

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Wydział Mechatroniki

# ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Maciej Byszewski

Adaptacyjne mocowanie elementów niesztynnych  
w pomiarach współrzędnościowych

Promotor:

prof. dr hab. inż. Adam Woźniak

Warszawa, 2019



## *Podziękowania*

Pragnę podziękować:

Promotorowi,

za opiekę merytoryczną, za cenne uwagi i sugestie oraz wszechstronną pomoc,  
za zaangażowanie i cierpliwość, dzięki której możliwe było pomyślne napisanie tej pracy.

Pracownikom Instytutu Metrologii i Inżynierii Biomedycznej,

za pomoc w realizacji badań a także za wsparcie merytoryczne i okazaną życzliwość.

Najbliższym,

za cierpliwość i wsparcie.



## Streszczenie

Współrzędnościowa technika pomiarowa pozwala przy użyciu współrzędnościowych urządzeń pomiarowych na pomiar geometrii skomplikowanych wyrobów pochodzących z przemysłu motoryzacyjnego, lotniczego, precyzyjnego itp. Rosnący stopień skomplikowania i dokładności wytwarzanych elementów wymaga od producentów sprzętu kontrolno-pomiarowego spełnienia odpowiednich wymagań związanych przede wszystkim z błędami dopuszczalnymi, wydajnością oraz elastycznością. Owocem wielu lat badań nad zagadnieniem dokładności pomiarów współrzędnościowych stały się skuteczne metody i narzędzia służące do badania i kompensacji błędów współrzędnościowych systemów pomiarowych. Istotne miejsce w budżecie niepewności pomiaru współrzędnościowego zajmują błędy wynikające z występowania sił działających na mierzony element. Siły te związane są z naciskiem pomiarowym (w przypadku metod stykowych), a także z metodą mocowania oraz grawitacją i naprężeniami resztkowymi pozostałymi po obróbce. Wpływ tych czynników na błąd pomiaru jest tym większy im mniejsza jest sztywność mierzonego elementu.

W rozprawie przedstawiono problematykę związaną ze współrzędnościowymi pomiarami elementów niesztywnych. Przedstawiona analiza literatury uzasadnia potrzebę opracowania metody mocowania elementów niesztywnych w taki sposób, aby pomiary tych elementów mogły odbywać się w stanie quasi-swobodnym.

Opracowano nową metodę adaptacyjnego mocowania elementów niesztywnych, w ramach której wykonano aktywne podpory wyposażone w moduł pomiaru wartości reakcji oraz jej regulacji. Opracowano algorytm optymalnej alokacji podpór i wyznaczania właściwej wartości reakcji. Opracowano oprogramowanie do obsługi i adjustacji aktywnych podpór. Przeprowadzono badania na elementach opracowanych samodzielnie oraz pochodzących z przemysłu z zastosowaniem mocowań klasycznych oraz opracowanego. Wykonano weryfikację metody poprzez pomiary przykładowych elementów niesztywnych zamocowanych w stanie bez naprężeń oraz z zastosowaniem mocowania adaptacyjnego. Zaproponowana metoda stanowi nowe rozwiązanie pozwalające na dokładniejszy pomiar elementów niesztywnych poprzez redukcję błędów związanych z działaniem sił zewnętrznych.

**Słowa kluczowe:** kontrola jakości, metrologia współrzędnościowa, pomiary części niesztywnych, GD&T, mocowanie części niesztywnych.

## Abstract

Coordinate measuring technology allows users of coordinate measuring machines to verify geometry of complex components produced in automotive, aerospace and high precision industries. The increasing level of complexity and accuracy of products and components makes the requirements for permissible errors, efficiency and flexibility of measuring devices more and more stringent. Years of research in the field of accuracy of coordinate measuring machines brought numerous methods and tools for verification and error compensation in coordinate measuring systems. External forces affecting measured elements are a key element in the uncertainty budget of coordinate measurement systems. Sources of these are methods of fixturing, gravity, machining-induced residual stresses and probing or scanning forces for contact methods. The effect of these factors on the measurement error is the higher the lower the stiffness of the measured elements. This dissertation presents the problems related to coordinate measurements of non-rigid parts. An in-depth analysis of literature has identified a need to develop a method of fixturing non-rigid elements in a way that would make verification of their geometry possible in a quasi-free state. A newly developed method of adaptive clamping of non-rigid parts is proposed in this dissertation. Essential to the method are customly designed active supports equipped with strain gauges. Strain gauges allow for measuring the reaction force and its further regulation. Algorithm calculating optimal locations of supports and reaction forces has been developed using ANSYS software. Measurement software has been created for operating and adjusting active supports. Several tests comparing classical approach and the developed method has been carried out on a range of industry components and custom made samples. Verification of the adaptive method was achieved by measuring non-rigid samples fixtured in a stress-free state. By compensating errors of the external forces the proposed method is an innovative and unique solution to issues in verification of geometry of non-rigid parts.

**Keywords:** quality control, coordinate metrology, non-rigid parts inspection, GD&T, inspection fixture for deformable parts.

## Spis treści

|   |     |
|---|-----|
| 1. Wstęp.....   | 9   |
| 1.1. Wprowadzenie do pomiarów współrzędnościowych.....                          | 9   |
| 1.2. Źródła błędów współrzędnościowych maszyn pomiarowych.....                  | 9   |
| 1.3. Istota działania sił zewnętrznych podczas pomiaru współrzędnościowego..... | 11  |
| 1.4. Badania nacisku pomiarowego sond stykowych.....                            | 12  |
| 1.5. Współrzędnościowe pomiary elementów niesztynnych.....                      | 19  |
| 1.6. Istniejący stan wiedzy.....  | 27  |
| 1.7. Mechaniczne metody mocowania elementów niesztynnych.....                   | 29  |
| 1.8. Wirtualne metody mocowania elementów niesztynnych.....                     | 35  |
| 1.9. Cel i teza pracy.....  | 49  |
| 2. Nowa metoda mocowania adaptacyjnego.....                                     | 50  |
| 2.1. Koncepcja metody.....  | 50  |
| 2.2. Idea aktywnych podpór.....   | 52  |
| 2.3. Realizacja praktyczna aktywnych podpór.....                                | 55  |
| 2.4. Metoda elementów skończonych.....  | 60  |
| 2.5. Algorytm lokowania aktywnych podpór.....                                   | 69  |
| 2.6. Oprogramowanie systemu i procedura kalibracji aktywnych podpór.....        | 74  |
| 2.7. Opis stanowiska badawczego i przygotowania pomiaru.....                    | 78  |
| 3. Badania doświadczalne.....   | 85  |
| 3.1. Opis badanych elementów.....   | 87  |
| 3.2. Wyniki badań doświadczalnych.....  | 93  |
| 4. Podsumowanie i wnioski.....  | 114 |
| 6. Bibliografia.....  | 116 |
| 6.1. Artykuły w czasopiśmie, publikacje konferencyjne.....                      | 116 |
| 6.2. Podręczniki.....   | 123 |
| 6.3. Normy.....   | 123 |
| 6.4. Specyfikacje techniczne i materiały producentów sprzętu pomiarowego.....   | 124 |
| 6.5. Raporty z projektów badawczych.....  | 124 |





## 1. Wstęp

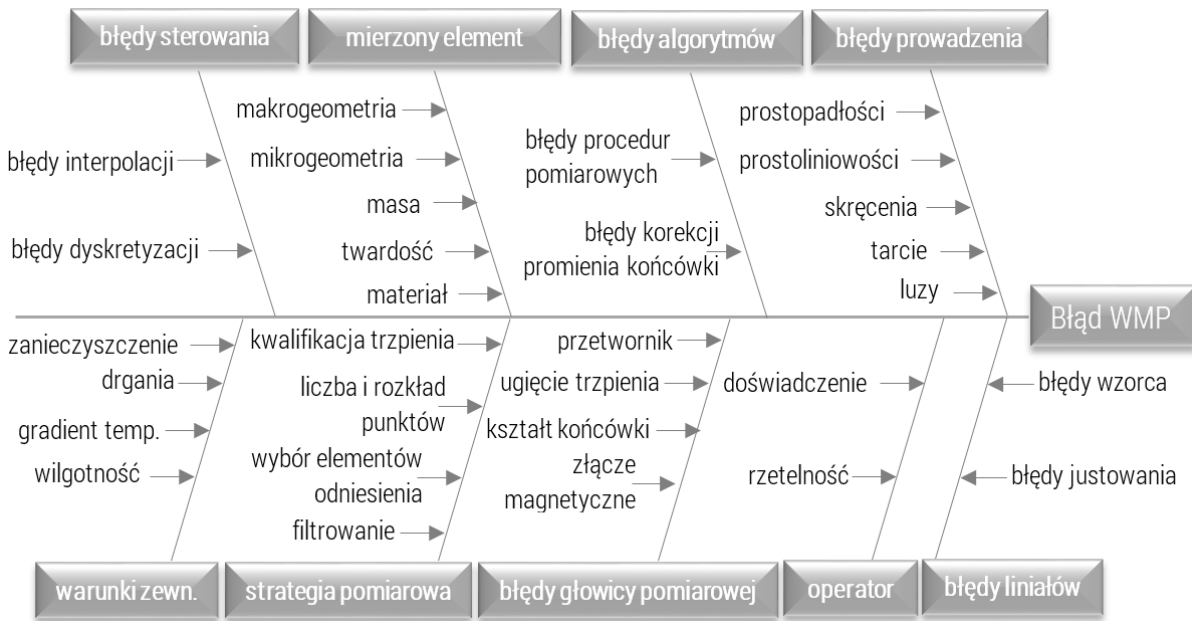
### 1.1. Wprowadzenie do pomiarów współrzędnościowych

Jednym z głównych czynników wpływających na rozwój oraz poziom funkcjonowania firm produkcyjnych jest kontrola jakości produkowanych wyrobów. Obserwowany dynamiczny rozwój technik wytwarzania nie byłby możliwy gdyby nie towarzyszący mu postęp w zakresie nadzoru nad poprawnością wymiarowo-kształtową produkowanych elementów. Decydujący wpływ na dynamikę postępu w technikach pomiarowych mają osiągnięcia w dziedzinie mechaniki, elektroniki oraz systemów informacyjnych. Zwiększenie wydajności oraz dokładności zarówno maszyn produkcyjnych jak i pomiarowych był możliwy dzięki wprowadzeniu zaawansowanych systemów sterowania CNC (z ang. *Computer Numerical Control*) oraz algorytmów służących do kompensacji błędów i optymalizacji pracy. Obecnie najbardziej powszechnym narzędziem umożliwiającym bardzo dokładny oraz automatyczny pomiar skomplikowanych geometrycznie wyrobów jest współrzędnościowa maszyna pomiarowa (WMP lub CMM z ang. *Coordinate Measuring Machine*). W zakresie współrzędnościowych technik pomiarowych (WTP) [102,103,105,108,109] rozpowszechniły się również pewne odmiany tych urządzeń w postaci ramion pomiarowych, trackerów laserowych, urządzeń fotogrametrycznych, a ostatnio również tomografów do zastosowań inżynierskich. Podobnie rozwijają się sterowane numerycznie obrabiarki CNC, które wyposażone w sondy pomiarowe stają się dziś współrzędnościowymi urządzeniami pomiarowymi. Cechą wspólną tych i innych współrzędnościowych systemów pomiarowych jest zasada pośredniej metody pomiaru na podstawie wyznaczonych współrzędnych punktów mierzonego przedmiotu zlokalizowanych w przestrzeni pomiarowej.

### 1.2. Źródła błędów współrzędnościowych maszyn pomiarowych

Wynik pomiaru współrzędnościowego (jak każdego innego) obarczony jest błędem, a wartość tego błędu określa przydatność danego urządzenia pomiarowego do realizacji określonego zadania pomiarowego. Właściwe wykrycie błędów maszyn pomiarowych pozwala nie tylko oszacować niepewność pomiaru, ale pozwala również na dobór właściwej strategii pomiarowej a także na kompensację tych błędów, pod warunkiem, że mają one charakter systematyczny. W celu wyznaczenia błędów WMP stosuje się kompleksowe metody bazujące na pomiarze wzorca lub zestawu wzorców

długości i kształtu. Źródła błędów maszyn współrzędnościowych można podzielić na dziewięć głównych grup [108]. Błędy te przedstawione są na rys. 1.1 w postaci o diagramu Ishikiway.



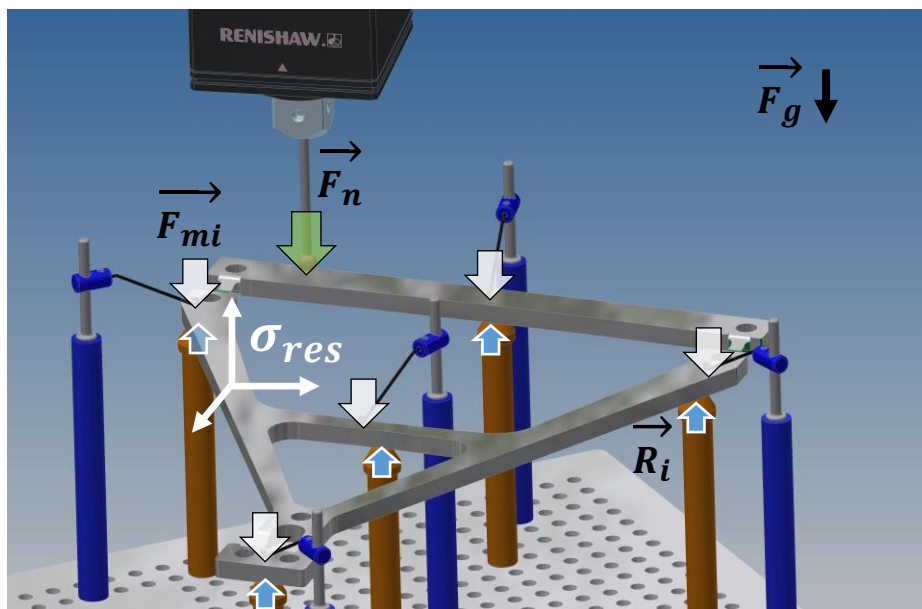
Rys. 1.1. Źródła błędów pomiarów przy użyciu WMP [108]

Wymienione źródła błędów są w większości przypadków identyfikowalne i podlegają przynajmniej częściowej kompensacji. Istotnym jest fakt, że czynniki te często są wzajemnie zależne, a wpływ poszczególnych błędów składowych na niepewność pomiaru na WMP jest zmienny. Znane są metody wyznaczania i kompensacji błędów geometrycznych, błędów głowic pomiarowych [115-117] oraz liniałów. Coraz większa jest również świadomość użytkowników WMP w zakresie warunków środowiskowych, stąd coraz częściej obserwuje się zaawansowane metody tłumienia drgań czy stabilizacji temperatury nie tylko samego urządzenia, ale również mierzonego elementu. Stosowane algorytmy matematyczne bardzo często podlegają certyfikacji, a dostępne strategie pomiarowe pomimo możliwości dawania różnych wyników pomiaru wybierane są świadomie przez konstruktorów uwzględniających funkcjonalność danego komponentu czy zespołu. Powszechna automatyzacja pomiarów, stosowanie zaawansowanych systemów sterowania CNC oraz szkolenia kadry powodują, że błędy pomiaru związane z operatorem są co do zasady pomijalne. Trudniejsze w identyfikacji i kompensacji wydają się być błędy dynamiczne związane z właściwościami dynamicznymi samego urządzenia [110] oraz cechami systemu sterowania co bezpośrednio przekłada się na interakcję pomiędzy sondą pomiarową, a elementem mierzonym powodując jego odkształcenie lub rejestrację błędnych punktów pomiarowych [96].

Drugim problematycznym obszarem są błędy związane z mierzonym elementem. Przede wszystkim źródłem błędów są odkształcenia, których wartość zależy od właściwości materiałowych oraz kształtu mierzonego elementu. Te dwa czynniki wpływają na podatność elementu na odkształcenia spowodowane ciężarem własnym, naciskiem pomiarowym oraz siłami mocowania. Zatem nie bez znaczenia są tu charakterystyki nacisku pomiarowego sond (główek pomiarowych) oraz sposób mocowania (podparcia) elementu podczas pomiaru.

### 1.3. Istota działania sił zewnętrznych podczas pomiaru współrzędnościowego

W ogólnym ujęciu wpływ działania sił zewnętrznych na błąd pomiaru jest wprost proporcjonalny do podatności mierzonego elementu. Na rys. 1.2 w sposób schematyczny przedstawiono siły działające na element w trakcie pomiaru na WMP. Zamocowanie elementu mierzonego na stole maszyny pomiarowej jest kwestią kluczową i w praktyce przemysłowej najczęściej realizowaną przez komercyjnie dostępne modułowe lub dedykowane systemy mocowań [117,127,128]. Systemy te orientują mierzony element w przestrzeni pomiarowej poprzez układ podpór oraz docisków, zapewniając pewne reakcje podpór oraz siłę docisku (mocowania).



Rys. 1.2. Siły działające na element mierzony w trakcie pomiaru współrzędnościowego

Niekorzystnym jest fakt, że siły zewnętrzne działające na element mierzony powodują naprężenia, które nie podlegają monitorowaniu. Wartość tych niekontrolowanych naprężeń zależy od

zastosowanego systemu mocowań, lokalizacji podpór i docisków, operatora, a także błędów wykonania elementu. Podobnie podczas pomiaru na element pomiarowy działa siła grawitacji, odkształcając go na skutek ciężaru własnego. Wpływ grawitacji na błąd pomiaru jest zależny od podatności elementu, jego orientacji oraz sposobu podparcia.

Na rys. 1.2 przyjęto następujące oznaczenia:

$\vec{F}_{mi}$  – siła docisku od systemu mocowania,

$\vec{R}_1$  – reakcja podporowa,

$\vec{F}_n$  – siła nacisku pomiarowego,

$\vec{F}_g$  – grawitacja,

$\sigma_{res}$  – naprężenia resztkowe [85].

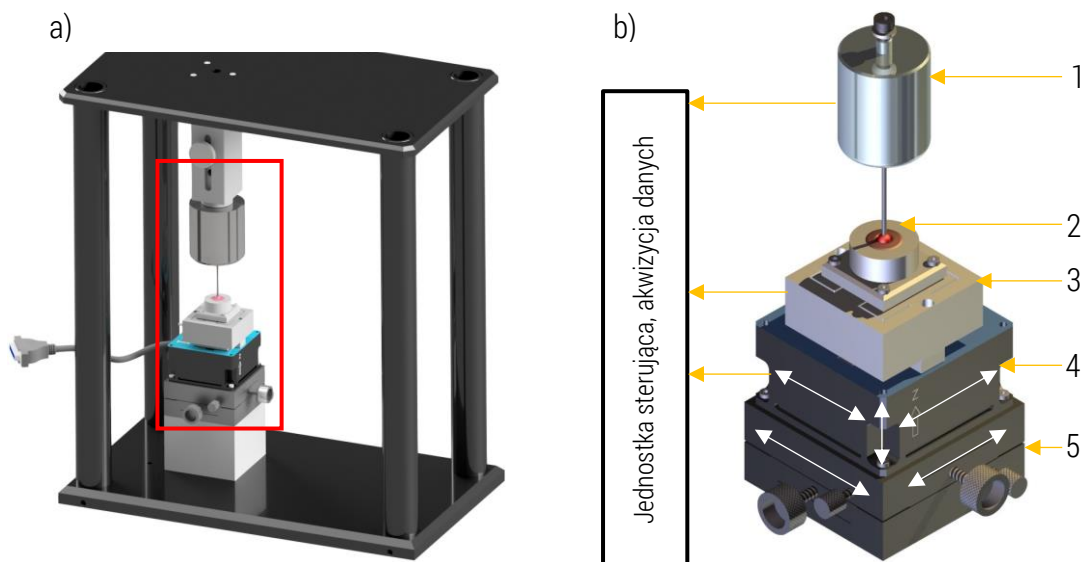
Problem sił mocowania elementów mechanicznych nie ogranicza się jedynie do metrologii przemysłowej, ale dotyczy on również etapu produkcyjnego. Otóż już na etapie obróbki mechanicznej, gdzie siły skrawania są często bardzo duże należy zastosować system mocowania, którego docisk zagwarantuje przede wszystkim bezpieczną obróbkę, ale również stabilną pozycję elementu w kontekście drgań i pozycji na stole obrabiarki. W wyniku obróbki mechanicznej zmieniają się właściwości mechaniczne elementu obrabianego, co skutkuje pojawieniem się naprężeń resztkowych, a ich relaksacja po zdemontowaniu elementu ze stołu obrabiarki widziana jest na etapie inspekcji jako odchyłka kształtu lub wymiaru. Wszystkie z wymienionych sił zewnętrznych z wyjątkiem sił nacisku pomiarowego działających na element mierzony mają charakter statyczny i wpływają na błąd pomiaru. Jedyną siłą zewnętrzną, która ma charakter dynamiczny i może podlegać regulacji i monitorowaniu jest siła nacisku pomiarowego występująca w przypadku pomiarów stykowych zarówno punktowych jak i skaningowych. Wpływ tych sił na odchyłkę kształtu może zostać oszacowany i skompensowany.

#### 1.4. Badania nacisku pomiarowego sond stykowych

Jedną z sił oddziałujących na element mierzony podczas pomiaru na maszynie współrzędnościowej (rys. 1.2) jest nacisk pomiarowy. Nacisk pomiarowy związany jest z oprzyrządowaniem współrzędnościowego urządzenia pomiarowego, jakim jest sonda (głowica) pomiarowa. W przypadku głowic bezstykowych (np. triangulacyjnych) nacisk pomiarowy oczywiście nie występuje.

W w przypadku głowic stykowych nacisk pomiarowy może mieć istotny wpływ na wynik pomiaru, szczególnie elementów o mniejszej sztywności.

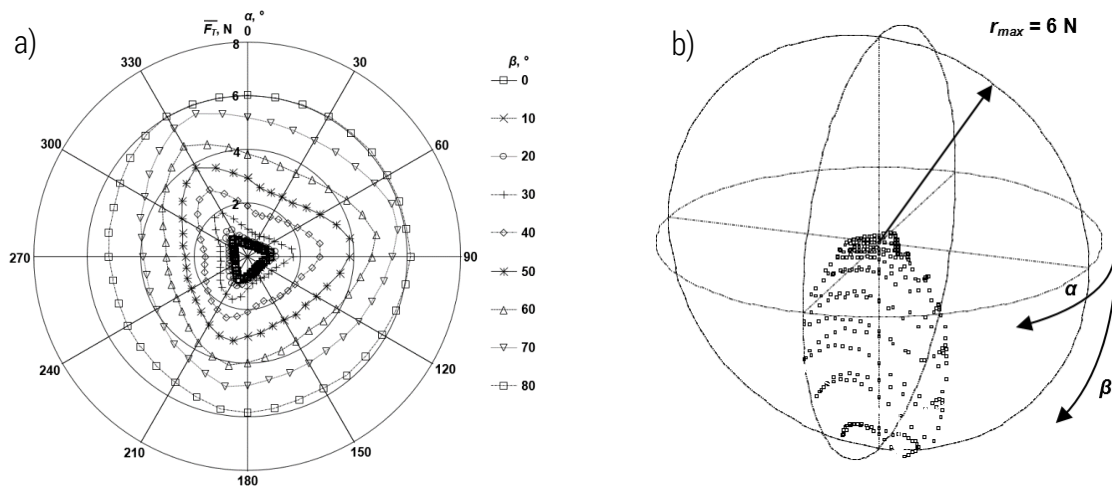
Autor pracy prowadził badania nad zagadnieniem siły nacisku pomiarowego w trakcie pomiaru punktowego i skaningowego [134]. Badania przeprowadzono zarówno dla głowic stosowanych w maszynach współrzędnościowych (Renishaw TP6, TP1S, TP20, Zeiss Vast Gold, Zeiss Vast XXT) oraz sond przedmiotowych stosowanych w obrabiarkach CNC (Renishaw OMP40-2 M&H IRP 32.00 mini) [34-36,91-95]. Opracowano stanowisko do automatycznego i bezpośredniego badania siły przełączania sond stykowych stosowanych we współrzędnościowych maszynach pomiarowych oraz sond przedmiotowych z obrabiarek CNC (rys 1.3) [91,93]. Stanowisko umożliwia badanie nacisku pomiarowego sond impulsowych bez udziału WMP lub w przypadku sond obrabiarkowych - bez udziału obrabiarki.



**Rys. 1.3.** Stanowisko do bezpośredniego badania siły przełączania sond stykowych z maszyn współrzędnościowych i obrabiarek CNC: a) widok ogólny stanowiska, b) widok zespołu pozycjonowania wzorca wraz z czujnikiem siły 3D

Stanowisko składa się z konstrukcji nośnej umożliwiającej zamocowanie badanej sondy (1) oraz zespołu wykonawczego, składającego się z stolików pozycjonujących (5), translatora piezoelektrycznego 3D (4), trójosiowego czujnika siły (3) oraz wzorca w postaci wewnętrznej półsfery (2). Sterowany translator piezoelektryczny służy do zadawania przemieszczeń zespołu wzorca, co prowadzi do wygenerowania impulsu pomiarowego sondy, który wyzwala pomiar nacisku pomiarowego. Sekwencja taka powtarzana jest dla każdego badanego kierunku pomiarowego. Szczegółowy opis stanowiska oraz wyników badań przedstawiono w [92].

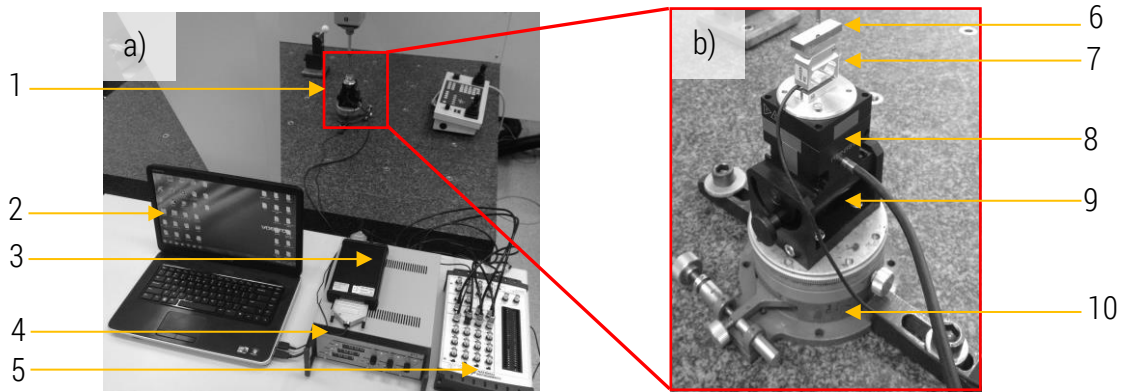
Na rys. 1.4 przedstawiono przykładowe wyniki badania nacisku pomiarowego sondy obrabiarkowej Renishaw OMP 40-2 współpracującej z interfejsem optycznym i trzpieniem pomiarowym o długości 50 mm. Wyniki przedstawione w dwóch postaciach: jako przekroje w układzie biegunowym (rys. 1.4a) oraz w postaci przestrzennej charakterystyki (rys. 1.4b). Przyjęte oznaczenia kątów  $\alpha$  oraz  $\beta$  definiują kierunek pomiarowy odpowiednio w płaszczyźnie prostopadłej do osi sondy oraz zawierającej oś sondy.



**Rys. 1.4.** Charakterystyka nacisku pomiarowego sondy obrabiarkowej Renishaw OMP40-2: a) wykres biegunowy, b) wykres przestrzenny

Zupełnie inną konstrukcją i właściwościami pomiarowe mają głowice mierzące (skaningowe). Tego typu głowice wyposażone w wewnętrzne przetworniki pomiarowe umożliwiają pomiar przemieszczenia końcówki trzpienia w każdej osi. Wskazania z przetworników głowicy są sumowane z wskazaniami liniałów pomiarowych maszyny WMP, dając wynik pomiarowy. Głowice skaningowe dzielą się na aktywne i pasywne. Pierwsze z nich posiadają wbudowane generatory nacisku pomiarowego, których rolą jest kompensacja ugięć trzpienia i zapewnienie stałej siły nacisku pomiarowego. Głowice pasywne nie posiadają generatorów siły, a nacisk pomiarowy wynika bezpośrednio z układu sprężyn płasko-równoległych lub membranowych.

Badania nacisku pomiarowego głowic skaningowych, w ramach realizacji grantu [134] zbudowano koleje stanowisko badawcze (rys. 1.5), którego autor był współtwórcą.



**Rys. 1.5.** Widok stanowiska badawczego do badania nacisku pomiarowych głowic skaningowych WMP: a) widok ogólny stanowiska, b) widok układu pozycjonowania i pomiaru

Stanowisko badawcze składa się z układu pomiarowego (1), komputera wraz z oprogramowaniem pomiarowym (2), wzmacniacza analogowego czujnika siły (3), sterownika nanopozycjonera 3D (4), karty akwizycji danych NI USB-6259 (5). Układ pomiarowy tworzy płytka wzorcowa (6), czujnik siły (7) Kraftsensoren Kd24s o zakresie pomiarowym  $\pm 2$  N, nanopozycjoner 3D Physik Instrimente P-611.3S o zakresie pomiarowym równym  $120 \mu\text{m}$  w każdej osi, podstawa uchylna (9) o zakresie pozycjonowania kąтового  $\pm 180^\circ$  oraz stolik obrotowy (10) o zakresie obrotu  $360^\circ$ .

Pomiar nacisku pomiarowego głowicy odbywa się w trybie pomiaru skaningowego prostoliniowości płytki wzorcowej. Badanie może odbywać się bez przemieszczania płytki wzorcowej lub z kontrolowanym przemieszczeniem płytki wzorcowej w kierunku normalnym do jej powierzchni. W ten sposób symuluje się geometrię mierzonej powierzchni. Zmiana amplitudy i częstotliwości sygnału sterującego pozwala dowolnie kształtować symulowaną powierzchnię pomiarową. W trakcie pomiaru rejestrowany jest nacisk pomiarowy. Zmieniając kątową orientację takiego układu pomiarowego istnieje możliwość wykonania badania przestrzennej charakterystyki nacisku pomiarowego z uwzględnieniem efektów dynamicznych wprowadzanych przez układ napędowy maszyny.

Na rys. 1.6 przedstawiono przykładową charakterystykę siły nacisku omawianej głowicy Vast Gold z trzpieniem 50 mm i ustawionym naciskiem nominalnym o wartości 50 mN. Badania wykonano bez przemieszczania płytki wzorcowej. Jednak nawet w takim przypadku podczas styku kontakt trzpienia pomiarowego z powierzchnią mierzoną ma charakter udarowy dając wartość nacisku niemal 4 krotnie większą od wartości zadanej. Po zrealizowanym najeździe rozpoczyna się proces pomiaru skaningowego, a średnia wartość nacisku pomiarowego odpowiada zadanej w oprogramowaniu

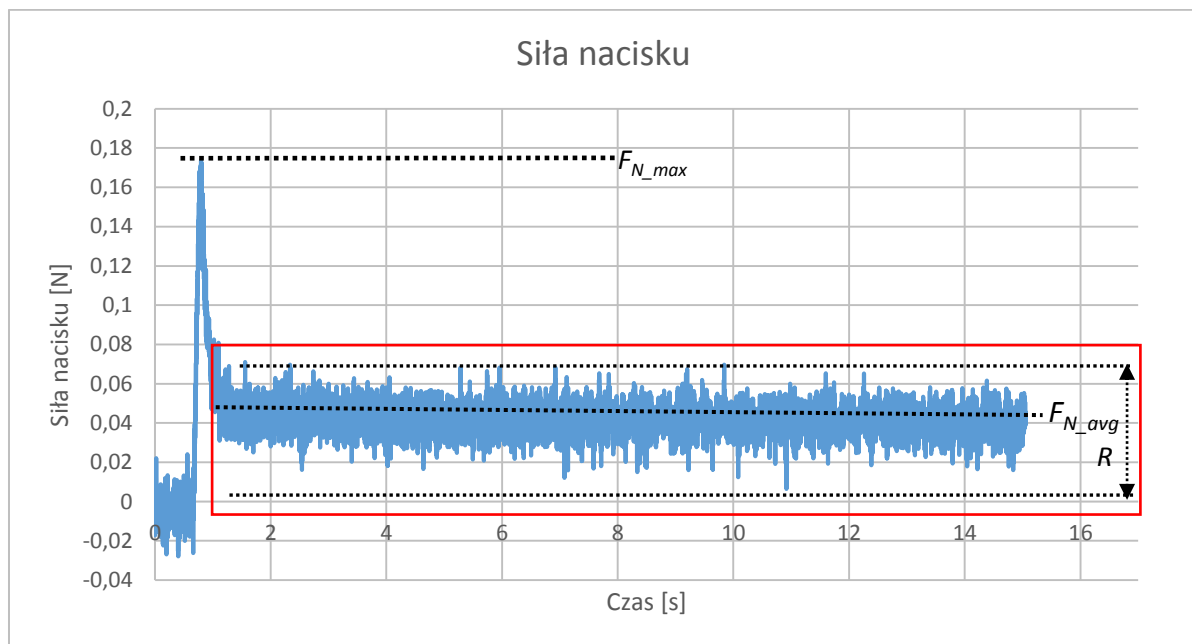
pomiarowym. Proces skaningu stykowego w kontekście działania sił sparametryzowano zgodnie z wykresem przedstawionym na rys. 1.6. Parametrami opisującymi proces skaningu sondą stykową w odniesieniu do nacisku pomiarowego są wartość maksymalna uzyskiwana podczas kontaktu z mierzonym elementem, wartość średnia w trakcie procesu skanowanie a także rozstęp siły nacisku.

Na rys. 1.6 zastosowano następujące oznaczenia:

$F_{N,max}$  - siła maksymalna,

$F_{N,avg}$  - siła średnia liczona dla ustabilizowanego fragmentu wykresu,

$R$  - rozstęp wyników dla ustabilizowanego fragmentu wykresu.



**Rys. 1.6.** Wykres nacisku pomiarowego głowicy Vast Gold z trzpieniem 50 mm i ustawionym naciskiem nominalnym o wartości 50 mN

Badania nacisku pomiarowego wykonano również dla symulowanej zmienności krzywizny mierzonego elementu. W tym celu płytka wzorcowa wykonywała przemieszczenie o amplitudzie 50  $\mu\text{m}$  i częstotliwości 0,5 Hz w kierunku wektora normalnego do płaszczyzny pomiarowej. Celem tego badania było określenie stabilności nacisku pomiarowego w trakcie pomiaru skaningowego. Na rys.

1.7 zastosowano następujące oznaczenia:

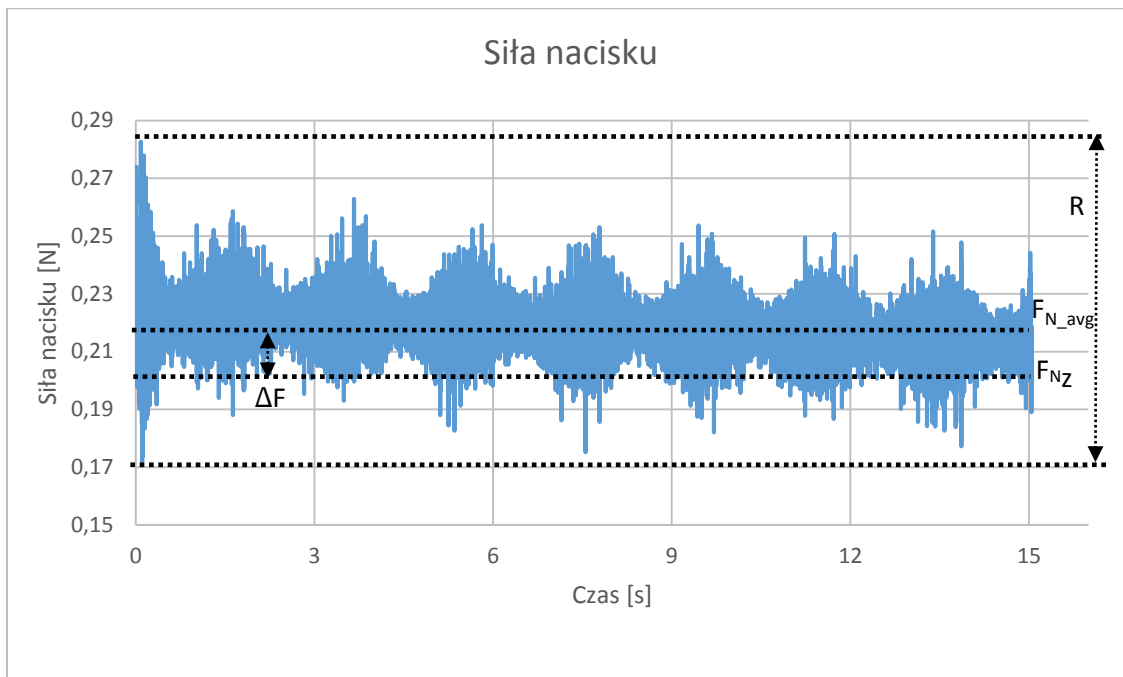
$F_{N,avg}$  - siła średnia,

$R$  - rozstęp siły,

$F_{NZ}$  - zadana,

$\Delta F$  - odchylenie od siły nominalnej.





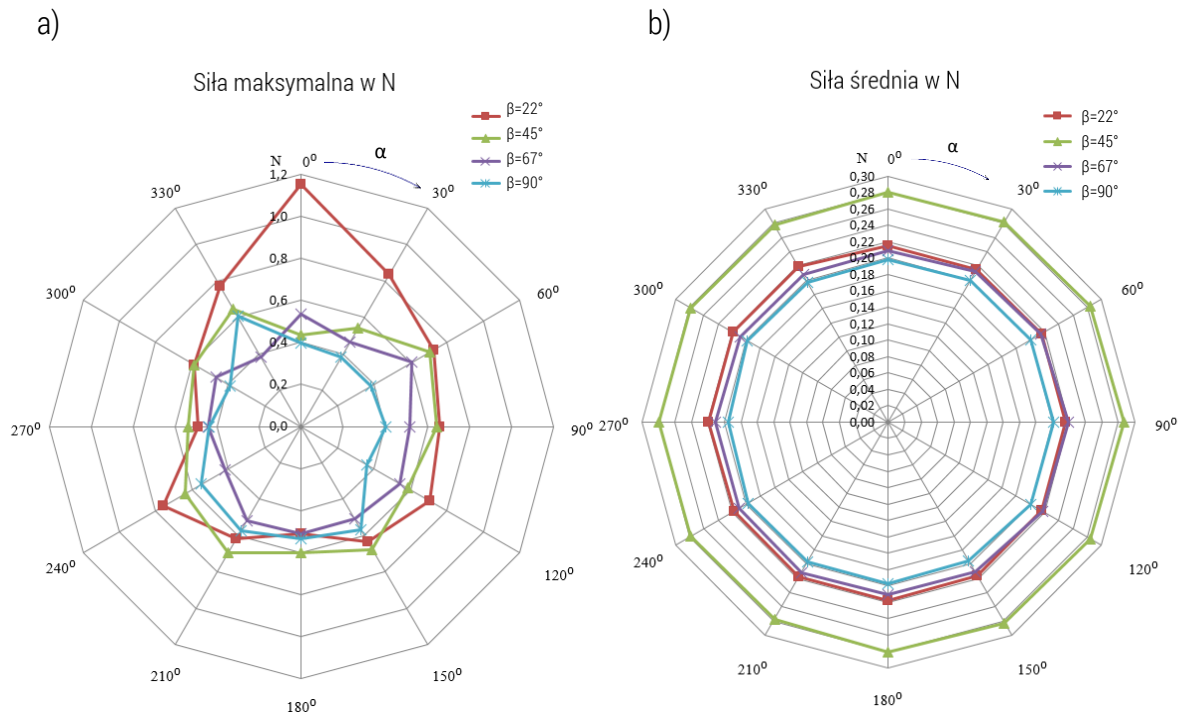
**Rys. 1.7.** Wykres nacisku pomiarowego głowicy Vast Gold z trzpieniem 70 mm i z ustawionym naciskiem nominalnym 200 mN oraz z wymuszeniem ruchu powierzchni wzorca o amplitudzie 50  $\mu\text{m}$  i częstotliwości 50 Hz

W przypadku ustawień stanowiska dla których nanopozycjoner wykonywał drgania nie uzyskano wartości siły przy zderzeniu trzpienia z powierzchnią płytki, ponieważ drgania nanopozycjonera były inicjowane po zetknięciu trzpienia w powierzchnią wzorcową. Charakterystyczny dla otrzymanych wykresów był sinusoidalny kształt o okresie odpowiadającym okresowi wywoływanych drgań. Opisywany efekt niestabilności nacisku pomiarowego ma typowy charakter dynamiczny, a jego wpływ na błąd pomiaru uzależniony od parametrów skaningu, sztywności mierzonego elementu, systemu sterowania WMP oraz nastaw napędów a także geometrii elementu mierzonego.

Na rys. 1.8a oraz 1.8b przedstawiono przestrzenne charakterystyki odpowiednio maksymalnej i średniej siły nacisku pomiarowego dla różnych kierunków pomiarowych. Pierwszy z wykresów obrazuje wartość siły maksymalnej uzyskanej podczas styku z elementem mierzonym, natomiast drugi z nich przedstawia charakterystykę przestrzenną dla siły średniej. Badania przeprowadzono dla siły nominalnej 200 mN, trzpienia o długości 70 mm i bez wymuszenia dynamicznego.

Uzyskane charakterystyki nacisku pomiarowego sondy skaningowej pokazują jak dalece zadany nacisk pomiarowy różni się od rzeczywistego szczególnie kiedy mowa o nacisku w momencie styku z elementem mierzonym. Wartości średnie nacisku pomiarowego rejestrowane w trakcie pomiaru

skaningowego są o wiele bardziej ustabilizowane dla danej płaszczyzny skanowania, jednak w dalszym ciągu odbiegają od wartości zadanej. Przedstawione zagadnienie należy przypisać do źródeł błędów głowicy (rys. 1.1) oraz sterowania WMP.



**Rys. 1.8.** Wykresy nacisku pomiarowego głowicy Zeiss Vast Gold z trzpieniem o długości 70 mm z nastawionym naciskiem nominalnym 200 mN: a) wartości maksymalne, b) wartości średnie

Wyniki badań nacisku pomiarowego uzyskane zarówno dla sond (głowic) impulsowych oraz skaningowych pokazują, że wartość nacisku pomiarowego nie jest stała co do wartości i zależna jest od kierunku pracy, zastosowanej konstrukcji sondy oraz dynamicznych aspektów pomiaru współrzędnościowego. O ile niestabilność nacisku pomiarowego ma pomijalny wpływ podczas pomiaru współrzędnościowego w przypadku elementów sztywnych, o tyle w trakcie pomiarów komponentów niesztwnych wpływ tego czynnika obok sił mocowania i grawitacji ma najistotniejszy udział w budżecie niepewności pomiaru. Oczywiście istnieje możliwość wyeliminowania wpływu nacisku pomiarowego na odkształcenia mierzonego elementu poprzez zastosowanie metod bezstykowych, jednak z uwagi na fakt, że metody stykowe są obecnie metodami dominującymi w przemyśle należy każdorazowo uwzględniać wpływ tego czynnika na wynik pomiaru w kontekście elementów niesztwnych.

W [85] Weckenmann dokonał analizy niepewności pomiaru karoserii samochodowej na WMP wyposażonej w sondę stykową. W efekcie działania siły nacisku pomiarowego o wartości nominalnej

3N, odkształcenie elementu w wyniku działania tej siły wyniosło 0,015 mm. Autor pracy [86] nie przedstawił w sposób szczegółowy zastosowanej strategii pomiaru oraz warunków podparcia niemniej jednak udowadnia on, że nacisk pomiarowy może powodować deformację mierzonego elementu. Opisany w [86] sposób pomiaru odkształcenia fragmentu karoserii w wyniku działania nacisku pomiarowego przedstawiono na rys. 1.9.



