze związane z zapewnieniem wymaganych właściwości warstwy wierzchniej części poprzez zastosowanie obróbki plastyczno-sprężystego odkształcenia warstwy wierzchniej za pomocą narzędzi diamentowych i ceramicznych.

W ramach projektu „Regionalna Inicjatywa Doskonałości” prowadziłem badania toczenia wykończeniowego stopu Ti6Al4V z zastosowaniem płytek skrawających z polikrystalicznego diamentu z wykorzystaniem planu RSM. W ramach prowadzonych badań opracowałem modele matematyczne wpływu parametrów toczenia na właściwości warstwy wierzchniej. Na podstawie opracowanych modeli, w wyniku rozwiązania zagadnienia optymalizacji wielokryterialnej wyznaczyłem parametry procesu skrawania umożliwiające prowadzenie obróbki na sucho przy temperaturze w obszarze tworzenia wióra wynoszącej 400°C zapobiegającej procesowi grafityzacji.

Prowadziłem również badania wpływu parametrów obróbki na miejsce powstawania zużycia i intensywność zużywania wiertel oraz przeciągaczy. Na podstawie przeprowadzonych badań wykazałem, że przy wierceniu otworów w próbkach z żeliwa sferoidalnego ENGJS-500-7 wiertłami z niskostopowej stali szybko tnącej HS2-5-1 ich zużywanie następuje jedynie na powierzchni przyłożenia. Wykazałem również, że kryterium zużywania wiertła może stanowić zużycie wierzchołków  $VB_{wo}$ , gdyż spełnia wszystkie stawiane mu wymagania, tzn. przedstawia zmianę geometrii i właściwości materiału narzędzia wynikające ze zużywania się ostrza, wzrasta monotonicznie w strefie normalnego zużycia oraz daje możliwość przeprowadzenia dokładnych pomiarów.

Przeprowadzone badania zużycia przeciągaczy wykazały, że do oceny efektywności jego pracy można wykorzystywać współczynnik wariancji, gdyż wraz ze wzrostem liczby ostrzeń wzrasta średnia wartość zużycia zębów na powierzchni przyłożenia, wielkość odchylenia standardowego i współczynnik wariancji, co świadczy o obniżeniu niezawodności pracy przeciągacza.

Wyniki zrealizowanych dotychczas prac badawczych o przedstawionej wyżej tematyce zostały opublikowane w czasopismach międzynarodowych oraz o zasięgu krajowym, jak również zostały zaprezentowane na międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych. Jestem autorem lub współautorem łącznie 73 artykułów naukowych opublikowanych po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych, z czego:

- 17 artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach z bazy JCR,
- 14 artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach indeksowanych na Web of Science lub/i Scopus (bez IF),
- 42 artykułów naukowych opublikowano w czasopismach o zasięgu krajowym,
- 1 rozdział w monografii,
- 1 pracę opublikowałem jako monografię.

Załącznik nr VI zawiera wydruk z baz Web of Science, Scopus i Google Scholar z wykazem cytowań wraz z podaniem liczby cytowań i indeksu Hirscha będących wynikiem zrealizowanych przeze mnie prac naukowo – badawczych.

- **Sumaryczny Impact Factor (IF)** wszystkich publikacji wg listy JCR, zgodnie z rokiem opublikowania, wynosi **33,535**
- **Liczba cytowań** (dane z dnia 28.06.2023) wg bazy Web of Science wynosi **181** (w tym bez autocytowań **164**), wg bazy Scopus wynosi **187** (w tym bez autocytowań **171**).
- **Indeks Hirscha** (dane z dnia 28.06.2023) wg bazy Web of Science oraz Scopus wynosi **8**.

Recenzuję artykuły naukowe dla czasopism krajowych oraz międzynarodowych. Po uzyskaniu stopnia doktora zrecenzowałem 26 artykułów w tym 3 dla czasopism międzynarodowych – Załącznik nr IV, pkt. II Ł.

Za swą działalność naukową po uzyskaniu stopnia doktora byłem czterokrotnie nagradzany Nagrodą Rektora Politechniki Rzeszowskiej, raz była to nagroda indywidualna III stopnia, trzy razy nagroda za publikację indeksowaną z listy MNISW (Załącznik nr IV, pkt. II D).

#### 4.6. Projekty badawcze oraz prace zlecone przez podmioty zewnętrzne:

W latach 2021 – 2022 byłem wykonawcą w projekcie nr 027/RID/2018/19 finansowanego w ramach programu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego pod nazwą „Regionalna Inicjatywa Doskonałości”.