Rys. 1.9. Odkształcenie fragmentu karoserii w wyniku działania nacisku pomiarowego [86]

### 1.5. Współrzędnościowe pomiary elementów niesztynnych

Specyfikacja tolerancji wymiarowo-kształtowych projektowanych komponentów jest podstawowym narzędziem określającym zgodność wyprodukowanych komponentów z wymaganiami określonymi przez konstruktora. Obowiązujące normy ASME oraz ISO [111-113] poza wieloma, określają warunki weryfikacji kształtu i wymiarów produkowanych elementów w kontekście ich mocowania na WMP. Otóż normy te stwierdzają, że pomiar elementu zamocowanego na WMP powinien odbyć się w warunkach swobodnych czyli z pominięciem wpływu działania sił zewnętrznych na wynik pomiaru. Jednocześnie wymienione wytyczne podają wyjątki od tej reguły, a wyjątki te dotyczą warunków mocowania elementów niesztynnych. Sztywność mierzonej części jest pojęciem umownym, a przynależność konkretnego elementu do grupy elementów niesztynnych określana jest na podstawie relacji sił zewnętrznych działających na tę część i przemieszczeń, które powodują. W [1] zaproponowano podział elementów mierzonych na trzy grupy jeśli chodzi o ich sztywność. Grupa A, (rys. 1.10) obejmuje elementy sztywne czyli takie dla których oszacowane siły zewnętrzne występujące

podczas pomiaru nie powodują przemieszczenia o wartość większą niż 5% wartości pola tolerancji. Abenheim wraz z zespołem [1] nazwali tę siłę „uzasadnioną” i przypisali jej wartość 40N. W rzeczywistości siły zewnętrzne podczas pomiaru powinny korespondować z siłami mocowania działającymi na ten element zamocowany w docelowym zespole czy mechanizmie. W odróżnieniu do elementów z grupy A, te z grupy B nazywamy elementami niesztywnymi, a przemieszczenie wywołane zewnętrznymi siłami związanymi z grawitacją, mocowaniem czy naciskiem pomiarowym przekracza wartość 10% wartości pola tolerancji. Komponenty znajdujące się w tej grupie uznawane są za najbardziej kłopotliwe jeśli chodzi o weryfikację ich geometrii, ale stanowią również duże wyzwanie dla konstruktorów, którzy określają wymagania geometryczno-kształtowe z uwzględnieniem podatności mechanicznej. Równie ambitne zadanie mają przed sobą technolodzy i operatorzy odpowiedzialni za produkcję elementów z grupy B. Ostatnia grupa wyrobów to wyroby ekstremalnie niesztywne takie jak elementy gumowe, uszczelki, które ulegają bardzo dużym deformacjom w wyniku samej grawitacji. Elementy te bardzo często podlegają analizie wymiarowo kształtowej bezpośrednio po zamocowaniu w zespole, lub kontrolowane są wraz ze specjalnymi wspornikami, które odwzorowują ich kształt funkcjonalny. Pomimo faktu, że elementy z grupy C są najmniej sztywne, ich kontrola jakości nie następuje szczególnych problemów, bowiem ich łatwa deformacja jest cechą oczekiwaną gdyż elementy te często pełnią funkcję uszczelnień.

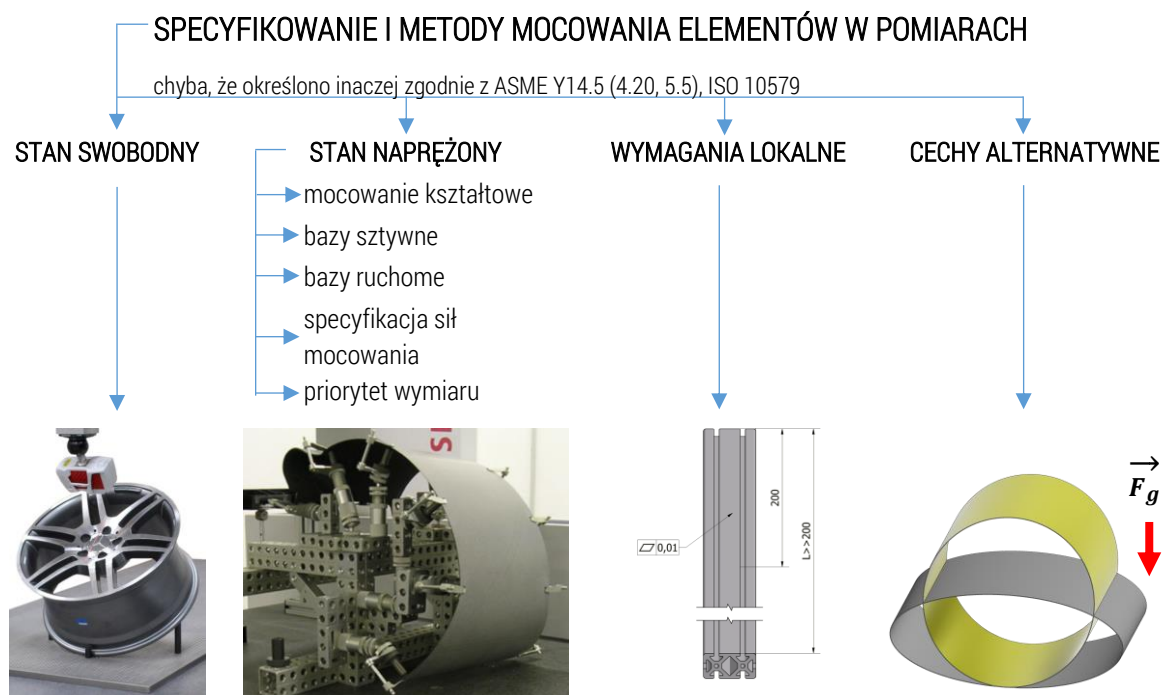


Rys. 1.10. Propozycja podziału komponentów wytwarzanych w przemyśle w zależności od ich sztywności [1]

Alternatywnie w odniesieniu do elementów z grupy C niektórzy producenci dopuszczają pomiar innych niż geometryczne cech takie jak np. ich masa.

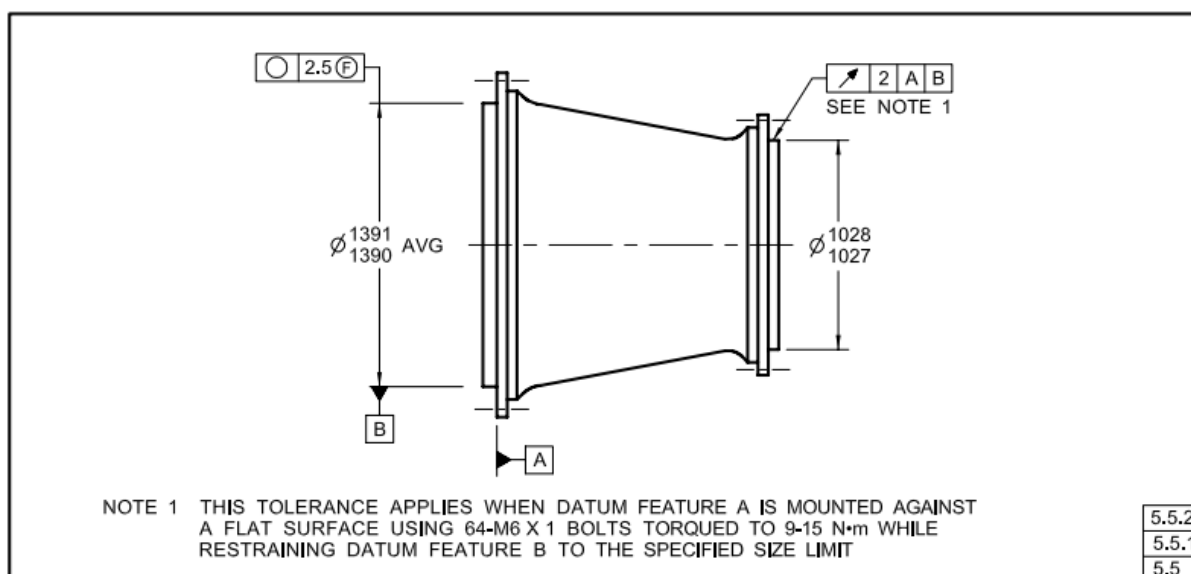
Niniejsza rozprawa dotyczy problematyki związanej z pomiarem elementów z grupy B. Typowymi reprezentantami tej grupy są elementy z przemysłu motoryzacyjnego, takie jak elementy karoserii, cienkościenne elementy tłoczone z blachy różnego przeznaczenia, elementy poszycia produkowane przez przemysł lotniczy, niektóre elementy nośne takie jak wręgi skrzydeł a także inne elementy podatne, w przypadku których błędy pochodzące od działania sił zewnętrznych posiadają istotny udział w założonej przez konstruktora tolerancji wymiarowo-kształtowej.

Obowiązujące normy ASME Y14.5 [111] oraz ISO 1101 [112] dotyczące tolerancji geometrycznych określają, że pomiar elementu na WMP powinien odbywać się w stanie swobodnym, a wyjątki od tej reguły dotyczą elementów niesztynnych (grupa B). Wyjątki te opisano w rozdziałach 4.20 oraz 5.5 normy ASME Y 14.5 oraz w normie ISO 10579 [113]. Ogólny podział metod mocowania elementów w pomiarach współrzędnościowych przedstawiono schematycznie na rys. 1.11. Metody specyfikacji czy też warunków mocowania dotyczących elementów niesztynnych można podzielić na trzy główne grupy: pomiar w stanie naprężonym, specyfikacja geometrii w ograniczonym zakresie, specyfikacja alternatywnych do geometrycznych wymagań np. masa elementu.

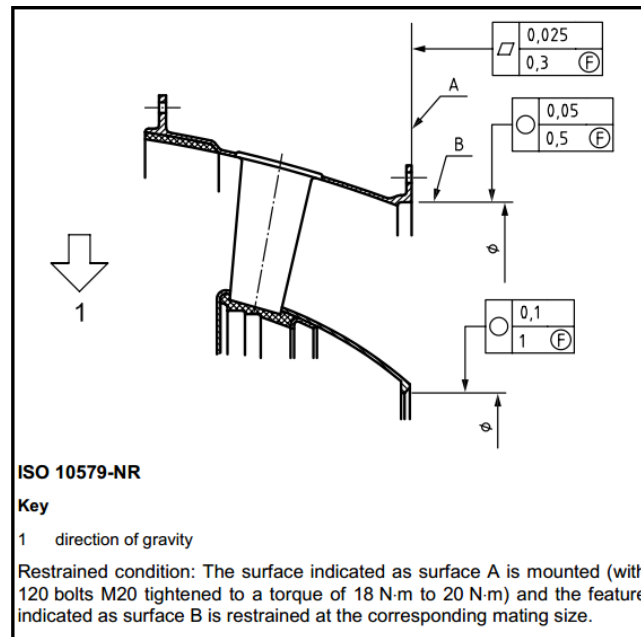


Rys. 1.11. Specyfikowanie i metody mocowania elementów w pomiarach. Podział w oparciu o [1]

Biorąc pod uwagę, że pomiar elementu nieszywnego w warunkach swobodnych daje istotnie różny wynik od spodziewanego w wyniku działania sił zewnętrznych, dopuszcza się pomiar elementu w stanie naprężonym w celu skompensowania błędów związanych z działaniem tych sił. Zewnętrzne obciążenie elementu nieszywnego w trakcie jego pomiaru powinno odwzorowywać jego relację z innymi elementami w finalnym zespole, stąd przyłożone siły powinny być zgodne co do wartości i miejsca przyłożenia z siłami działającymi na mierzoną część w zespole. Rolą konstruktora, poza określeniem wymagań geometryczno-kształtowych jest w tym wypadku dodanie na rysunku wykonawczym opisu „ISO 10579-NR” (*skrót NR z ang. Non-Rigid*). Zdarza się, że w ramach jednego komponentu mamy do czynienia z obszarami zarówno sztywnymi jak i nieszywnymi, wówczas zgodnie z ASME Y14.5 część 3.3.20 oraz 5, wprowadza się modyfikator  $\text{\textcircled{F}}$ , który informuje, że dana cecha podlega kontroli w stanie swobodnym (z ang. *Free state*). Zarówno norma ISO 10579 jak również ISO 1101 nakładają dodatkowo na konstruktora obowiązek określenia warunków mocowania elementu w tym jego orientacji względem siły grawitacji. Przykład określenia wymagań geometryczno-kształtowych w odniesieniu do elementu nieszywnego przedstawiono na rys. 1.12 oraz 1.13.

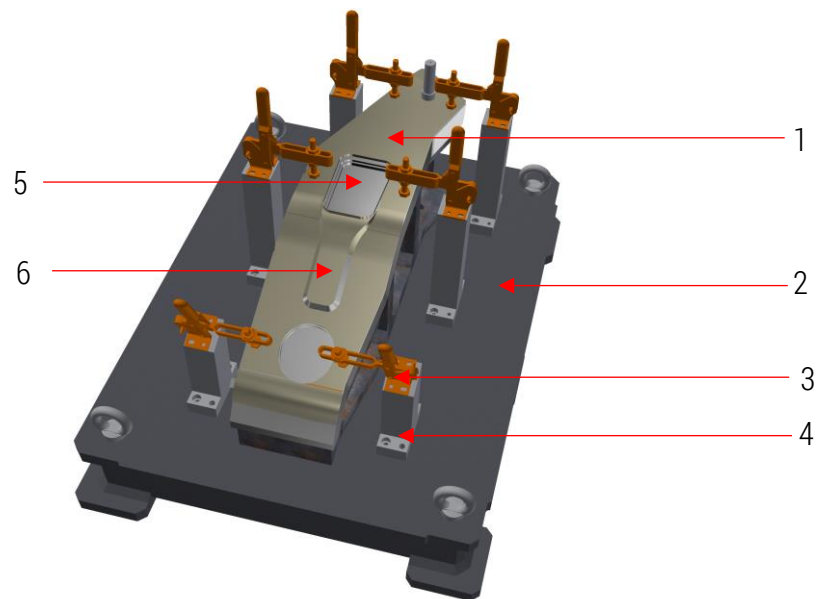


Rys. 1.12. Przykład specyfikacji geometrii wyrobu z uwzględnieniem warunków mocowania [ 110]



Rys. 1.13. Przykład specyfikacji geometrii wyrobu z uwzględnieniem warunków mocowania [ 113]

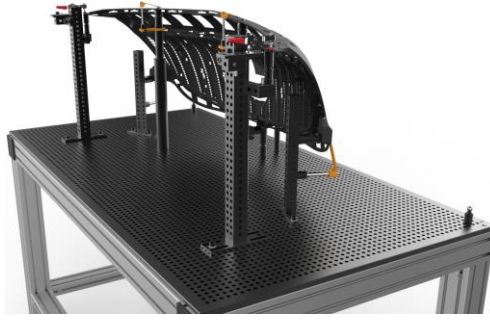
Pomiar elementu niesztynnego w warunkach naprężenia można zrealizować na różne sposoby (schemat przedstawiono na rys. 1.11). Pierwszym z nich jest zamocowanie elementu niesztynnego na dedykowanym mocowaniu kształtowym odwzorowującym kształt nominalny mierzonego elementu. Tego typu rozwiązanie jest bardzo kosztowne jeśli chodzi o wyprodukowanie, ponieważ błąd wykonania nie może przekraczać 10% wartości pola tolerancji w odniesieniu do kontrolowanego elementu. Dodatkowo mocowania kształtowe wymagają właściwego nadzoru i okresowej kalibracji. Tego typu elementy stosowane są w pomiarach małych i średnich komponentów z uwagi na ich skomplikowany kształt, znaczną masę oraz wysokie koszty produkcji. Mocowanymi w ten sposób elementami są fragmenty kokpitów produkowanych przez firmy z przemysłu motoryzacyjnego, elementy z tworzyw sztucznych, fragmenty karoserii oraz poszyc samolotów czyli części tłoczone. Mocowanie kształtowe znajdzie również swoje zastosowanie w odniesieniu do elementów obrabianych na maszynach CNC, lub elementach giętych takie jak np. przewody paliwowe. Przykład mocowania kształtowego przedstawiono na rys. 1.14. Element mierzony (6) ustawiony jest na korpusie (5) odwzorowującym jego kształt. Zarówno korpus jak i podpory (4) docisków (3) ustawione są na palecie (2). Element mierzony jest dociskany przez zespół docisków (3) na korpusie kształtowym a następnie mierzony na WMP.



Rys. 1.14. Przykład mocowania kształtowego

Elementy nieszttywne o większych gabarytach takie jak elementy tłoczone z blachy można także mocować na specjalnych ramach wyposażonych w kołki, których pozycje kalibrowane są z wykorzystaniem WMP. W przeciwieństwie do poprzedniego rozwiązania nie mamy tu do czynienia z kompletną powierzchnią, do której dociskamy mierzony element, a określoną liczbę kołków, które w pierwszej kolejności odwzorowują bazy rysunkowe, ale ich liczba jest większa niż wymagana w przypadku elementów sztywnych. Klasyczna strategia 3-2-1 tworzenia układów współrzędnych na WMP znana z mocowania elementów sztywnych nie może być zastosowana w przypadku elementów nieszttywnych, gdyż z uwagi na wpływ grawitacji i nacisku pomiarowego elementy te ulegałyby znacznemu odkształceniu. Zwiększona liczba elementów podporowych i dociskowych powoduje, że element mierzony jest w stanie przeszttywnionym i z punktu widzenia teorii mechaniki jest układem statycznie niewyznaczalnym [106,107]. Warto także wspomnieć, że istotnym aspektem z punktu widzenia powtarzalności i odtwarzalności pomiaru z zastosowaniem metody sztywnych baz jest określenie właściwej kolejności dociskania elementu do podpór i konsekwentne jest przestrzeganie [19,59]. Na rys. 1.15 przedstawiono widok mocowania elementu nieszttywnego wykonanego z blachy cienkościenniej. Element mierzony poddany jest naprężeniu wprowadzonym od układu podpór i docisków. W praktyce przemysłowej podpory kolumnowe pozycjonowane są w taki sposób, aby odwzorowywać bazy rysunkowe i stanowią uproszczoną wersję mocowania kształtowego z rys. 1.14.

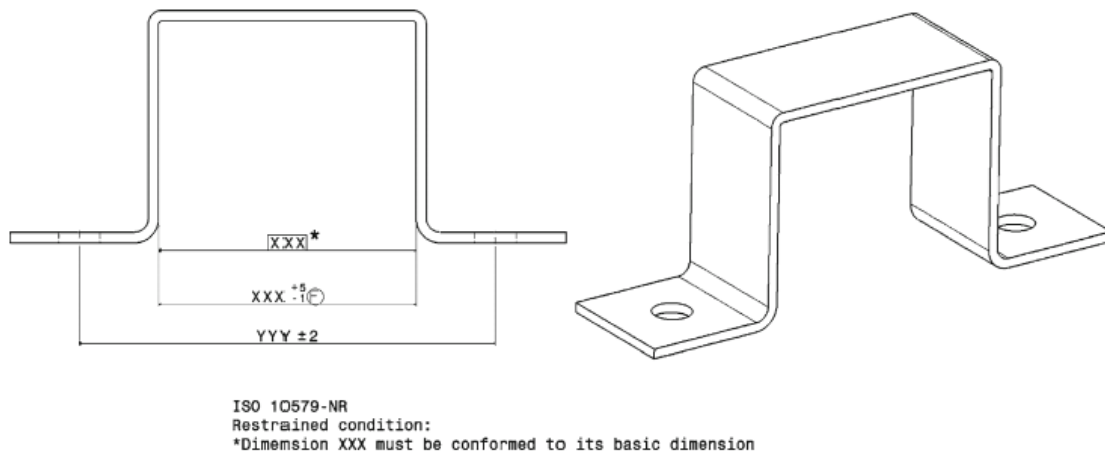




**Rys. 1.15.** Mocowanie elementu w stanie naprężonym z zastosowaniem podpór i docisków [119]

Bardzo podobną metodą mocowania elementów niesztynnych jest metoda z zastosowaniem baz ruchomych [113,117]. W takim rozwiązaniu sztywne bazy korespondujące z dokumentacją techniczną dokładnie określają układ bazowy, natomiast bazy ruchome dodatkowo stabilizują element mierzony w trakcie pomiaru. Metoda z bazami ruchomymi nie jest zarezerwowana jedynie dla elementów niesztynnych i jest popularna również w odniesieniu do elementów z grupy A (rys. 1.10). Zaletą tej metody jest jej większa użyteczność w kontekście powtarzalności i odtwarzalności gdyż kolejność wykorzystania baz ruchomych nie wpływa na te parametry.

Czasami zdarza się, że niektóre części niesztynne posiadają zawężone pola tolerancji dla pojedynczych cech. Są to tak zwane cechy krytyczne, które wymagają dokładniejszej metody pomiaru i szczególnej uwagi w trakcie jego realizacji, gdyż cechy te w sposób szczególny determinują funkcjonalność części w zespole. W przypadku takich elementów dopuszcza się wprowadzenia naprężenia w taki sposób, aby cecha krytyczna znajdowała się w środku pola tolerancji. Taki wymiar traktowany jest wówczas jako wymiar teoretycznie dokładny, natomiast wszystkie pozostałe cechy są mierzone z uwzględnieniem stanu naprężenia. Praktyczna realizacja takiego mocowania w przypadku np. wymiarów wewnętrznych może odbyć się z zastosowaniem chociażby płytki wzorcowej o wymiarze nominalnym zgodnym z wymiarem zawartym w dokumentacji dla mierzonej cechy (rys. 1.16).



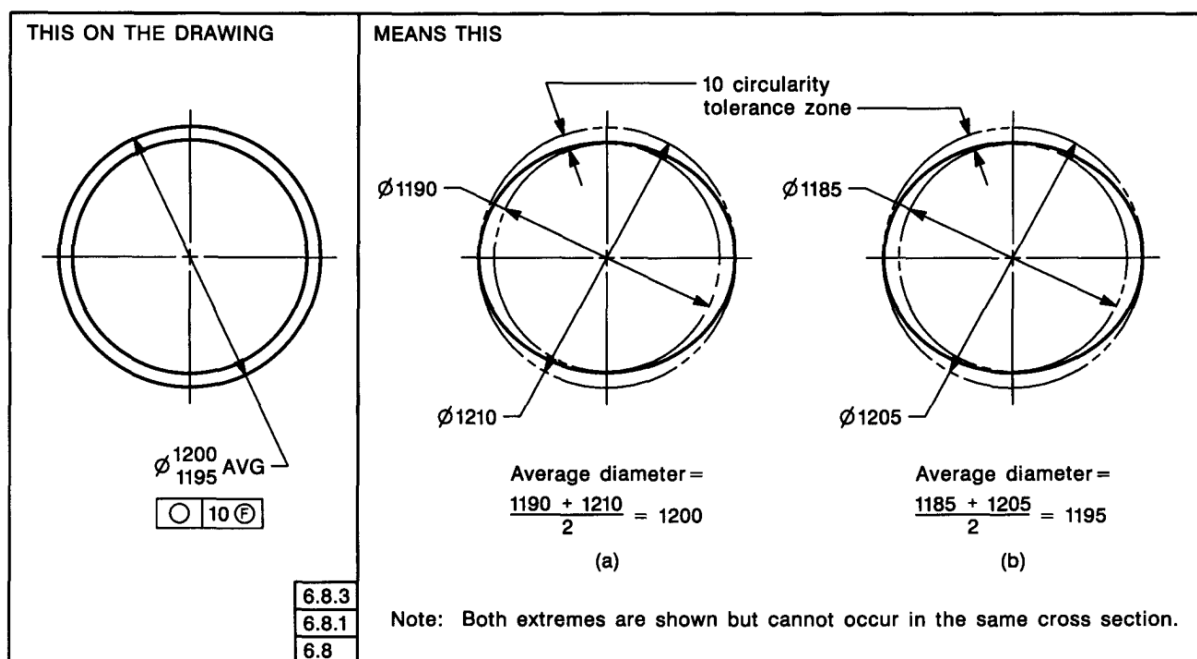
Rys. 1.16. Mocowanie elementu w stanie naprężonym. Wymuszenie wymiaru teoretycznie dokładnego [112]

Alternatywą dla wyżej opisanych metod mocowania elementów niesztynnych jest metoda z wykorzystaniem dedykowanego systemu mocowania, która poza wymaganiami geometrycznymi zawiera także informację o dopuszczalnej sile mocowania określonej przez konstruktora w dokumentacji technicznej dla danego wyrobu. Tego typu podejście dedykowane jest w stosunku do dużych komponentów, gdzie znana jest siła mocowania gotowego wyrobu w zespole np. siła 1500N/m. Warunki te muszą zostać odtworzone w trakcie pomiaru, a po zaimplementowaniu określonej siły mierzony element przyjmuje kształt funkcjonalny, aby następnie zostać poddany pomiarowi.

W praktyce spotyka się także komponenty, dla których zastosowanie opisanych metod jest nieosiągalne lub zbyt kosztowne. Elementy te jak np. wszelkiego rodzaju elementy ekstrudowane w ujęciu ogólnym mogą być traktowane jako elementy niesztynne, natomiast w ograniczonych obszarach (np. na pewnej długości) ich sztywność jest na duża, że pozycjonują się one w grupie A. Wówczas konstruktor określa obszar, długość etc. oraz wymagania wymiarowe lub kształtowe, jakie powinno być spełnione w ramach określonej przestrzeni, w której element ten traktowany jest jako sztywny, co pozwala na zachowanie pomiaru powtarzalnego i odtwarzalnego.

W przypadku elementów o profilu zaokrąglonym dopuszcza się tolerowanie cech takich jakich kąt, cięciwa lub długość łuku zamiast pomiaru np. promienia czy średnicy. W takiej sytuacji element mierzony jest w warunkach swobodnych bez zastosowania dodatkowego mocowania, a spełnienie wymagań odnośnie długości łuku, kąta lub cięciwy zapewnia, że element będzie mógł zostać zamontowany w zespole. Alternatywnie norma ASME Y14.5 w rozdziale 2.7 i 6.83 opisuje przypadek

specyfikowania elementu nieszywnego w postaci cienkościennego walca, który w wyniku grawitacji odkształca się przyjmując kształt elipsy. W przypadku takiego elementu toleruje się wartość średnią średnicy, przy czym wymaga się, aby wymiar nominalny był oznaczony skrótem AVG. ISO 10579 wymaga natomiast, aby w dokumentacji rysunkowej znalazł się zapis „średnia arytmetyczna” w odniesieniu do sprawdzanej cechy. Na rys. 1.17 przedstawiono przykład tolerowania walcowego elementu nieszywnego poprzez określenie średniej wartości średnicy.



Rys. 1.17. Specyfikacja nieszywnego elementu walcowego w oparciu o wartość średnią średnicy [111]

## 1.6. Istniejący stan wiedzy

Problematyka metod mocowania zarówno elementów sztywnych jak i nieszywnych jest przedmiotem zainteresowania wielu naukowców z dziedziny budowy i eksploatacji maszyn. Zakres badań nie ogranicza się jedynie do kwestii związanych z metrologią współrzędnościową, ale dotyczy on również technik wytwarzania [22,24,29,30,50,60,61,64,66,67,80,84,99] oraz montażu zespołów składających się z części nieszywnych [21,54-56,82]. Istniejące publikacje wskazują, że obok błędów dynamicznych o geometrycznych samej obrabiarki [43,44], istotne są także błędy wykonania pochodzące od systemu mocowania. Bi i Zhang [17,26,100] szczegółowo opisali potrzebę opracowania modułowych i uniwersalnych systemów mocowań stosowanych w produkcji. Opisali oni także typowe konstrukcje, oraz trendy w tym zakresie uwzględniając aspekty zjawiska dynamiczne

towarzyszące obróbce mechanicznej. Gonzalo w [29] opracował system aktywnego mocowania elementu na obrabiarce poprzez zastosowanie czujników siły do adjustacji i kontroli sił reakcji działających na detal w trakcie obróbki. W pracach [16,58] opisano statystyczną metodę FASTA, wykorzystującą analizę elementów skończonych i kowariancję przemieszczeń nodalnych, umożliwiając oszacowanie sił, przemieszczeń oraz naprężeń występujących w elementach nieszywnych po montażu. Samo zagadnienie określania tolerancji szczególnie kształtu w kontekście elementów nieszywnych wymaga dalszych prac badawczych z uwagi na duży wpływ działania sił zewnętrznych [55,56]. Jak pokazały wyniki uzyskane przez zespół Abenhaima w [2] wpływ na powtarzalność wyników pomiaru elementu nieszywnego jest silnie uzależniona od konfiguracji i liczby podpór.

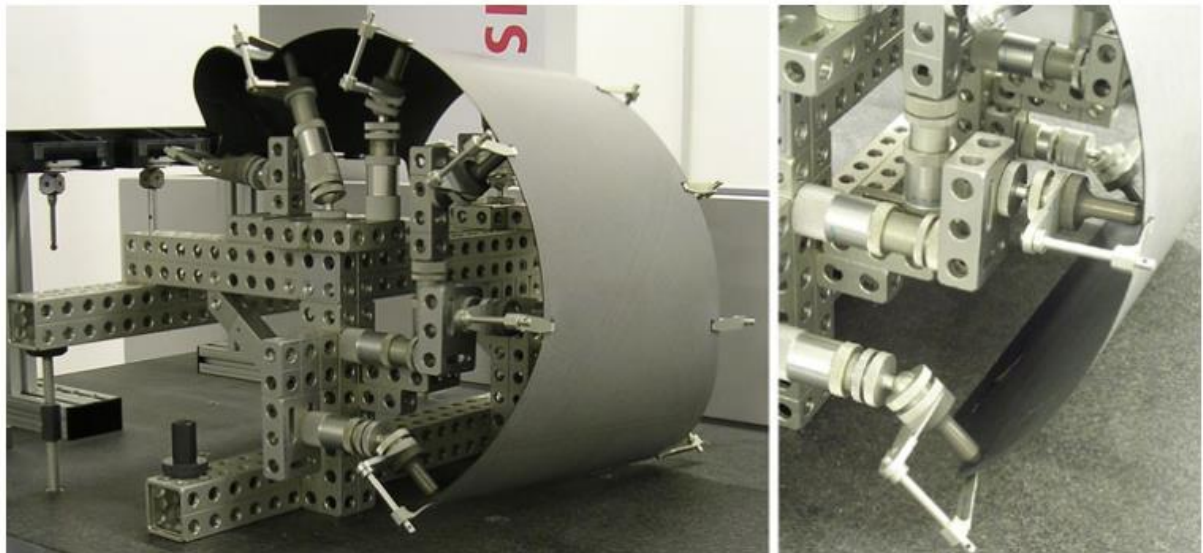
W odniesieniu do kontroli wymiarowo-kształtowej elementów nieszywnych na WMP proponowane rozwiązania bazują na wytycznych norm ISO 10579 oraz ASME Y 14.5. Metody te można podzielić na metody mechaniczne oraz wirtualne. Pierwsze z nich zakładają użycie specjalnych systemów mocowań (rys. 1.14) kształtowych (odzworowujących kształt mierzonego elementu) lub dedykowanych ram z kołkami, których pozycje kalibrowane są na WMP. Stosuje się także mocowania/przyrządy, wykonane bardzo dokładnie na wymiar odpowiadający wartości nominalnej sprawdzanej cechy. W opisie do metod z rys. 1.11 wskazano także metodę siłową, gdzie określa się konkretne siły, jakich należy użyć, aby zamocować element do pomiaru. W praktyce metody ze zdefiniowaną siłą mocowania realizowane są w sposób wirtualny.

Mechaniczne mocowania kształtowe, które podlegają adjustacji w celu odzworowania punktów charakterystycznych w oparciu o dane nominalne, stanowią pewnego rodzaju wzorce, które nie tylko orientują mierzony element w przestrzeni, ale także w wyniku sił docisku wymuszają zmianę geometrii elementu nieszywnego. Takimi wzorcami mogą być mocowania mechaniczne lub niematerialne w postaci brył nominalnych CAD. Metody wirtualne są obecnie najdynamiczniej rozwijanymi gdyż nie wymagają stosowania kosztownych elementów mechanicznych, a ich obsługa mniej czasochłonna. Model CAD elementu nie wymaga także kalibracji, która jest konieczna w przypadku mocowań mechanicznych.

## 1.7. Mechaniczne metody mocowania elementów niesztynnych

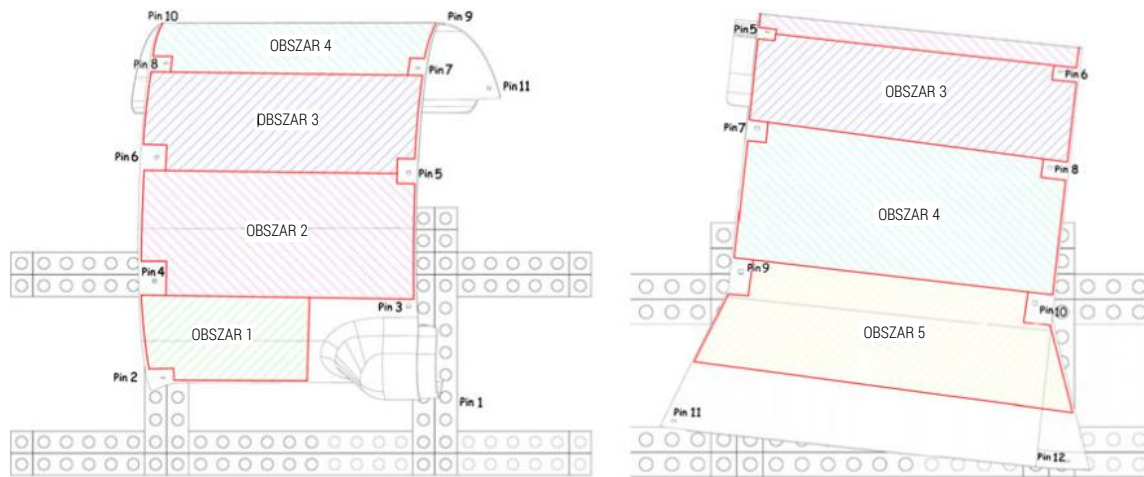
Dynamiczny rozwój metod mocowania elementów niesztynnych dotyczy głównie elementów z grupy B przedstawionych na schemacie rys. 1.10. Elementy te pełnią często odpowiedzialne funkcje jak np. wręgi skrzydeł samolotów, fragmenty poszycia kadłubów, lub fragmenty karoserii. Elementy z grupy C podlegają kontroli po zmontowaniu lub z wykorzystaniem dedykowanych wsporników, lub podlegają kontroli w zakresie innych cech takich jak waga lub szczelność, którą muszą zapewnić po montażu.

W 2010 roku Ascione i Polini opublikowali pracę [12]. Przedstawiono w niej metodę pomiaru fragmentu osłony wyciągarki stosowanej w helikopterze i wykonanej ze specjalnego kompozytu. Autorzy wskazują, że komponent ten po procesie produkcji i demontażu z podlega znacznej deformacji w wyniku relaksacji naprężeń wewnętrznych. Podobnie element ten jest wysoce podatny na działanie grawitacji oraz wszelkich sił zewnętrznych podczas mocowania do pomiaru. W celu poprawnego zamocowania osłony do pomiaru autorzy wykorzystali oprogramowanie do modelowania CAD 3D, w którym przy użyciu brył komercyjnie dostępnych podpór i docisków zaprojektowali dedykowaną ramę na podstawie nominalnej bryły CAD mierzonego elementu. Autorzy dokonali również przeglądu dostępnych modułowych systemów mocowań wskazując na ich uniwersalność i elastyczność w stosunku do mocowań kształtowych. Adjustacja zaprojektowanego systemu mocowania odbyła się przy wykorzystaniu WMP i ręcznego ustawienia podpór na podstawie danych pomiarowych. Po zamocowaniu elementu na dedykowanej ramie wykonano pomiar z zastosowaniem skaningowej sondy stykowej z nominalnym naciskiem pomiarowym o wartości 0,1 N. Autorzy zwrócili uwagę, że wpływ nacisku pomiarowego był pomijalny. Teorię tę potwierdzili stosowną analizą. Zamocowanie elementu w taki sposób i wprowadzenie go w stan przesztyniony istotnie ogranicza wpływ nacisku pomiarowego na deformację, co nie wyklucza większego wpływu tego czynnika na deformację w przypadku zastosowania mniejszej liczby podpór, lub innej ich lokacji. Na rys. 1.18 przedstawiono widok osłony kompozytowej zamocowanej na skalibrowanych podporach [12].



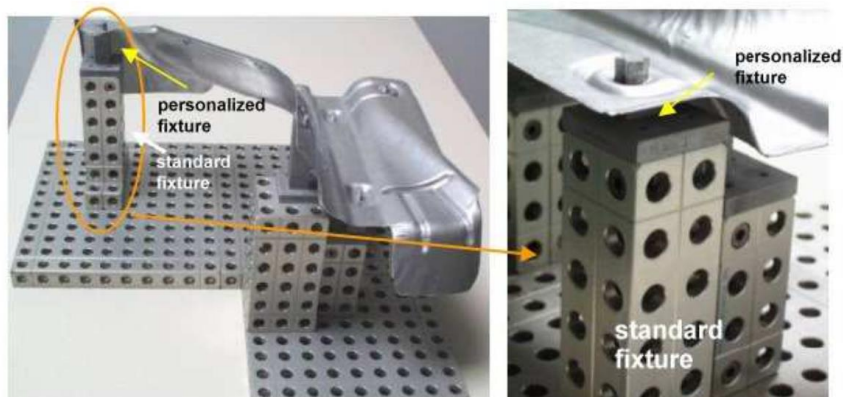
**Rys. 1.18.** Mocowanie cienkościennej osłony wciągarki helikoptera na skalibrowanej ramie [12]

Mierzony element został podzielony na 5 powierzchni widocznych na rys. 1.19, a pomiar w celu oceny powtarzalności został wykonany pięciokrotnie. Uzyskany rozstęp wskazań wynosi od 0,0019 mm do 0,0123 mm, a odchylenie standardowe dla powierzchni 1-5: 0,0085 mm. Autorzy nie opisali wpływu kolejności dociskania na wynik pomiaru. Stosunkowo dobra powtarzalność jest niewątpliwie podyktowana faktem, że rama, na której został zamocowany element, była skalibrowana, a jej sztywność i stabilność wymiarowa podczas każdorazowego mocowania była wysoka. Obszary, o najlepszym rezultacie jeśli chodzi o powtarzalność to obszary 1 oraz 5. W obszarach tych wykorzystano otwory pokrywy jako elementy bazowe dzięki czemu komponent w tych obszarach mógł być mocowany bardziej stabilnie i powtarzalnie. Zaproponowana metoda jest zgodna z wytycznymi ISO 10579 oraz ASME Y14.5 jednak polega ona na odwzorowaniu kształtu mocowania nie dając wiedzy na temat naprężeń wewnętrznych wywołanych tym mocowaniem. Dobra powtarzalność uzyskanych wyników nie uwzględnia każdorazowej ręcznej adjustacji podpór, których lokalizacja z pewnością różni się od założonej w projekcie CAD i obarczona jest błędem związanym z pomiarem na WMP.



Rys. 1.19. Sposób podziału elementu mierzzonego na obszary 1-5 [12]

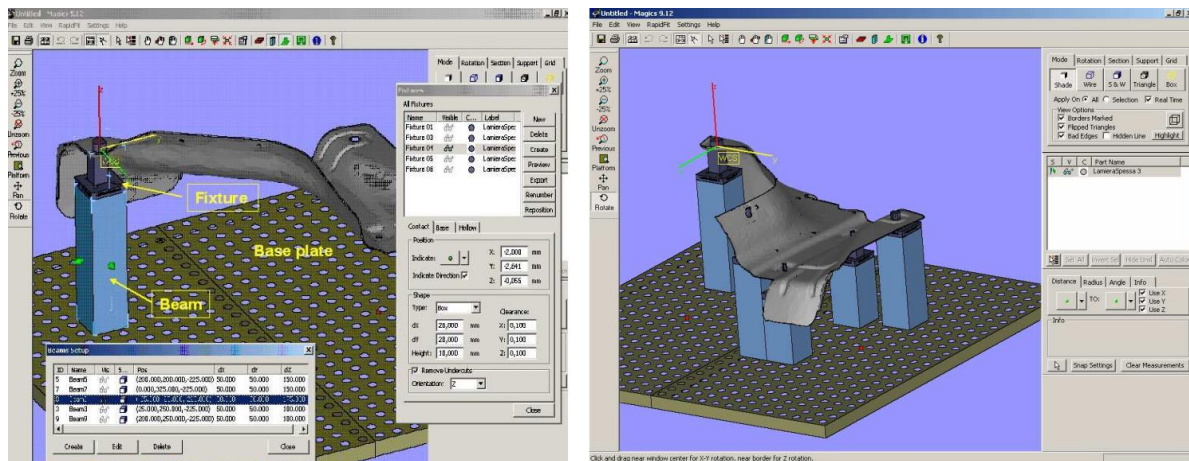
Autorzy pracy [33] zaproponowali metodę hybrydową w zastosowaniu techniki inżynierii odwrotnej do wykonania dedykowanych podpór kształtowych. Metoda polega na wykonaniu pomiaru skaningowego głowicą triangulacyjną elementu, którego geometria jest zaakceptowana i zgodna wymaganiami rysunkowymi. Na podstawie chmury punktów wykonuje się tzw. „rzeczywisty model CAD” elementu. Model ten następnie jest wykorzystywany do addytywnej produkcji podpór (druk 3D), których kształt odwzorowuje określone obszary mierzzonego elementu. Wykonane w ten sposób elementy stanowią wkładki kształtowe, które mocowane są do komercyjnych podpór słupkowych. Na rys. 1.20 przedstawiono widok mocowania hybrydowego wykorzystującego wkładki kształtowe.



Rys. 1.20. Widok mocowania hybrydowego [33]

Projektowanie hybrydowego systemu mocowania odbywa się przy udziale oprogramowania wspomagającego proces projektowania CAD (rys. 1.21).

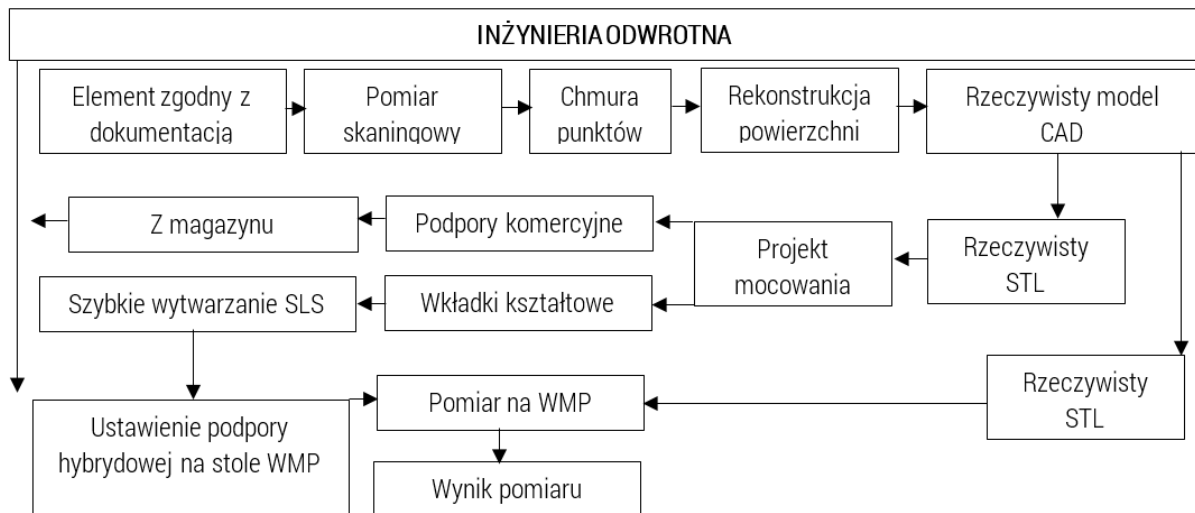




Rys. 1.21. Proces projektowania mocowania hybrydowego z zastosowaniem oprogramowania CAD [33]

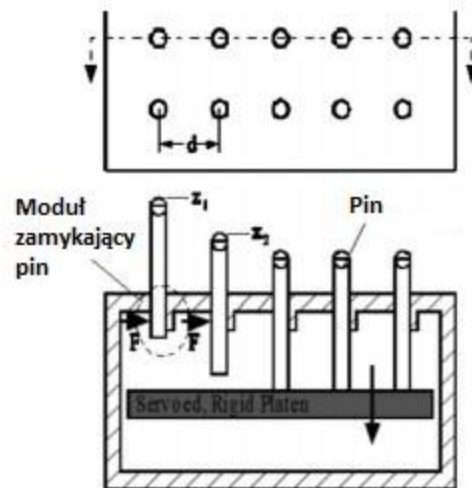
Po zaprojektowaniu mocowania hybrydowego dobierane są komercyjnie dostępne podpory słupkowe, a elementy dedykowane wykonywane są z wykorzystaniem technologii selektywnego spiekania laserowego ( SLS z *ang. Selective Laser Sintering* ) proszku Pa-Al. W celu weryfikacji geometrii elementu tłoczonego autorzy zdecydowali się na pomiar stykowy z zastosowaniem stykowej głowicy pomiarowej zainstalowanej na maszynie Global DEA wskazując, że jest to metoda bardziej dokładna od metod optycznych, a także odporna na właściwości refleksyjne mierzonej powierzchni. Zarejestrowano 170 punktów pomiarowych powtarzając tę procedurę 6-krotnie. Na tej podstawie określono uśrednione współrzędne każdego ze 170 punktów pomiarowych i porównano je z punktami nominalnymi X,Y,Z. Autorzy pracy nie określili użytej strategii pomiarowej oraz warunków testu powtarzalności, natomiast na podstawie uzyskanych błędów wskazali przynależność komponentu do klasy dokładności IT zgodnie z wytycznymi normy EN 20286 (zastąpionej przez EN ISO 286-1:2010). Analiza uzyskanych wyników nie odnosi się bezpośrednio do systemu mocowania, natomiast sama idea mocowania hybrydowego wydaje się być interesującą, ponieważ stanowi połączenie stabilnego mocowania kształtowego z uniwersalnym mocowaniem modułowym. Warto byłoby jednak poddać pod dyskusję fakt zastosowania technologii SLS w procesie produkcji wkładek, gdyż metoda ta nie zapewnia wysokiej dokładności wykonania geometrii tych elementów. Przyjmuje się, że technologia ta jeśli chodzi o tolerancje wykonania oscyluje wokół wartości  $\pm 0,05$  mm. Autorzy pracy wykonywali warstwy o grubości 0,15 mm, co dyskwalifikuje tę metodę w kontekście kontroli elementów precyzyjnych. Na rys. 1.22 przedstawiono schemat tworzenia hybrydowego systemu mocowań.





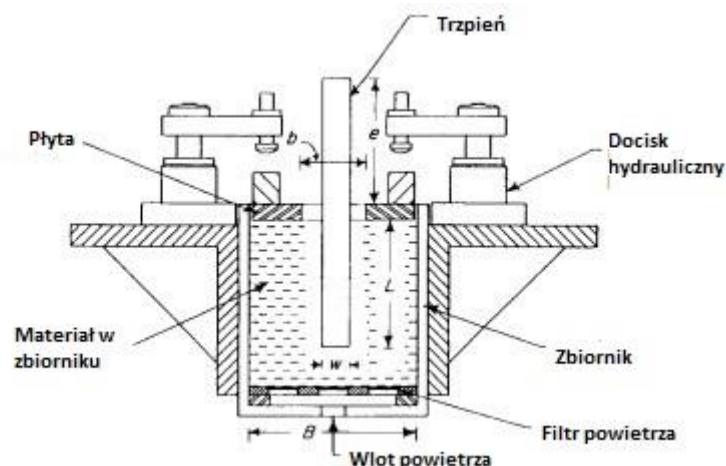
**Rys. 1.22.** Procedura pomiaru powierzchni swobodnych z zastosowaniem podpór hybrydowych

Na rys. 1.23 przedstawiono schemat aktywnego mocowania opracowanego przez Walczyka [83]. Mocowanie to posiada płytą dociskową poruszającą się w pionie, która przesuwa wszystkie piny do skrajnej - górnej pozycji. W momencie obniżania płyty poszczególne piny są tymczasowo zatrzymywane w założonej wcześniej pozycji przez siłownik bądź sprężynowy solenoid, który działa na nie siłą boczną. Gdy pozycja wszystkich pinów (kołków) jest już ustalona następuje ich zablokowanie przez główny zacisk w postaci płyty poruszającej się w poziomie. Zaproponowana konstrukcja pozwala na odwzorowanie mierzonej powierzchni poprzez wykorzystanie ruchomych podpór. Jest to zatem podejście analogiczne do wcześniej opisanych. Łoże podpór co prawda dostosowuje się do geometrii mierzonego elementu, jednak metoda ta nie uwzględnia wpływu grawitacji na zmianę geometrii wyrobu.



Rys. 1.23. Aktywne mocowanie kołkowe [83]

Kolejnym przykładem mechanicznego mocowania elementów niesztynnych jest zastosowanie metody mocowania na podstawie fluidalnej [47,79]. Podpora w postaci pinu łożyskowana jest w obudowie podpory w sposób ślizgowy i ma możliwość swobodnego ruchu w kierunku osiowym. W momencie wprowadzenia przepływu powietrza przez porowate dno, znajdujące się powyżej cząsteczki zaczynają zachowywać się jak płyn, umożliwiając dopasowanie się matrycy pinów do powierzchni mierzonego elementu. W momencie wyłączenia dopływu powietrza na skutek działania siły grawitacji zmienia się stan skupienia medium w zbiorniku powodując zablokowanie pozycji osiowej podpór. Jako media stosowane są także substancje zawierające zawiesinę metaliczną, a zmiana stanu skupienia (blokowanie pozycji podpór) odbywa się poprzez wprowadzenie pola magnetycznego.



Rys. 1.24. Schemat mocowania fluidalnego

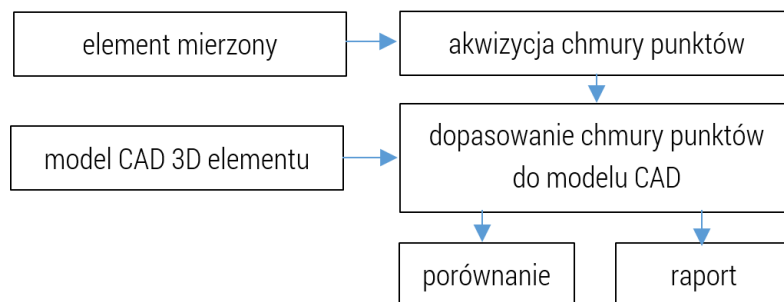
Koncepcja mocowania fluidalnego jest bardzo podobna to tej zaproponowanej przez Walczaka w [47]. Metody te w ogólnym spojrzeniu różnią się sposobem blokowania pozycji matrycy pinów. Obydwie metody nie uwzględniają wpływu grawitacji na odkształcenia elementów mierzonych zapewniając jedynie aktywne dopasowanie się podpór do mierzonej krzywizny.

## 1.8 Wirtualne metody mocowania elementów niesztynnych

W przypadku elementów zbudowanych z powierzchni swobodnych dominującymi metodami pomiaru są metody takie jak: triangulacja laserowa [27], metody konfokalne, metoda projekcji prążków, czy metoda fotogrametryczna [118,120-123,125,129-132]. W skrócie metody te można określić jako optyczne i dające w efekcie informację o kształcie powierzchni mierzonego elementu poprzez rejestrację chmury punktów. Tematykę związaną z technikami pomiaru elementów składających się z powierzchni swobodnych przedstawiono w [14,45,49,51,69,76,98], natomiast w pracach [53] oraz [46] omówiono zagadnienia związane z metodami bazowania powierzchni swobodnych oraz sposobem oceny odchyłek kształtu elementów o powierzchniach swobodnych. Savio i De Chiffre [77] opracowali modułowy wzorzec MFG (*z ang. Modular Freeform Gauge*) służący do zapewnienia spójności pomiarowej podczas kontroli kształtu powierzchni swobodnych.

Systemy mocowań elementów w pomiarach kojarzone są głównie z mechanicznymi, sztywnymi elementami nośnymi pozwalającymi na jednoznaczną i powtarzalną orientację mierzonego elementu. Nie dziwi więc fakt, że naturalną odpowiedzią przemysłu i nauki na problematykę pomiaru elementów niesztynnych były kolejne opracowania mocowań mechanicznych, co do których stosuje się ostrzejsze niż w przypadku konwencjonalnych rozwiązań kryteria wymiarowo-kształtowe lub dodatkowe procedury kalibracji w związku z koniecznością odwzorowania geometrii nominalnej. Przed przystąpieniem do pomiaru współrzędnościowego i niezależnie od wybranej metody stykowej bądź bezstykowej wykonywany jest proces bazowania czyli przejścia z układu współrzędnych maszyny pomiarowej do układu detalu, w którym dokonany zostanie pomiar. Klasycznie określenie układu współrzędnych elementu mierzonego odbywa się poprzez wskazanie odpowiednio korespondujących ze sobą obiektów geometrycznych bezpośrednio na detalu zgodnie z dokumentacją techniczną. W związku z dynamicznym rozwojem technik komputerowego wspomaganie procesów inżynierskich, proces bazowania (dopasowania układu współrzędnych maszyn do układu współrzędnych

mierzonego elementu) odbywa się z udziału modelu CAD czyli bryły reprezentującej nominalny kształt produkowanego elementu zgodnie ze schematem jak na rys. 1.25.



**Rys. 1.25.** Schemat pomiaru geometrii wyrobu w oparciu o bazowanie na modelu nominalnym CAD [40]

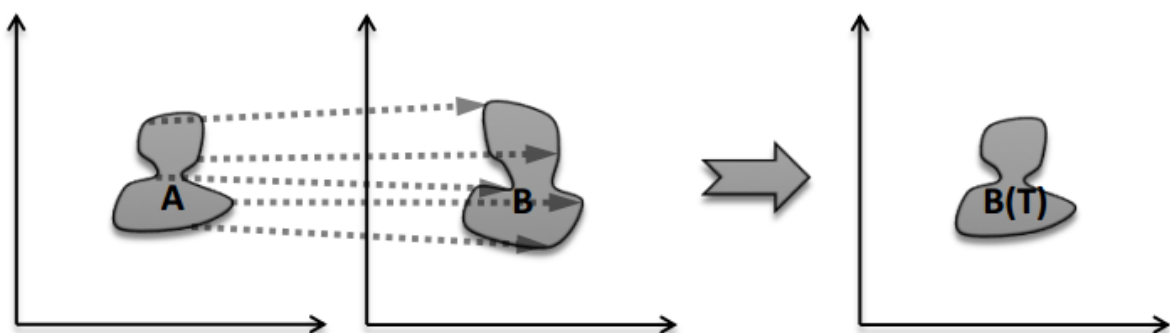
W tym wypadku podczas bazowania również określa się cechy korespondujące lub określa się macierz przekształcenia geometrycznego jednak zamiast fizycznego wskazania geometrii na WMP elementy te wskazywane są na bryle nominalnej CAD [52].

W stosunku do elementów zbudowanych z powierzchni swobodnych rzadko kiedy stosuje się klasyczną metodą bazowania 3-2-1, powszechnie stosowaną do bazowania elementów o regularnych kształtach. Dostępne oprogramowania pomiarowe umożliwiają określenie układu współrzędnych powierzchni swobodnych z wykorzystaniem iteracyjnej metody RPS w przypadku pomiarów punktowych. W przypadku pomiarów topograficznych elementów zbudowanych z powierzchni swobodnych głównym wyzwaniem jeśli chodzi o bazowanie jest znalezienie macierzy przekształcenia współrzędnych punktów tworzących chmurę na odpowiadającą jej bryłę nominalną CAD. Oczekiwanym efektem procedury bazowania jest właściwe zorientowanie elementu mierzonego poprzez odebranie sześciu stopni swobody (trzech liniowych oraz 3 obrotowych). Tego typu dopasowanie nazywamy przekształceniem liniowym i dotyczy ono elementów sztywnych niezależnie od zastosowanej strategii bazowania. Metody dopasowania liniowego szczegółowo opisano w pracy [52] przez Li oraz Gu, a także w pracach [31,42] Najbardziej popularną metodą liniowego dopasowania chmur punktów tzw BestFit 3D jest metoda ICP ( z ang. *Iterative Closest Point*) opracowania przez Mc Kay'a [15]. Algorytm ten w sposób iteracyjny oblicza optymalną macierz transformacji poprzez minimalizację odległości euklidesowej między dwiema chmurami punktów. ICP jest skuteczny w dopasowaniu w sześciu stopniach swobody i nie wymaga parametrycznej reprezentacji dopasowywanych chmur punktów. Głównym ograniczeniem tej metody jest fakt uzależnienia jej

skuteczności od wstępnej orientacji i dystansu korespondujących punktów. Niemniej jednak ICP jest dominującą metodą dopasowania i jest stosowana w komercyjnych pakietach oprogramowania pomiarowego.

Inną metodą dopasowania liniowego jest metoda trójpunktowego dopasowania powłok wypukłych 3PCHM opisaną przez Fana i Yanga w [23]. Metoda ta w stosunku do ICP jest bardziej odporna na początkową relację dopasowywanych chmur punktów, a także lepiej sprawdza się w przypadku chmur punktów zawierających szumy. 3PCHM jest także metodą szybszą jednak posiada swoje ograniczenia w przypadku dopasowania struktur sferycznych.

Wysokie koszty produkcji, nadzoru a także czasochłonny proces adjustacji i przygotowania mechanicznych systemów mocowań mechanicznych stał się podstawą do rozpoczęcia badań nad wirtualnymi systemami mocowań elementów nieszywnych. Metody te bazują w większości przypadków na przekształceniach geometrycznych chmur punktów i odniesienie ich do wzorców w postaci nominalnych plików CAD. Alternatywnie wykorzystują one narzędzia symulacyjne w postaci oprogramowania do analizy MES (metoda elementów skończonych), bowiem metody te uwzględniają właściwości mechaniczne mierzonych obiektów. Opisane wcześniej metody dopasowania liniowego dotyczą bazowania elementów sztywnych. W przypadku elementów nieszywnych bardzo często zdarza się, że geometria elementu nominalnego znacznie odbiega od rzeczywistego kształtu, który w wyniku sił zewnętrznych pozostaje odkształcony. W praktyce oznacza to tyle, że wzajemnemu dopasowaniu podlegają np. linia oraz krzywa lub powierzchnia płaska ze swobodną. W przypadku takich elementów poza wstępnym bazowaniem liniowym należy zastosować dopasowanie nieliniowe [11,29,56,67,94].



Rys. 1.26. Schemat dopasowania nieliniowego. Źródło: Dr. J. Galeotti Carnegie Mellon University 2018

Zakładając, że  $P = \{p_i\}$ , gdzie  $i=1,\dots,n$ , stanowią punkty reprezentujące model nominalny, przekształcenie nieliniowe  $T$  można opisać wzorem (1.1):

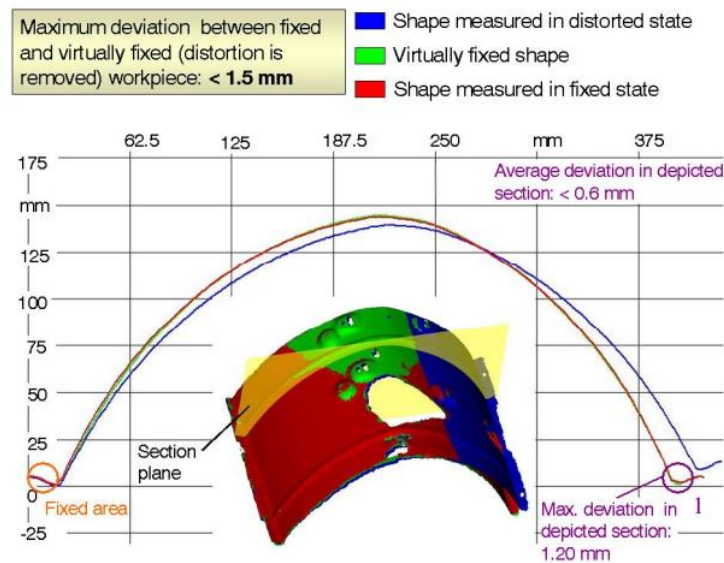
$$T(p_i) = N(p_i) + Mp_i + l \quad (1.1),$$

gdzie:  $N$  jest transformacją nieliniową,  $M$  jest macierzą rotacji, a  $l$  – wektorem translacji liniowej.

Pierwsze algorytmy dopasowania nieliniowego powstawały na potrzeby medycyny i właściwego obrazowania tkanek miękkich [20,26,32].

Znane algorytmy stosowane w przekształceniach nieliniowych stosowane do dopasowań nieszywnych to np. algorytm MDS (*Multi-dimensional Scalling*), oraz CPD (*Coherent Point Drift*) [7,62,63]. Przywołane algorytmy dopasowania nieliniowego stanowią przekształcenia geometryczne, które nie uwzględniają właściwości materiałowych mierzonych elementów. W związku z tym wielu autorów prac badawczych nad zagadnieniem mocowania elementów nieszywnych wykorzystało możliwości oferowane przez metodę elementów skończonych [18,107].

Pierwsze próby opracowania wirtualnego systemu mocowań podjął Weckenmann w 2006 [87-89]. W swojej metodzie nazwanej „wirtualną metodą kompensacji przemieszczeń” autorzy dokonali pomiaru fragmentu karoserii w stanie swobodnym i z zastosowaniem metody projekcji prążków o powtarzalności  $< 0,01$  mm. Zarejestrowana chmura punktów poddana została dalszej obróbce w celu uzyskania odpowiedniego do analizy MES modelu. Autorzy wykorzystali elementy charakterystyczne takie jak otwory mocujące do określenia wspólnego z modelem nominalnym CAD układu współrzędnych tworząc założenie, że cechy te pozbawione są wad. Następnie wykonana została analiza MES, której celem było dostosowanie zarejestrowanej w stanie swobodnym chmury punktów komponentu do kształtu nominalnego CAD (rys. 1.27). Po wykonaniu dopasowania obydwu obiektów dokonywana jest analiza odchyłek i na tej podstawie szacowany jest błąd wykonania części.



Rys. 1.27. Metoda wirtualnej kompensacji odkształceń [88]

Metoda zaproponowana przez Weckenmanna [88] jest metodą subiektywną. Po określeniu warunków brzegowych symulacji MES to operator decyduje w którym momencie uzyskał satysfakcjonujący poziom dopasowania. Dodatkowo przygotowanie chmury punktów do tej analizy podobnie jak sama symulacja jest procesem czasochłonnym. Dodatkowo autor metody nie bierze pod uwagę rozdzielczości optycznej systemu pomiarowego, co ma ogromny wpływ na dokładność odwzorowania mierzonej powierzchni. Sama powtarzalność systemu pomiarowego nie pozwala stwierdzić czy przygotowany model do analizy MES jest właściwy. Każdy lokalny błąd np. na grubości ścianki będzie wpływał na zmianę wyniku symulacji a także wprowadzona deformacja będzie istotnie inna od prawdziwej. Weckenmann przyjął także stałą grubość ścianki mierzonego elementu, co również stanowi ogromne uproszczenie i źródło błędów analizy MES.

W pracy [3] Abenham wykorzystał również analizę MES do weryfikacji geometrii fragmentu poszycia samolotu. W tym wypadku dopuszczalne siły mocowania były znane i zostały uwzględnione w procesie symulacji.

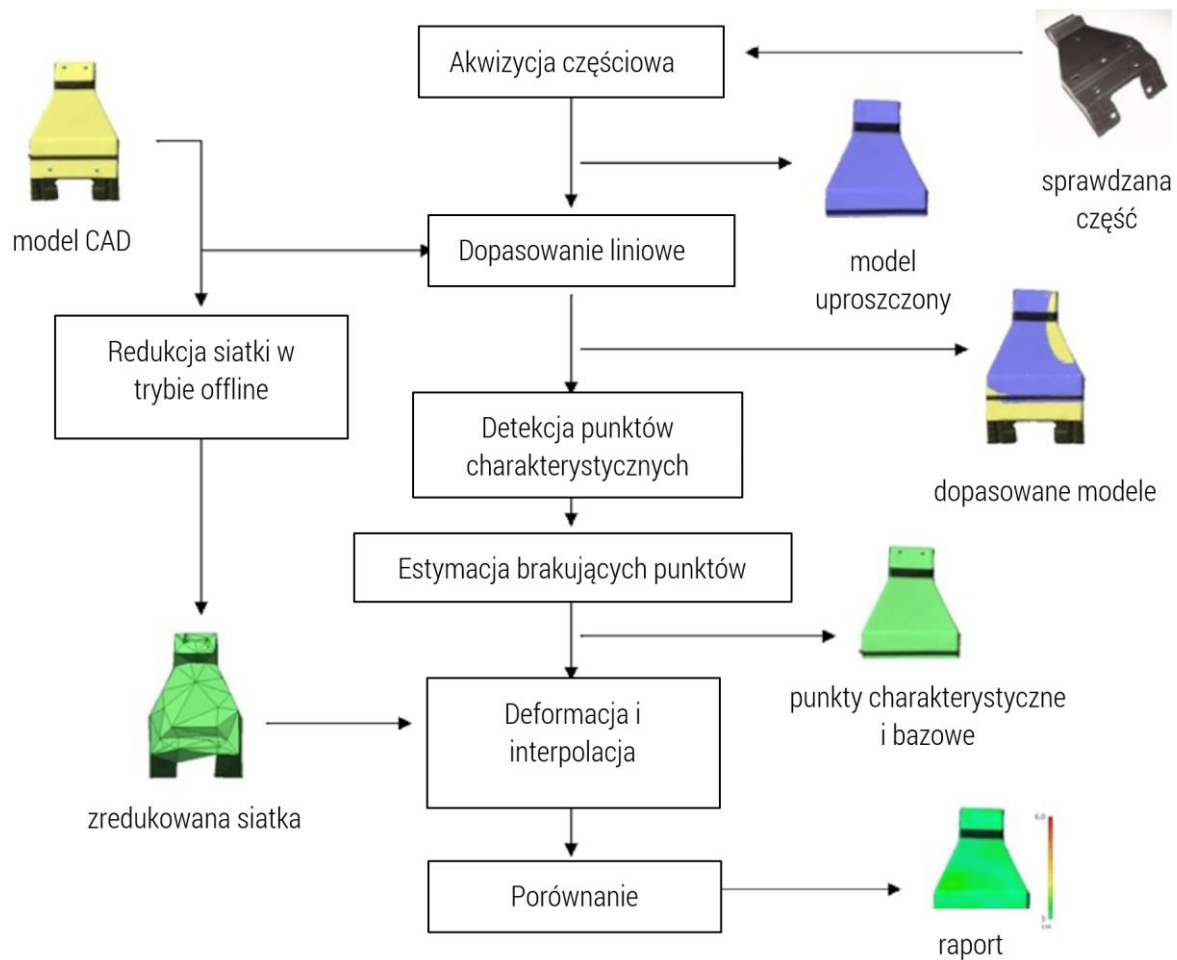
Autor metody wirtualnej kompensacji odkształceń wprowadził pewne modyfikacje w dotychczasowym podejściu do zagadnienia wirtualnego mocowania elementów nieszytych i w roku 2007 opublikował pracę [90]. W nowej metodzie nazwanej metodą wirtualnej deformacji wstecznej wyeliminował część niedoskonałości wcześniej zaproponowanej metody, a główna zmiana polegała na tym, że analizie MES poddany został model CAD z uwzględnieniem warunków brzegowych występujących podczas pomiaru. Metoda w dalszym ciągu była podatna na błędy związane

z operatorem jednak uzyskane wyniki były o wiele bardziej dokładne, a procedura znacznie mniej czasochłonna.

Valery w pracy [81] podobnie do Weckenmana wykorzystał technikę inżynierii odwrotnej do stworzenia rzeczywistego modelu CAD elementu poprzez jego pomiar głowicą triangulacyjną zainstalowaną na ramieniu Faro. Bryła ta poddana została analizie MES w środowisku Abaqus. Wykorzystując narzędzie MES Valery deformował rzeczywisty model CAD w taki sposób, aby dopasować go do modelu mocowania a następnie porównywał odchylenia od bryły nominalnej CAD elementu.

Podobny do kierunku Weckenmanna obrał Jaramillo [37,40] przedstawiając analogiczną aczkolwiek o wiele bardziej zoptymalizowaną metodę wirtualnej deformacji wstecznej wykorzystując do oszacowania odkształceń aproksymację z zastosowaniem radialnych funkcji bazowych (RBF). Takie podejście pozwoliło na znaczne zredukowanie gęstości siatki przy analizie MES otwierając drzwi do inspekcji elementów niesztynnych w czasie rzeczywistym. Autorzy wskazują na oczywistą zależność pomiędzy stopniem uproszczenia modelu a uzyskanymi wynikami, jednak stopień ten może być kontrolowany i dostosowany do danej aplikacji w odniesieniu do tolerancji. Autorzy pracy rozwijali tę metodę i w pracach [38,41] i przedstawili jej udoskonalenie polegające na dopasowaniu nieliniowym na podstawie tylko tych obszarów, które podlegają inspekcji. W tej sytuacji skanowanie całego elementu nie jest konieczne, a ewentualne punkty charakterystyczne wyznaczone są w oparciu o algorytm RBF. Na rys. 1.28 przedstawiono schemat działania wirtualnej metody mocowania elementów niesztynnych i bazującej na interpolacji RBF.



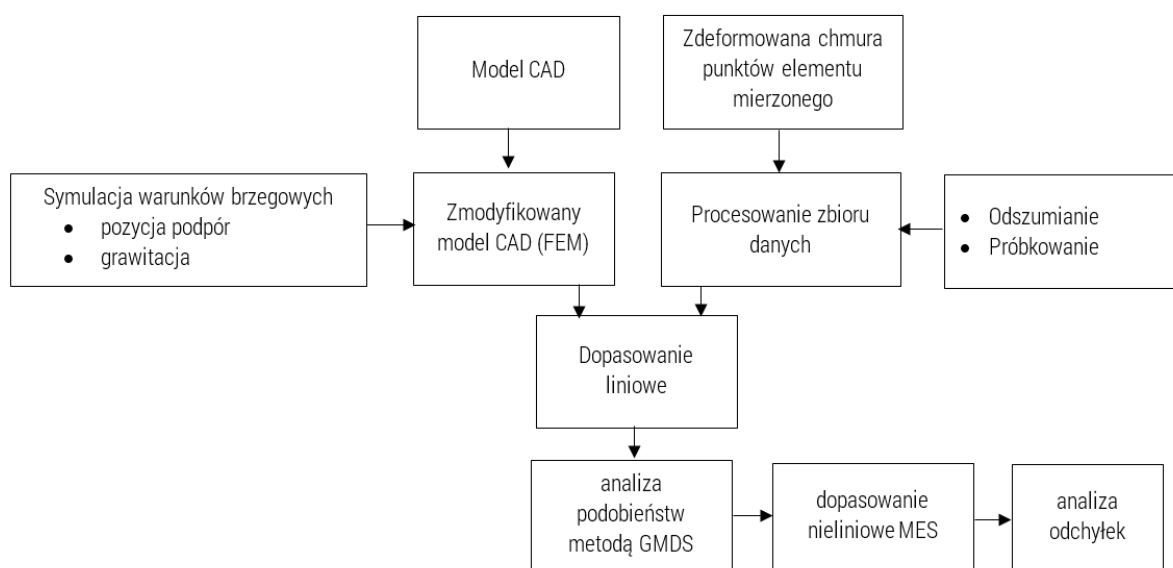


Rys. 1.28. Metoda dopasowania nieliniowego z zastosowaniem interpolacji RBF na podstawie skanów częściowych [38]

W [28] przedstawiono metodę pozwalającą na oszacowanie kształtu elementu nieszywnego po zamocowaniu go w zespole. W tym celu stosowane jest podobne do zaproponowanego przez Weckenmanna w [87] podejście wirtualnej kompensacji przemieszczeń. Po wykonaniu skanu optycznego i odpowiedniej obróbki chmury punktów model poddawany jest analizie MES z zastosowaniem warunków brzegowych zgodnych z nominałem pochodzącym z modelu CAD zespołu. Po wirtualnym zamocowaniu elementu nieszywnego w zespole sprawdza się odchylenia geometrii wyrobu od nominału. W celu weryfikacji metody autorzy dokonali także skanu optycznego wyrobu zamontowanego w zespole i porównali wyniki z wynikami symulacyjnymi.

Zaproponowana metoda ma z pewnością swój naukowy i praktyczny walor jednak posiada istotne wady opisane przy okazji pracy [87]. Wady te polegają m.in. na znacznym uproszczeniu modelu obliczeniowego związanym z interpolacją metodą RBF a także założeniem stałej grubości ścianki mierzonego elementu.

Radvar-Esfahlan [70] wraz ze współautorami opracował ogólną postać mocowania numerycznego (GNIF). W metodzie tej wykorzystano fakt, że najkrótszy dystans pomiędzy dwoma dowolnymi punktami pozostaje niezmienny w wyniku przekształcenia izometrycznego. Metoda pozwala określić punkty korespondujące pomiędzy odkształconym modelem części uzyskanym w wyniku rejestracji chmury punktów a modelem nominalnym CAD. Element mierzony jest ustawiony w specjalnym mocowaniu o znanej geometrii w celu określenia warunków brzegowych oraz wpływu grawitacji. Warunki brzegowe są wykorzystane do symulacji MES wykonanej na modelu nominalnym CAD w celu określenia wpływu grawitacji przy znanych warunkach mocowania. Sam element mierzony jest metodą optyczną pozostając w stanie odkształconym. Chmura punktów zostaje wstępnie dopasowana do przygotowanego modelu CAD dzięki zastosowaniu algorytmu ICP. Następnie wykorzystując algorytm skalowanie wielowymiarowego MDS (*z ang. Multi Dimensional Scalling*) wyszukiwane są punkty korespondujące. Finalne dopasowanie nieliniowe odbywa się poprzez narzędzie MES FENR (*z ang. Finite Element Non Rigid Registration*). Dzięki tej metodzie element nieszytwny może być mierzony w dowolnej pozycji przy czym należy pamiętać, że wstępne przekształcenie modelu CAD musi odbyć dla tej samej orientacji w celu właściwego określenia wpływu grawitacji. Kolejne przekształcenia stanowią mocowanie numeryczne (GNIF). Schemat procedury przedstawiono na rys. 1.29.



Rys. 1.29. Koncepcja metody GNIF [28]

Opisana metoda jest automatyczna i może zostać zastosowana nawet w przypadku elementów znacznie zdeformowanych. Sami autorzy wskazują, że metoda wymaga dalszego rozwoju i na obecnym etapie jest rekomendowana do oceny stabilności procesu produkcyjnego. Uwadze autorów należy polecić fakt, że na etapie działania algorytmu MDS jako punkty korespondujące przyjęte są granice elementu, które uznawane są jako pozbawione wad, co w aplikacjach przemysłowych zdarza się nieczęsto. Ci sami autorzy rozwijali metodę GNIF m.in. poprzez usprawnienie definicji warunków brzegowych [74,75], a także poprzez filtrację punktów powodujących niekoherencję dystansów geodezyjnych. W obecnej formie metoda GNIF może być również zastosowana w stosunku do niekompletnych chmur punktów.

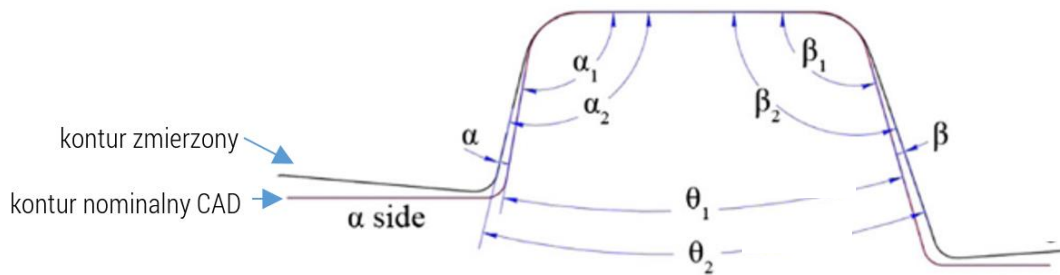
W 2011 roku opublikowano pracę Abenhaima i Tahana [5,9], którzy opracowali algorytm inspekcji metodą iteracyjnego przemieszczania (*IDI z ang. iterative displacement inspection*). Metoda ta nie bazuje na analizie MES a na zmodyfikowanym algorytmie ICP, który łączy możliwości dopasowania liniowego i nieliniowego. W praktyce IDI pozwala na iteracyjne odkształcanie modelu nominalnego CAD dążąc do dopasowania do zarejestrowanej metodami optycznymi chmury punktów. Opracowana metoda posiada także moduł pozwalający na identyfikację odchyłek kształtu mierzonego elementu i odseparowanie ich od zniekształceń wynikających z działania sił zewnętrznych. W pracach [8,73] ci sami autorzy wprowadzili usprawnienia m.in. w module identyfikacji poprzez zastosowanie testu Grubbsa do automatycznego ustawiania progu identyfikacji.

Aidibe i Tahan w [10] przedstawili kolejną metodę mocowania wirtualnego, polegającą na odseparowaniu odchyłek kształtu zmierzonego w stanie swobodnym elementu od błędów związanych działaniem sił zewnętrznych, wykorzystując cechy krzywizny Gaussa oraz testu statystycznego Thompsona-Biweight'a. W 2015 roku Aidibe i Tahan [7] zaproponowali metodę ACPD (*z ang. Adapted Coherent Point Drift*) jako optymalizację algorytmu CPD (*z ang. Coherent Point Drift*). Model nominalny CAD jest poddawany modyfikacji, która pozwala na dopasowanie go do zebranej chmury punktów. Proces ten odbywa się poprzez minimalizację dwóch kryteriów typowych dla elementów niesztynnych. Pierwszym z nich jest zachowanie odległości krzywoliniowej (transformacja izometryczna). Oznacza to, że różnica w odkształceniu modelu nominalnego i zmodyfikowanego powinna być jak najmniejsza. Drugim kryterium jest minimalizacja odległości euklidesowej pomiędzy

zdeformowanym modelem CAD a otrzymaną w wyniku pomiaru chmurą punktów. Autorzy metody intensywnie pracują nad nowymi algorytmami dopasowania nieliniowego w wirtualnych metodach mocowania, a kolejne osiągnięcia w tym zakresie opisali m.in. w pracy [13].

W pracy [6] opisano kolejną wirtualną metodę mocowania elementów niesztynnych. Autorzy zasymulowali proces montażu elementu niesztynnego w zespole poprzez deformację reprezentującej go chmury punktów zarejestrowanej w stanie swobodnym. Metoda symuluje mocowanie kształtowe poprzez zmapowanie chmury punktów elementu na jego model nominalny CAD. Wirtualna procedura montażu i ewaluacji podzielona jest na cztery główne moduły. W pierwszym kroku wykonywane jest wstępne dopasowanie liniowe z wykorzystaniem punktów charakterystycznych. Następnie moduł dopasowania nieliniowego oszacowuje siły mocowania z uwzględnieniem tolerancji określonej przez użytkownika a także określa macierz translacji dla każdego zestawu punktów zeskanowanego elementu. Każda z chmur punktów zostaje przekształcona w taki sposób, aby odzwierciedlać stan zamocowania elementu na sztywnym mocowaniu kształtowym. Uzyskane przekształcenia są następnie implementowane do każdej kolejnej chmury punktów w celu modyfikacji chmury zarejestrowanej w stanie swobodnym. Nowa chmura punktów poddawana jest następnie porównaniu z bryłą nominalną CAD. Autorzy metody kontynuowali swoje prace nad udoskonaleniem opracowanej metody, a efekty swoich działań przedstawili w publikacjach [4,72]. Usprawnienia metody polegają m.in. na automatycznym generowaniu węzłów oraz na zwiększeniu dokładności rozwiązania zagadnienia MES dla określonych warunków brzegowych

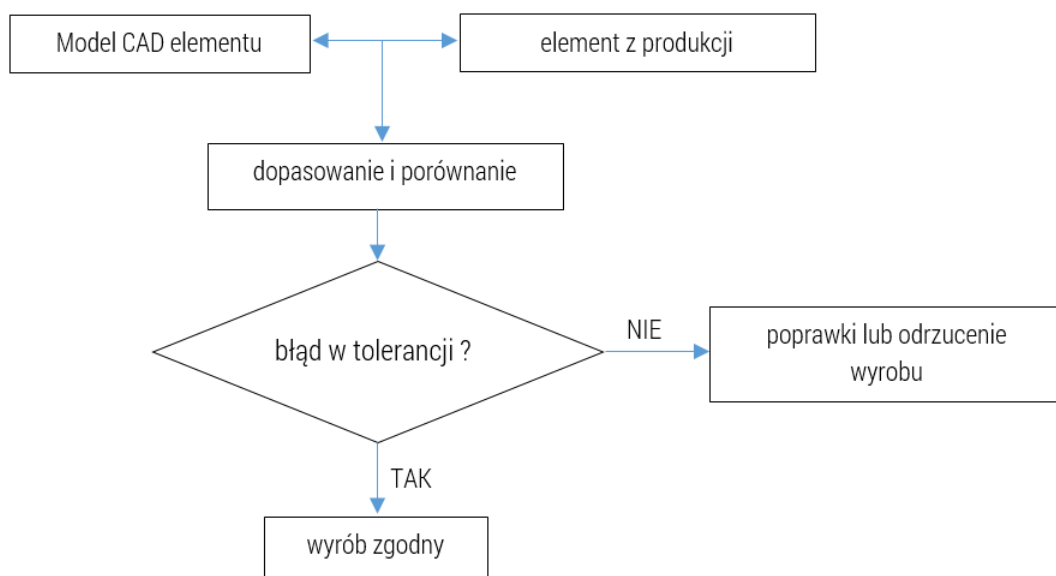
Zespół Wang, Zhou w [85] podjął się opracowania metody kompensacji efektu sprężynowania. Wykonana w procesie tłoczenia blacha została zeskanowana głowicą laserową i przetworzona do postaci siatki trójkątów. W oprogramowaniu Geomagic dokonano pomiaru kąta odkształcenia. Na podstawie opracowanej i uzyskanych wyników metody można korygować narzędzia pras. Na rys. 1.30 przedstawiono kontur nominalny CAD wraz z nałożonym konturem zmierzonym i widocznym efektem sprężynowania.



Rys. 1.30. Pomiar kąta rozwarcia ścianek w elemencie tłoczonym [85]

W [78] zaproponowano kolejną metodę inspekcji elementów niesztynnych z zastosowaniem skanera laserowego. Ułożenie elementu niesztynnego na stole maszyny pomiarowej nie korespondowało z warunkami mocowania elementu w zespole, jednak z uwagi na późniejszą analizę MES, było znane. Przeprowadzona dla znanych warunków brzegowych analiza MES modelu CAD dała informację o przemieszczeniach związanych z grawitacją. Weryfikację zgodności elementu z wymaganiami określono na podstawie różnicy pomiędzy kształtem zmierzonym, a zasymulowanym. Bardzo podobną metodę opisano w pracy [48]. W tekście zwrócono uwagę na problematykę szumów, którymi obarczone są pomiary topograficzne z wykorzystaniem głowic triangulacyjnych. Odpowiedzią na ten problem było opracowanie autorskiej metody filtracji chmury punktów.

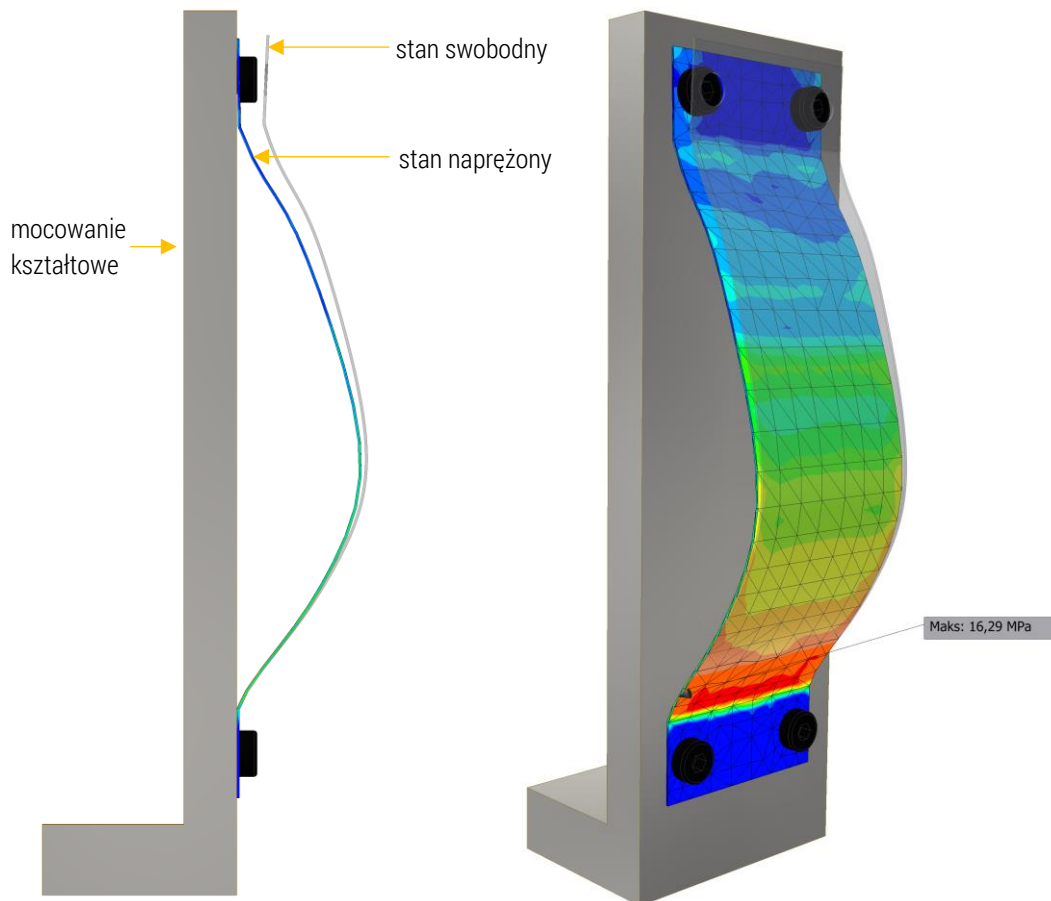
Ravishankar wraz z zespołem [71] dokonali modyfikacji popularnego algorytmu ICP i zastosowali go do nieliniowego dopasowania chmury punktów reprezentującej mierzony element, do nominału CAD. Weryfikacja zgodności wyrobu z dokumentacją odbywa się zgodnie ze schematem, jak na rys. 1.31.



Rys. 1.31. Wirtualny system mocowania z zastosowanym zmodyfikowanym algorytmem ICP [71]

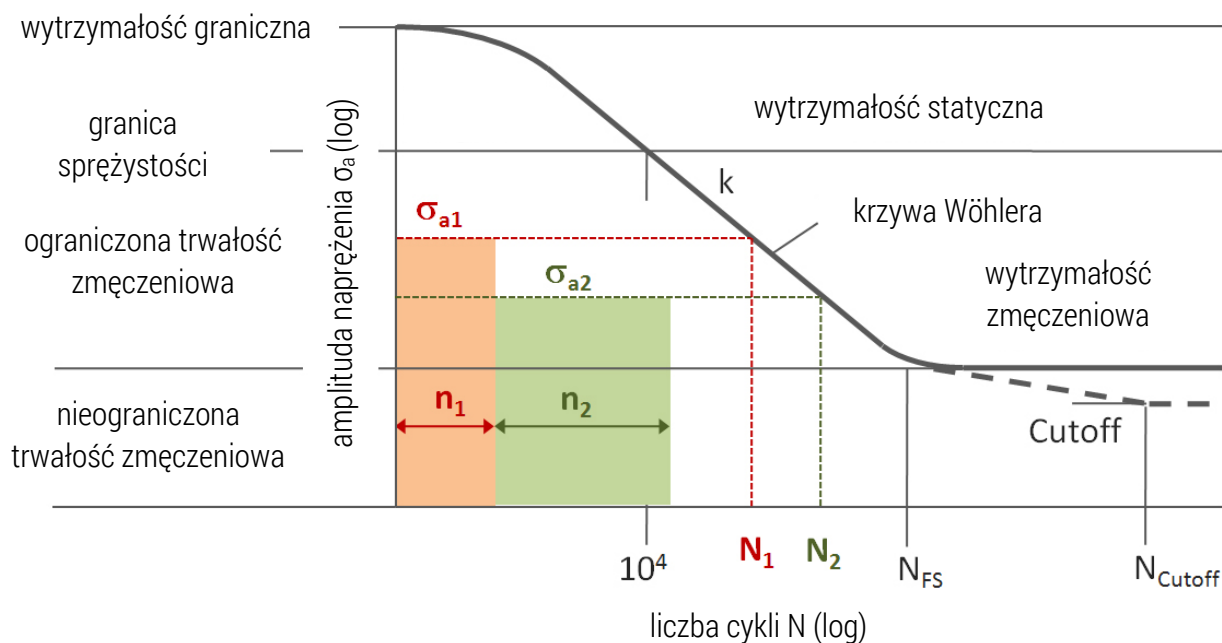
Jaramillo [39] wskazując na czasochłonność i skomplikowanie metod symulacyjnych MES w zastosowaniu do wirtualnych metod mocowania elementów nieszytywnych zaproponował zastosowanie modelu bazującego na układzie mas na sprężynach. Sformułowanie tego zagadnienia jest według autora o wiele łatwiejsze, i zapewnia podobną do MES dokładność przy określaniu deformacji elementu nieszytywnego. System składa się z dwóch modeli sprężystych. Pierwszy z nich symuluje zachowanie membranowe siatki natomiast drugi zakłada, że elementy stanowiące siatkę trójkątów stanowią masy, pomiędzy którymi zachodzą relacje sprężyste. Zastosowanie modelu sprężystego pozwala na redukcję czasu inspekcji o 80% w stosunku do powszechnie stosowanej MES.