W ramach projektu realizowałem (RID.RE.19.001) „*Badanie toczenia wykończeniowego stopu Ti6Al4V z zastosowaniem płytek skrawających z polikrystalicznego diamentu z wykorzystaniem planu RSM*”. Na podstawie przeprowadzonych badań opracowałem modele matematyczne wpływu parametrów toczenia na właściwości warstwy wierzchniej części oraz wyznaczyłem optymalne parametry procesu w wyniku rozwiązania zagadnienia optymalizacji wielokryterialnej. Wynikiem prowadzonych prac była publikacja w czasopiśmie z bazy JCR:

**Kluz R., Habrat W., Bucior M., Krupa K., Sęp J.** „*Multi-criteria optimization of the turning parameters of Ti-6Al-4V titanium alloy using the Response Surface Methodology.*” *Eksplatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* vol. 24, no 4 (2022): pp. 668-676.

Jestem członkiem zespołu, który złożył wniosek o finansowanie projektu badawczego do Narodowej Agencji Wymiany Akademickiej w ramach programu „*Wspólne projekty badawcze NAWA pomiędzy Rzeczpospolitą Polską a Republiką Słowacką*”. Partnerem ze strony Republiki Słowackiej jest zespół z Wydziału Mechanicznego Uniwersytetu Technicznego w Koszycach, którego koordynatorem jest prof. Ing. PhD. Ján Šlota. Projekt dotyczy „*Badania innowacyjnych technologii kształtowania oraz łączenia elementów struktur cienkościennych*”. W ramach projektu prowadzone będą badania dla różnych materiałów stosowanych lub mogących mieć zastosowanie w konstrukcji karoserii pojazdów celem obniżenia ich masy. Realizowane będą badania dotyczące nowych metod łączenia ze sobą różnych materiałów technologią m.in. zgrzewania tarcowego punktowego (RFSSW) oraz liniowego (FSW). Do osiągnięcia tych celów zostaną wykorzystane metody eksperymentalne i symulacje numeryczne.

Byłem również wykonawcą w ramach umowy zleconej przez EME Aero Sp. z o. o (RM-U-23004) „*Weryfikacja zdolności procesu pomiarowego poprzez przeprowadzenie MSA wraz z testem R&R dla nowej metody pomiarowej EME Aero*”. W ramach realizowanego zadania opracowałem metodykę oceny zdolności jakościowej nowej metody pomiarowej nieregularnych uszkodzeń powierzchni części lotniczych na bazie systemu replik firmy Kulzer-technik „*Technovit Provil Putty regular soft*” oraz „*Technovit Provit Light regular*” oraz przeprowadziłem ocenę zdolności jakościowej systemu pomiarowego wyżej wymienionych replik na urządzeniu Keyence VR5200 w zakresie pomiarowym 0,02 – 0,15 mm.

Realizuję zadanie badawcze w ramach umowy nr RM-U-23145 zawartej w dniu 13.06.2023r., pomiędzy Pratt & Whitney Rzeszów S.A. a Politechniką Rzeszowską o realizację projektu pt. „*Wyznaczenie właściwości połączenia oraz dobór warunków zapewniających efektywność mocowania detalu cienkościennego typu pierścień wykonanego z materiałów PWA79-216 i wskazanego przez Zleceniodawcę stopu aluminium do uchwytu obróbkowego przy użyciu kleju utwardzanego światłem UV.*”

W latach 2013 – 2018 w ramach prac zleconych przez podmioty zewnętrzne opracowałem:

1. Opinię potwierdzającą innowacyjność, dotyczącą „Elastycznej automatyzacji procesu spawania generatorów ozonu i reaktorów UV z wykorzystaniem metody MAG o zmiennej biegunowości prądu”, dla przedsiębiorstwa B&P Engineering Sp. z o.o. Spółka komandytowa, ul. Lubomirskich 1E, 37-200 Przeworsk. Realizacja w roku 2013.
2. Opinię o wdrożonej technologii przedstawionej w projekcie p.t. „Wzrost konkurencyjności B&P Engineering poprzez wdrożenie innowacji produktowych i procesowych”, dotycząca „Technologii wytwarzania wielkogabarytowych pras do produkcji soków z zastosowaniem innowacji produktowych i procesowych”, dla przedsiębiorstwa B&P Engineering Sp. z o.o. Spółka komandytowa, ul. Lubomirskich 1E, 37-200 Przeworsk. Realizacja w roku 2015.
3. Opinię potwierdzającą innowacyjność „Technologii wytwarzania innowacyjnych reaktorów UV do uzdatniania soków i koncentratów owocowych oraz wody” dla przedsiębiorstwa B&P Engineering Sp. z o.o. Spółka komandytowa, ul. Lubomirskich 1E, 37-200 Przeworsk. Realizacja w roku 2016.
4. Opinię potwierdzającą innowacyjność „Technologii wytwarzania innowacyjnych podgrzewaczy pojemnościowych, uniwersalnych wody użytkowej” wykonana dla Przedsiębiorstwa Produkcyjno – Usługowo – Handlowego Instal – INOX Anna Rachfał, Gniewczyzna Tryniecka 99, 37-203 Gniewczyzna Łańcucka. Realizacja w roku 2016.
5. Opinię potwierdzającą innowacyjność „Technologii wytwarzania wysokowydajnych płyt dwuwarstwowych, komorowych o wysokich wymaganiach pojemnościowych i ciśnieniowych używanych w systemach wymiany ciepła”, dla RS Technology Adam Rachfał Gniewczyzna Tryniecka 267, 37-203 Gniewczyzna Łańcucka Realizacja w roku 2018.

#### **5. AKTYWNOŚĆ NAUKOWA REALIZOWANA W WIĘCEJ NIŻ JEDNEJ UCZELNI, INSTYTUCJI NAUKOWEJ, W SZCZEGÓLNOŚCI ZAGRANICZNEJ:**

**Prowadzę stałą współpracę naukowo-badawczą z następującymi zagranicznymi uczelniami i instytutami:**

- Belgian Welding Institute – Belgia, Ghent,
- Technical University of Košice Department of Computer Aided Technology – Słowacja, Košice,
- Institute of Aerospace Engineering Brno University of Technology – Czechy, Brno.

**A także z uczelniami polskimi:**

- Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny – Polska, Lublin,
- Uniwersytet Rzeszowski, Wydział Matematyczno-Przyrodniczy – Polska, Rzeszów,
- Akademia Marynarki Wojennej, Wydział Mechaniczno-Elektryczny – Gdynia Polska,
- Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Krośnie – Polska, Krosno.

Niżej opisuję krótko charakter współpracy, a także wymieniam przykładowe publikacje potwierdzające taką współpracę.

Badania z zakresu technologii zgrzewania metodą RFSSW prowadzę w ścisłej współpracy z Belgian Welding Institute. Realizuję tam procesy zgrzewania, a także badania metalograficzne próbek. Osobą,

z którą w głównej mierze współpracuję jest dr. ir. Koen Faes (European Welding Engineer), a potwierdzeniem naszej współpracy są wymienione niżej wspólne publikacje naukowe:

1. **Kluz R.**, Kubit A., Trzepiecinski T., Faes K., Bochnowski W.: „*A weighting grade-based optimization method for determining refill friction stir spot welding process parameters*”. JOURNAL OF MATERIALS ENGINEERING AND PERFORMANCE, ISSN: 1059-9495, 2 Vol. 28(10) October 2019, pp. 6471–6482  
**MNiSW: 70 pkt.; IF: 1.652**
2. **Kluz R.**, Kubit A., Trzepiecinski T., Faes K.: „*Polyoptimisation of the refill friction stir spot welding parameters applied in joining 7075-T6 Alclad aluminium alloy sheets used in aircraft components*”. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, August 2019, Vol. 103, Issue 9–12, pp. 3443–3457  
**MNiSW: 100 pkt.; IF: 2.633**
3. Kubit A., Faes K., Jurczak W., Bucior M., **Kluz R.**: „*Analysis of the properties of RFSSW lap joints of alclad 7075-t6 aluminum alloy sheets under static and dynamic loads*”. TECHNOLOGIA I AUTOMATYZACJA MONTAŻU, Vol 110 No 4, ISSN: 2450-8217, 2020  
**MNiSW: 40pkt.**
4. Kubit A., Bucior M., **Kluz R.**, Faes K., rok 2019: „*Analiza numeryczna procesu tarcowego punktowego zgrzewania z przemieszaniem z wypełnieniem krateru*”. 61. Naukowo – Techniczna Konferencja Spawalnicza nt. „Spawanie w XXI Wieku - Domena Ludzi czy Robotów?”. Gdańsk-Sobieszewo 14-16.10.2019.