Opisane metody mocowania elementów nieszytywnych w pomiarach współrzędnościowych w wersji mechanicznej (jak na rys. 1.14 i 1.15) zakładają zgodnie z wytycznymi ASME Y14.5 oraz ISO 10579 pomiar części nieszytywnych w stanie naprężonym poprzez wymuszoną deformację elementu na mocowaniu kształtowym. Na rys. 1.32 pokazano rozkład naprężeń w elemencie cienkościennym podczas zamocowania go na dedykowanym mocowaniu kształtowym pod wpływem siły docisku wygenerowanej w tym przypadku przez wkręty. Poziom naprężeń jest uzależniony od szeregu czynników, a w głównej mierze od naprężeń resztkowych oraz kształtu elementu w stanie swobodnym. Na rys. 1.32 oznaczono schematycznie mocowanie kształtowe i mocowany na nim element nieszytywny w stanie swobodnym oraz w stanie utwierdzonym. W stanie utwierdzonym element mierzony pozostaje w stanie naprężonym, a rozkład naprężeń przedstawiono za pomocą kolorowej mapy odchyłek. Rozkład i wartość naprężeń pochodzących od systemu mocowań uzależniona jest od kształtu elementu mierzonego w stanie swobodnym oraz od kształtu i konfiguracji mocowania kształtowego.



Rys. 1.32. Widok elementu nieszytywnego zamocowanego w stanie naprężonym na mocowaniu kształtowym

Siła mocowania może w znaczny sposób deformować element mierzony po przytwierdzeniu go do mocowania kształtowego. Poprzez takie działanie seria elementów nieszytywnych przyjmuje kształt zgodnie z zaprojektowanym mocowaniem kształtowym pomimo, że w stanie swobodnym elementy te mogą różnić się od siebie nawet w znacznym stopniu. W związku z tym w trakcie pomiaru elementy o różnych kształtach (w stanie swobodnym) mierzone są w różnym stanie naprężenia. Naprężenia i ich zmiany wpływają na pojawianie się zmian zmęczeniowych a to z kolei determinuje graniczną liczbę cykli, po osiągnięciu której element ulegnie zniszczeniu. Zależność umownej liczby cykli i wartości naprężenia zmęczeniowego przedstawiono na wykresie Wöhlera (rys. 1.33).



Rys. 1.34. Zależność liczby cykli granicznych  $N$  od naprężenia  $\sigma_a$  [104]

Niektóre wirtualne metody mocowania, np. [4,6,37,72,74] częściowo rozwiązują ten problem poprzez zastosowanie narzędzi MES przez co pozwalają na rozdzielenie odkształceń związanych z grawitacją od zniekształceń związanych z błędem wykonania elementu. Metody te jednak są dość skomplikowane i wymagają wielu transformacji chmur punktów lub brył CAD łącząc często kilka narzędzi takich jak analizę MES oraz przekształcenia geometryczne liniowe i afiniczne. Często w celu skrócenia czasu analizy stosowane są pewne uproszczenia, która pozwalają na spełnienie wymagań w zakresie wydajności metody jednak ich dokładność jest ograniczona i pozwala jedynie na monitorowanie powtarzalności produkcji. Jednym z kroków, które realizowane są w przypadku metod wirtualnych jest pomiar elementu w stanie swobodnym (i odkształconym), czyli w stanie naprężonym. Pomimo opracowania wielu metod mocowania elementów niesztynnych zarówno mechanicznych jak i wirtualnych, nie istnieją metody pozwalające na wykonanie pomiaru elementu niesztynnego w stanie swobodnym, czyli w stanie pozbawionym naprężeń powstałych w wyniku oddziaływania grawitacyjnego.



## 1.9. Cel i teza pracy

### Cel pracy:

Celem rozprawy doktorskiej jest opracowanie nowej metody mocowania elementów niesztynnych działającej w taki sposób, aby ich pomiar współrzędnościowy odbywał się w stanie quasi-swobodnym.

**Do zrealizowania tak postawionego celu pracy niezbędne było wykonanie następujących prac:**

1. opracowanie koncepcji mocowania elementów w stanie quasi-swobodnym,
2. opracowanie i wykonanie konstrukcji aktywnych podpór,
3. opracowanie algorytmu wspierającego optymalną lokalizację aktywnych podpór,
4. dobór i konfiguracja systemu akwizycji danych,
5. opracowanie oprogramowania do adjustacji i kalibracji aktywnych podpór,
6. wykonanie badań eksperymentalnych.

### Teza pracy:

Możliwe jest opracowanie metody mocowania elementów niesztynnych w stanie quasi-swobodnym, umożliwiającej pomiary współrzędnościowe z dokładnością większą niż w przypadku klasycznych metod mocowania.

## 2. Nowa metoda mocowania adaptacyjnego

Opracowana metoda adaptacyjnego mocowania stanowi połączenie metody symulacyjnej realizowanej z wykorzystaniem metody elementów skończonych oraz mechanicznego mocowania, które na podstawie opracowanego algorytmu optymalnego lokowania podpór umożliwia regulację i kontrolę wartości reakcji w trakcie pomiaru na WMP. Aktywne podpory mechaniczne skonstruowane są jako niezależne mechanicznie mechanizmy i posiadają regulację pozycji podparcia, a zastosowane tensometryczne czujniki siły pozwalają na kontrolę reakcji węzłowych i zminimalizowanie naprężeń elementu mierzonego. Dzięki takiemu podejściu możliwe jest skompensowanie odkształceń elementu mierzonego w wyniku działania siły grawitacji i jego pomiar w stanie quasi-swobodnym.

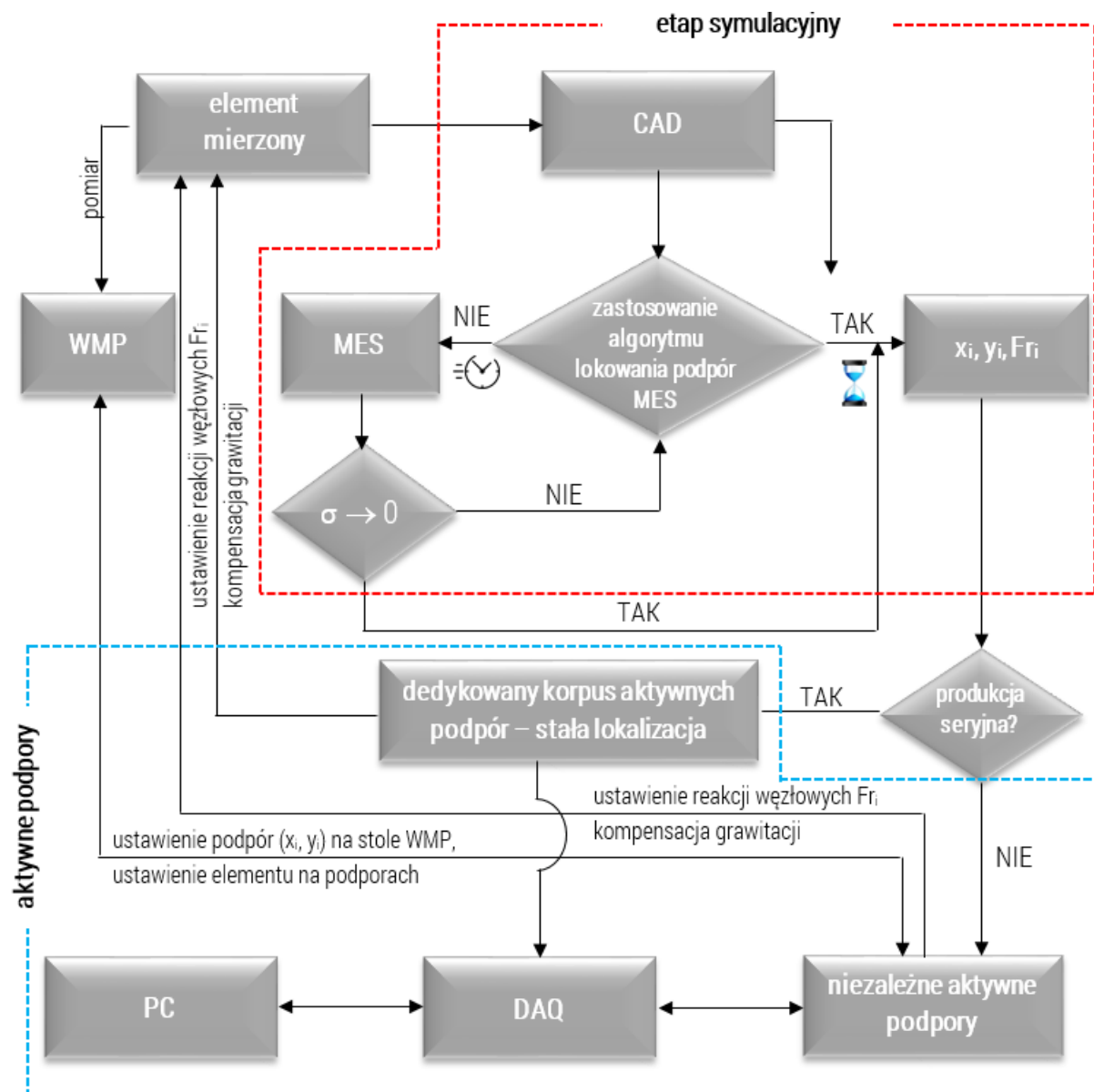
### 2.1. Koncepcja metody

Ogólną koncepcję opracowanej metody mocowania adaptacyjnego elementów niesztynnych opisano w oparciu o schemat na rys. 2.1. W kontekście przedstawionego podziału metod mocowania elementów niesztynnych na metody mechaniczne oraz wirtualne opracowana metoda adaptacyjnego mocowania jest hybrydą, ponieważ posiada cechy wspólne zarówno pierwszej jak i drugiej grupy metod. Opracowana metoda posiada trzy fundamentalne etapy:

1. etap symulacyjny,
2. etap adjustacji podpór aktywnych,
3. etap pomiarowy na WMP.

W etapie symulacyjnym, oznaczonym na rys. 2.1 czerwoną przerywaną linią, wykonywana jest analiza strukturalna MES. Celem tej analizy jest wyznaczenie reakcji węzłowych oraz optymalnego rozmieszczenia podpór aktywnych. Etap ten odbywa się w sposób automatyczny lub półautomatyczny w zależności od stopnia skomplikowania elementu mierzonego. W przypadku elementów o skomplikowanej geometrii, zbudowanych z powierzchni swobodnych istnieje możliwość zastosowania opracowanego przez autora pracy algorytmu, który w sposób automatyczny wyznacza optymalną lokalizację podpór oraz odpowiadające im reakcje węzłowe. W przypadku elementów płytowych o prostej geometrii istnieje możliwość zastosowania analizy MES poprzez samodzielne określenie warunków brzegowych. Zarówno jedna jak i druga metoda prowadzi do określenia optymalnej pozycji podpór oraz odpowiadających im reakcji węzłowych przy założeniu, że

dopuszczalne przemieszczenie uzyskane w wyniku symulacji nie przekracza przyjętego przez użytkownika. Określenie dopuszczalnego przemieszczenia węzłowego w wyniku grawitacji ma charakter subiektywny i zależy od tolerancji rysunkowej. Efektem symulacji jest pakiet informacji o współrzędnych  $x_i$ ,  $y_i$  danej odpory oraz wartości reakcji węzłowej. Liczba podpór  $i$  określana jest przez użytkownika na etapie symulacyjnym (zarówno z zastosowaniem algorytmu optymalnego lokowania podpór jak i w trybie ręcznym). Następny etap według opracowanej metody polega na ustawieniu podpór aktywnych na stole WMP zgodnie z przyjętym w symulacji MES układem współrzędnych, a następnie ustawienie elementu mierzonego na podporach. Aktywne podpory zostały opracowane jako elementy niezależne i w związku właściwe ich ustawienie na stole WMP (kalibracja) odbywa się z udziałem maszyny pomiarowej. Niemniej jednak w przypadku dużych serii pomiarowych istnieje możliwość wykonania stałego korpusu podpór o określonych na podstawie symulacji pozycjach  $x_i$ ,  $y_i$  i dzięki temu etap kalibracji pozycji podpór jest pominięty. Etap kolejny to ustawienie elementu mierzonego na aktywnych podporach zgodnie z przyjętym w analizie MES układzie współrzędnych. Po odpowiednim ustawieniu elementu na aktywnych podporach, które posiadają tensometryczny czujnik siły oraz mechanizm regulacji wysokości należy wykonać regulację wartości reakcji. Regulacja aktywnych podpór w zakresie reakcji węzłowych odbywa się z zastosowaniem opracowanego oprogramowania pomiarowego, komputera sterującego oraz karty akwizycji danych. Elementy te wspólnie z mechanicznymi podporami tworzą fizyczną realizację adaptacyjnego mocowania, a moduł ten oznaczono niebieską przerywaną linią na schemacie na rys. 2.1. Maszyna współrzędnościowa pełni w opracowanej metodzie funkcję zarówno urządzenia pomiarowego oraz urządzenia do ustawienia pozycji aktywnych podpór. W przypadku pomiarów serii elementów niesztynnych jednego typu istnieje możliwość wykonania stałej konfiguracji aktywnych podpór i dzięki temu pominąć etap konfiguracji tych elementów względem siebie oraz elementu mierzonego względem nich.

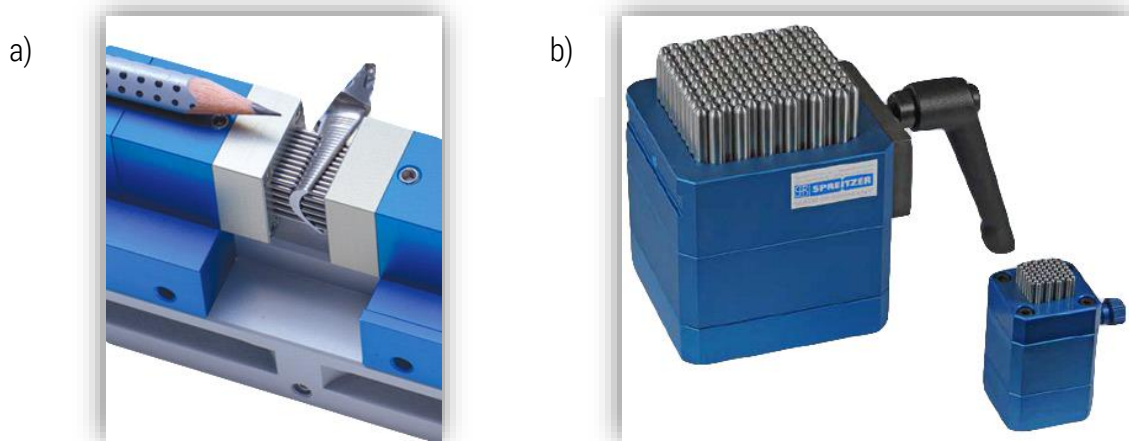


Rys. 2.1. Schemat koncepcji opracowanej metody

## 2.2. Idea aktywnych podpór

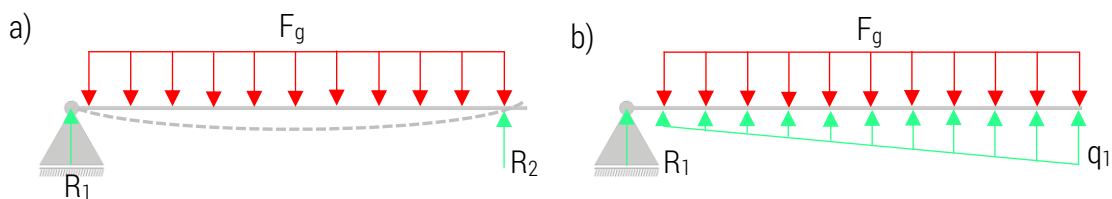
Mocowanie elementów o nieregularnych kształtach w tym elementów zbudowanych z powierzchni swobodnych stanowi wyzwanie zarówno na etapie produkcji jak również podczas pomiaru wymiarów i odchyłek kształtu. Istnieją metody pozwalające na pasywne zamocowanie elementów, w taki sposób aby siła mocowania miała charakter ciągły. Dzięki takiemu podejściu siły podczas obróbki czy pomiaru rozkładają się na powierzchni podparcia i dzięki temu w przeciwieństwie do podparcia punktowego (rys. 2.3a), nie występują lokalne odkształcenia elementu (rys. 2.3b). W mocowaniu pin-type

zastosowano matrycę kołków które podparte są na sprężynach naciskowych. W wyniku grawitacji i siły docisku elementu mierzzonego/obrabianego na ruchome piny, dochodzi do odwzorowania powierzchni współpracującej z kołkami. Przykładowe rozwiązania tego typu przedstawiono na rys. 2.2a oraz 2.2b. Dodatkowo wersja na rysunku 2.2b posiada rękojeść służącą do blokowania pinów w pozycji roboczej.



**Rys. 2.2.** Mocowanie pin-type: a) stosowane w obróbce mechanicznej [124], b) stosowane do mocowania elementów o powierzchniach swobodnych [128]

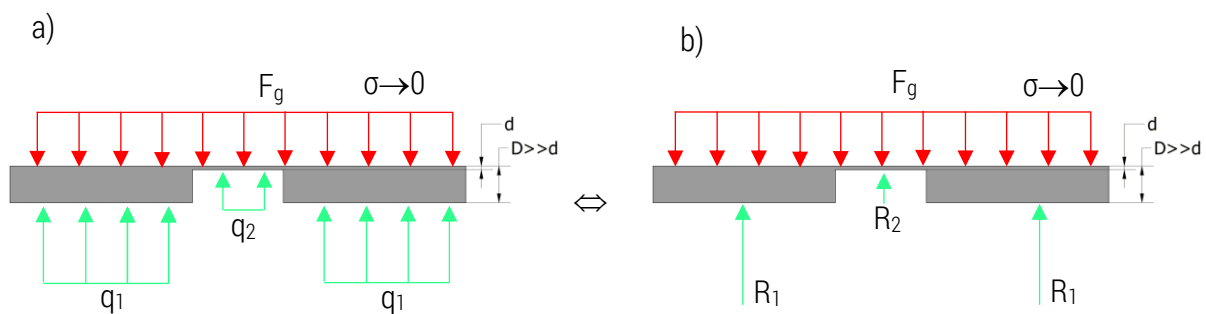
Na rys. 2.3 siłę grawitacji oznaczono jako  $F_g$ , parametry  $R_1$  i  $R_2$  są reakcjami węzłowymi, a  $q_1$  jest reakcją powierzchniową występującą podczas podparcia powierzchniowego. Przerwana linia na rys. 2.3a symbolizuje odkształcenie elementu w wyniku działania sił grawitacji. Efekt ten nie występuje w przypadku podparcia powierzchniowego.



**Rys. 2.3.** Sposoby podparcia belki: a) punktowe, b) powierzchniowe

Idea aktywnego mocowania powstała poprzez analogię do pasywnego mocowania typu pin-type, które doskonale sprawdza się w odniesieniu do elementów sztywnych jednak z uwagi na fakt, iż wszystkie piny podparte są na matrycy sprężyn o tej samej charakterystyce i stosunkowo dużej sztywności zastosowanie tej metody do podparcia elementów niesztywnych jest bezzasadne.

U podstaw idei aktywnego mocowania leży możliwość indywidualnej regulacji wartości reakcji na każdej podporze oraz na znalezieniu optymalnej konfiguracji podpór w taki sposób, aby ograniczona ich liczba dała identyczny efekt jak aktywne podparcie powierzchniowe. Na rys. 2.4 przedstawiono schematycznie sposób podparcia elementu nieszywnego w postaci płytki z przewężeniem. Jako  $F_g$  oznaczono siłę grawitacji natomiast jako  $q_1$  oraz  $q_2$  (rys. 2.4a) przedstawiono reakcję powierzchniową. Grubość elementu nie schemacie wynosi  $D$  natomiast przewężenie  $d$  jest dużo mniejsze co do wartości od grubości elementu  $D$ . W związku z tym element ten podlega odkształceniu w wyniku oddziaływania grawitacyjnego i jest uznawany jako element nieszywny. W przedstawionym na rys. 2.4a, który stanowi przypadek idealnego podparcia powierzchniowego naprężenie zredukowane wynosi 0 MPa. Praktyczna realizacja takiej koncepcji byłaby bardzo kosztowna i trudna w implementacji, dlatego w opracowanej metodzie dąży się do zastąpienia podparcia powierzchniowego skończoną liczbą podpór aktywnych (z możliwością regulacji siły podparcia) w taki sposób, aby naprężenie zredukowane  $\sigma$  było minimalne. Kluczowym zadaniem jest zatem wyznaczenie właściwej liczby podpór aktywnych, odpowiednie ich rozlokowanie oraz ustawienie odpowiednich wartości reakcji (w przypadku rys. 2.4b oznaczonych jako  $R_1$ ,  $R_2$ ), tak aby naprężenie zredukowane było jak najbliższe 0 MPa.



Rys. 2.4. Podparcie elementu nieszywnego: a) w sposób powierzchniowy, b) na podporach niezależnych

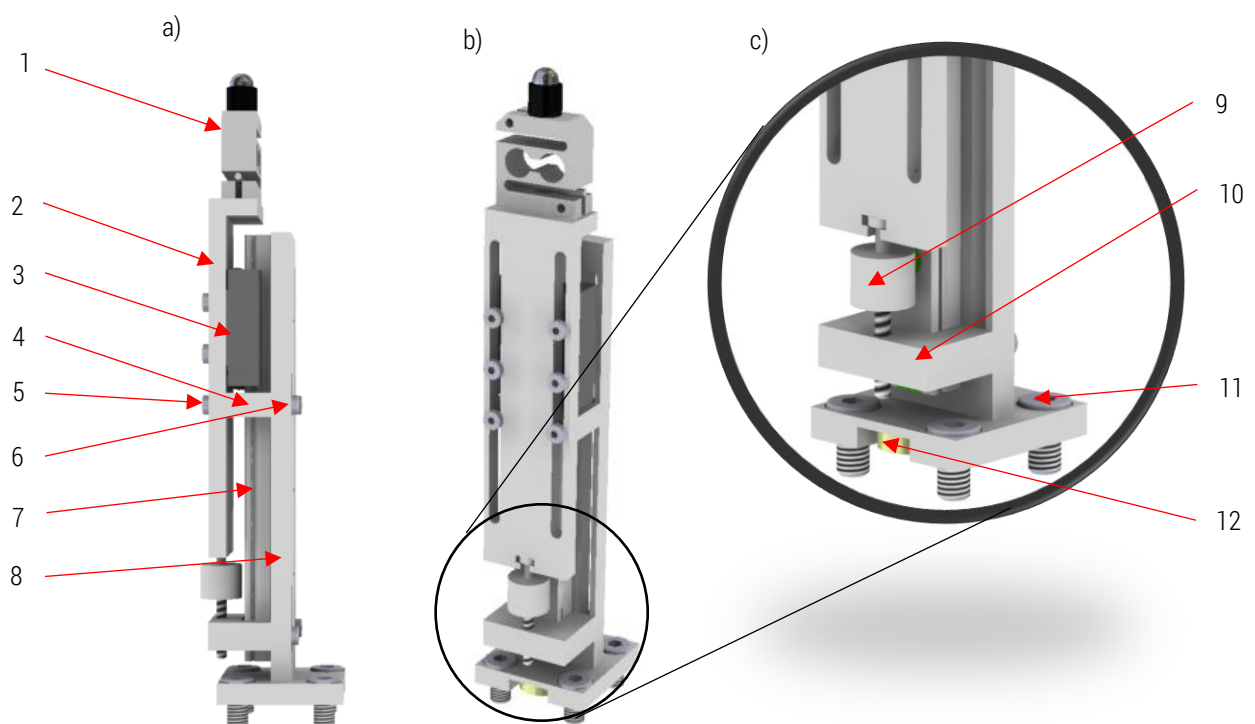
**Mocowanie elementu nieszywnego w stanie zgodnym ze schematem przedstawionym na rys. 2.4b jest możliwe poprzez realizację dwóch celów:**

- 1 – opracowanie i wykonanie niezależnych podpór, umożliwiających regulację reakcji,
- 2 – opracowanie algorytmu lokowania podpór w taki sposób, aby w warunkach równowagi nie występowały momenty siły, a siła grawitacji była kompensowana przez reakcje na podporach.

Zrealizowanie przedstawionych celów pozwala na skompensowanie odkształceń w elemencie niesztynnym wywołanych grawitacją. Realizację pierwszego z nich opisano w rozdziale 2.3, natomiast algorytm optymalnego lokowania aktywnych podpór, po wcześniejszym opisie zastosowanej metody elementów skończonych, opisano w rozdziale 2.5.

### 2.3. Realizacja praktyczna aktywnych podpór

Aktywne podpory zgodnie z założeniem polegającym na możliwości regulacji siły podparcia elementu niesztynnego wyposażone są w tensometryczne czujniki siły oraz mechanizm pozycjonowania osiowego punktu podparcia. Widok podpory aktywnej przedstawiono na rys. 2.5.



**Rys. 2.5.** Aktywna podpora: a) widok boczny, b) widok izometryczny, c) widok szczegółowy systemu regulacji wysokości

Do czujnika siły (1) mocowany jest trzpień wraz z wklejonym magnesem neodymowym, na którym osadzony jest element mierzony. Czujnik siły mocowany jest na ruchomym wsporniku (2) poprzez pasowanie ciasne na kołku. Wspornik ten przykręcony jest do karetki Hiwin MGN12H-Z0-H (3) realizującej ruch liniowy na prowadnicy Hiwin MGNR12R-H-M (7). Precyzyjny układ prowadzenia liniowego ułatwia przeprowadzenie adjustacji wartości reakcji ponieważ odczyt tego parametru nie jest zaburzony występowaniem nacisków bocznych. Podczas konstruowania aktywnych podpór

zdecydowano się na zastosowanie czujników tensometrycznych o konstrukcji typu „S”. Konstrukcja ta w związku z kompensacją momentów sił, zapewnia poprawny odczyt siły nawet w przypadku gdy działa ona niewspółosiowo z osią czujnika (rys. 2.6). Regulacja wartości reakcji zgodnie z danymi uzyskanymi z algorytmu optymalnego lokowania podpór realizowana jest poprzez pokrętko (9) z naciętym gwintem drobnozwojnym. Wkręcenie lub wykręcenie tego elementu z kostki (10), która mocowana jest na stałe do wspornika (8) powoduje ruch poosiowy czujnika siły. Wykonany w popychaczu oraz kostce gwint drobnozwojny M4x0,5 umożliwia precyzyjne zadawanie reakcji z rozdzielczością 1 mN. Podstawowy zakres regulacji wysokości podpory wynikający z długości gwintu popychacza wynosi 15 mm. Istnieje natomiast możliwość zwiększenia tego zakresu do 42 mm w związku z możliwością regulacji pozycji kostki (10) na otworach fasolkowych wykonanych w podporze nieruchomej (6). Po wyregulowaniu wysokości podpory należy zablokować ustaloną pozycję czujnika za pomocą wkrętów (5) oraz (6). Ta operacja blokuje pozycję wspornika (2) względem wspornika (8), który mocowany jest na stole maszyny pomiarowej. Podpory aktywne ustawiane są na stole maszyny pomiarowej za pośrednictwem płyty pośredniej. W podstawie (11) wykonane są otwory z pogłębieniem walcowym pod gwint M5 rozstawione na kwadracie o boku 25 mm. Otwory te mogą zostać wykorzystane do zamocowania podpory na podstawie stalowej jednak jest to uzasadnione tylko w przypadku kontroli mała lub wielkoseryjnej. W takiej sytuacji należy wykonać otwory M5 na podstawie stalowej zgodnie z parametrami uzyskanymi z algorytmu optymalnego lokowania podpór. Dodatkową możliwość mocowania podpory na płycie dają cztery magnesy neodymowe (12) o sile przyciągania 30 N każdy. Dzięki zastosowaniu takiego rozwiązania system aktywnych podpór jest elastyczny jeśli chodzi o ich stabilne lokowanie na stole maszyny pomiarowej.

Tabela 2.3 zawiera specyfikację tensometrycznych czujników siły zastosowanych w budowie aktywnych podpór. Opracowany system mocowania adaptacyjnego może wykorzystywać maksymalnie 8 aktywnych podpór wyposażonych w czujniki o zakresie pomiarowym 5N i obciążeniu granicznym 7,5 N. Istnieją dwa główne kryteria doboru czujników w systemie mocowania adaptacyjnego. Pierwszym z nich jest zakres pomiarowy, który musi być dobrany w taki sposób, aby po ustawieniu elementu mierzonego na matrycy podpór nie przekroczył dopuszczalnego zakresu dla żadnego z czujników. W praktyce oznacza to, że ciężar elementu nie może być większy od sumarycznego zakresu wszystkich użytych czujników przy założeniu równomiernego rozkładu masy.



W przypadku elementów o nierównomiernym rozkładzie masy czujniki należy dobierać w sposób indywidualny tak, aby pracowały możliwie w pełnym zakresie pomiarowym. Drugim z istotnych kryteriów jest błąd sumaryczny będący procentową wartością wskazania czujnika. W przypadku dobranych tensometrów błąd dopuszczalny nie przekracza 0,01 N (~ 1gF). W symulacyjnym etapie działania metody (rys. 2.1) istnieje możliwość wyznaczenia jednostkowego przemieszczenia węzłowego w wyniku działania określonej siły (sztywność lokalna). Stan quasi-swobodny oznacza, że istnieje minimalne naprężenie, które występuje podczas pomiaru. Użytkownik systemu określa dopuszczalne przemieszczenie węzłowe związane z oddziaływaniem grawitacyjnym. Temu przemieszczeniu odpowiada określona siła  $\Delta F_r$ , której wartość zależy od dopuszczalnego przemieszczenia oraz sztywności elementu. Błąd sumaryczny wskazania siły dla danej podpory nie może przekraczać 20% wartości siły  $\Delta F_r$ .

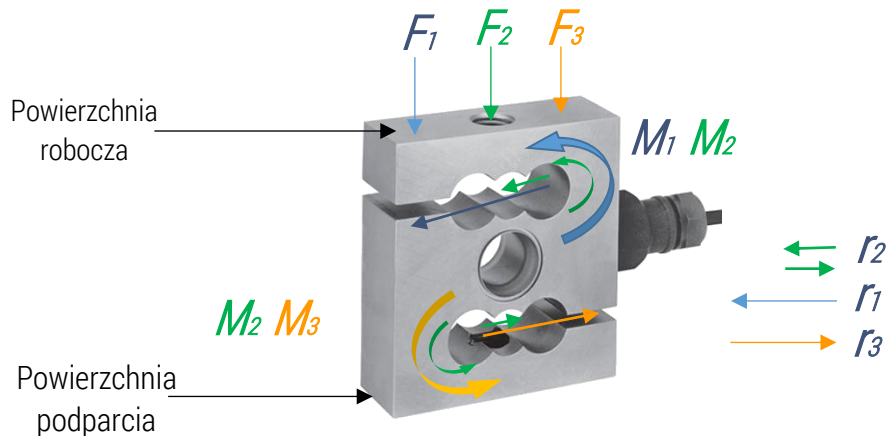
**Tabela 2.3.** Specyfikacja czujników tensometrycznych ZEPWN

| Numer fabryczny                     | Jedn.    | 8215       | 8214       | 8213       | 8212       | 8211       | 8210       | 8209       | 8208       |
|-------------------------------------|----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Zakres pomiarowy                    | N        | 5          | 5          | 5          | 5          | 5          | 5          | 5          | 5          |
| Rezystancja tensometrów             | $\Omega$ | 350        | 350        | 350        | 350        | 350        | 350        | 350        | 350        |
| Napięcie zasilania                  | V        | 5          | 5          | 5          | 5          | 5          | 5          | 5          | 5          |
| Dopuszczalne przeciążenie           | %        | 50         | 50         | 50         | 50         | 50         | 50         | 50         | 50         |
| Czułość                             | mV/V     | 0,7765     | 0,8930     | 0,8233     | 0,8907     | 0,8705     | 0,8163     | 0,8904     | 0,7723     |
| Błąd sumaryczny                     | %        | $\leq 0,2$ | $\leq 0,2$ | $\leq 0,2$ | $\leq 0,2$ | $\leq 0,2$ | $\leq 0,2$ | $\leq 0,2$ | $\leq 0,2$ |
| Temperaturowy współczynnik pełzania | %/10K    | 0,05       | 0,05       | 0,05       | 0,05       | 0,05       | 0,05       | 0,05       | 0,05       |

Na rys. 2.6 przedstawiono widok czujnika tensometrycznego typu „S”, użytego w konstrukcji aktywnych podpór. Czujnik ten z uwagi na swoją konstrukcję posiada przydatną cechę konstrukcyjną, polegającą na tym, że niezależnie od miejsca przyłożenia tej samej co do wartości siły ( $F_1-F_3$ ) na powierzchni roboczej, czujnik daje to samo wskazanie. Siła  $F_1$  generuje moment siły  $M_1$  w górnym przegubie czujnika działając na ramieniu oznaczonym fioletową strzałką. Ramię to jest dwa razy dłuższe od ramienia oznaczonego zieloną strzałką. W związku z tym moment siły  $M_2$  jest dwukrotnie mniejszy od  $M_1$ . Biorąc jednak pod uwagę symetrię układu, ten sam moment  $M_2$  jest generowany na dolnym przegubie tensometru. Działanie siły  $F_3$  nie generuje momentu siły na górnym przegubie tensometru, ponieważ wektor siły przechodzi przez oś obrotu, jednak siła ta generuje moment siły  $M_3$

równy co do wartości momentowi siły  $M_1$  i podwojonemu momentowi  $M_2$ . Równanie 1.2 opisuje powyższą właściwość czujników tensometrycznych typu „S”

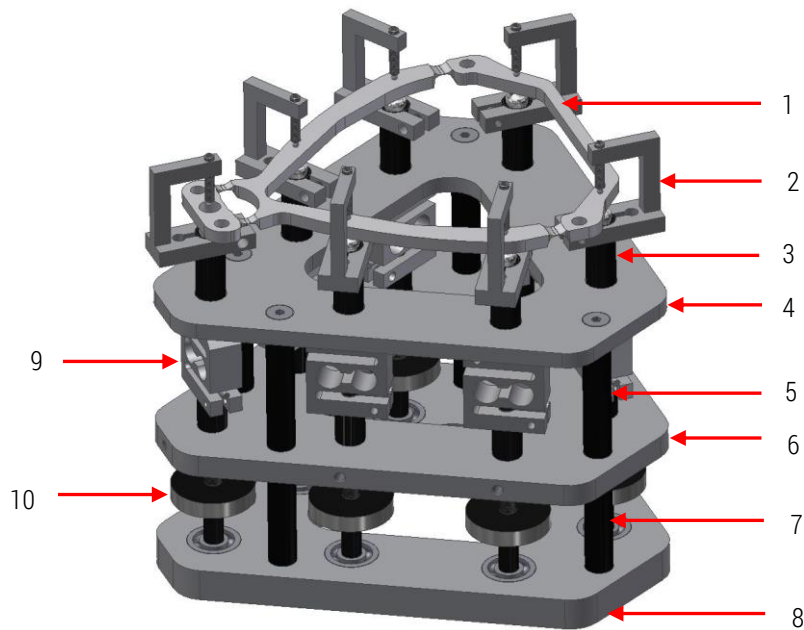
$$F_1 = F_2 = F_3 = 2 * \frac{M_2}{r_2} = \frac{M_1}{r_1} = \frac{M_3}{r_3} \quad (1.2)$$



Rys. 2.6. Konstrukcja zastosowanego czujnika tensometrycznego typu „S”

W dalszej części rozdziału przedstawiono alternatywne konstrukcje systemu mocowania adaptacyjnego, które opracowano w trakcie realizacji prac badawczych [133].

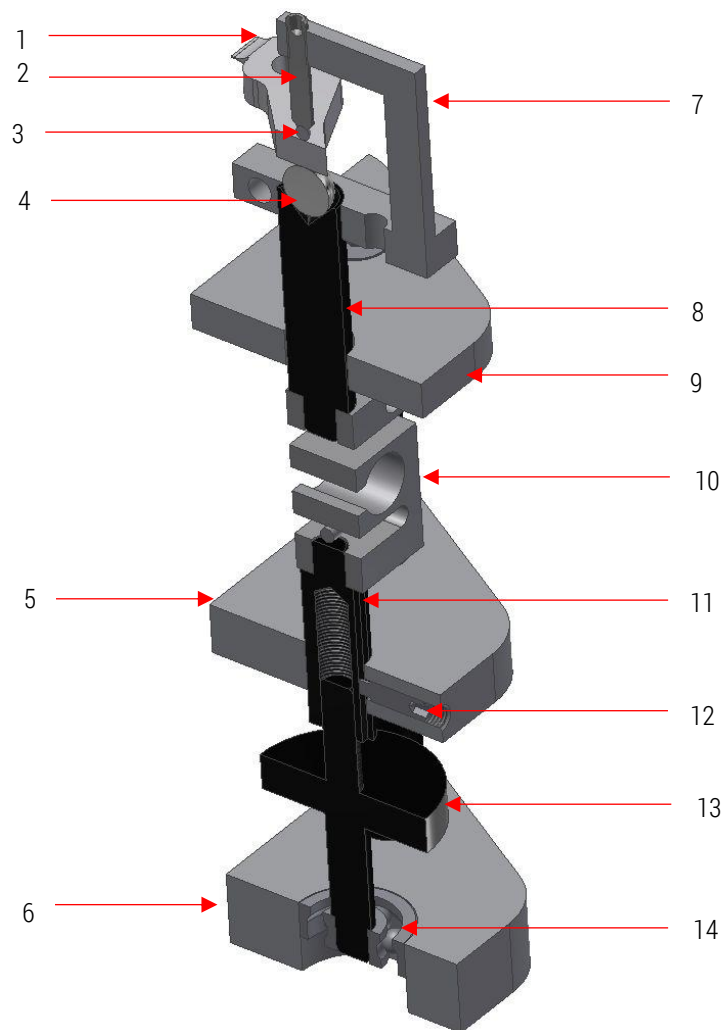
W ramach realizowanego projektu opracowano szczególną - kompaktową odmianę mocowania adaptacyjnego elementów niesztynnych w postaci wahaczy pełniących funkcję układu prowadzenia w precyzyjnych wagach laboratoryjnych. Na rys. 2.7 przedstawiono widok zaprojektowanego systemu mocowania. Stanowisko było przeznaczone do stykowych pomiarów wahaczy poziomych na współrzędnościowej maszynie pomiarowej. Po ustawieniu wahacza oraz wyregulowaniu wysokości podpór blokuje się pozycję wahacza za pomocą wkrętów dociskających górną powierzchnię wahacza. W związku z tym, że wkręt znajduje się we wsporniku (2) zaciskanym na trzpieniu (3) siła docisku nie zostaje odczytana na czujniku siły. W przypadku pomiaru stykowego operacja ta jest niezbędna w związku z działaniem sił nacisku pomiarowego pochodzących z maszyny współrzędnościowej. Pomiar odchyłki płaskości górnej powierzchni wahacza poziomego następuje poprzez pomiar skaningowy obszarów pomiędzy podporami. Opisane mocowanie jest bardzo kompaktowe jednak dedykowane do jednego typu elementów niesztynnych.



Rys. 2.7. Widok aktywnego mocowania dla wahaczy

Szkielet stanowiska stanowią 3 płytki (4),(6),(8) oddzielone słupkami dystansowymi (3) oraz (5). Mierzony element (1) podparty jest na zespole podpory, która w przekroju przedstawiona została na rys. 2.8.

Mierzony element (1) ustawiony jest pomiędzy magnetyczną kulką neodymową (4) a gumową kulką (3), która dociska element (1) do kulki (4) poprzez dokręcenie wkrętu w otworze wspornika (7), mocowanego do trzpienia (8). Trzpień (8) pasowany jest w sposób ciasny z elementem ruchomym przetwornika siły (10) oraz luźny z otworem w płytce (9). Trzpień (11) jest również pasowany w sposób ciasny w drugim otworze przetwornika (10). W elemencie (11) wykonany jest gwint drobnozwojny, pozwalający na stworzenie połączenia gwintowego z popychaczem (13) pasowanym ciasno w otworze łożyska (14), które z kolei jest pasowane ciasno w otworze płytki dolnej (6). Obrót popychacza (13) powoduje ruch elementów (1-4,7,8,10,11) w kierunku wyznaczonym przez oś otworu w płytce (9). Dzięki takiemu rozwiązaniu możliwa jest regulacja pozycji elementu mierzonego (1) wraz z jednoczesnym pomiarem siły. Blokowanie obrotu zespołu popychacza realizowane jest poprzez dokręcenie wkrętu (12), współpracującego suwliwie z rowkiem wykonanym w trzpieniu (11). W przedstawionym rozwiązaniu uwzględniono wymagania polegające na zastosowaniu stykowej, skaningowej metody pomiaru na WMP, jednak autor pracy rekomenduje zastosowanie metod bezstykowych w pomiarach elementów niesztynnych.



Rys. 2.8. Widok aktywnego mocowania dla wahaczy w przekroju

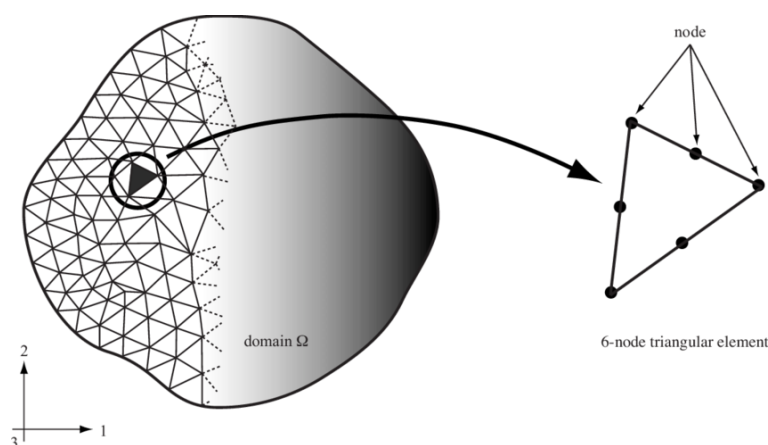
## 2.4 Metoda elementów skończonych

Metoda elementów skończonych (MES, z ang. *FEM – finite element method*) jest powszechnie stosowanym narzędziem do obliczeń inżynierskich i obok metody różnic skończonych (MRS), metody całkowania numerycznego (MCN), oraz metody elementów brzegowych (MEB) jest numeryczną metodą stosowaną w mechanice. Rozwój MES odbywał się równoległe do rozwoju techniki komputerowej i w początkowych stadiach w latach 60 XX wieku służyła ona do rozwiązywania zagadnień mechaniki liniowej a w kolejnych latach wraz ze wzrostem mocy obliczeniowej komputerów

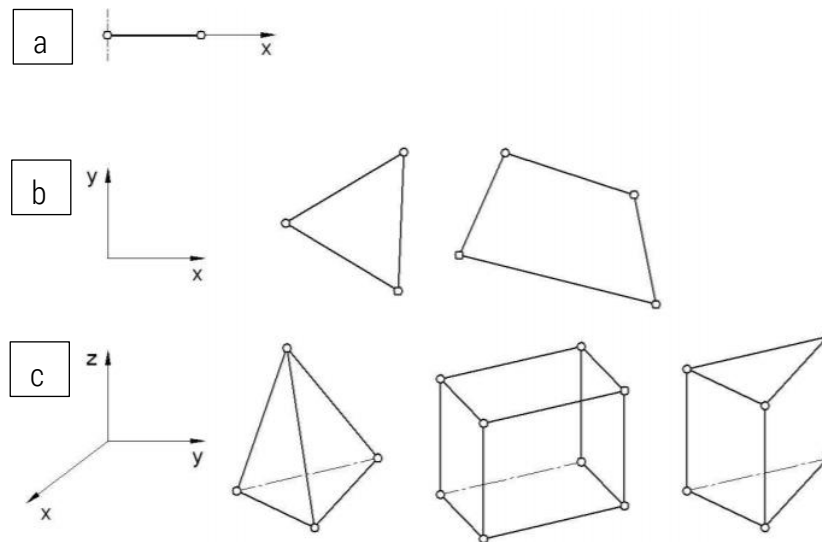
zakres zastosowania MES został rozszerzony o zagadnienia mechaniki nieliniowej czy konstrukcji materiałów.

Praktyczne problemy w mechanice rozwiązywane są poprzez dyskretyzację pól przemieszczeń, naprężeń czy temperatur opisywanych przez nieskończoną liczbę parametrów. Dla tych pól, w oparciu o nieskończenie małe obszary, tworzone są modele matematyczne w postaci równań różniczkowych, które z uwagi na dyskretyzację kontinuum dają przybliżone rozwiązania danego zagadnienia. Rozwiązania te dotyczą określonych punktów dlatego istotne jest określenie zależności pola pomiędzy nimi. Zależności te nazywane są funkcjami kształtu lub interpolacyjnymi, a właściwe określenie tych funkcji a także punktów i parametrów determinuje dokładność rozwiązania zagadnienia. Metoda elementów skończonych prowadzi zatem do modelu dyskretnego poprzez podział pola ciągłego na skończoną liczbę elementów o porównywalnym kształcie, określonych właściwościach węzłowych i funkcjach interpolacyjnych.

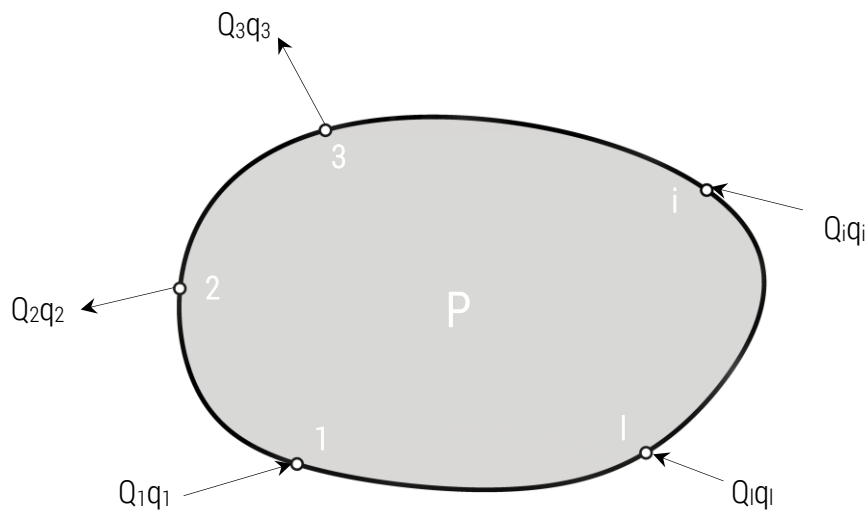
Metoda elementów skończonych posiada wiele reprezentacji przy czym dominującą w mechanice konstrukcji jest metoda przemieszczeniowa. Pierwszym etapem jest podział konstrukcji na małe elementy (np. trójkątne, czworosienne sześcienne) o określonych parametrach węzłowych czyli stworzenie matematycznego modelu dyskretnego. W kolejnym etapie MES szukane są zależności statyczno-geometryczne pomiędzy węzłami.



Rys. 2.9. Dyskretyzacja ośrodka ciągłego [18]



Rys. 2.10. Schematy ideowe przykładowych elementów skończonych a) 1D, b) 2D, c) 3D [107]



Rys. 2.11. Parametry statyczne „ $Q_i$ ” i geometryczne „ $q_i$ ” elementu „p” [107]

Związki statyczno-geometryczne można zapisać w postaci macierzowej zgodnie z równaniem (1.3)

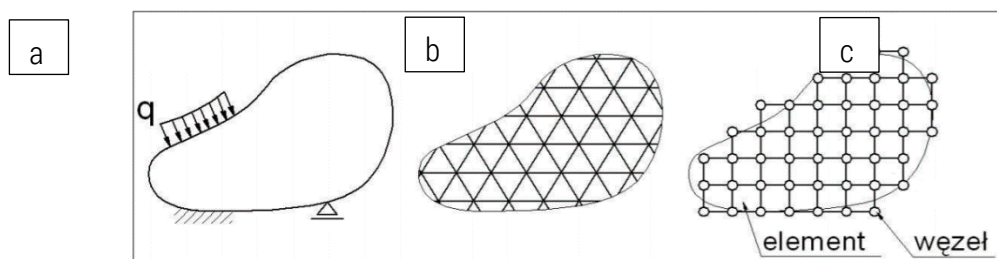
$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1l} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2l} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{l1} & k_{l2} & \cdots & k_{ll} \end{bmatrix}_p \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_l \end{bmatrix}_p = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_l \end{bmatrix}_p \quad (1.3)$$

lub w postaci uproszczonej (1.4):

$$k_p q_p = Q_p \quad (1.4)$$

Macierz  $k_p$  jest macierzą sztywności elementu,  $Q_i$ , gdzie  $i=1,2,\dots,l$  jest macierzą parametrów statycznych, a macierz  $q_i$ , gdzie  $i=1,2,\dots,l$  jest macierzą parametrów geometrycznych.

Następnym elementem w procedurze MES jest określenie właściwych funkcji kształtu, które w reprezentacji przemieszczeniowej prowadzą do przybliżonego opisu pola przemieszczeń rys. 2.12 c.



Rys. 2.12. Dyskretyzacja modelu ciągłego. a) – model ciągły, b) model dyskretny idealny, c) model dyskretny obliczeniowy [107]

To właśnie od przyjętych funkcji interpolacyjnych (kształtu), które najczęściej występują w postaci wielomianów, zależy zbieżność rozwiązania MES. Funkcje te muszą spełniać następujące kryteria:

- zgodności – ciągłość przemieszczeń w elemencie i ich zgodność na brzegach,
- ruchu sztywnego – podczas ruchu ciała sztywnego nie występują naprężenia,
- stałych odkształceń – posiadanie składników o stałych wartościach odkształceń,

Kolejny etap metody MES polega na połączeniu poszczególnych elementów w jeden układ. Etap ten nazywamy analizą układu, który doprowadza do następującego układu równań (1.5):

$$\begin{aligned}
 R_1 &= K_{11}r_1 + K_{12}r_2 + \dots + R_{1n}r_n \\
 R_2 &= K_{21}r_1 + K_{22}r_2 + \dots + R_{2n}r_n \\
 &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\
 R_n &= K_{n1}r_1 + K_{n2}r_2 + \dots + R_{nn}r_n
 \end{aligned}
 \tag{1.5}$$

lub w postaci macierzy:

$$\mathbf{R} = \mathbf{K}\mathbf{r}
 \tag{1.6}$$

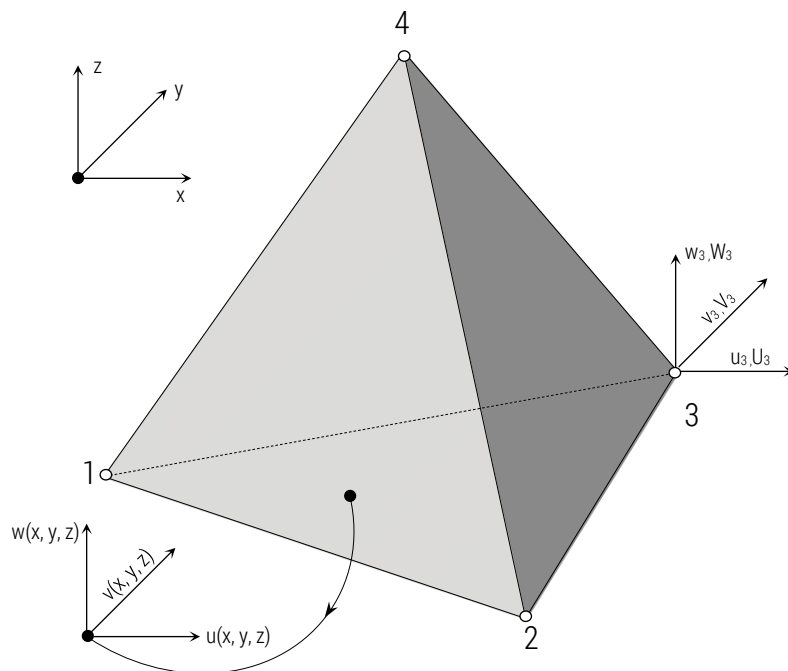
Macierz  $\mathbf{K} = [K_{ij}]$  jest macierzą sztywności a wektor  $\mathbf{K} = \{R_i\}$  jest wektorem składowych sił i momentów a wektor  $\mathbf{r} = \{r_i\}$  jest wektorem przemieszczeń.

Etap czwarty analizy MES stanowi rozwiązanie równań (1.5), prowadząc do wartości geometrycznych parametrów węzłowych, a w ostatnim piątym etapie analizy obliczane są szukane wielkości takie jak naprężenia czy odkształcenia.

W praktyce inżynierskiej mamy do czynienia z zagadnieniami przestrzennymi. Na rys. 2.13 przedstawiono element czworościenny jako przestrzenny odpowiednik elementu trójkątnego w zagadnieniach 2D. Pole przemieszczeń w przypadku elementu czworościennego ma trzy składowe będące funkcjami trzech zmiennych:  $u(x, y, z)$ ,  $v(x, y, z)$ ,  $w(x, y, z)$ . Wobec tego rzeczywiste parametry węzłowe i odpowiadające im parametry uogólnione dzielimy na trzy podgrupy.

Parametry geometryczne:

$$\begin{aligned} \mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} &\rightarrow \mathbf{q}_x = \begin{bmatrix} q_{x1} \\ q_{x2} \\ q_{x3} \\ q_{x4} \end{bmatrix} \\ \mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} &\rightarrow \mathbf{q}_y = \begin{bmatrix} q_{y1} \\ q_{y2} \\ q_{y3} \\ q_{y4} \end{bmatrix} \\ \mathbf{w} = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \end{bmatrix} &\rightarrow \mathbf{q}_z = \begin{bmatrix} q_{z1} \\ q_{z2} \\ q_{z3} \\ q_{z4} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1.7)$$



**Rys. 2.13.** Element czworościenny.  $u, v, w$  – parametry geometryczne.  $U, V, W$  – parametry statyczne



Parametry statyczne przyjmują postać:

$$\begin{aligned}
 U &= \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} \rightarrow Q_x = \begin{bmatrix} Q_{x1} \\ Q_{x2} \\ Q_{x3} \\ Q_{x4} \end{bmatrix} \\
 V &= \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} \rightarrow Q_y = \begin{bmatrix} Q_{y1} \\ Q_{y2} \\ Q_{y3} \\ Q_{y4} \end{bmatrix} \\
 W &= \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \\ W_4 \end{bmatrix} \rightarrow Q_z = \begin{bmatrix} Q_{z1} \\ Q_{z2} \\ Q_{z3} \\ Q_{z4} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{1.8}$$

Pole przemieszczeń można opisać wielomianem trzech zmiennych, a z każdą z nich związane są cztery parametry węzłowe. Należy zatem wybrać cztery kolejne składniki wielomianu – wartość stała i trzy składniki linowe:

$$N_q = [1 \ x \ y \ z] \tag{1.9}$$

czyli

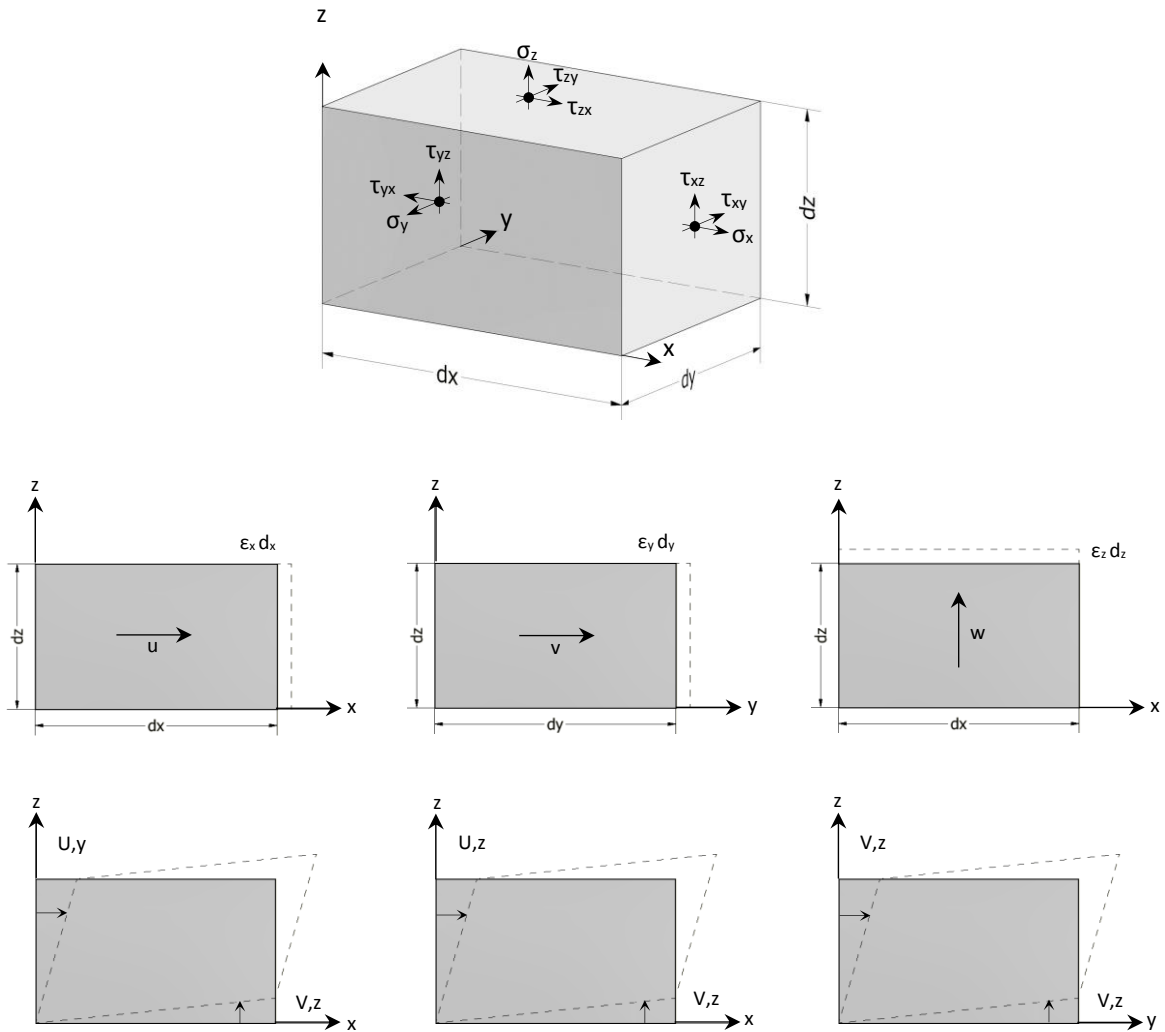
$$u = N_q q_x, \quad v = N_q q_y, \quad w = N_q q_z \tag{1.10}$$

w zapisie macierzowym

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_q & 0 & 0 \\ 0 & N_q & 0 \\ 0 & 0 & N_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} \tag{1.11}$$

Pole odkształceń ma sześć składowych, które zależą od przemieszczeń w sposób następujący:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \\
 \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \quad \gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}
 \end{aligned} \tag{1.12}$$



Rys. 2.14. Pole odkształceń elementu przestrzennego

Po uwzględnieniu (1.12) otrzymujemy:

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_q}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_q}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_q}{\partial z} \\ \frac{\partial N_q}{\partial y} & \frac{\partial N_q}{\partial x} & 0 \\ \frac{\partial N_q}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_q}{\partial x} \\ 0 & \frac{\partial N_q}{\partial z} & \frac{\partial N_q}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} = B_q \begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

$B_q$  jest macierzą o wymiarze 6x12, i po uwzględnieniu (1.9) i (1.13) przyjmuje postać:

$$B_q = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

Składowe pola naprężeń przyjmują postać macierzy (1.16):

$$\sigma = \{\sigma_x \quad \sigma_x \quad \sigma_x \quad \tau_{xy} \quad \tau_{xz} \quad \tau_{yz}\} \quad (1.15)$$

Równanie konstytutywne po uwzględnieniu (1.14) przyjmuje postać:

$$\sigma = D\varepsilon = DB_q \begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

Macierz sztywności materiału izotropowego we wzorze 1.17 ma postać:

$$D = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & b & b & 0 & 0 & 0 \\ b & 1 & b & 0 & 0 & 0 \\ b & b & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c \end{bmatrix} \quad (1.17)$$

gdzie:

$$b = \frac{\nu}{1-\nu}, c = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}$$

E jest modułem Younga

$\nu$  jest liczbą Poissona

Zastosowanie zasady prac wirtualnych daje wynik:

$$\begin{bmatrix} Q_x \\ Q_y \\ Q_z \end{bmatrix} = \left( \int_V B_q^T D B_q dV \right) \begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

Stąd macierz sztywności dla wielkości uogólnionych, przy uwzględnieniu, że macierze  $D$ ,  $B_q$  są stałe, wyraża się jako:

$$k_q = \int_V B_q^T D B_q dV = B_q^T D B_q V \quad (1.19)$$

Po wykonaniu mnożenia w (1.20) otrzymujemy:

$$k_q = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} V \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & b & 0 & 0 & 0 & 0 & b \\ 0 & 0 & c & 0 & 0 & c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c & 0 & 0 & c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & b \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c & 0 & 0 & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c & 0 & 0 & c & 0 \\ 0 & b & 0 & 0 & 0 & 0 & b & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.20)$$

Poszukiwana macierz sztywności dla wielkości rzeczywistych ma postać (1.21):

$$k = \begin{bmatrix} L^T & 0 & 0 \\ 0 & L^T & 0 \\ 0 & 0 & L^T \end{bmatrix} K_q \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

gdzie:

$$L = G^{-1}, G = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} \quad (1.22)$$

Elementy macierzy  $G$  to współrzędne węzłów. Tak opisany element jest dostosowany. Zarówno wartość stała i składniki liniowe zapewniają ruch sztywny i stałość odkształceń, a przemieszczenia

zmieniają się liniowo wzdłuż krawędzi. Dla każdej z tych krawędzi określone są po dwa parametry związane z każdym składowym przemieszczeniem.

Do opisu pola przemieszczeń stosuje się także inne elementy przestrzenne wyższych rzędów takie jak np. prostopadłościowe (8 węzłów i po 24 parametry geometryczne i statyczne), czy czworościenne (10 węzłów).

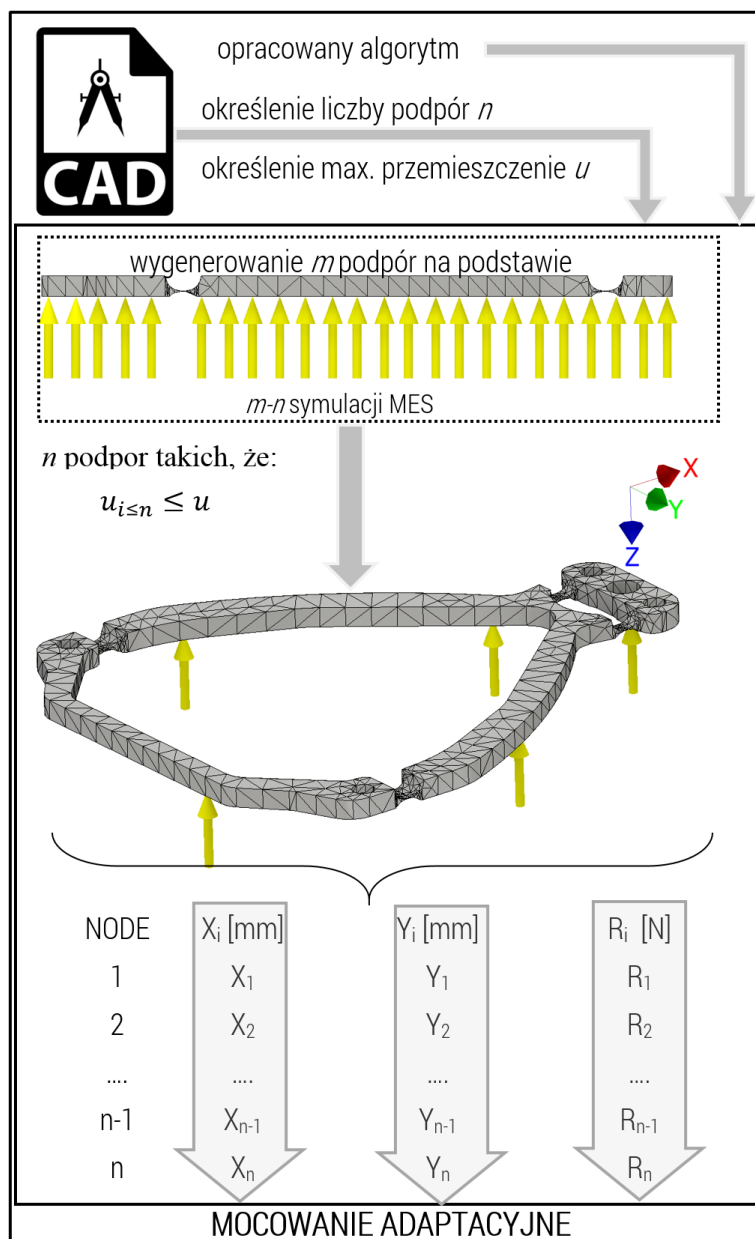
## 2.5. Algorytm lokowania aktywnych podpór

Algorytm optymalnego lokowania aktywnych podpór został opracowany w oprogramowaniu ANSYS Multiphysics. Pakiet ANSYS jest wiodącym narzędziem do obliczeń metodą elementów skończonych oraz metodą objętości skończonych (analiz numerycznych) i jest on wykorzystywany w symulacjach w wielu dziedzinach z zakresu przemysłu czy nauki.

Moduł preprocesora odpowiedzialny jest za przygotowanie modelu do analizy. Pozwala on na tworzenie geometrii konstrukcji lub jej import z popularnych programów do projektowania CAD, po czym pozwala na wygenerowanie siatki elementów. Proces ten może odbywać się w sposób automatyczny zarówno w analizach liniowych jak i nieliniowych. W module postprocesora odbywa się prezentacja wyników w formie tekstowej lub graficznej.

W zaproponowanym algorytmie optymalnego lokowania podpór wykorzystano ideę mocowania powierzchniowego pin-type do określenia warunków brzegowych (podparcie powierzchniowe). W pierwszym etapie należy opracować model dyskretny zagadnienia w oparciu o model CAD, właściwości materiałowe elementu, warunki brzegowe, obciążenie modelu (grawitacja). Do dyskretyzacji modelu przyjęto strukturalną siatkę elementów opartą na elementach bryłowych typu heksagonalnego z liniową funkcją kształtu. Na etapie przygotowania modelu dyskretnego określa się płaszczyznę/powierzchnię „zerową”, na której w sposób wirtualny podparty jest detal przy czym liczba podpór wirtualnych równa jest liczbie węzłów. W każdym z tych węzłów odebrany jest jeden stopień swobody w kierunku normalnym do powierzchni. W kolejnym etapie działania algorytmu w sposób iteracyjny wykonywane jest rozwiązanie zagadnienia MES w taki sposób, że po każdej iteracji zmieniają się warunki brzegowe tj. usuwane są wiązania z węzłów o najmniejszej wartości reakcji nodalnej  $r_i$ . Jednocześnie sprawdzany jest warunek przemieszczenia nodalnego  $u_i$ . Dopuszczalne przemieszczenie węzłowe jest zdefiniowane przez użytkownika wewnątrz podprogramu. Dodatkowym

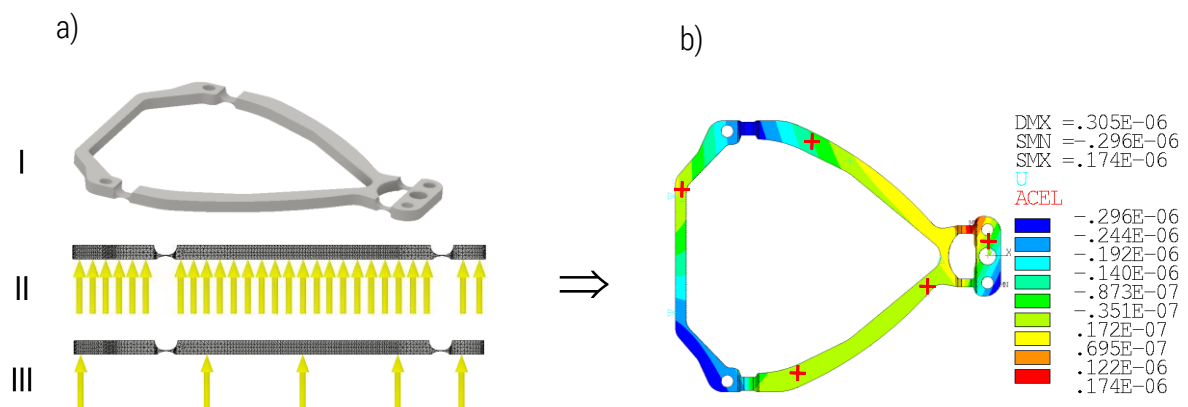
parametrem określonym przez użytkownika jest minimalna liczba podpór  $m$ , na której podparty zostanie element podczas pomiaru.



Rys. 2.15. Schemat działania algorytmu optymalnego lokowania podpór aktywnych

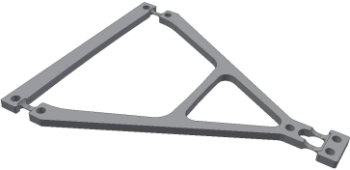
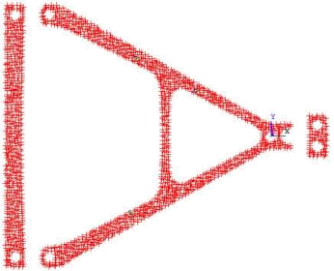
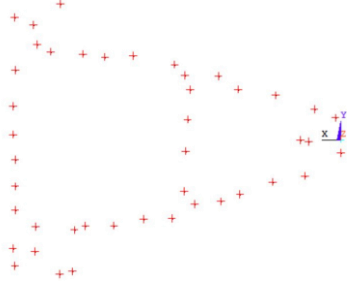
Warunkiem zakończenia działania algorytmu jest przekroczenie dopuszczalnego przemieszczenia nodalnego  $u_i$  lub osiągnięcie minimalnej liczby podpór  $m$ . Po zakończeniu działania algorytmu, użytkownik otrzymuje plik txt. z parametrami jak na rys. 2.15 (pozycja podpory  $X_i, Y_i$  oraz wartość reakcji  $r_i$ ). Uzyskane w ten sposób parametry są danymi wejściowymi do adjustacji aktywnych podpór. Proces wyznaczania optymalnej lokalizacji aktywnych podpór przedstawiono w oparciu o uproszczony schemat na rys. 2.16a. Model CAD elementu mierzonego (I) podpierany jest powierzchniowo przez  $N$

podpór, gdzie  $N$  oznacza liczbę węzłów na podpieranej powierzchni (II). W drugim etapie w sposób iteracyjny usuwane są podpory o najmniejszej reakcji węzłowej. Proces ten trwa do momentu osiągnięcia dopuszczalnego przemieszczenia węzłowego (III). Iteracyjne usuwanie podpór wirtualnych prowadzi do przejścia z powierzchniowego podparcia elementu mierzonego (stan swobodny) do podparcia na zredukowanej liczbie podpór aktywnych, które umożliwiają pomiar elementu w stanie quasi-swobodnym. Rys. 2.16b przedstawia górny widok bryły elementu po zakończonym procesie wyznaczania optymalnej pozycji podpór. Czerwone krzyżyki pokazują miejsca podparcia elementu, a widoczna skala (kolory od niebieskiego do czerwonego) przedstawia mapę przemieszczeń w metrach w wyniku podparcia elementu zgodnie z wyznaczonym algorytmem.

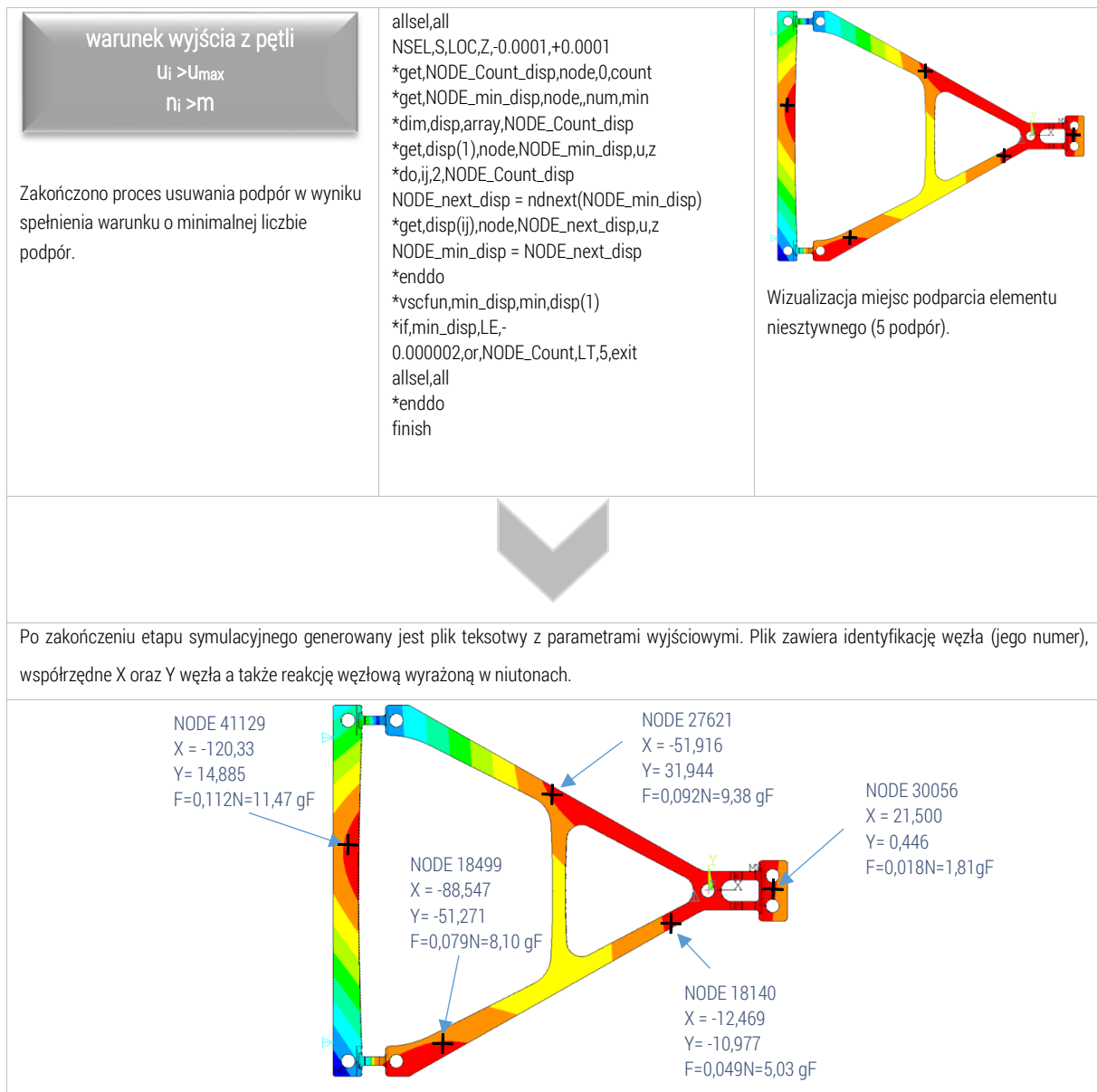


**Rys. 2.16.** Proces lokowania aktywnych podpór: a) I – przygotowanie modelu CAD, II wygenerowanie  $N$ -podpór wirtualnych i iteracyjne ich usuwanie, III – podparcie elementu na zredukowanej liczbie podpór, b) widok bryły CAD z góry z oznaczeniem punktów podparcia i kolorową mapą przemieszczeń węzłowych

Na rys. 2.17 w sposób szczegółowo przedstawiono schemat działania algorytmu optymalnego lokowania podpór aktywnych. W pierwszej kolumnie tabeli znajduje się skrócony opis operacji, w kolumnie środkowej znajduje się kod APDL (z *ang.* *Ansys Parametric Design Language*) odpowiedzialny za realizację danej funkcji. Trzecia kolumna przedstawia wizualizację CAD każdego etapu.

|  |  |   |
|--|--|---|
| <p style="text-align: center;">wybranie węzłów na podstawie</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">usunięcie węzła o najmniejszej reakcji węzłowej</p> <p><b>parametry wejściowe:</b></p> <p><math>U_{max}</math> – dopuszczalne przemieszczenie nodalne</p> <p>m – liczba podpór</p> | <pre>*do,j,1,100000000000 save,solved,db,,model /solu solve finish nset,s,d,uz,-0.0001,+0.0001 *get,NODE_Count,node,0,count *get,NODE_min,node,,num,min *dim,forces,array,NODE_Count,2 forces(1,1) = NODE_min *get,forces(1,2),node,NODE_min,RF,FZ *do,i,2,NODE_Count NODE_next = ndnext(NODE_min) forces(i,1) = NODE_next *get,forces(i,2),node,NODE_next,RF,FZ NODE_min = NODE_next *vscfun,min_l,lmin,forces(1,2) node_num = forces(min_l,1) /prep7 ddelete,node_num,UZ</pre> | <p>Model CAD elementu</p>  <p>Wygenerowanie N podpór (węzłów) na podstawie elementu.</p>  |
| ↓  |  |   |
| <p style="text-align: center;">rozwiązanie zagadnienia MES</p> <p style="text-align: center;">↻</p> <p style="text-align: center;">usunięcie węzła o najmniejszej reakcji węzłowej</p> <p>Iteracyjne usuwanie kolejnych wiązań.</p>  | <pre>*do,j,1,100000000000 save,solved,db,,model /solu solve finish nset,s,d,uz,-0.0001,+0.0001 *get,NODE_Count,node,0,count *get,NODE_min,node,,num,min *dim,forces,array,NODE_Count,2 forces(1,1) = NODE_min *get,forces(1,2),node,NODE_min,RF,FZ *do,i,2,NODE_Count NODE_next = ndnext(NODE_min) forces(i,1) = NODE_next *get,forces(i,2),node,NODE_next,RF,FZ NODE_min = NODE_next *vscfun,min_l,lmin,forces(1,2) node_num = forces(min_l,1) /prep7 ddelete,node_num,UZ</pre> |  <p>W tym etapie pozostało 44 węzły. Proces usuwania węzłów trwa do momentu osiągnięcia przemieszczenia dopuszczalnego lub minimalnej liczby podpór.</p>                    |





Rys. 2.17. Algorytm optymalnego lokowania aktywnych podpór

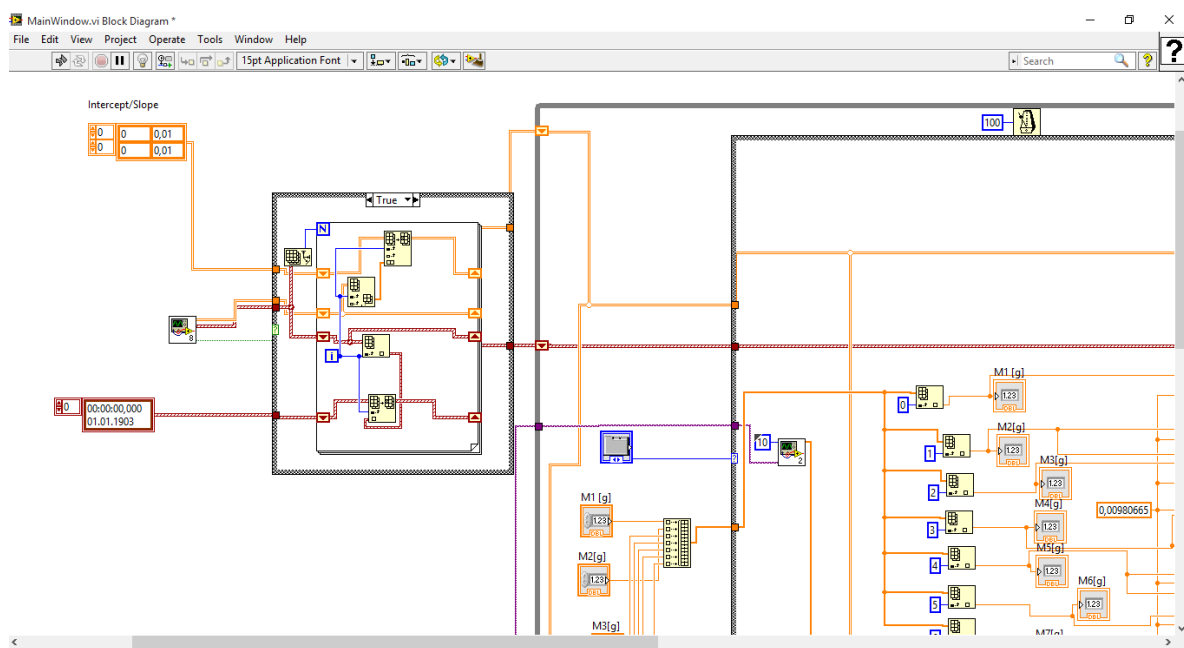
Opracowany algorytm optymalnego lokowania aktywnych podpór jest narzędziem wspierającym adaptacyjny system mocowania elementów nieszytywnych i automatyzuje proces wyszukiwania optymalnych warunków podparcia. Podobny efekt można uzyskać poprzez ręczne określenie warunków brzegowych jednak czas po którym osiągnie się zadowalający efekt może ulec znacznemu wydłużeniu. W przypadku nieskomplikowanych geometrii łatwo jest przewidzieć optymalną pozycję podpór aktywnych, jednak wybór ten należy zweryfikować poprzez wykonanie symulacji MES i uzyskanie informacji o przemieszczeniu i reakcjach nodalnych. Informacje te jak już wcześniej określono stanowią parametry wejściowe do adjustacji aktywnych podpór.

## 2.6. Oprogramowanie systemu i procedura kalibracji aktywnych podpór

Program do obsługi mocowania adaptacyjnego opracowany został w celu wizualizacji i monitorowania wartości reakcji działających na badany element oraz umożliwienia dokładnego pomiaru elementu mocowanego w warunkach quasi-swobodnych.

Fundamentalnym założeniem aplikacji było zapewnienie obsługi wielu sygnałów napięciowych równoległe, analiza i przeliczanie sygnałów napięciowych na wartości reakcji według prostej wzorcowania w czasie rzeczywistym, wizualizacja sił działających na badany element, możliwość wzorcowania oraz zapamiętywania wzorcowania dla każdego z czujników osobno.

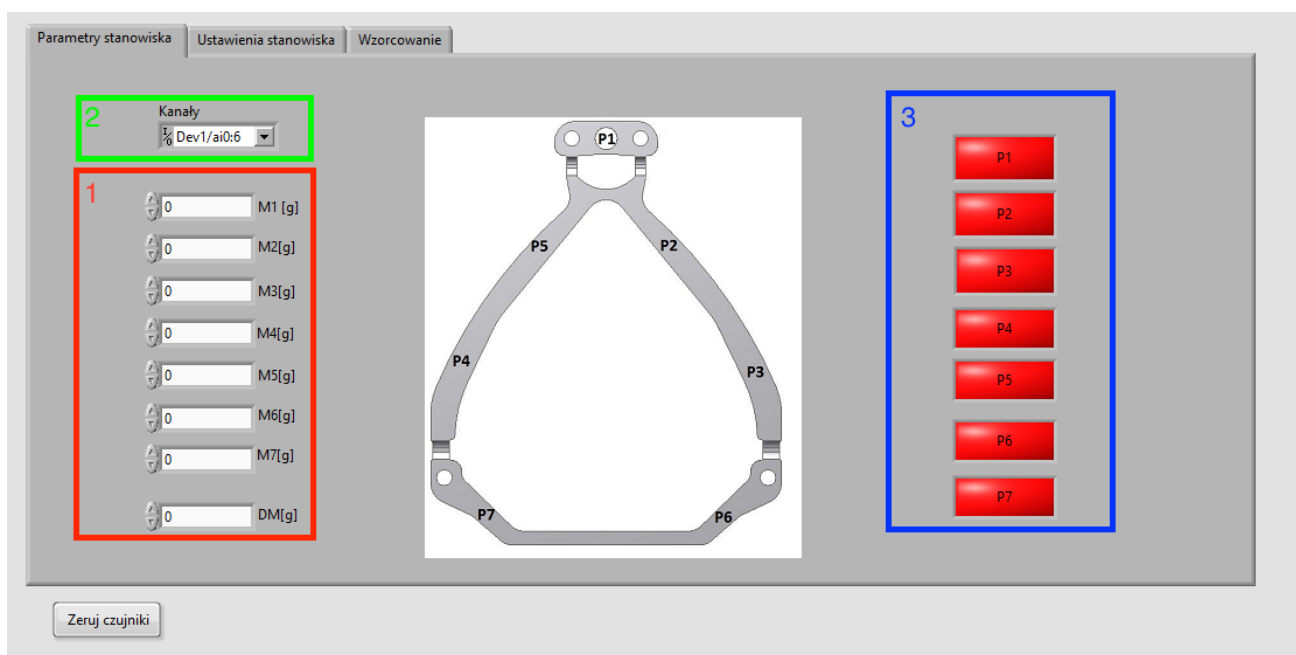
Aplikacja napisana została w środowisku LabView w wersji 2013. Wybrane środowisko umożliwia tworzenie zaawansowanych programów laboratoryjnych poprzez interfejs graficzny. Jego zaletami jest wysoka poziomowość języka dzięki czemu programista posiada wiele predefiniowanych rozwiązań spełniających postawione wymagania. W celu obsługi karty pomiarowej użyto kompatybilnej biblioteki DAQ MX. Biblioteka ta jest zestawem narzędzi niezbędnych do wykonywania pomiarów za pomocą środowiska LabView. Aplikacje stworzone w języku LabView cechują się dwoma widokami: schematu blokowego – realizującego logikę działania programu oraz widoku kontrolki – będącemu odpowiednikiem interfejsu użytkownika. Główne okno środowiska LabView wraz z fragmentem kodu źródłowego przedstawione zostało na rys. 2.18.



Rys. 2.18. Widok głównego okna programu wraz z fragmentem kodu źródłowego

Program składa się z trzech głównych zakładek: ekranu zadawania obciążeń nominalnych oraz ich maksymalnych odchyień, ekranu odczytu z poszczególnych czujników oraz ekranu wzorcowania. Przy każdej aktywnej karcie możliwe jest także wyzerowanie wskazań czujników poprzez naciśnięcie przycisku „Zeruj czujniki”.

Ekran widoczny na rys. 2.19 jest ekranem głównym aplikacji i wyświetla się po jej uruchomieniu. W sekcji 1 oznaczonej czerwoną ramką wpisywane są wartości reakcji (od M1 do M7) przeliczone na gramy. Wartości te wpisywane są zgodnie z wynikami uzyskanymi z symulacji (rys. 2.17). W tej części programu należy również wskazać kartę pomiarową podłączoną do komputera (domyślnie adres Dev1) oraz zakres kanałów tej karty z których odczytywane są wartości (domyślnie ai0:6). Wyboru aktywnych kanałów dokonuje się za pomocą rozwijanej listy widocznej na rys. 2.20 w sekcji 2. Zestaw ikon P1 – P7, widocznych w sekcji 3 tego samego rysunku sygnalizuje czy odczytywane przez program wartości zmierzone odpowiadają zadany w sekcji 1.