Badania dotyczące technologii zgrzewania tarcowego z przemieszaniem struktur cienkościennych prowadzę we współpracy Technical University of Košice Department of Computer Aided Technology. Współpracuję z profesorem Janem Slotą:

1. Kubit A.; Trzepieciński T.; **Kluz R.**; Ochałek K.; Slotá J. “*Multi-Criteria Optimisation of Friction Stir Welding Parameters for EN AW-2024-T3 Aluminium Alloy Joints*”. Materials 2022, 15, 5428.  
**MNiSW: 140 pkt.; IF: 2.389**

Prowadzę badania dotyczące wyznaczania poziomu montowalności nowoczesnych połączeń konstrukcyjnych (w tym RFSSW) oraz analizy możliwości ich zastosowania w konstrukcjach lotniczych a także badania dotyczące możliwości poprawy właściwości zmęczeniowych cienkościennych elementów wydrukowanych w 3D metodą kulowania we współpracy z Institute of Aerospace Engineering Brno University of Technology (Czechy). We wrześniu 2019 roku odbyłem w instytucie tym staż naukowo-badawczy. Osobą, z którą w głównej mierze współpracuję jest pan ing. Tomáš Katrňák.

Badania związane z modelowaniem błędów na zrobotyzowanym stanowisku montażowym prowadzę we współpracy z Wydziałem Mechanicznym Politechniki Lubelskiej. Na podstawie zrealizowanych badań wraz z Panem dr hab. inż. Arkadiuszem Gołą opracowaliśmy model matematyczny z wykorzystaniem sieci neuronowej przedstawiony w artykule opublikowanym w czasopiśmie indeksowanym w bazie Scopus:



1. **Kluz R.**, Antosz K., Trzepieciński T., Gola A.: *"Predicting the error of a robot's positioning repeatability with artificial neural networks"*. Advances in Intelligent Systems and Computing, 1004, pp. 41-48, 2020

W zakresie badań metalograficznych, prowadzę współpracę z Wydziałem Matematyczno-Przyrodniczym Uniwersytetu Rzeszowskiego. Współpraca z panem dr Wojciechem Bochnowskiem przyniosła efekt w postaci cyklu publikacji:

1. **Kluz R.**, Kubit A., Trzepieciński T., Faes, K., Bochnowski W.: *"A weighting grade-based optimization method for determining refill friction stir spot welding process parameters"*. JOURNAL OF MATERIALS ENGINEERING AND PERFORMANCE, ISSN: 1059-9495, 2 Vol. 28(10) October 2019, pp. 6471–6482  
**MNiSW: 70 pkt.; IF: 1.652**
2. Kubit A., **Kluz R.**, Trzepieciński T., Wydrzyński D., Bochnowski W.: *"Analysis of the mechanical properties and of micrographs of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminium sheets"*. ARCHIVES OF CIVIL AND MECHANICAL ENGINEERING, 18 (2018), pp. 235–244, ISBN/ISSN: 1644-9665  
**MNiSW (lista A czasopism, 2018): 30pkt.; IF: 2.846**
3. **Kluz R.**; Bucior M.; Dzierwa A.; Antosz K.; Bochnowski W.; Ochał K.: *"Effect of Diamond Burnishing on the Properties of FSW Joints of EN AW-2024 Aluminum Alloys"*. Applied Sciences 13, no. 3: 1305, 2023  
**MNiSW: 140 pkt.; IF:**
4. Kubit A., Bucior M., **Kluz R.**, Bochnowski W., Perłowski R.: *"Experimental research of the weakening of the fuselage skin by RFSSW single row joints"*. ADVANCES IN SCIENCE AND TECHNOLOGY-RESEARCH JOURNAL, Vol. 13, no. 3, pp. 90 - 97, 2019  
**MNiSW: 70pkt.** (czasopismo indeksowane w bazach Web of Science oraz Scopus)

Badania naukowe prowadzę również w Państwowej Wyższej Szkole Zawodowej w Krośnie. Jest to współpraca w zakresie badań wytrzymałości statycznej oraz technologii zgrzewania tarcowego z przemieszaniem. Współpracuję z mgr. inż. Krzysztofem Ochałkiem:

1. Kubit A.; Trzepieciński T.; **Kluz, R.**; Ochałek K.; Słota J. *"Multi-Criteria Optimisation of Friction Stir Welding Parameters for EN AW-2024-T3 Aluminium Alloy Joints"*. Materials 2022, 15, 5428.  
**MNiSW: 140 pkt.; IF: 3.4**
2. Kubit A., **Kluz R.**, Ochałek K., Wydrzyński D., Trzepieciński T. *"Friction stir welding of 2024-T3 aluminium alloy sheet with sheet pre-heating"*. MATERIALI IN TEHNOLOGIJE, t.52, z.3, s.283-288, ISBN/ISSN: 1580-2949, 2018  
**MNiSW (lista A czasopism, 2018): 15pkt.; IF: 0.714**

Badania z zakresu obciążeń dynamicznych połączeń wykonanych metodą RFSSW prowadzę na Wydziale Mechaniczno-Elektrycznym Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni. Współpracuję z Panem dr hab. inż. Wojciechem Jurczakiem.

1. Kubit A., Faes K., Jurczak W., Bucior M., Kluz R.: *“Analysis of the properties of RFSSW lap joints of alclad 7075-t6 aluminum alloy sheets under static and dynamic loads”*. TECHNOLOGIA I AUTOMATYZACJA MONTAŻU, Vol 110 No 4, ISSN: 2450-8217, 2020  
**MNiSW: 40pkt.**

## 6. INFORMACJA O OSIĄGNIĘCIACH DYDAKTYCZNYCH, ORGANIZACYJNYCH ORAZ POPULARYZUJĄCYCH NAUKĘ

W ramach działalności popularyzującej naukę wygłaszałem referaty, prezentowałem plakaty, uczestniczyłem w dyskusji i przygotowałem materiały do zaprezentowania na wielu krajowych i międzynarodowych konferencjach naukowych. Wygłosiłem 17 referatów oraz zaprezentowałem 11 plakatów na 22 konferencjach międzynarodowych i 6 konferencjach krajowych.

Uczestniczyłem w organizacji 1 międzynarodowej konferencji naukowej i 2 konferencji krajowych, jako członek komitetu organizacyjnego.

Poza artykułami przedstawionymi do osiągnięć naukowych stanowiących cykl publikacji opublikowałem 64 artykułów naukowych w wydawnictwach krajowych i zagranicznych.

Jestem członkiem dwóch towarzystw naukowych: Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Mechaników Polskich (SIMP) oraz Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją (PTZP).

Aktualnie jestem członkiem komitetu redakcyjnego w zespole redakcyjnym czasopisma Technologia i Automatykacja Montażu (redaktor tematyczny w zakresie *w zakresie technologia i automatyzacja*).  
MNiSW: 40 pkt

Uczestniczyłem w komitecie organizacyjnym konkursu „*POSTER MASTER*” na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa, mającym na celu prezentację wyników badań uzyskanych przez studentów podczas realizacji prac dyplomowych magisterskich w roku akademickim 2022/2023.

Ze względu na zainteresowania naukowe dotyczące problematyki wyznaczania poziomu montowalności nowoczesnych połączeń konstrukcyjnych stosowanych w lotnictwie z własnej inicjatywy po uzyskaniu stopnia doktora odbyłem zagranicznych staż naukowo-badawczy w Institute of Aerospace Engineering Brno University of Technology (2019r.) – czas trwania: jeden miesiąc.

Prowadziłem wykłady i ćwiczenia na studiach podyplomowych „*Konstrukcja form wtryskowych*” oraz „*Zapewnienie jakości w produkcji lotniczej*” z przedmiotów:

- „Systemy jakości w narzędziowni”
- „Nadzór metrologiczny w procesach zapewnienia jakości”

Na co dzień prowadzę zajęcia dydaktyczne na studiach magisterskich oraz inżynierskich na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa z takich przedmiotów jak:

- *Elastyczne systemy produkcyjne (wykład, laboratorium),*
- *Zintegrowane systemy wytwarzania (wykład, laboratorium),*
- *Technologia montażu (wykład, laboratorium),*
- *Podstawy technologii maszyn (wykład, laboratorium),*
- *Inżynieria wytwarzania: Technologia maszyn (wykład, laboratorium),*
- *Technologia lotnicza (wykład, laboratorium).*

Prowadziłem również zajęcia na studiach dualnych „Inżynieria mechaniczna dla przemysłu lotniczego” realizowanych we współpracy z Pratt & Whitney Rzeszów S.A. z przedmiotu „Zintegrowane systemy wytwarzania”

Jako promotor sprawowałem opiekę naukową nad 213 studentami, w tym pełniłem funkcję promotora 103 prac inżynierskich oraz 110 prac magisterskich. Wykonałem recenzję 149 prac dyplomowych (104 inżynierskich i 45 magisterskich). Byłem również promotorem pomocniczym w 1 przewodzie doktorskim.