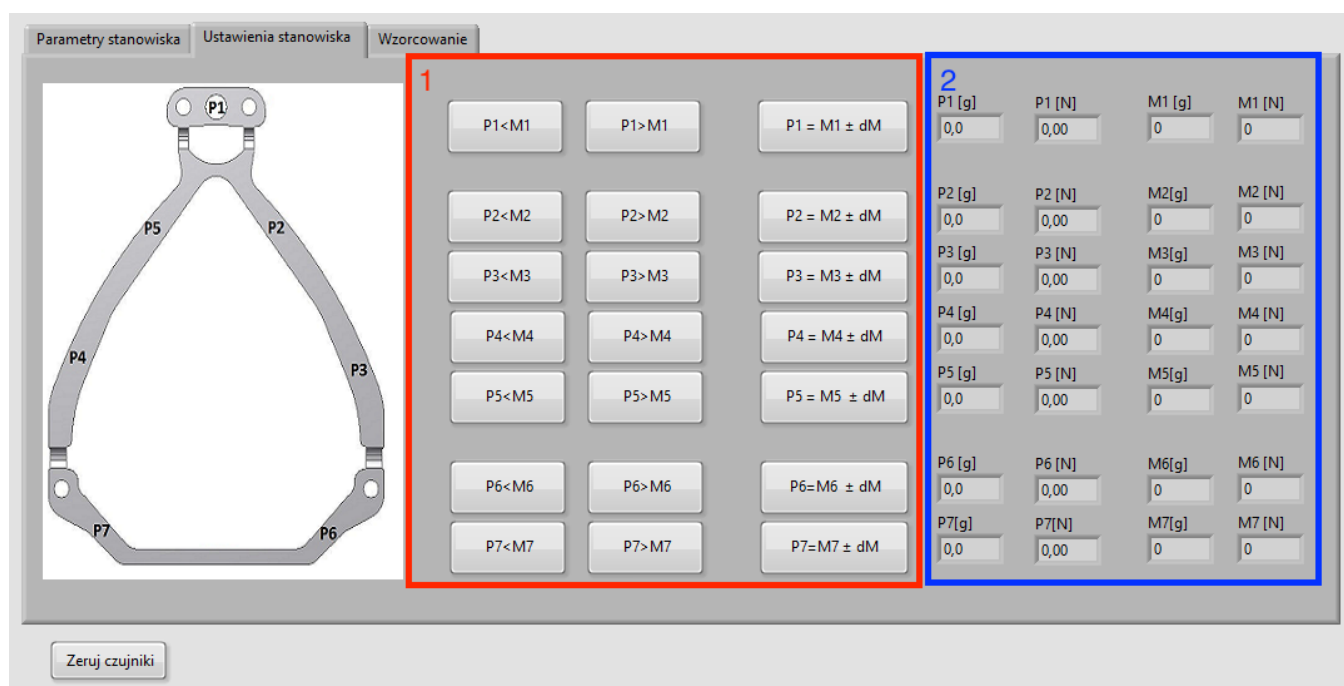


Rys. 2.19. Ekran zadawania obciążeń nominalnych

System w sposób ciągły monitoruje aktualne wskazania wszystkich aktywnych czujników siły. Jeśli wskazania w sekcji 3 równe są zadany w sekcji 1 wówczas tło odczytu w sekcji 3 ma kolor zielony. Jeśli kolor ten jest niebieski wówczas oznacza to, że reakcja na danej podporze jest mniejsza od zadanej i czerwona gdy aktualna wartość jest większa od wartości zadanej. W sekcji 1 w ostatnim

wierszu wpisywana jest dopuszczalna tolerancja ustawienia wartości reakcji i domyślnie równa jest ona 0,01N. (~ 1g). Parametr ten oznaczono w aplikacji jako *DM*. W środkowej części aplikacji znajduje się zdjęcie elementu mierzzonego wraz z wizualizacją rozstawienia aktywnych podpór. Widok ten ułatwia operatorowi właściwe ustawienia i identyfikację aktywnych podpór.

Drugim z ekranów jest panel wyświetlający w czasie rzeczywistym zmierzone wartości sił nacisku w gramach oraz niutonach. W jego pierwszej części widocznej na rys. 2.20 umiejscowione są ikony które w zależności od wartości zmierzonej oraz zadanej sygnalizują stan obciążenia elementu odpowiednim kolorem. Jeśli wartość siły z danego czujnika będzie mniejsza od zadanej z uwzględnieniem tolerancji *DM*, wówczas wyświetli się ikona niebieska w pierwszej kolumnie sekcji 1. Analogicznie jeśli wartość ta będzie większa wówczas zasygnalizuje to ikona w drugiej kolumnie sekcji 1 podświetlona na czerwono. Prawidłowe ustawienie wartości reakcji wyświetlane jest w kolumnie trzeciej tej samej sekcji przy czym kolor podświetlenia jest zielony. Kolorystyczna wizualizacja jest przydatna na etapie adjustacji układu natomiast zmierzone wartości siły przedstawiona są w sekcji 2 (niebieska ramka). Bezpośrednie odczyty z karty analogowej wyrażone są w gramach oraz niutonach.



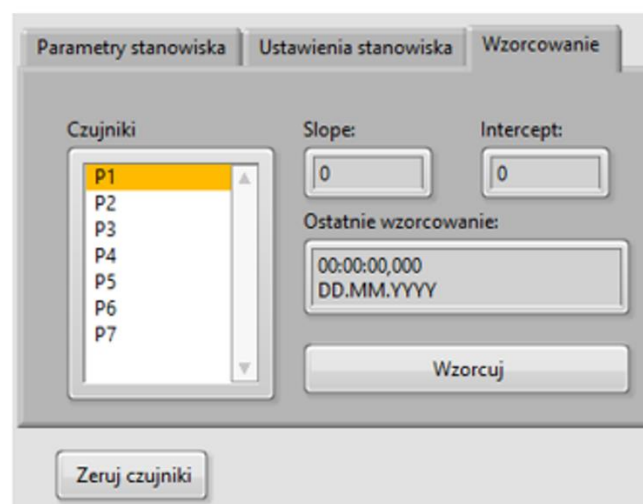
Rys. 2.20. Ekran odczytu wartości mierzonych

Ostatnim ekranem jest zakładka pozwalająca wywzorcować każdy podłączony do karty danych czujnik. Procedura polega na ustawianiu na czujniku odważników wzorcowych i podaniu masy nominalnej takiego odważnika w programie. Po zakończeniu pomiarów odważników wzorcowych program dopasuje punkty pomiarowe prostą:

$$M_{wz} = aP_i + b, \quad (1.23)$$

gdzie  $M_{wz}$  jest masą odważnika wzorcowego wyrażoną w gramach,  $a$  - jest współczynnikiem kierunkowym prostej dopasowania (w programie wartość „Slope”),  $P_i$  - wartością bezpośrednio odczytaną przez aplikację z karty pomiarowej, a parametr  $b$  - jest współczynnikiem przesunięcia (w programie wartość „Intercept”).

Podczas procedury wzorcowania należy wykonać je dla każdego z czujników. Współczynniki prostej kalibracyjnej są zapisywane oraz zapamiętywane dzięki czemu nie jest konieczne ponowne wykonywanie wzorcowania w przypadku np. zamknięcia aplikacji. Widok okna kalibracji przedstawiono na rys. 2.21.



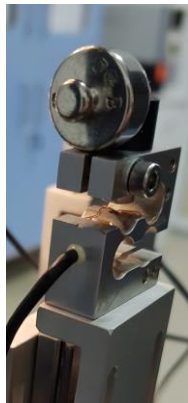
Rys. 2.21. Ekran wzorcowania poszczególnych czujników

Kalibracja czujników siły odbywa się z wykorzystaniem odważników wzorcowych w klasie M1

**Tabela 2.4** Błędy graniczne dopuszczalne dla odważników klasy M1 wg klasyfikacji OIML R-111-1

| $M_{wz}$ [g] | +/- $\delta m$ |
|--------------|----------------|
| 1            | 0,0010         |
| 2            | 0,0012         |
| 5            | 0,0016         |
| 10           | 0,0020         |
| 20           | 0,0025         |
| 50           | 0,0030         |

Na rys. 2.22 przedstawiono widok aktywnej podpory podczas kalibracji czujnika siły.



**Rys. 2.22.** Widok odważnika M1 10g podczas kalibracji czujnika siły

## 2.7. Opis stanowiska badawczego i przygotowania pomiaru

Na rys. 2.23 znajduje się widok stanowiska badawczego, które składa się z maszyny współrzędnościowej wyposażonej w sensor bezstykowy (1) oraz system adaptacyjnego mocowania. Na stole maszyny pomiarowej znajduje się układ aktywnych podpór wyposażonych w czujniki tensometryczne służące do nastawiania i kontroli wartości reakcji. Czujniki te podłączone są do wzmacniacza sygnału (6). Komputer przenośny (7) posiada oprogramowanie służące do zadawania i monitorowania wartości reakcji na podporach aktywnych. Sygnały pomiarowe przetwarzane są poprzez kartę akwizycji danych NI.



**Rys. 2.23.** Widok systemu adaptacyjnego mocowania na WMP. 1-WMP, 2-element mierzony, 3-podpory aktywne, 4-monitory WMP, 5-karta akwizycji danych, 6-komputer systemu mocowania, 7-elektronika czujników siły

W zaproponowanej metodzie mocowania adaptacyjnego jako pierwszą wykonuje się procedurę symulacyjną. Procedura ta odbywa się z wykorzystaniem opracowanego algorytmu zaimplementowanego w oprogramowaniu ANSYS. Rolą algorytmu, który w sposób szczegółowy opisano w rozdziale 2.5 jest określenie optymalnych pozycji podpór aktywnych a także odpowiadającym im wartości reakcji, które należy ustawić przed wykonaniem pomiaru na WMP. Reakcje uzyskane drogą symulacyjną zgodnie z opracowanym algorytmem odzwierciedlają stan, w którym naprężenia występujące w elemencie mierzonym w trakcie pomiaru są pomijalne, co oznacza stan quasi swobodny. Warto w tym miejscu podkreślić, że część symulacyjna wykonywana jest tylko raz dla danego elementu. W związku z tym metoda może zostać zastosowana do pomiaru elementów produkowanych seryjnie bez konieczności każdorazowego wykonywania czasochłonnej procedury symulacyjnej. Przygotowanie modelu CAD do modułu symulacyjnego nie wymaga także wiernego odwzorowania warunków brzegowych standardowo związanych z warunkami mocowania elementu w zespole, ponieważ to właśnie opracowany algorytm sugeruje optymalne rozlokowanie podpór aktywnych. Przyjęcie układu współrzędnych na bryle CAD jest dowolne, jednak warto przyjąć go w punkcie charakterystycznym, łatwo identyfikowalnym, ponieważ na dalszym etapie mocowania na podporach aktywnych, musi zostać odtworzony.

Po zakończonej części symulacyjnej, użytkownik systemu otrzymuje pakiet danych o treści przedstawionej w tabeli 2.5.

**Tabela 2.5** Parametry wejściowe systemu aktywnych podpór

| Identyfikacja węzła | X (mm) | Y (mm) | $F_r$ (N) |
|---------------------|--------|--------|-----------|
| 1                   | $x_1$  | $y_1$  | $F_{r1}$  |
| 2                   | $x_2$  | $y_2$  | $F_{r2}$  |
| 3                   | $x_3$  | $y_3$  | $F_{r3}$  |
| 4                   | $x_4$  | $y_4$  | $F_{r4}$  |
| $N_i$               | $x_i$  | $y_i$  | $F_{ri}$  |

Pierwsza kolumna w tabeli oznacza numer węzła, kolejne dwie kolumny oznaczają współrzędne X oraz Y węzła zgodnie z przyjętym układem współrzędnych, natomiast ostatnia kolumna to reakcja węzłowa. Uzyskany pakiet danych pozwala na realizację pozostałych kroków związanych z mocowaniem elementu niesztynnego. Znając właściwą pozycję (współrzędne X,Y) każdej z podpory można przystąpić do ustawienia aktywnych podpór na płycie bazowej, która następnie wraz z podporami mocowana jest na stole maszyny pomiarowej.

Na rysunku 2.24 przedstawiono widok płyty bazowej, na której ustawione są podpory aktywne zgodnie z danymi symulacyjnymi. Na tym etapie użytkownik ustawia podpory w zadanej pozycji X,Y.

Proces ustawienia podpór aktywnych na płycie bazowej można zrealizować na dwa sposoby:

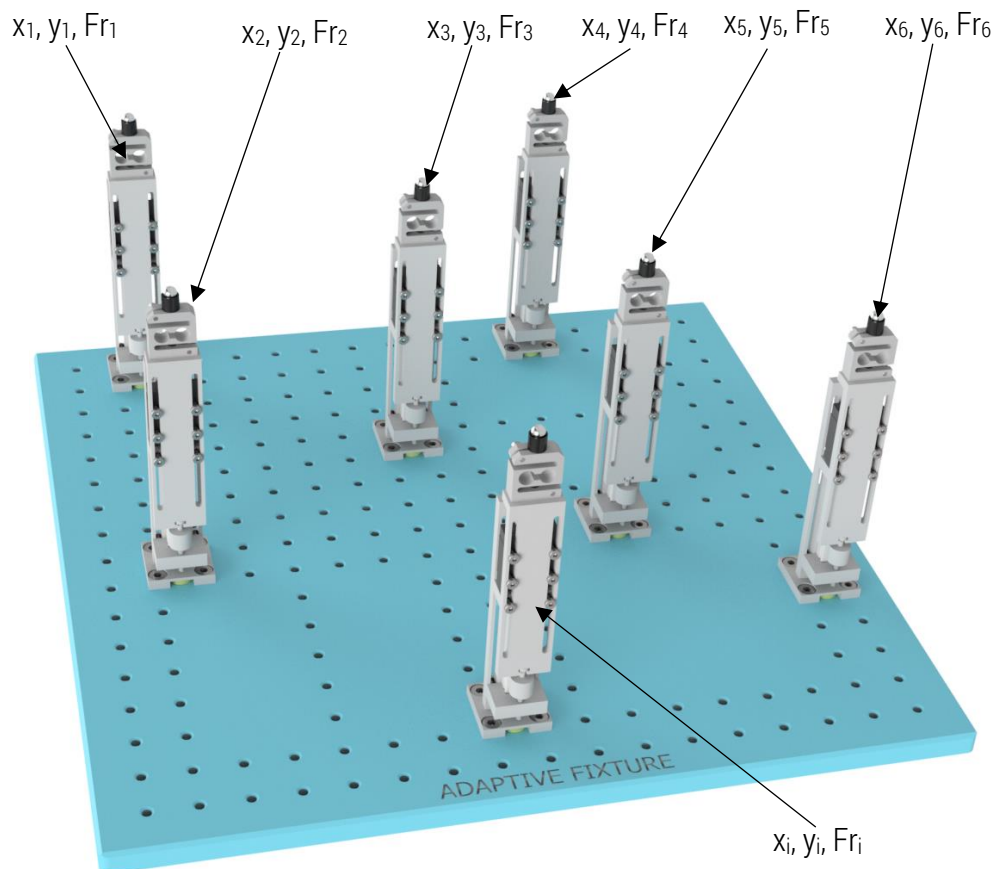
- z wykorzystaniem WMP,
- z wykorzystaniem dedykowanej płyty bazowej.

Pierwszy z nich zakłada wykorzystanie maszyny pomiarowej, na której odbywa się bezstykowy pomiar elementu niesztynnego. Znając wzajemną pozycję podpór, użytkownik systemu dokonuje najazdu na zadaną pozycję X,Y i w tym miejscu ustawia podporę aktywną. Najlepszym rozwiązaniem jeśli chodzi o wsparcie w pozycjonowaniu X,Y podpór jest maszyna wyposażona w sensor optyczny.

Na rys. 2.25a przedstawiono widok płyty bazowej z zamocowanymi podporami aktywnymi. Konstrukcję podpór omówiono w sposób szczegółowy w rozdziale 2.4 gdzie przedstawiono także możliwości w zakresie ich mocowania na stole WMP. Podpory są mocowane do płyty bazowej poprzez połączenie śrubowe lub z wykorzystaniem magnesów neodymowych. W związku z powyższym istnieje

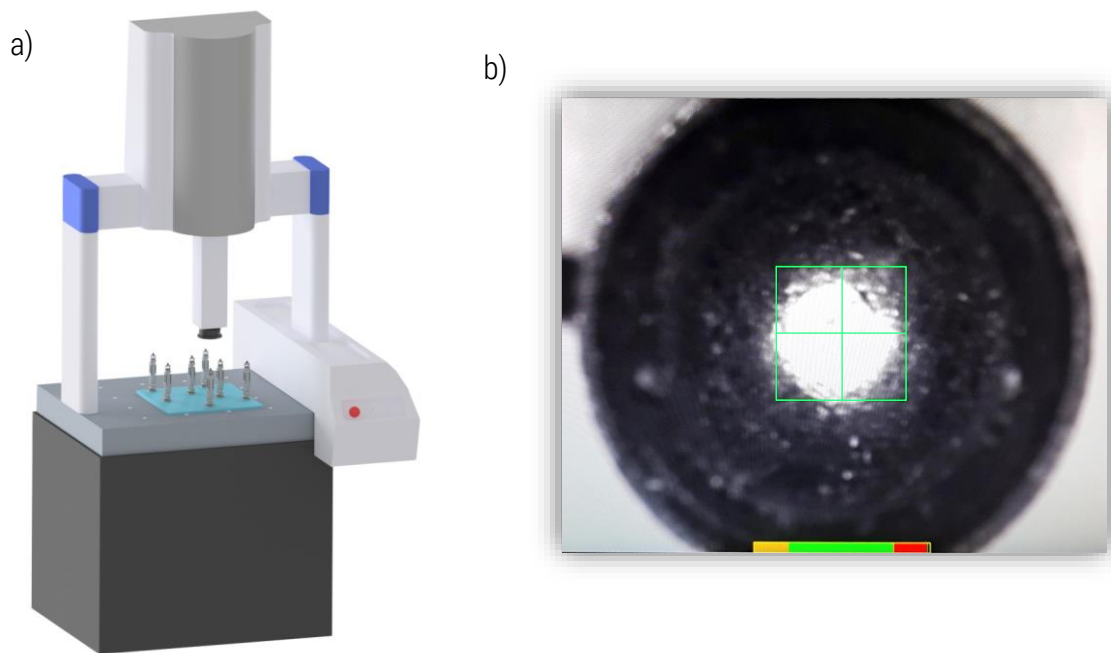


możliwość ustawienia podpory w dowolnym miejscu na płycie bazowej. Na rys. 2.25b przedstawiono podporę aktywną widzianą na monitorze komputera WMP. Współrzędnościowa maszyna pomiarowa wyposażona w sensor optyczny pracujący w trybie krzyża umożliwia ręczne ustawienie podpory z błędem współosiowości z osią optyczną na poziomie 0,1 mm.



**Rys. 2.24.** Widok aktywnych podpór ustawionych zgodnie z danymi z modułu symulacyjnego, na płycie bazowej

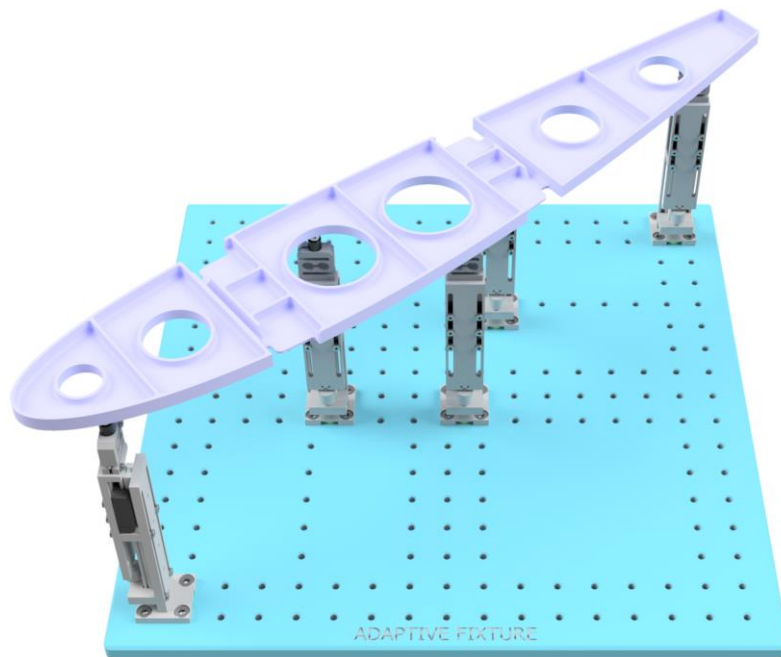
Drugą z metod jest wykonanie płyty bazowej z otworami mocującymi, w taki sposób, aby pozycja podpór była zgodna z pozycją uzyskaną na etapie symulacji. Rozwiązanie to jest mniej elastyczne, jednak w przypadku produkcji seryjnej elementów niesztynnych, najbardziej optymalne.



**Rys. 2.25.** Aktywne podpory ustawione na stole WMP: a) widok ogólny, b) widok kulki neodymowej na monitorze komputera WMP

Po ustawianiu podpór na płycie bazowej zgodnie z parametrami uzyskanymi na etapie symulacyjnym należy ustawić na nich element mierzony. Do prawidłowego ustawienia elementu mierzonyego na podporach można wykorzystać sensor optyczny podobnie jak w przypadku ustawienia pozycji podpór na płycie bazowej. W warunkach przemysłowych można natomiast skorzystać z elementów ustalających, które jednoznacznie ustalą pozycję elementu mierzonyego względem podpór. Do tego celu mogą posłużyć odpowiednio zorientowane kołki, ograniczające pozycję elementu w płaszczyźnie XY.

Na rys. 2.26 przedstawiono widok elementu niesztynnego (wręgi skrzydła samolotu) zamocowanego na aktywnych podporach i płycie bazowej.



Rys. 2.26. Ustawienie elementu niesztynnego na aktywnych podporach

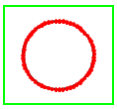
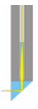


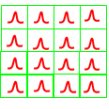
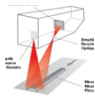
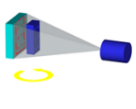
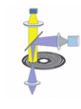
Kolejną czynnością jaką należy wykonać jest ustawienie właściwych wartości reakcji na każdej z podpór zgodnie z danymi uzyskanymi na drodze symulacyjnej. Proces ustawiania reakcji odbywa się w sposób ręczny poprzez regulację wysuwu elementu ruchomego podpory względem podstawy. Podczas wykonywania regulacji reakcji na każdej z podpór, użytkownik monitoruje te wartości w oprogramowaniu obsługującym system adaptacyjnego mocowania. Oprogramowanie to zostało szczegółowo opisane w rozdziale 2.5. Wykonane czynności powodują, że tak ustawiony element może zostać poddany pomiarom na WMP.

Istniejące publikacje opisane w rozdziałach 1.7 i 1.8 dotyczące metod pomiaru elementów niesztynnych oraz grupy elementów zbudowanych z powierzchni swobodnych wskazują, że metody bezstykowe są właściwymi do pomiaru tego typu elementów. Do niedawna wśród użytkowników WMP panowało przekonanie, że metody stykowe jako oferujące najwyższą dokładność pomiaru są jedynymi wiarygodnymi metodami inspekcji elementów precyzyjnych. Jak się jednak okazuje istnieją metody bezstykowe, które nie tylko dorównują, a czasem przewyższają możliwości metod stykowych w odniesieniu do dokładności a dodatkowo umożliwiają one pomiar cech trudnodostępnych zarówno w trybie punktowym jak i powierzchniowym.

Obecnie trendy w metrologii współrzędnościowej zmiernają w kierunku metod hybrydowych, (inaczej multisensorycznych) czyli rozwiązań, które łączą ze sobą różne techniki pomiarowe (stykowe i

bezstykowe) w jednym urządzeniu pomiarowym. W tabeli 2.6. przedstawiono techniki pomiaru bezstykowego oraz odpowiadające im błędy MPEp.

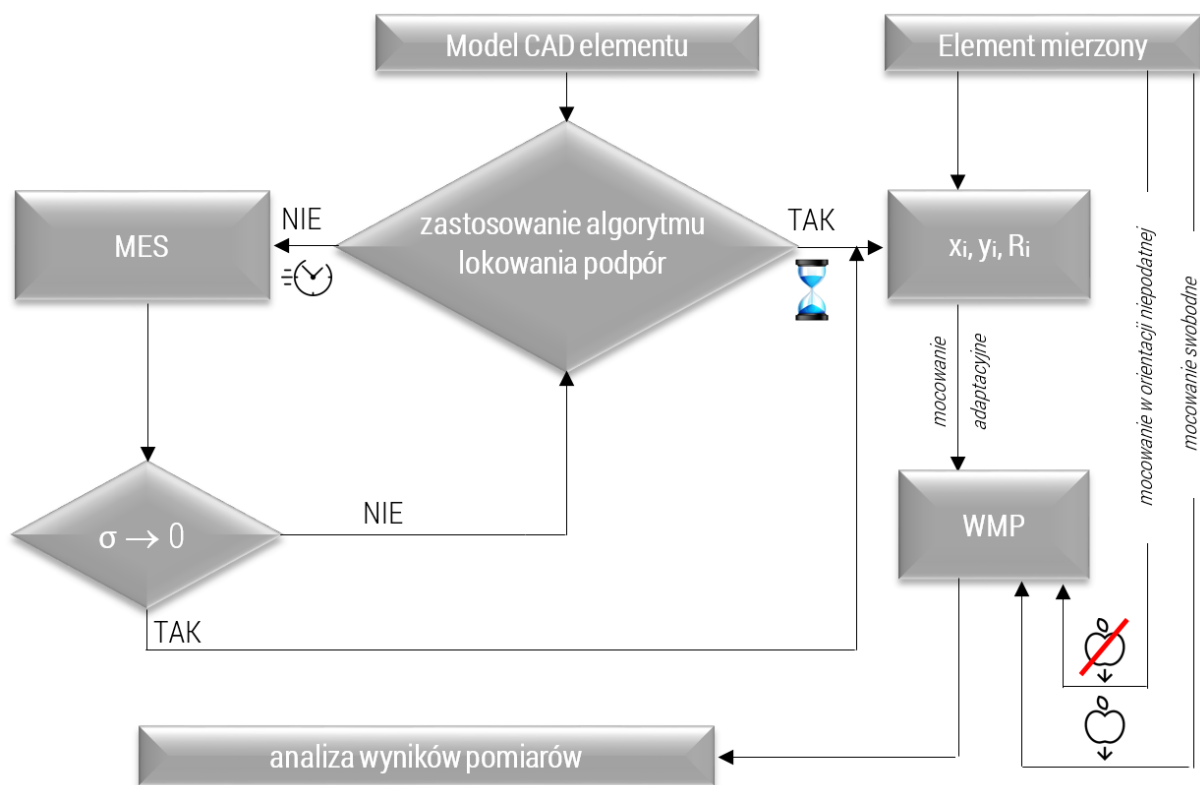
**Tabela 2.6.** Sensory stosowane w multisensorycznych współrzędnościowych systemach pomiarowych [123]

| SENSORY STOSOWANE DO PRECYZJNYCH POMIARÓW BEZSTYKOWYCH                            |   |   |   |   |  |   |   |
|---|---|---|---|---|--|---|---|
| Metody punktowe / skaningowe  |   |   |   | Metody powierzchniowe   |  |   |   |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
| kamera CCD  | metoda Interferometryczna   | laser Foucaulta   | aberracja chromatyczna  | metoda zmiennej ogniskowej  | metoda triangulacyjna  | X-Ray   | metoda konfokalna   |
| MPE <sub>p</sub> (μm)   |   |   |   |   |  |   |   |
| 0,35 – 4,9  | 0,25  | 1-3,5   | 0,25-1,5  | 0,5-10  | 50   | 2,5-9   | 0,6-2,9   |

W niniejszej pracy podczas realizacji części badawczej wykorzystano maszynę pomiarową wyposażoną w kamerę CCD oraz laser liniowy a także inny system pomiarowy, na którym zastosowano laserową głowicę triangulacyjną mocowaną na głowicy obrotowo-uchylnej.

### 3. Badania doświadczalne

Badania doświadczalne z wykorzystaniem opracowanej metody mocowania adaptacyjnego przeprowadzono na elementach niesztynnych pochodzących z aplikacji przemysłowych oraz na elemencie opracowanym na potrzeby badań i weryfikacji metody. Opisany w rozdziale 2.5 algorytm wspomagający właściwe lokowanie podpór jest narzędziem wspomagającym proces mocowania adaptacyjnego. W przypadku elementów o prostej geometrii istnieje możliwość zastosowania wyłącznie aktywnych podpór, a dane wejściowe do systemu (lokalizacja podpór oraz reakcje węzłowe) pochodzą z danych symulacyjnych przeprowadzonych w sposób nieautomatyczny. Dla elementów o prostej geometrii (stałe grubości ścianki, brak powierzchni swobodnych, symetria układu) dojście do właściwych parametrów mocowania może wymagać jedynie kilku iteracji MES wykonanych w sposób ręczny zamiast kilku/kilkunastu tysięcy (w zależności od liczby węzłów na powierzchni podparcia) w przypadku algorytmu automatycznego. Schemat, zgodnie z którym przeprowadzono badania doświadczalne przedstawiono na rys. 3.1.



Rys. 3.1. Schemat przeprowadzonego procesu badawczego

Badania doświadczalne wykonane były w trzech konfiguracjach jeśli chodzi o warunki mocowania:

1. mocowanie adaptacyjne,
2. ustawienie w orientacji podatnej (pomiar w stanie naprężonym),
3. mocowanie w orientacji niepodatnej na odkształcenia w wyniku grawitacji.

W pierwszym etapie wykonania badań doświadczalnych wykorzystano wyniki symulacji MES z informacją o optymalnej lokalizacji podpór oraz wartości reakcji węzłowych. Następnie element mierzony ustawiony był na stole maszyny pomiarowej wyposażonej w laserową głowicę triangulacyjną. Po wykonaniu adjustacji aktywnego systemu mocowania przeprowadzono pomiar odchyłki płaskości po czym wyniki zapisano w formie chmury punktów czyli pliku STL. Drugim sposobem zamocowania elementu na stole WMP było ustawienie go w sposób swobodny czyli bez uwzględnienia wpływu grawitacji na wynik pomiaru. W tej sytuacji element niesztynny podlega odkształceniu związanemu z oddziaływaniem grawitacyjnym. Na tym etapie badań istniała możliwość porównania uzyskanych wyników badań z bryłą nominalną CAD 3D jednak porównanie tego typu (np. BestFit 3D) nie pozwala na właściwą ocenę przydatności opracowanej metody mocowania adaptacyjnego. Bezpośrednie porównanie modelu CAD z wynikami pomiarów uzyskanych poprzez mocowanie adaptacyjne czy swobodne nie uwzględnia błędów wykonania, naprężeń resztkowych pozostałych po obróbce. W związku z tym do badań wybrano takie elementy, dla których możliwe było takie podparcie, że grawitacja nie ma wpływu na ich odkształcenie. Tę strategię nazwano na schemacie 3.1 – mocowaniem w orientacji niepodatnej. W praktyce oznaczało to, że każdy z badanych elementów posiadał taką orientację, w której element zachowywał się jak element sztywny. Dzięki takiemu podejściu możliwy był pomiar elementu w stanie nieodkształconym, a uzyskaną w ten sposób chmurę punktów, przyjąć jako rzeczywisty element nominalny. W innym wypadku trudno byłoby oszacować skuteczność opracowanej metody mocowania elementów niesztynnych. Wykorzystaną w pomiarach maszyną współrzędnościową była maszyna Nikon Altera, wyposażona w głowicę obrotowo uchylną z zastosowanym sensorem stykowym Renishaw SP25 oraz sondą triangulacyjną LC150. W tabeli przedstawiono specyfikację maszyny pomiarowej użytej w pomiarach.

**Tabela. 3.1.** Specyfikacja maszyny pomiarowej Nikon Altera [118]

| Element        | Parametr               | Wartość     |
|----------------|------------------------|-------------|
| WMP Altera     | Zakres X [mm]          | 1016        |
|                | Zakres Y [mm]          | 711         |
|                | Zakres Z [mm]          | 600         |
|                | Max. masa części [kg]  | 514         |
| PH10M + SP25   | MPEp [ $\mu\text{m}$ ] | 1,6         |
|                | MPEE [ $\mu\text{m}$ ] | 1,8+L/400   |
| PH10M + LC15Dx | MPEp [ $\mu\text{m}$ ] | 2,5         |
|                | MPEE [ $\mu\text{m}$ ] | 5,8 + L/400 |

W tabeli 3.2 przedstawiono specyfikację użytej głowicy triangulacyjnej.

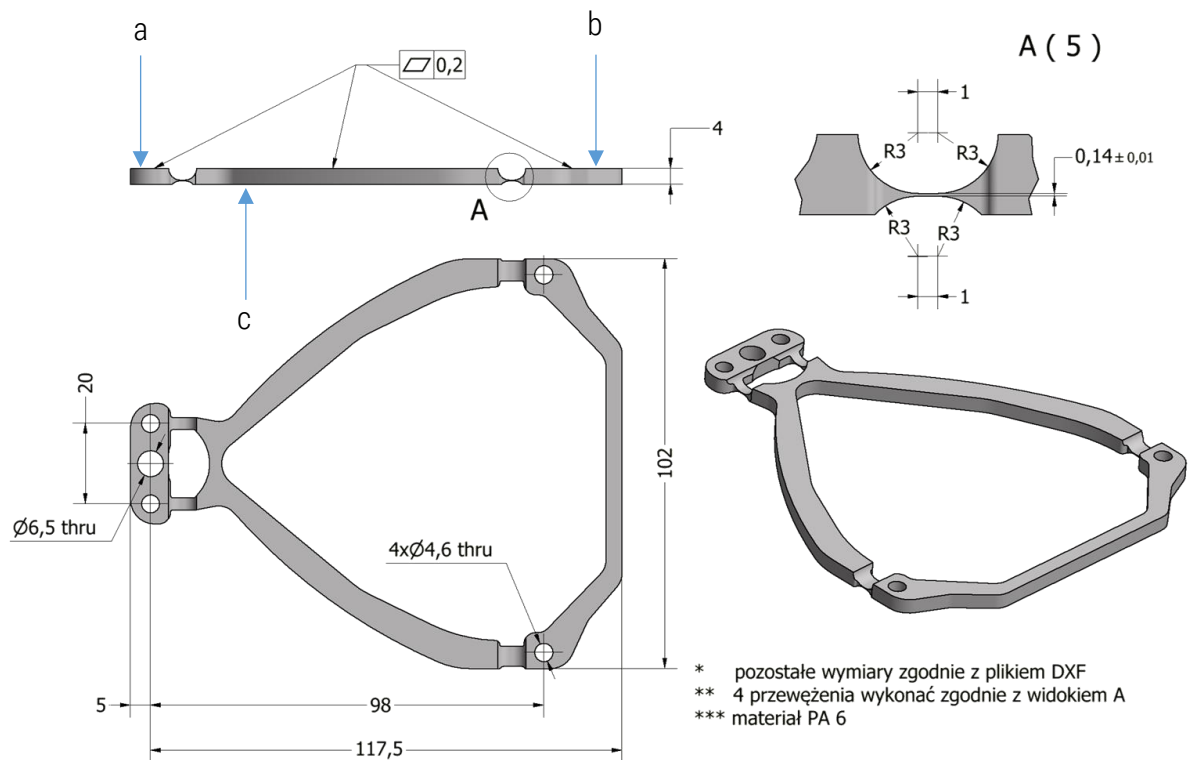
**Tabela. 3.2.** Specyfikacja laserowej sondy triangulacyjnej Nikon LC15Dx [118]

| Element | Parametr                  | Wartość |
|---------|---------------------------|---------|
| LC15Dx  | MPEp [ $\mu\text{m}$ ]    | 1,9     |
|         | $f_{\text{skan}}$ [pkt/s] | 70000   |
|         | FOV [mm]                  | 18      |
|         | DOF [mm]                  | 15      |
|         | WD [mm]                   | 60      |

### 3.1. Opis badanych elementów

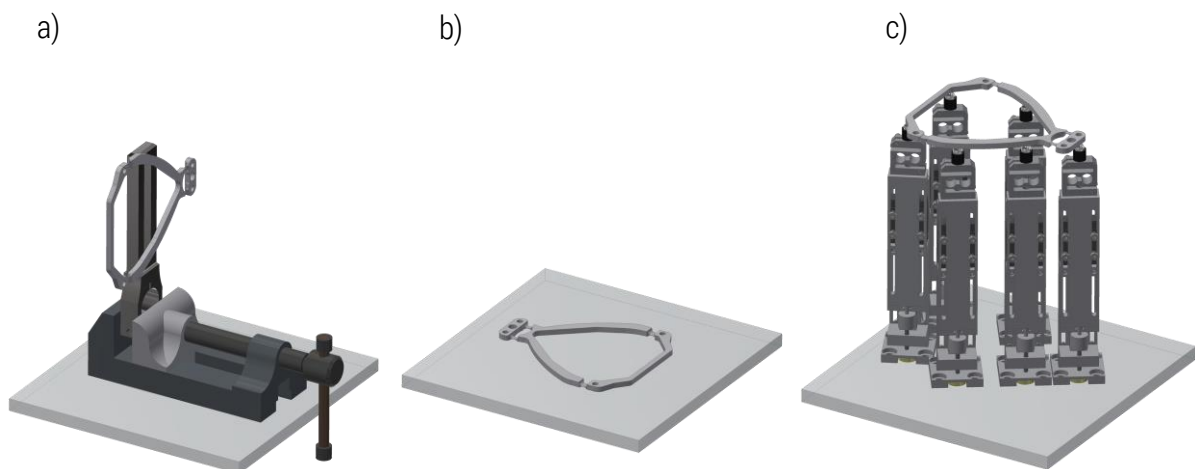
Opracowana metoda mocowania elementów niesztynnych znajduje swoje zastosowanie w przypadku elementów takich jak elementy poszycia statków powietrznych, karoserii samochodowych, elementów precyzyjnych o ściśle określonych parametrach wytrzymałościowych podczas pracy. Adaptacyjna metoda mocowania jest w pełni skalowalna i może zostać zastosowana również w przypadku elementów wielkogabarytowych w tym elementów obrotowych takich jak wały turbin czy wałów korbowych w odniesieniu do inspekcji błędów geometrycznych. W ramach niniejszej pracy wykonano badania błędów płaskości wahaczy (rys. 3.2) stosowanych w precyzyjnych wagach laboratoryjnych, produkowanych przez firmę Radwag. Widoczne na rys. 3.2 przewężenia o grubości nominalnej 0,14 mm obniżają sztywność elementu, umożliwiając ruch powierzchni mocujących  $a$  i  $b$  względem siebie i względem powierzchni  $c$ . Zespół dwóch wahaczy pełni funkcję układu prowadzenia ruchomych elementów przetwornika w precyzyjnej wadze laboratoryjnej. Mierzony wahacz posiada zmienną podatność na odkształcenia w zależności od jego orientacji względem pola grawitacyjnego.

Z uwagi na charakter pracy wahacza i pełniący przez niego roli w zespole mechanicznym, ważne jest, aby powierzchnie *a, b, c* były współpłaszczyznowe i pracowały w określonym przedziale naprężeń na przewężeniach. Przekroczenie dopuszczalnych naprężeń wpływa na graniczną liczbę cykli zgodnie z krzywą Wöhlera.



Rys. 3.2. Rysunek wahacza stosowanego w precyzyjnych wagach

Pomiar wahacza wykonano w trzech różnych warunkach mocowania zgodnie z rys. 3.3

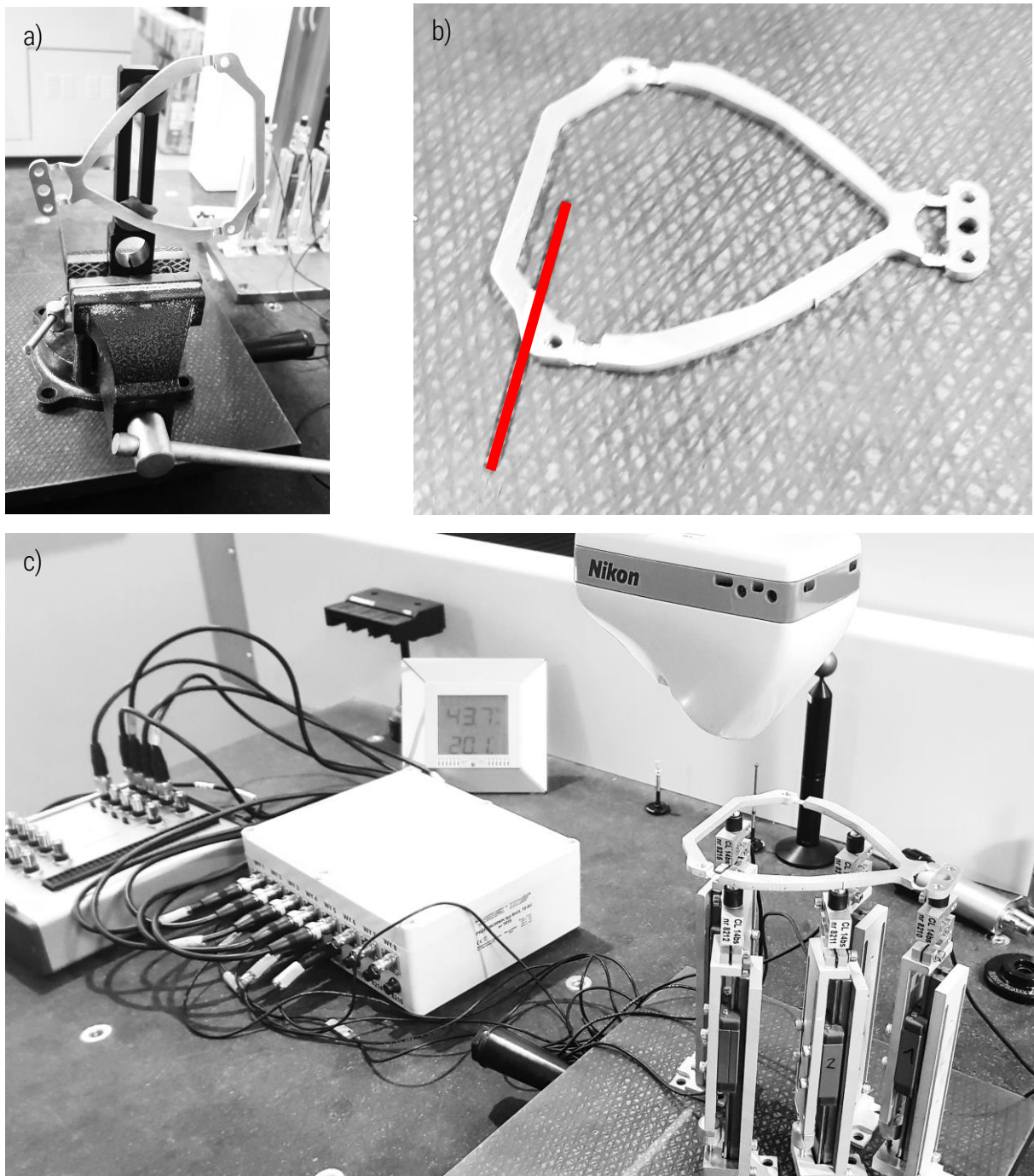


Rys. 3.3. Sposób mocowania wahacza w badaniach doświadczalnych: a) mocowanie w pozycji niepodatnej, b) mocowanie w orientacji podatnej, c) mocowanie na mocowaniu adaptacyjnym w orientacji podatnej



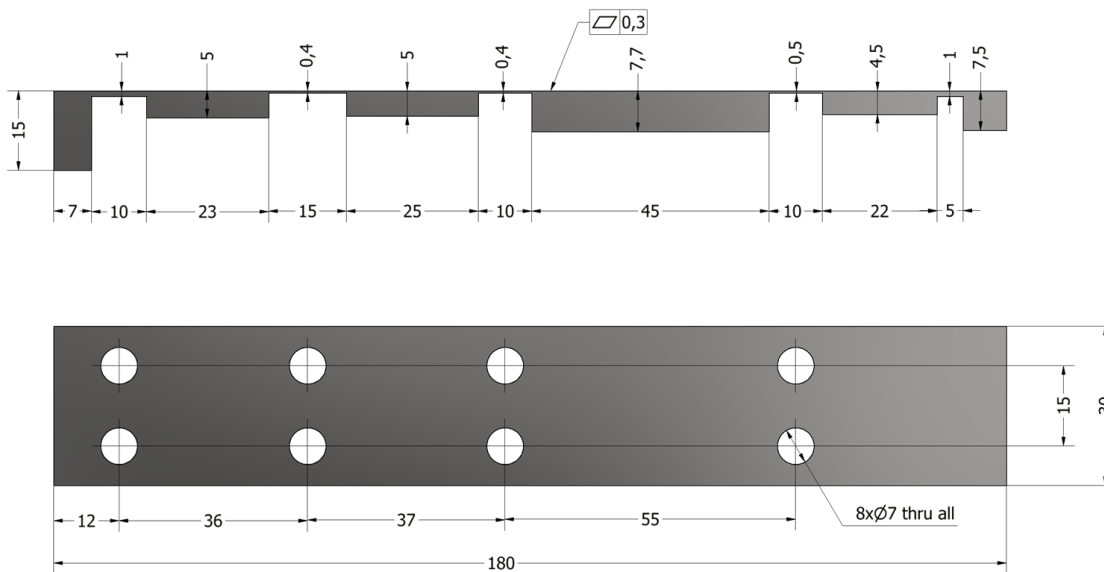
Mocowanie wahacza w pozycji niepodatnej (rys. 3.3a), umożliwia pomiar tego elementu w stanie quasi swobodnym, gdyż w takiej orientacji element mierzony posiada cechy elementu sztywnego (przemieszczenie w wyniku działania grawitacji  $\ll 0,1T$ ). Druga metoda mocowania (rys. 3.3b) to metoda, w której wpływ grawitacji na odchyłkę płaskości jest znaczny (przemieszczenie w wyniku działania grawitacji  $> 0,1T$ ). Trzecią metodą mocowania jest mocowanie adaptacyjne, gdzie przemieszczenia wywołane działaniem grawitacji są kompensowane przez aktywne podpory pomimo podatnej orientacji elementu. Porównanie wyników błędu płaskości dla przypadków a) oraz b) pozwala na weryfikację poprawności działania opracowanej metody.

Na rys. 3.4 przedstawiono widok wahacza zamocowanego na stole maszyny w trzech konfiguracjach opisanych powyżej. Czerwona linia widoczna na rys. 3.4b symbolizuje wiązkę lasera (głowicy triangulacyjnej), realizującej pomiar skaningowy powierzchni górnej elementu. W pierwszym przypadku (rys. 3.4a) element mocowany jest w pozycji bocznej na sztywnej kolumnie mocowanej w imadle. Mierzony element jest w tym wypadku przytwierdzony do kolumny na sztywnej powierzchni środkowej (obszar „c”, objaśnienie na rys. 3.8). Swobodne końce elementu (obszar „a” oraz „b” – rys. 3.8) nie są podparte w żaden sposób, jednak można przyjąć, że w tej orientacji nie występuje przemieszczenie tych obszarów w wyniku oddziaływania grawitacyjnego, a element posiada cechy elementu sztywnego. Wyniki pomiarów dla takiej orientacji elementu stanowiąc będą odniesienie do wyników uzyskanych w innych orientacjach – podatnych na odkształcenia grawitacyjne. W drugim przypadku element mierzony położony jest bezpośrednio na płaskim stole pomiarowym (rys. 3.6b). W takim przypadku obserwujemy, że element mierzony (z założenia płaski) nie przylega do równomiernie do całej powierzchni stołu. Element w tej orientacji ulega deformacji w wyniku oddziaływania grawitacyjnego które nie podlega żadnej kompensacji, a stopień deformacji uzależniony jest od kształtu podłoża oraz sztywności elementu. W trzecim przypadku (rys. 3.6c) element mocowany jest również w orientacji podatnej jednak z zastosowaniem metody adaptacyjnego mocowania, która kompensuje błąd związany z odkształceniem grawitacyjnym.



**Rys. 3.4.** Mocowanie wahacza na stole maszyny: a) mocowanie w pozycji niepodatnej, b) mocowanie w orientacji podatnej, c) mocowanie wahacza na stole maszyny na mocowaniu adaptacyjnym w orientacji podatnej

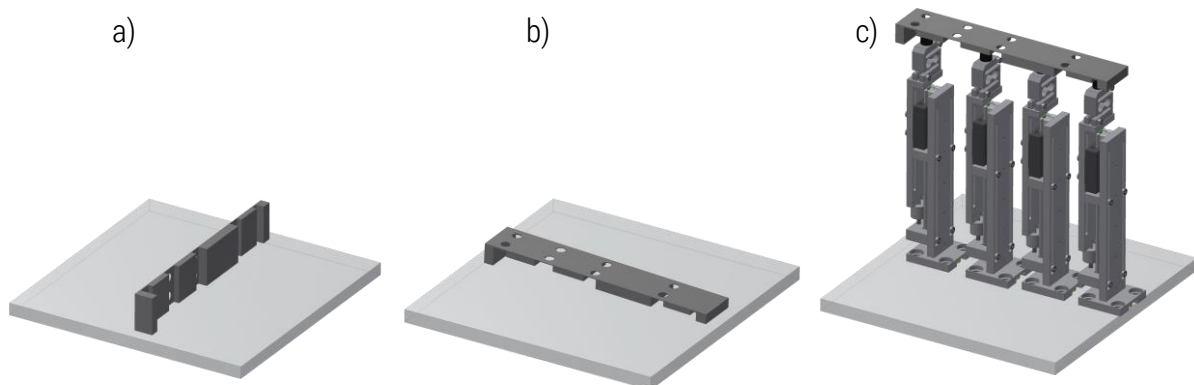
Drugim z elementów, poddanym badaniom doświadczalnym był zaprojektowany specjalny wzorec płytkowy przedstawiony na rys. 3.5. Element ten wykonany jest ze stali konstrukcyjnej C45 i posiada 5 przewężeń obniżających sztywność tego elementu. W miejscach przewężeń wykonano otwory przelotowe  $\varnothing 7\text{mm}$ , które dodatkowo obniżają jego sztywność. Mierzona była odchyłka płaskości górnej powierzchni, która w wyniku działania grawitacji i orientacji elementu względem pola grawitacji przyjmuje różne wartości.



Materiał C45  
Tolerancja grubości przewężeń  $\pm 0,025$  mm

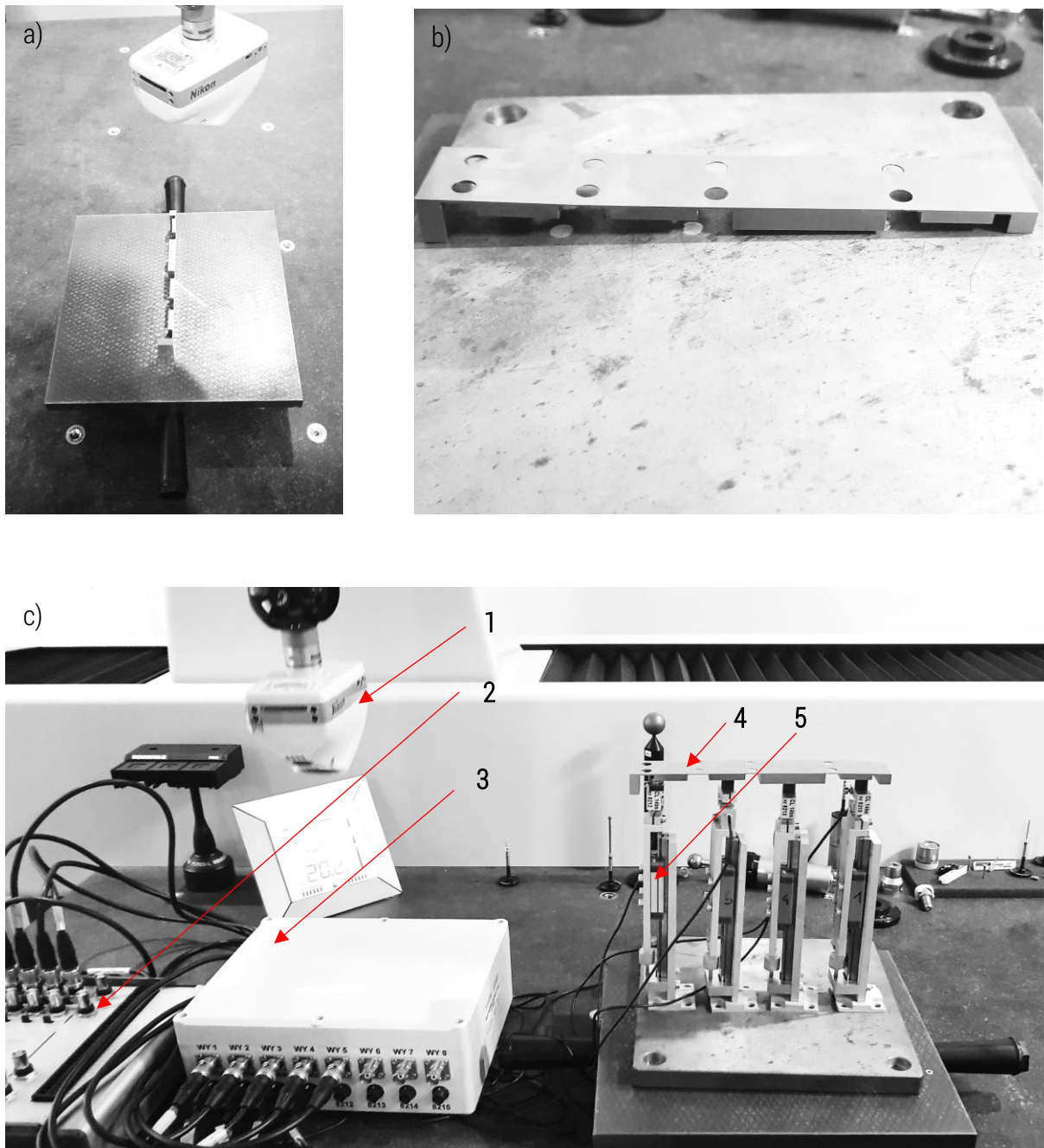
**Rys. 3.5.** Opracowany wzorzec płytkowy

Badania błędu płaskości powierzchni górnej opracowanej płytki testowej wykonano w trzech warunkach mocowania, analogicznie do mocowania wahacza. Schemat mocowania płytki testowej przedstawiono na rys. 3.6. W pierwszej kolejności wykonano pomiar odchyłki płaskości górnej powierzchni elementu, ustawionego w pozycji bocznej. Zarejestrowaną chmurę punktów przyjęto jako element nominalny do porównania z wynikami uzyskanymi podczas pomiaru błędu płaskości w dwóch pozostałych warunkach mocowania tj. w pozycji podatnej oraz w pozycji podatnej z zastosowanym mocowaniem adaptacyjnym.



**Rys. 3.6.** Sposób mocowania płytki testowej w badaniach doświadczalnych: a) mocowanie w pozycji niepodatnej, b) mocowanie w orientacji podatnej, c) ustawienie na mocowaniu adaptacyjnym w orientacji podatnej

Na rys. 3.7 przedstawiono widok opracowanej płytki zamocowanej na stole maszyny pomiarowej zgodnie z opisem do rys. 3.7 a-c.

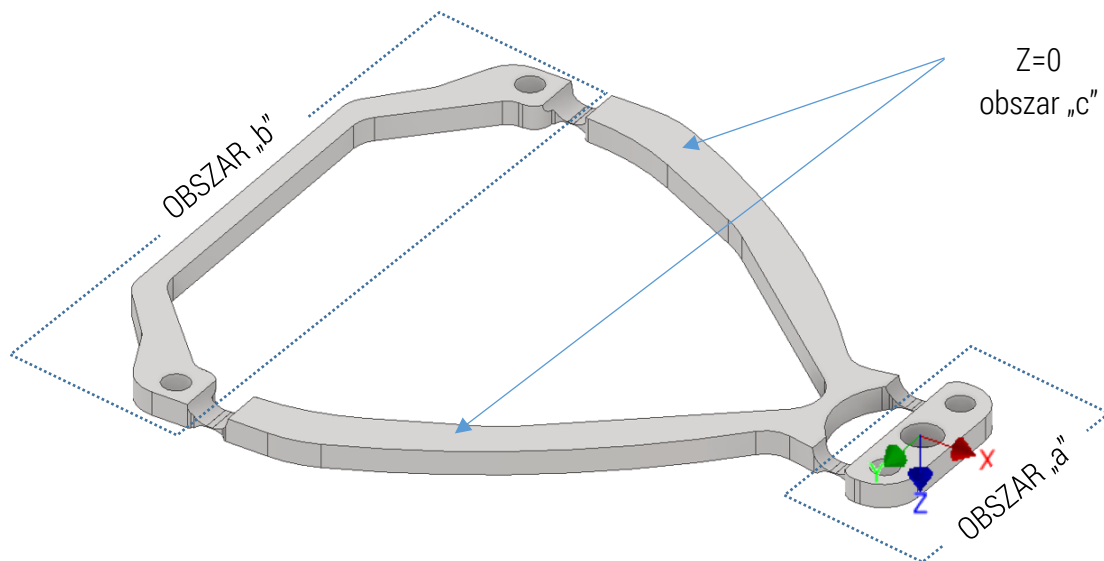


**Rys. 3.7.** Mocowanie płytki testowej na stole maszyny: a) mocowanie w pozycji niepodatnej, b) mocowanie w orientacji podatnej, c) mocowanie adaptacyjne w orientacji podatnej: 1 – głowica laserowa, 2 – karta akwizycji danych, 3 – wzmacniacz czujników siły, 4 – mierzony element, 5 – aktywne podpory

## 3.2. Wyniki badań doświadczalnych

### Wahacz poziomy

Badania doświadczalne wykonano na współrzędnościowej maszynie pomiarowej wyposażonej w triangulacyjny skaner laserowy, który umożliwia wykonanie pomiarów powierzchniowych. Układ współrzędnych zarówno do pomiaru jak i symulacji MES dla wahacza przyjęto zgodnie z rys. 3.8 tj. w osi otworu. Płaszczyzna  $Z=0$  związana jest z obszarem pomiędzy przewężeniami.



Rys. 3.8. Przyjęty układ współrzędnych wahacza

Wahacz zgodnie z oznaczeniem przyjętym na rys. 3.8. podzielony został na 3 obszary: „a”, „b”, „c”. Obszary te oddzielone są przewężeniami o nominalnej grubości 0,14 mm (rys. 3.2). W związku z przyjęciem obszaru „c” jako płaszczyzny odniesienia  $Z=0$ , analizowane są przemieszczenia obszarów „a” oraz „b” w zależności od metody mocowania elementu do pomiaru. Przyjęto następujące oznaczenia:

$Z_{a\_ref}$  – odchyłka płaskości w obszarze a-c (mocowanie w orientacji niepodatnej – rys. 3.3a),

$Z_{b\_ref}$  – odchyłka płaskości w obszarze b-c (mocowanie w orientacji niepodatnej – rys. 3.3a),

$Z_{a\_g}$  – odchyłka płaskości w obszarze a-c (mocowanie w orientacji podatnej – rys. 3.3b),

$Z_{b\_g}$  – odchyłka płaskości w obszarze b-c (mocowanie w orientacji podatnej – rys. 3.3b),

$Z_{a\_am}$  – odchyłka płaskości w obszarze a-c (mocowanie adaptacyjne – rys. 3.3c),

$Z_{b\_am}$  – odchyłka płaskości w obszarze b-c (mocowanie adaptacyjne – rys. 3.3c),

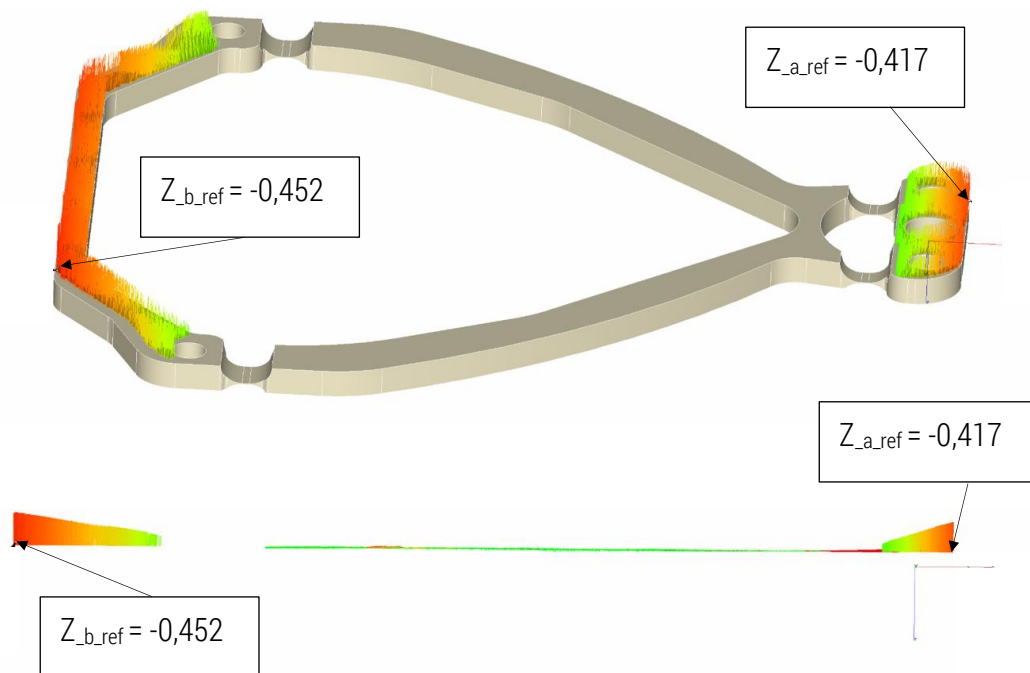
$Z_{a\_g\_MES}$  – odchyłka płaskości w obszarze a-c w wyniku działania grawitacji wg. analizy MES,

$Z_{b\_g\_MES}$  – odchyłka płaskości w obszarze b-c w wyniku działania grawitacji wg. analizy MES.



Jako pierwsze wykonano pomiary odchyłki płaskości górnej powierzchni wahacza ustawionego w pozycji niepodatnej na odkształcenia zgodnie z rys. 3.4a. Pomiar wahacza w takim ustawieniu pozwala określić odchyłkę płaskości w stanie swobodnym, a uzyskane w ten sposób wyniki przyjęto jako wyniki referencyjne służące do weryfikacji opracowanej metody. Po zeskanowaniu wahacza uzyskaną chmurę punktów porównano z modelem nominalnym CAD 3D.

Rys. 3.9 przedstawia odchylenie zebranej chmury punktów od modelu nominalnego CAD 3D. Maksymalne odchylenie obszaru „b” od powierzchni  $Z=0$  czyli odchyłkę płaskości w obszarze b-c wynosi 0,452 mm, natomiast obszaru „a”: 0,417 mm. Na rys. 3.9 przedstawiono wartości liczbowe odchyłek płaskości w obszarach a-c oraz b-c a także kolorową mapę odchyłek zarejestrowanej chmury punkty od modelu nominalnego CAD.

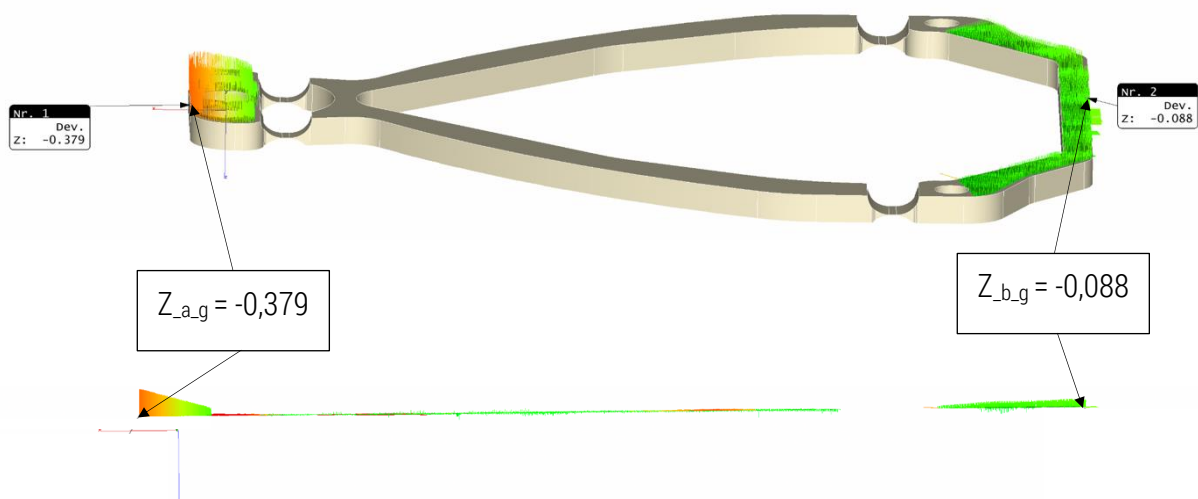


**Rys. 3.9.** Odchyłki płaskości obszarów a-c oraz b-c. Odchyłka płaskości wynosi 0,452 mm. Mocowanie wahacza w pozycji niepodatnej na odkształcenia w wyniku działania grawitacji

Po wykonaniu pomiaru odchyłki płaskości powierzchni górnej w orientacji niepodatnej na odkształcenia grawitacyjne wykonano pomiar wahacza ustawionego na powierzchni płaskiej. Podczas realizacji pomiaru wahacza ustawionego płasko na stole maszyny przyjęto tę samą strategię pomiaru

jak w przypadku orientacji niepodatnej na odkształcenia pod wpływem działania grawitacji. Wynik pomiaru przedstawiono na rys. 3.10.

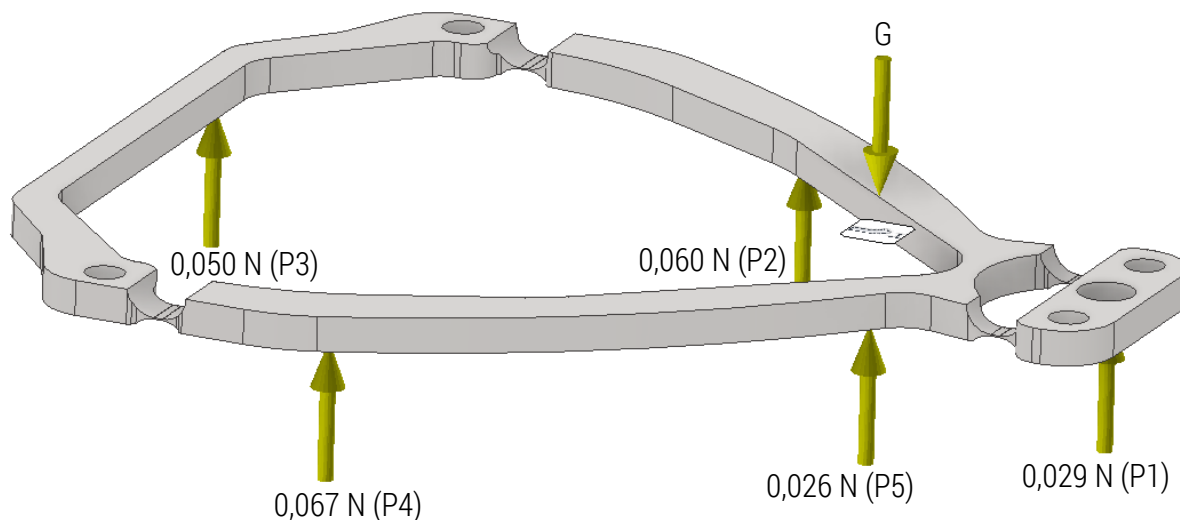
W wyniku działania grawitacji obszar „b” uległ przemieszczeniu o 0,364 mm w stosunku do wyniku uzyskanego podczas mocowania wahacza w pozycji niepodatnej. Obszar „a” uległ przemieszczeniu o wartość 0,038 mm. Odchyłka płaskości obszaru a-c wyniosła 0,379 mm, a w obszarze b-c – 0,088 mm. Analizując wahacz całościowo stwierdzono odchyłkę płaskości o wartości 0,379 mm i jest ona determinowana jest przez obszar „a-c” w przeciwieństwie do przypadku z rys. 3.9. Wahacz w wyniku działania grawitacji ulega „wyprostowaniu”, co wiąże się ze zwiększeniem naprężeń w przewężeniach pomiędzy obszarem „b” a częścią środkową wahacza – „c”.



**Rys. 3.10.** Wynik pomiaru odchyłki płaskości wahacza mocowanego na płasko w orientacji podatnej na odkształcenia grawitacyjne. Odchyłka płaskości wynosi 0,379 mm

Ostatnią z przyjętych metod mocowania była opracowana metoda mocowania adaptacyjnego (rys. 3.4c). Element mierzony ustawiony był w orientacji podatnej na odkształcenia w wyniku działania grawitacji, jednak przemieszczenia związane z jej działaniem skompensowane zostały przez odpowiednio wyjustowane aktywne podpory. Schemat podparcia wraz z oznaczonymi wartościami reakcji przedstawiono na rys. 3.11. Zarówno pozycje podparcia jak i wartości reakcji węzłowych uzyskano na podstawie opracowanego algorytmu optymalnego lokowania podpór aktywnych. Widoczne na rys. 3.11 wartości reakcji są wartościami nominalnymi uzyskanymi w wyniku symulacji.

W związku z faktem, że środkowa część wahacza jest elementem sztywnym, precyzyjne ustawienie siły podparcia wymagane było jedynie dla obszarów „a” oraz „b” zgodnie z rys. 3.12 (czujniki P1 – P5).



Rys. 3.11. Nominalne wartości reakcji podporowych uzyskane przy użyciu algorytmu optymalnego lokowania podpór

Na rys. 3.12 przedstawiono rzeczywiste odczyty z czujników siły (P1 – P5) po ustawieniu aktywnych podpór. Czerwoną ramką oznaczono odczyt z czujnika P1 – podparcie obszaru „a”, natomiast kolorem żółtym oznaczono odczyt z czujnika P3 – podparcie obszaru „b”.

Parametry stanowiska    Ustawienia stanowiska    Wzorcowanie

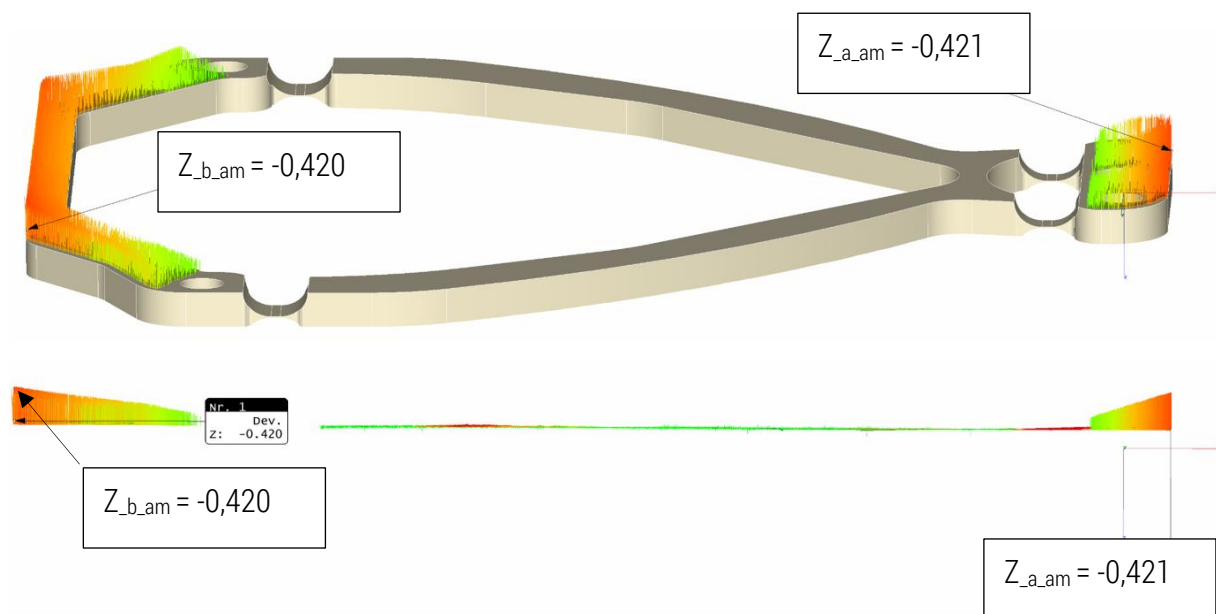
| P1 [g] | P1 [N] | M1 [g] | M1 [N]   |
|--------|--------|--------|----------|
| 3,0    | 0,03   | 2,98   | 0,02922: |
| P2 [g] | P2 [N] | M2 [g] | M2 [N]   |
| 7,2    | 0,07   | 6,16   | 0,06040: |
| P3 [g] | P3 [N] | M3 [g] | M3 [N]   |
| 5,1    | 0,05   | 5,12   | 0,05021  |
| P4 [g] | P4 [N] | M4 [g] | M4 [N]   |
| 4,9    | 0,05   | 6,8    | 0,06668: |
| P5 [g] | P5 [N] | M5 [g] | M5 [N]   |
| 4,7    | 0,05   | 2,62   | 0,02569: |
| P6 [g] | P6 [N] | M6 [g] | M6 [N]   |
| 3,8    | 0,04   | 0      | 0        |
| P7 [g] | P7 [N] | M7 [g] | M7 [N]   |
| 3,4    | 0,03   | 0      | 0        |

Zeruj czujniki

Rys. 3.12. Widok oprogramowania do regulacji aktywnych podpór. Parametry P<sub>1</sub> – P<sub>5</sub> są nominalnymi reakcjami, natomiast parametry M<sub>1</sub> – M<sub>5</sub> są rzeczywistymi wartościami ustawionych reakcji podporowych




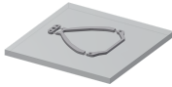

Na rys. 3.13 przedstawiono wynik pomiaru wahacza ustawionego na aktywnych podporach w orientacji podatnej na odkształcenia w wyniku działania grawitacji. Odchyłka płaskości w obszarze a-c wyniosła 0,421 mm, natomiast odchyłka płaskości w obszarze b-c wyniosła 0,420 mm. Analizując wyniki w odniesieniu do całego elementu, można stwierdzić, że odchyłka płaskości powierzchni montażowych wynosi 0,421 mm.



**Rys. 3.13.** Wynik pomiaru odchyłki płaskości wahacza mocowanego na aktywnych podporach w orientacji podatnej na odkształcenia grawitacyjne. Odchyłka płaskości wynosi 0,421 mm

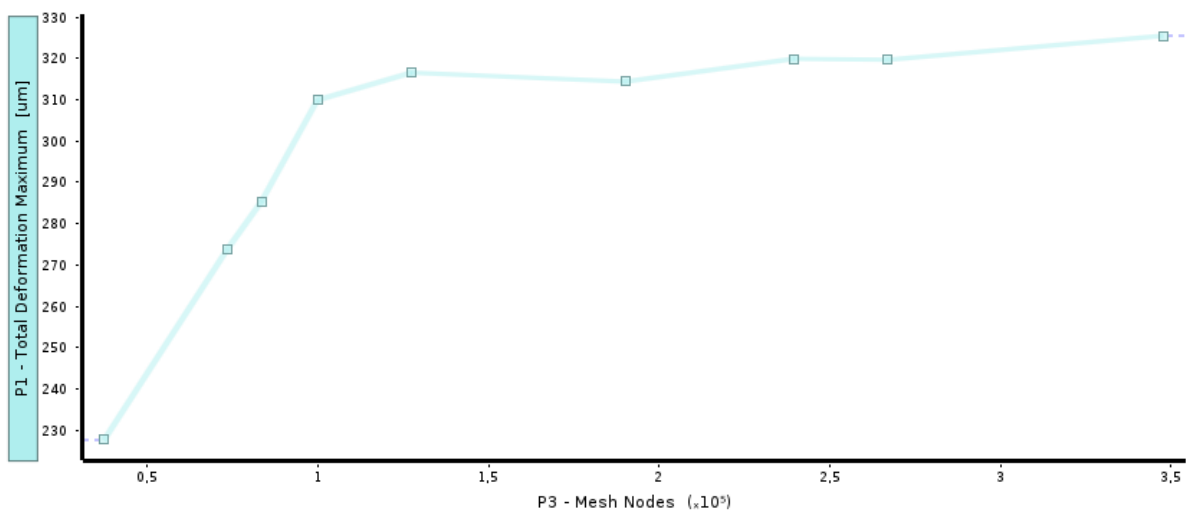
W tabeli 3.3 przedstawiono zestawienie uzyskanych wyników pomiarów w zależności od zastosowanej strategii mocowania wahacza na stole maszyny pomiarowej. Wyniki pomiaru uzyskane dla orientacji niepodatnej na odkształcenia w wyniku działania grawitacji przyjęto jako wyniki referencyjne, ponieważ element mierzony w tej orientacji znajduje się w stanie swobodnym. Obliczony błąd stanowi różnicę wskazania referencyjnego (orientacja niepodatna) dla obszarów „a” oraz „b” i tych samych obszarów w orientacji podatnej i orientacji podatnej przy ustawieniu elementu na aktywnych podporach.

**Tabela 3.3.** Zestawienie wyników pomiarów odchyień obszarów „a” i „b” w zależności od strategii mocowania

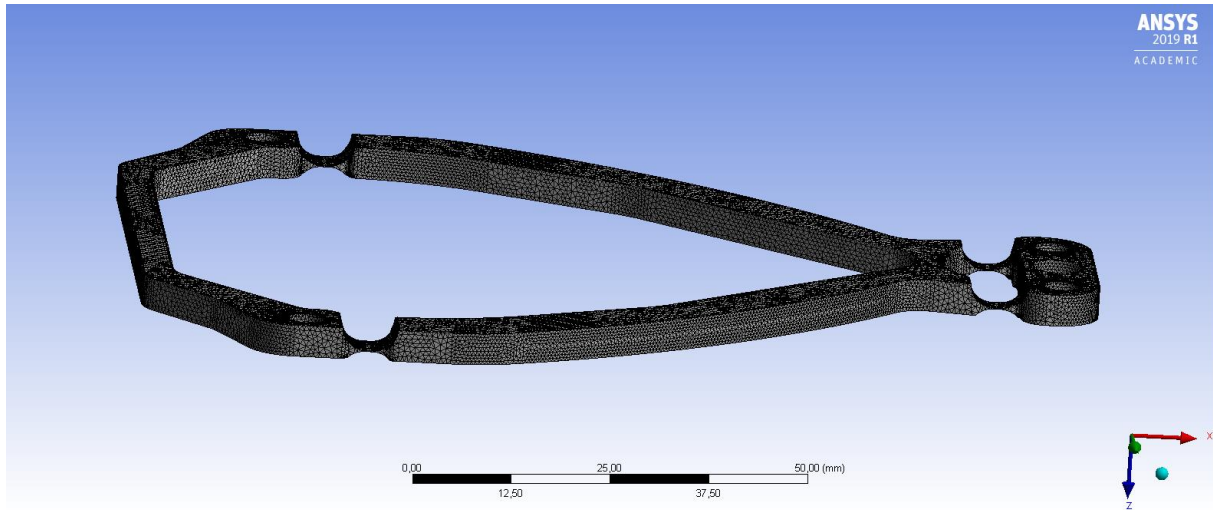
| Oznaczenie         | Mocowanie   | Wartość [mm] | Oznaczenie                             | Błąd [mm] |
|--------------------|---|--------------|--|-----------|
| Z <sub>a_ref</sub> |  | 0,417        |  |           |
| Z <sub>b_ref</sub> |   | 0,452        |  |           |
| Z <sub>a_g</sub>   |  | 0,379        | Z <sub>a_ref</sub> - Z <sub>a_g</sub>  | 0,038     |
| Z <sub>b_g</sub>   |   | 0,088        | Z <sub>b_ref</sub> - Z <sub>b_g</sub>  | 0,364     |
| Z <sub>a_am</sub>  |  | 0,421        | Z <sub>a_ref</sub> - Z <sub>a_am</sub> | 0,004     |
| Z <sub>b_am</sub>  |   | 0,420        | Z <sub>b_ref</sub> - Z <sub>b_am</sub> | 0,032     |

Zmierzone przemieszczenia obszarów „a” oraz „b” w wyniku oddziaływania grawitacyjnego stanowią wynik obliczeń odpowiednio  $Z_{a\_ref} - Z_{a\_g}$  oraz  $Z_{b\_ref} - Z_{b\_g}$  (tabela 3.3). W celu weryfikacji tych przemieszczeń wykonano analizę MES przy założeniu, że obszary „a” oraz „b” pozostają niepodparte, a płaszczyzna „c” jest nieruchoma.

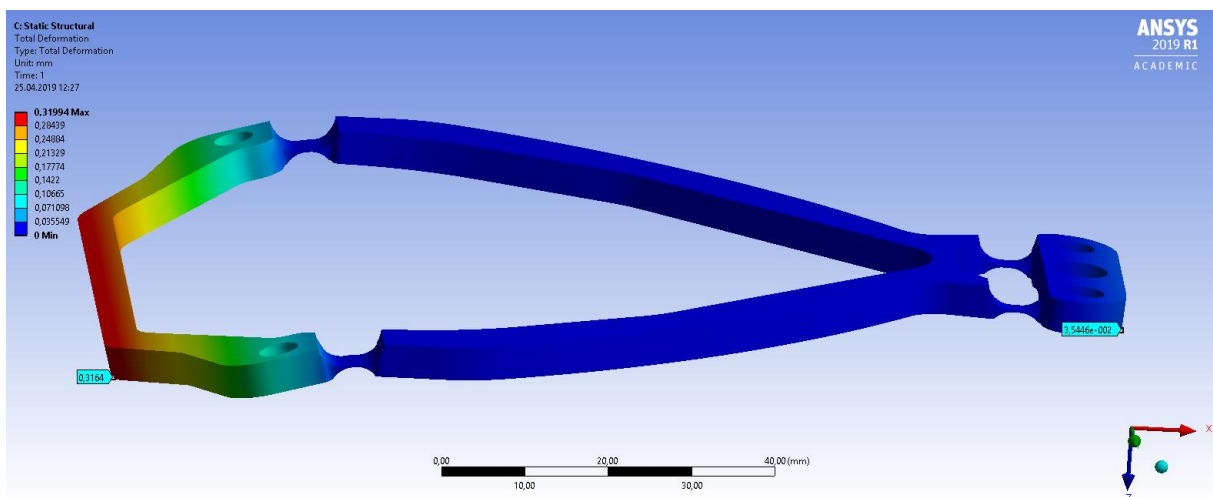
W związku z tym, że rozwiązanie MES uzależnione jest m.in od liczby elementów użytych w symulacji, przeprowadzono analizę zbieżności maksymalnego przemieszczenia w funkcji liczby elementów skończonych (rys. 3.14).

**Rys. 3.14.** Wykres zbieżności maksymalnego przemieszczenia w funkcji liczby elementów skończonych

W analizowanym przypadku siatka składała się z 239487 węzłów i 142362 elementów. Widok siatki przedstawiono na rys. 3.15, a wynik analizy z informacją o maksymalnych przemieszczeniach w wyniku oddziaływania grawitacyjnego na rys. 3.16.



Rys. 3.15. Analiza MES wahacza pod obciążeniem grawitacyjnym – widok siatki



Rys. 3.16. Analiza MES wahacza pod obciążeniem grawitacyjnym

W tabeli 3.4 przedstawiono porównanie maksymalnych przemieszczeń grawitacyjnych obszarów „a” oraz „b” uzyskanych na drodze doświadczalnej i symulacyjnej.

Tabela 3.4. Porównanie przemieszczeń grawitacyjnych zmierzonych doświadczalnie i uzyskanych drogą symulacji MES

| $Z_{a\_ref} - Z_{a\_g}$ [mm] <sup>i</sup> | $Z_{b\_ref} - Z_{b\_g}$ [mm] <sup>j</sup> | $Z_{a\_g\_MES}$ [mm] <sup>ii</sup> | $Z_{b\_g\_MES}$ [mm] <sup>jj</sup> | $ ii - i $ [mm] | $ jj - j $ [mm] |
|---|---|------------------------------------|------------------------------------|-----------------|-----------------|
| 0,0380                                    | 0,3640                                    | 0,03546                            | 0,3164                             | 0,0025          | 0,0476          |

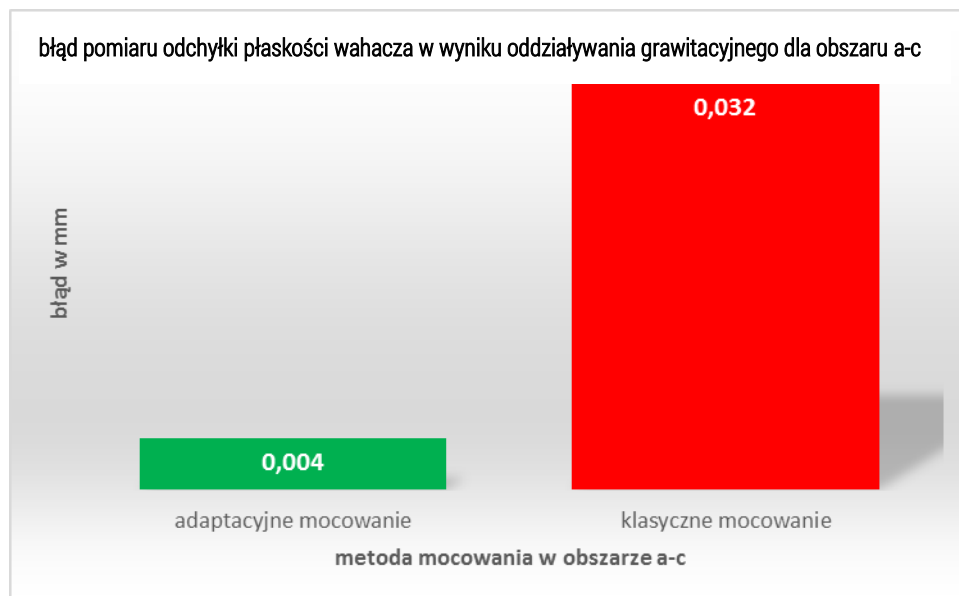
Analiza MES potwierdza zgodność uzyskanych przemieszczeń grawitacyjnych obszaru „a” oraz „b” z wynikami badań doświadczalnych. Biorąc pod uwagę przyjętą definicję elementu niesztynnego i uzyskane przemieszczenia pod wpływem oddziaływania grawitacyjnego, można stwierdzić, że wahacze stosowane w precyzyjnych wagach laboratoryjnych są elementami bardzo wiotkimi gdyż stosunek przemieszczenia związanego z oddziaływaniem grawitacyjnym i tolerancji w tym wypadku płaskości znacznie przekracza 10% pola tolerancji. Stosunek ten wynosi 182 %.

W tabeli 3.5 zestawiono błędy pomiaru związane z oddziaływaniem grawitacyjnym. Przyjęto założenie, że wyniki pomiaru uzyskane dla niepodatnej orientacji wahacza są wynikami referencyjnymi.

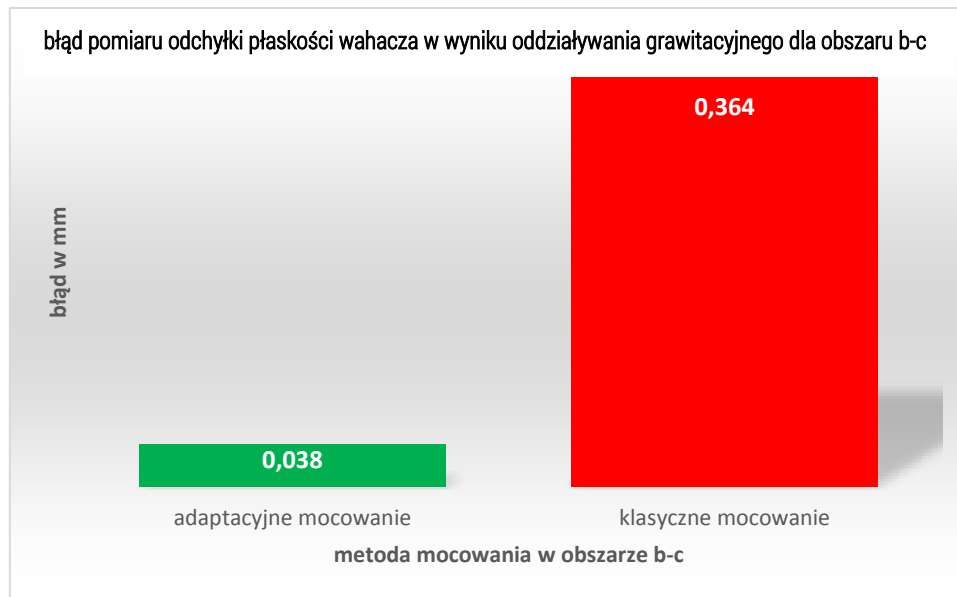
**Tabela 3.5.** Błędy względne pomiaru odchyłki płaskości obszaru „a” oraz „b” w zależności od mocowania

| Oznaczenie                                | Błąd względny [%] |
|---|-------------------|
| $ (Z_{a\_ref} - Z_{a\_g})  / Z_{a\_ref}$  | 7,1               |
| $ (Z_{b\_ref} - Z_{b\_g})  / Z_{b\_ref}$  | 80,5              |
| $ (Z_{a\_ref} - Z_{a\_am})  / Z_{a\_ref}$ | 1,0               |
| $ (Z_{b\_ref} - Z_{b\_am})  / Z_{b\_ref}$ | 9,1               |

Na wykresie 3.17 przedstawiono porównanie błędu pomiaru odchyłki płaskości obszaru a-c związanego z oddziaływaniem grawitacyjnym dla zastosowanych metod mocowania klasycznego i adaptacyjnego. Analogiczny wykres 3.18 przedstawia zestawienie błędu pomiaru dla obszaru b-c.