**Pozostała działalność organizacyjna:**

1. Członek Komisji Obron Prac Dyplomowych (magisterskich oraz inżynierskich) na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn, nieprzerwanie od 2015r. do 2021r.
2. Członek Komisji Obron Prac Dyplomowych (magisterskich oraz inżynierskich) na kierunku Zarządzanie i Inżynieria Produkcji, nieprzerwanie od 2015r. do chwili obecnej.
3. Funkcja układania i koordynowania rozkładu zajęć na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn, nieprzerwanie od 2008r.
4. Pełnienie funkcji audytora wewnętrznego w Systemie Zarządzania Jakością” Katedry Technologii Maszyn i Inżynierii produkcji w latach 2004-2012.
5. Pełnienie funkcji Pełnomocnika ds. szkoleń w Systemie Zarządzania Jakością” Katedry Technologii Maszyn i Inżynierii produkcji w latach 2006-2012.

**7. SUMARYCZNE ZESTAWIENIE DOROBKU NAUKOWO–BADAWCZEGO, POPULARYZATORSKIEGO, DYDAKTYCZNEGO I ORGANIZACYJNEGO (po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych)**

Lp.	Kryterium	Liczba
1.	Publikacje naukowe w czasopismach z bazy Journal Citation Reports (JCR)	17
2.	Zrealizowane oryginalne osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne i technologiczne	–
3.	Udzielone patenty	
	a) międzynarodowe	–
	b) krajowe	–
4.	Wynalazki oraz wzory użytkowe i przemysłowe, które zostały wystawione na międzynarodowych lub krajowych wystawach lub targach	–
5.	Monografie, publikacje naukowe w czasopismach innych niż znajdujące się w bazie JCR	56
6.	Opracowania zbiorowe, katalogi zbiorów, dokumentacja prac badawczych, ekspertyz	–
7.	Sumaryczny <i>Impact Factor (IF)</i> według listy JCR, zgodnie z rokiem opublikowania prac	33,535
8.	Liczba cytowań publikacji według bazy <i>Web of Science (WoS)</i> : z autocytowaniami / bez autocytowań	181 164
9.	Indeks Hirscha według bazy <i>Web of Science (WoS)</i>	8
10.	Liczba cytowań publikacji według bazy <i>Scopus</i> : z autocytowaniami / bez autocytowań	187 171
11.	Indeks Hirscha według bazy <i>Scopus</i>	8
12.	Kierowanie projektami badawczymi oraz udział w projektach badawczych:	
	a) międzynarodowe (wykonawca)	–
	b) krajowe (wykonawca)	1
13.	Międzynarodowe i krajowe nagrody za działalność naukową	–

14.	Uczestnictwo w programach europejskich oraz innych programach: międzynarodowych i krajowych	–
15.	Aktywny udział w konferencjach naukowych:	
	a) międzynarodowych	22
	b) krajowych	6
13	Udział w komitetach organizacyjnych konferencji naukowych:	
	a) międzynarodowych	2
	b) krajowych	1
14.	Otrzymane nagrody i wyróżnienia inne niż wymienione wyżej	4
15.	Udział w konsorcjach i sieciach badawczych	–
16.	Kierowanie projektami realizowanymi we współpracy z: przedsiębiorcami, innymi niż wymienione wyżej	–
17.	Udział w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism	1
18.	Członkostwo w międzynarodowych i krajowych organizacjach oraz towarzystwach naukowych	2
19	Osiągnięcia dydaktyczne i w zakresie popularyzacji nauki	6
20.	Opieka naukowa nad studentami	213
21.	Opieka naukowa nad doktorantami	1
22.	Stáže w ośrodkach naukowych lub akademickich	1
23.	Wykonane ekspertyzy lub inne opracowania na zamówienie	5
24.	Udział w zespołach eksperckich i konkursowych	1
25.	Recenzowanie projektów	–
26	Recenzowanie publikacji w czasopismach:	
	a) międzynarodowych	3
	b) krajowych	23

*Fluz Rafał*

Podpis wnioskodawcy