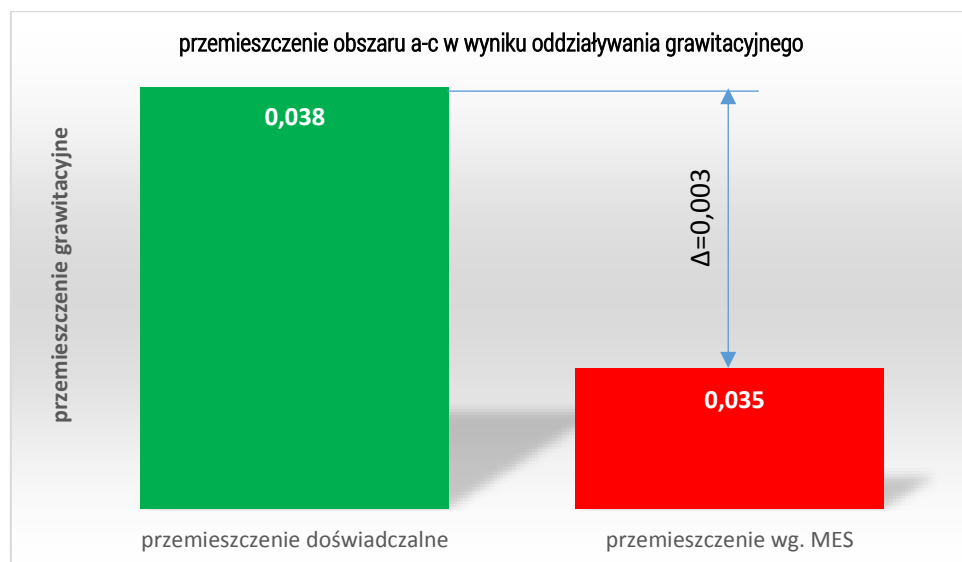


**Rys. 3.17.** Zestawienie błędów pomiaru odchyłki płaskości obszaru a-c wahacza w związku z oddziaływaniem grawitacyjnym w zależności od zastosowanej metody mocowania



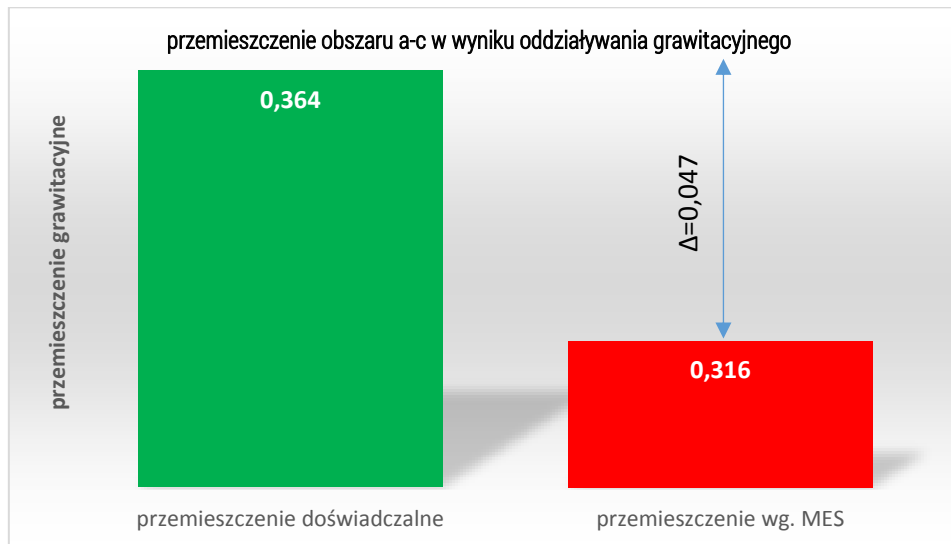
**Rys. 3.18.** Zestawienie błędów pomiaru odchyłki płaskości obszaru a-c wahacza w związku z oddziaływaniem grawitacyjnym w zależności od zastosowanej metody mocowania

Na wykresie 3.19 przedstawiono porównanie wyników doświadczalnych i symulacyjnych w odniesieniu do przemieszczenia obszaru a-c w wyniku oddziaływania grawitacyjnego. Różnica wskazań wynosi poniżej 0,003 mm, i jest na poziomie błędu systemu pomiarowego.



**Rys. 3.19.** Wynik przemieszczenia maksymalnego obszaru a-c w wyniku oddziaływania grawitacyjnego. Kolorem zielonym oznaczono przemieszczenie uzyskane na drodze doświadczalnej, a kolorem czerwonym wynik uzyskany na drodze symulacyjnej

Na wykresie 3.20 przedstawiono porównanie wyników doświadczalnych i symulacyjnych w odniesieniu do przemieszczenia obszaru b-c w wyniku oddziaływania grawitacyjnego. Różnica wskazań wynosi 0,047 mm i wskazuje na mniejszą sztywność elementu w stosunku do modelu CAD.



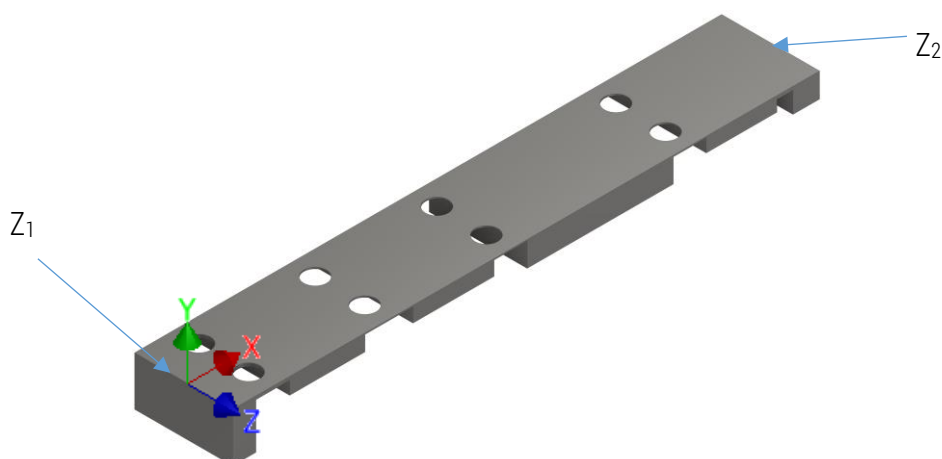
**Rys. 3.20.** Wynik przemieszczenia maksymalnego obszaru b-c w wyniku oddziaływania grawitacyjnego. Kolorem zielonym oznaczono przemieszczenie uzyskane na drodze doświadczalnej, a kolorem czerwonym wynik uzyskany na drodze symulacyjnej

Uzyskane wyniki pomiaru odchyłki płaskości pokazują przeszło 8-krotną redukcję błędu związanego z oddziaływaniem grawitacyjnym. Kierując się obowiązującymi wytycznymi dotyczącymi mocowania elementów niesztywnych należałoby zastosować np. mocowanie kształtowe w postaci płaskiej płyty oraz docisk obszarów „a”, „b”, „c”. Zakładając, że odchyłka płaskości płyty wyniosłaby 0 mm oraz, że grubości obszarów „a”, „b”, „c” byłyby takie same wówczas element uległby całkowitemu wyprostowaniu przyjmując kształt podparcia, a odchyłka płaskości wyniosłaby 0 mm. Analizując dalej ten przykład i biorąc pod uwagę fakt, że wahacz w stanie swobodnym (rys. 3.9) posiada odchyłkę płaskości o wartości 0,452 mm, błąd względny związany z mocowaniem kształtowym wyniósłby 100%. Opracowane mocowanie adaptacyjne umożliwiło przeszło ośmiokrotne zredukowanie błędu związanego z oddziaływaniem grawitacyjnym zarówno dla obszaru a-c oraz b-c w stosunku do mocowania w orientacji podatnej bez kompensacji. Oczywiście elementy tego typu można mierzyć w orientacji niepodatnej w przypadku posiadania odpowiedniego wyposażenia pomiarowego (głowicy obrotowo – uchylniej) jednak w przypadku braku takiego wyposażenia konieczny jest pomiar

w orientacji podatnej z zastosowaniem kompensacji wpływu oddziaływania grawitacyjnego na błąd pomiaru. W przypadku podparcia elementu typu wahacz na mocowaniu kształtowym wykonanym zgodnie z nominałem CAD, jego pomiar odbyłby się w stanie naprężonym a wynik błędu płaskości uzależniony byłby od dokładności wykonania mocowania kształtowego. Opracowana metoda mocowania adaptacyjnego pozwala odseparować odkształcenia sprężyste od błędów wykonania elementów, umożliwiając mocowanie elementu w stanie quasi-swobodnym.

### Wzorzec płytkowy

Na rys. 3.21 przedstawiono widok izometryczny wzorca płytkowego z oznaczonym początkiem układu współrzędnych przyjętym zarówno w pomiarach jak i w symulacji MES. Element ten zaprojektowano w taki sposób, aby podobnie jak w przypadku wahacza poziomego istniała orientacja podatna oraz niepodatna na odkształcenia związane z oddziaływaniem grawitacyjnym. W przypadku tego elementu analizie poddano odchyłkę płaskości powierzchni górnej. Podobnie jak w przypadku wahacza poziomego, wyniki uzyskane dla orientacji niepodatnej na odkształcenia sprężyste przyjęto jako wartość rzeczywistą odchyłki płaskości. Ten sam element zmierzono także używając innych strategii mocowania tj. mocowania swobodnego w orientacji podatnej na odkształcenia oraz w tej samej orientacji z podparciem elementu na aktywnych podporach w celu kompensacji przemieszczeń. W celu łatwej identyfikacji błędów związanych z oddziaływaniem grawitacyjnym przyjęto płaszczyznę odniesienia  $XZ = 0$  w oparciu o dwie proste  $Z_1$  oraz  $Z_2$  jak na rys. 3.21.



Rys. 3.21. Model opracowanego wzorca płytkowego wraz z oznaczonym układem współrzędnych

Do analizy wyników przyjęto następujące oznaczenia:

$Y_{ref\_max}$  – odchyłka płaskości w orientacji niepodatnej (rys. 3.6a),

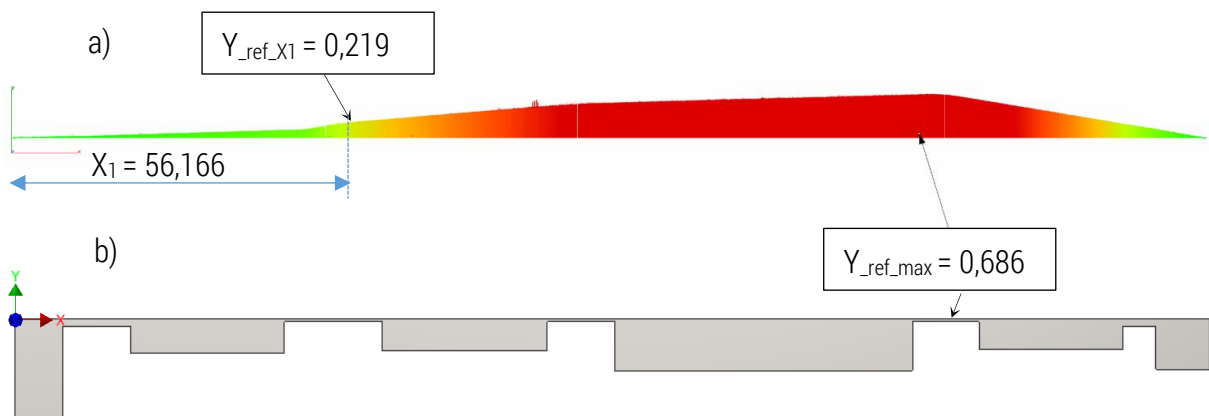
$Y_{ref\_x1}$  – przemieszczenie w punkcie  $X_1=56,166$  mm w orientacji niepodatnej.

$Y_{g\_max}$  – odchyłka płaskości w orientacji podatnej (rys. 3.6b),

$Y_{am\_max}$  – odchyłka płaskości w orientacji podatnej na mocowaniu adaptacyjnym (rys. 3.6c),

$Y_{g\_MES\_max}$  – przemieszczenie maksymalne w osi Y uzyskane podczas analizy MES.

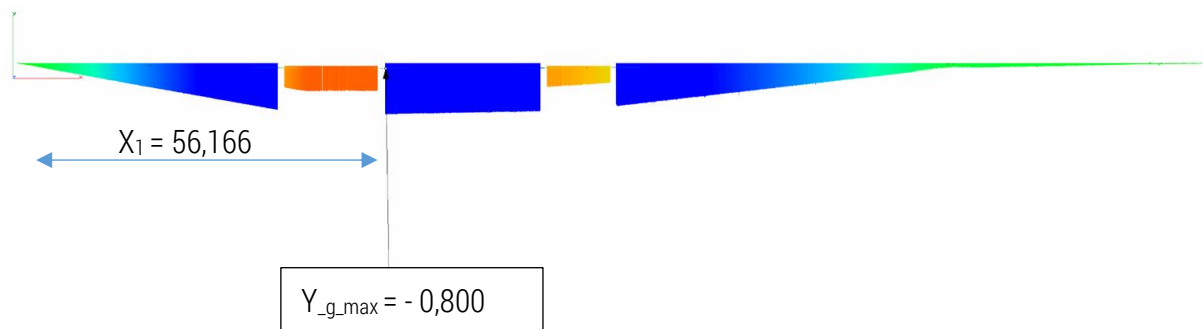
Na rys. 3.22a przedstawiono wynik pomiaru wzorca płytkowego zmierzonego w orientacji niepodatnej na odkształcenia sprężyste (rys. 3.6a). Po zeskanowaniu powierzchni górnej płytki uzyskano chmurę punktów, którą następnie nałożono na model nominalny CAD elementu mierzonego. W idealnym przypadku (odchyłka płaskości równa 0), widok w płaszczyźnie XY byłby widoczny jako linia prosta. W analizowanym przypadku płytka posiada odchyłkę kształtu o wartości 0,686 mm. Błąd ten jest przedstawiony poprzez kolorową mapę punktów odstających od płaszczyzny nominalnej XZ. Na rys. 3.22b pokazano model CAD płytki w widoku z przodu i odpowiadający orientacji elementu podczas pomiaru. Niebieską strzałką oznaczono zmierzoną górną powierzchnię płytki.



**Rys. 3.22.** Wynik pomiaru odchyłki płaskości wzorca płytkowego w orientacji niepodatnej: a) odchyłka płaskości wraz z kolorową mapą odchyłek, b) model CAD płytki z oznaczoną górną powierzchnią. Odchyłka płaskości wynosi 0,686 mm

Następnie wykonano pomiar elementu w pozycji podatnej na odkształcenia w wyniku działania grawitacji. Element ustawiony został na płycie treserskiej zgodnie z rys. 3.6b oraz 3.7b. W wyniku działania grawitacji nastąpiło odkształcenie sprężyste, a jego wizualizację przedstawiono na rys. 3.23.

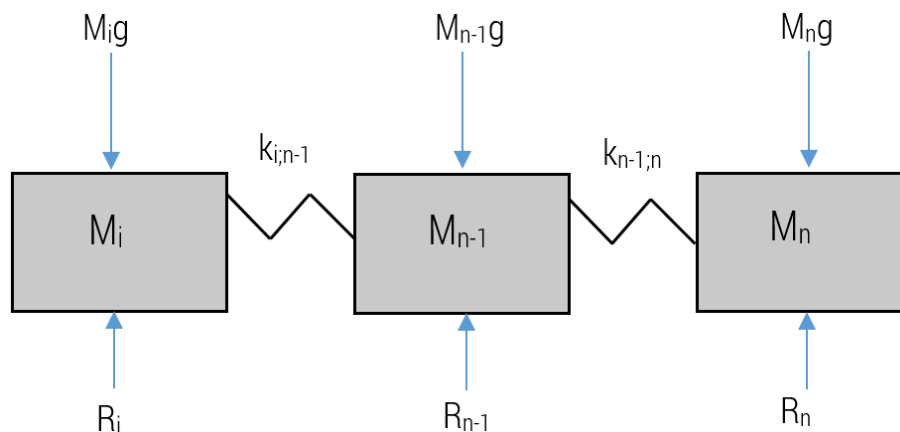




**Rys. 3.23.** Wynik pomiaru odchyłki płaskości wzorca płytkowego w orientacji podatnej. Odchyłka płaskości wynosi 0,8 mm. Maksymalne przemieszczenie występuje w pozycji  $X_1=56,166$  mm

Ustawienie elementu w orientacji podatnej na odkształcenia sprężyste pod wpływem działania siły grawitacji spowodowało znaczną zmianę kształtu. Maksymalne odchylenie od powierzchni nominalnej wyniosło 0,8 mm przy czym zmianie uległa jego lokalizacja oraz zwrot (-Y).

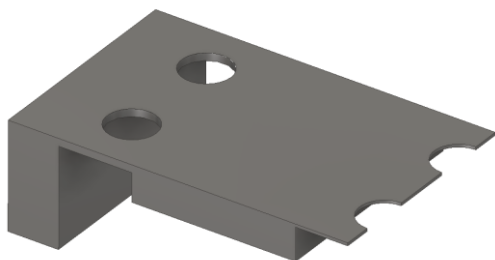
Ostatnią z przyjętych metod mocowania była opracowana metoda mocowania adaptacyjnego (rys. 3.6c, rys. 3.7c). Element mierzony ustawiony był w orientacji podatnej na odkształcenia w wyniku działania grawitacji, jednak przemieszczenia związane z jej działaniem skompensowane zostały przez odpowiednio wyjustowane aktywne podpory. Schemat podparcia wraz z oznaczonymi wartościami reakcji przedstawiono na rys. 3.23. W przypadku opracowanego elementu nie było konieczności stosowania algorytmu optymalnego lokowania podpór i wykorzystano model masy odsprężynowanej MSS (rys. 3.24).



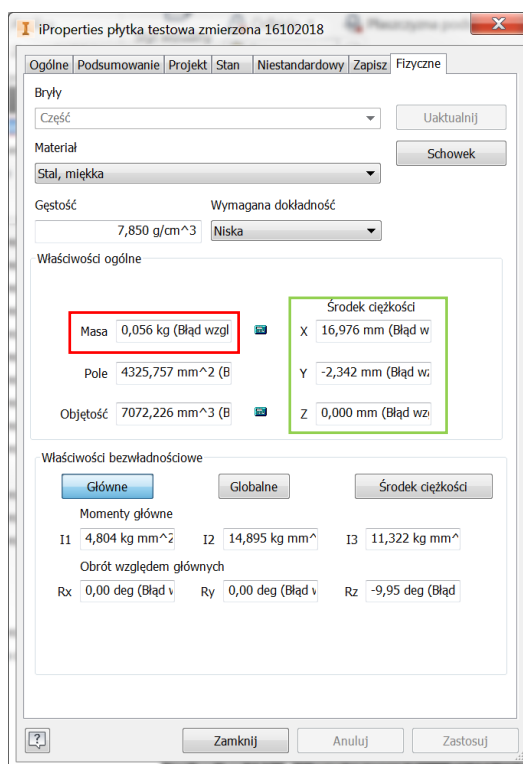
**Rys. 3.24.** Model masy odsprężynowanej MSS:  $M_i g$  – ciężar masy jednostkowej,  $k_{i,j-1}$  – sztywność pomiędzy masami  $M_i$ ;  $M_{i-1}$ ,  $R_i$  – reakcja podporowa masy cząstkowej  $M_i$ .

W przypadku gdy każda z mas  $M_i$ ;  $M_n$  zostanie podparta w środku ciężkości reakcją o wartości równej ciężarowi każdej z mas, wówczas nie występują momenty gnące pomiędzy poszczególnymi masami tj. naprężenie równe jest 0 MPa. Wykorzystując tę właściwość można dokonać podziału elementu mierzzonego na masy cząstkowe. Podział ten został wykonany w oprogramowaniu CAD Autodesk Inventor, który w szybki sposób daje informację o masie cząstkowej oraz o środku ciężkości danej masy. Naturalnie w przypadku omawianego elementu istnieje możliwość wykorzystania opracowanego algorytmu optymalnego lokowania podpór aktywnych, jednak przedstawiony sposób analizy podparcia jest mniej czasochłonny i równie skuteczny. Na rys. 3.25a przedstawiono widok jednej z mas cząstkowych tworzących model opracowanego elementu niesztynnego. Właściwości tego fragmentu tj. jego masę (ramka czerwona) oraz współrzędne środka ciężkości (ramka zielona) przedstawiono na rys. 3.25b.

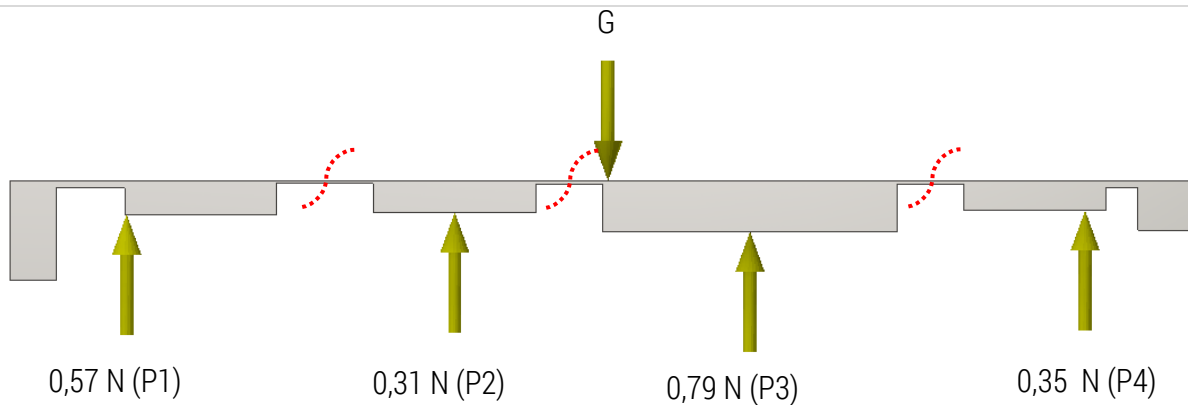
a)



b)



Rys. 3.25. Podział elementu na masy cząstkowe: a) przykład elementu, b) właściwości elementu cząstkowego



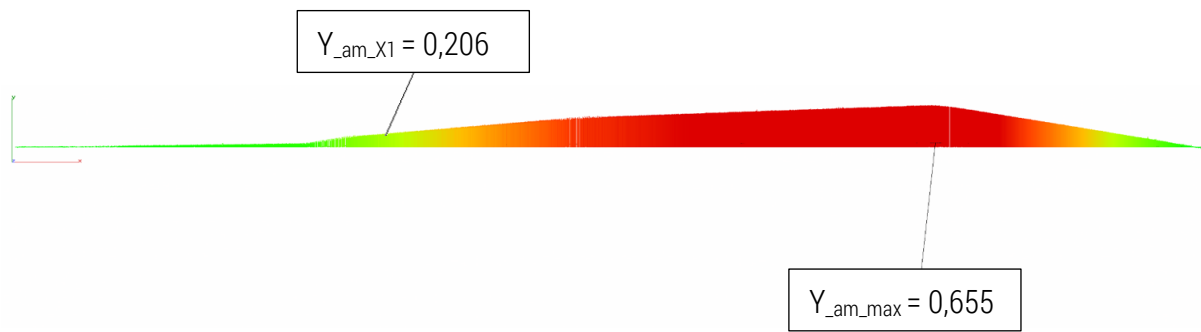
**Rys. 3.25.** Nominalne wartości reakcji podporowych. Przerwane czerwone linie oznaczają wirtualny podział elementu na masy cząstkowe

Na rys. 3.27 przedstawiono rzeczywiste odczyty z czujników siły ( $M_1 - M_4$ ) po ustawieniu aktywnych podpór. Widok elementu ustawionego na aktywnych podporach przedstawiono na rys. 3.7c.

|         | P1 [g] | P1 [N] | M1 [g] | M1 [N]  |
|---------|--------|--------|--------|---------|
| P1 < M1 | 58,5   | 0,57   | 56     | 0,54917 |
| P2 < M2 | 31,6   | 0,31   | 29     | 0,28439 |
| P3 < M3 | 80,2   | 0,79   | 82     | 0,80414 |
| P4 < M4 | 35,8   | 0,35   | 39     | 0,38245 |
| P5 < M5 | 0,0    | 0,00   | 0      | 0       |
| P6 < M6 | 0,0    | 0,00   | 0      | 0       |
| P7 < M7 | 0,0    | 0,00   | 0      | 0       |

**Rys. 3.27.** Widok oprogramowania do regulacji aktywnych podpór. Parametry  $P_1 - P_4$  są nominalnymi reakcjami, parametry  $M_1 - M_4$  są rzeczywistymi wartościami ustawionych reakcji podporowych

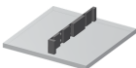
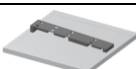
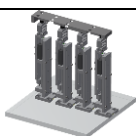
Po ustawieniu opracowanego elementu nieszywnego na aktywnych podporach i wykonaniu ich regulacji zgodnie z parametrami z rys. 3.27 zmierzono odchyłkę płaskości górnej powierzchni tego elementu. Wynik pomiaru w postaci kolorowej mapy odchyłek oraz wartości maksymalnej przedstawia rys. 3.28.



**Rys. 3.28.** Wynik pomiaru odchyłki płaskości górnej powierzchni płytki testowej ustawionej w orientacji podatnej przy zastosowaniu aktywnych podpór. Odchyłka płaskości wynosi 0,655 mm

W tabeli 3.6 przedstawiono wyniki pomiarów płytki testowej z zastosowaniem trzech strategii mocowania (rys. 3.6a - 3.6c).

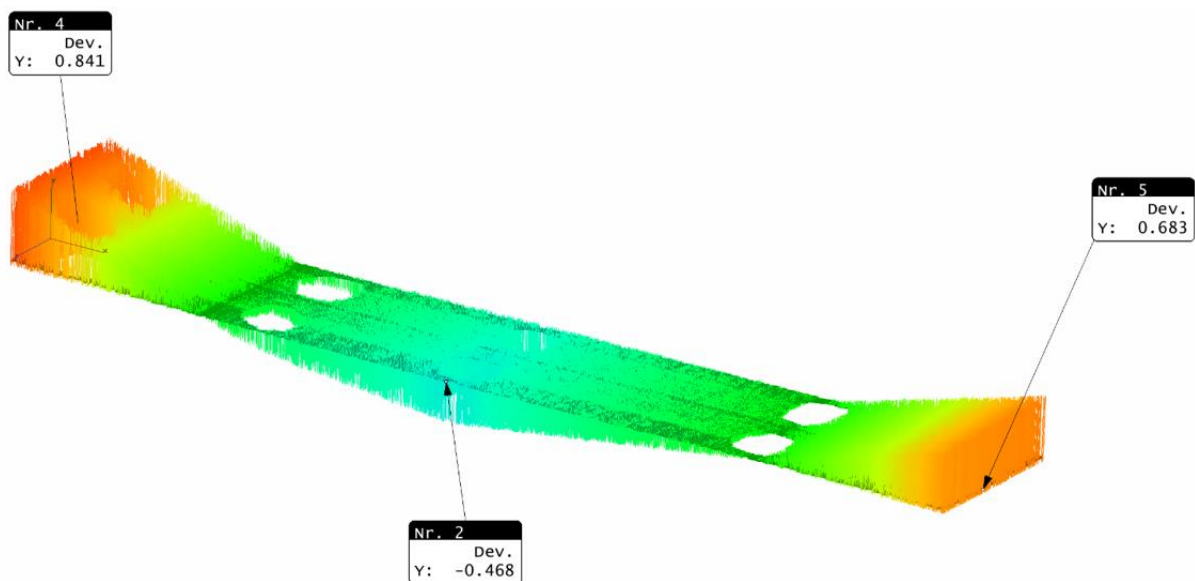
**Tabela 3.6.** Zestawienie wyników pomiaru płytki testowej.

| Oznaczenie     | Mocowanie   | Odchyłka płaskości [mm] |
|----------------|---|-------------------------|
| $Y_{ref\_max}$ |  | 0,686                   |
| $Y_g\_max$     |  | 0,800                   |
| $Y_{am\_max}$  |  | 0,655                   |

Zgodnie z tabelą 3.6 zachodzi duża zgodność wartości odchyłki płaskości górnej powierzchni przy zastosowaniu mocowania adaptacyjnego oraz mocowania w orientacji niepodatnej, a różnica tych wskazań wynosi 0,031 mm. Analizując jedynie odchyłkę kształtu górnej powierzchni płytki można stwierdzić, że błąd pomiaru przy orientacji podatnej bez kompensacji ugięć sprężystych w wyniku wynosi jedynie 0,114 mm.

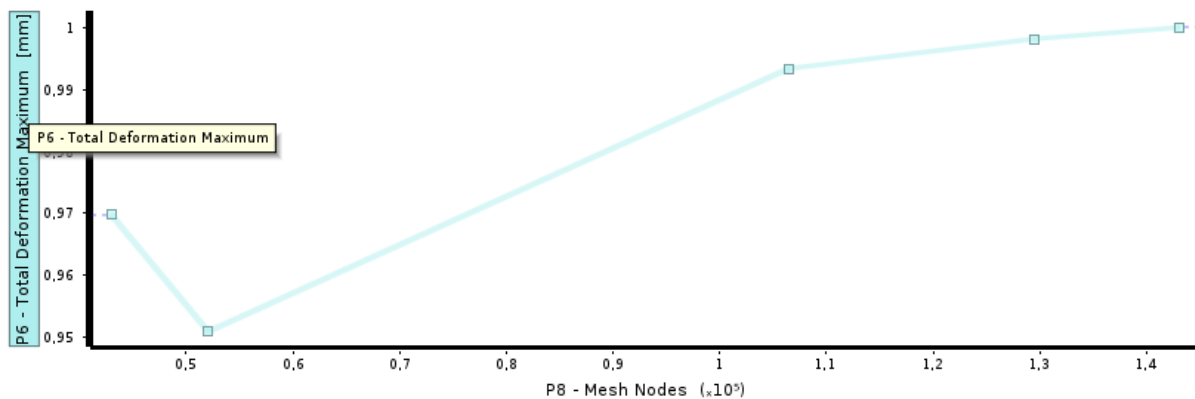
Odchyłka płaskości zmierzona w przypadku mocowania płytki w orientacji niepodatnej została przyjęta jako wartość prawdziwa tej wielkości, ponieważ wynik pomiaru nie jest obarczony błędem związanym z oddziaływaniem grawitacyjnym. Jak pokazuje wynik badania doświadczalnego mocowanie adaptacyjne umożliwiło niemal całkowitą kompensację odkształcenia sprężystego, a uzyskany błąd związany z tym efektem wynosi 0,031mm. Dodatkowo zachodzi zgodność jeśli chodzi o pozycję

punktu maksymalnego w osi X (139,160 mm). W przypadku mocowana w orientacji podatnej odchyłka płaskości wynosi  $-0,8$  mm, a punktu najbardziej oddalony od płaszczyzny ZX występuje w odległości  $X_1 = 56,16$  mm (rys. 3.26). W związku z faktem, że maksymalne odchylenie uzyskane podczas pomiarów elementu niesztynnego w orientacji podatnej jak i niepodatnej występuje w różnych pozycjach w osi X, należy porównać odchylenia występujące w tej samej pozycji  $X_1$ . W związku z tym określono wartość odchylenia w osi Y dla pozycji  $X_1=56,166$  mm orientacji niepodatnej. Parametr ten oznaczono jako  $Y_{ref\_X1}$ . Porównując współrzędne  $Y_{ref\_X1}$  i  $Y_{g\_max}$  można określić błąd pomiaru związany z przemieszczeniem w wyniku oddziaływania grawitacyjnego. Błąd ten wynosi 1,006 mm i znacznie przekracza uzyskany błąd pomiaru odchyłki płaskości w orientacji podatnej, który wynosi 0,114 mm. W celu zobrazowania tego błędu nałożono chmurę punktów zebraną z powierzchni górnej płytki w orientacji podatnej oraz niepodatnej przyjmując tę ostatnią jako element nominalny (rys. 3.29).



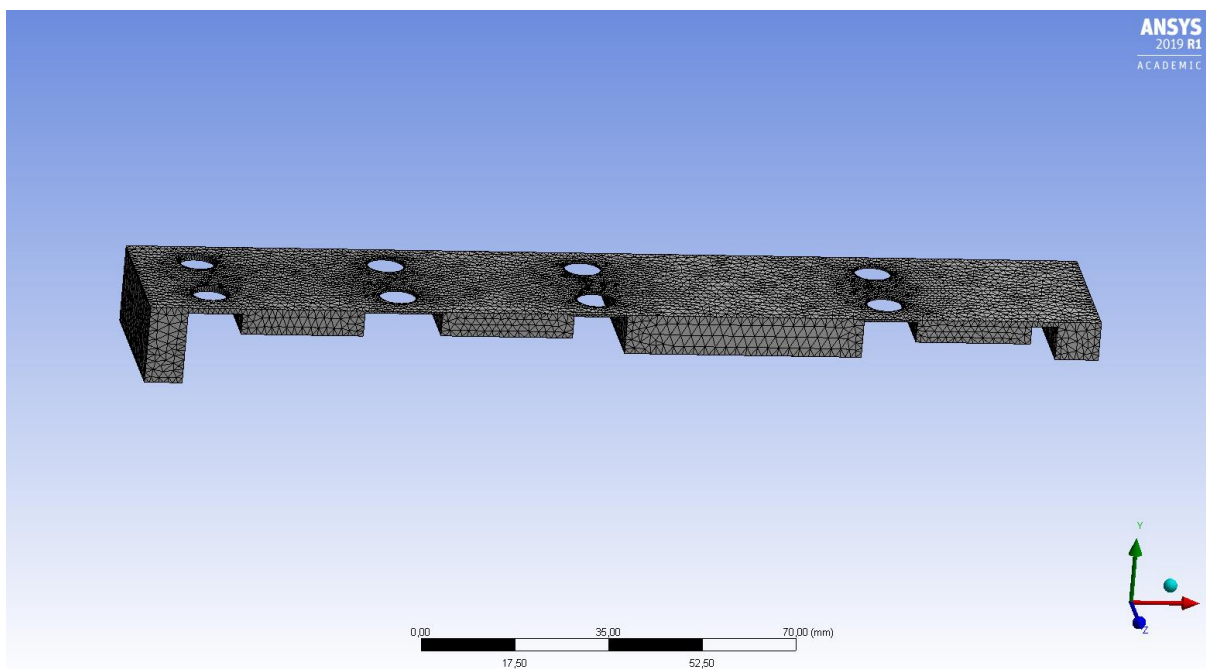
**Rys. 3.29.** Porównanie wyniku pomiaru (chmury punktów) odchyłki płaskości powierzchni górnej płytki zmierzonej w orientacji podatnej i orientacji niepodatnej

Podobnie jak w przypadku wahacza poziomego wykonano analizę MES w celu weryfikacji maksymalnej deformacji płytki testowej w wyniku oddziaływania grawitacyjnego. Przeprowadzono także analizę zbieżności maksymalnego przemieszczenia w funkcji liczby elementów skończonych. Wynik analizy zbieżności przedstawia rys. 3.30.

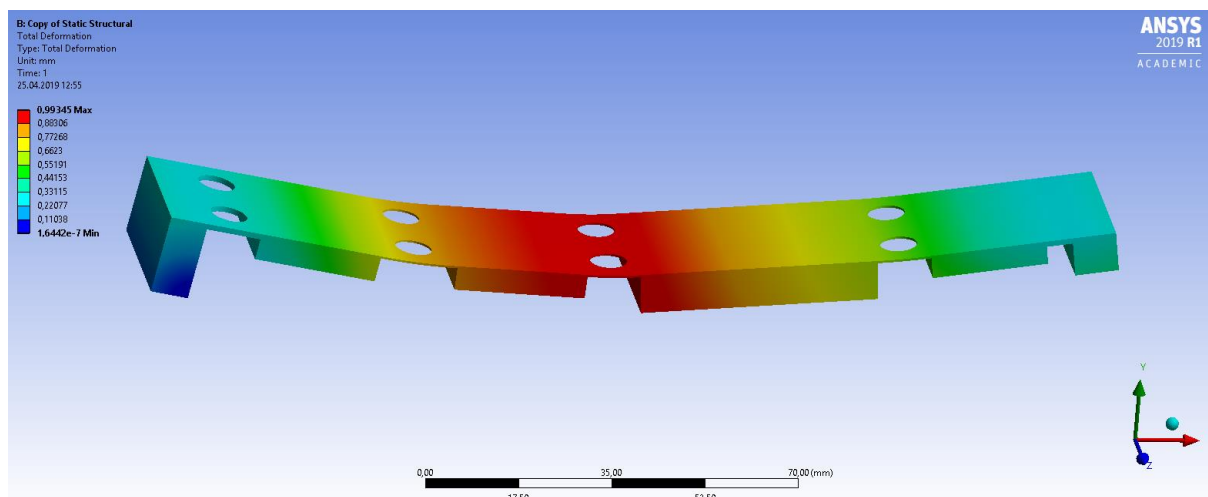


Rys. 3.30. Wykres zbieżności maksymalnego przemieszczenia w funkcji liczby elementów skończonych

W analizowanym przypadku siatka składała się z 106451 węzłów i 61315 elementów. Widok siatki elementów przedstawiono na rys. 3.31, a wynik analizy z informacją o maksymalnym przemieszczeniu w wyniku oddziaływania grawitacyjnego na rys. 3.32.



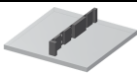
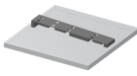

Rys. 3.31. Analiza MES płytki pod obciążeniem grawitacyjnym – widok siatki



Rys. 3.32. Analiza MES płytki pod obciążeniem grawitacyjnym

Maksymalne przemieszczenie w wyniku obciążenia grawitacyjnego zgodnie z symulacją MES wyniosło 0,993 mm i wystąpiło ono w odległości 86,860 mm od płaszczyzny ZY czyli w środku elementu. Maksymalne przemieszczenie grawitacyjne według badań doświadczalnych wystąpiło w odległości 56,166 mm i wyniosło ono 1,006 mm. Różnica pomiędzy maksymalnym przemieszczeniem grawitacyjnym uzyskanym na drodze eksperymentalnej i symulacyjnej wynosi 0,013 mm. Podsumowanie wyników pomiarów pomiaru wzorca płytkowego przedstawiono w tabeli 3.7.

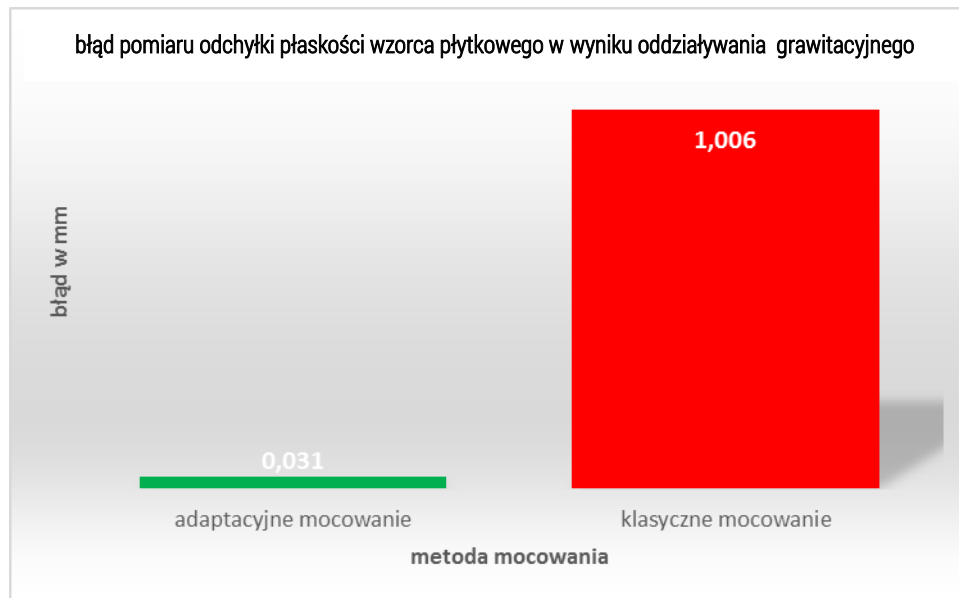
Tabela 3.7. Zestawienie błędów pomiaru odchyłki płaskości powierzchni górnej wzorca płytkowego.

| Oznaczenie                 | Mocowanie   | Błąd [mm] | Błąd względny [%] |
|----------------------------|---|-----------|-------------------|
| $Y_{ref\_max}$             |  |           |                   |
| $Y_{ref\_x1} - Y_{g\_max}$ |  | 1,006     | 146,6             |
| $Y_{am\_max}$              |  | 0,031     | 4,5               |

Uzyskane wyniki pomiarów pokazują, że opracowana metoda mocowania adaptacyjnego zwiększyła dokładność pomiaru niemal 33 – krotnie w stosunku do mocowania klasycznego w orientacji podatnej na odkształcenia. Mocowanie elementu w orientacji podatnej stanowi przykład skrajnie nieoptymalnej strategii mocowania tego typu elementów, jednak umożliwia ona określenie maksymalnego błędu związanego z oddziaływaniem grawitacyjnym. Podparcie elementu w inny sposób uniemożliwiłoby

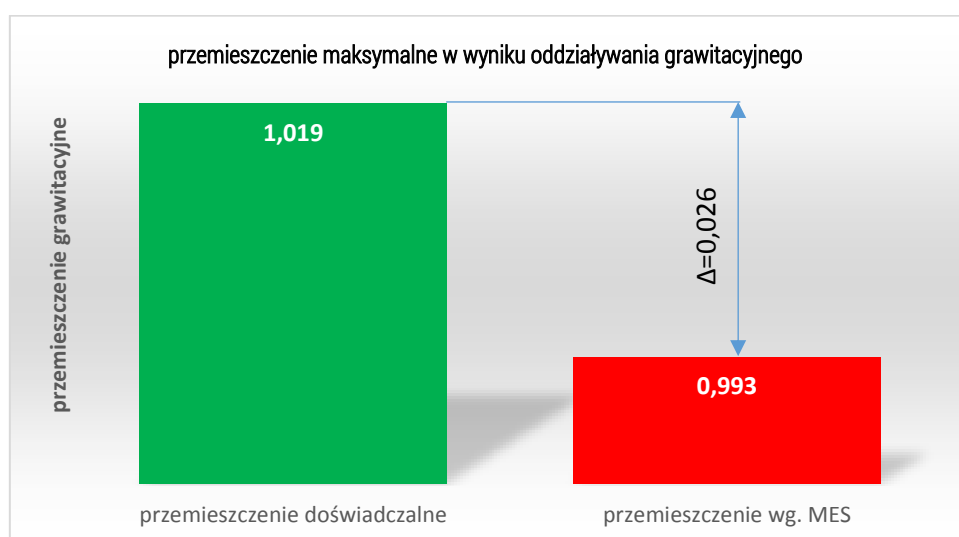
określenie stopnia oddziaływania grawitacyjnego na błąd pomiaru, ponieważ przemieszczenie wynikające z tego oddziaływania byłoby ograniczane przez podpory.

Na rys. 3.33 ponownie przedstawiono zestawienie uzyskanych błędów pomiaru odchyłki płaskości w postaci wykresu kolumnowego.



**Rys. 3.33.** Zestawienie błędów pomiaru odchyłki płaskości obszaru wzorca płytkowego w związku z oddziaływaniem grawitacyjnym w zależności od zastosowanej metody mocowania

Na wykresie 3.34 przedstawiono porównanie wyników doświadczalnych i symulacyjnych w odniesieniu do deformacji wzorca płytkowego w wyniku oddziaływania grawitacyjnego. Różnica wskazań wynosi 0,047 mm i wskazuje na mniejszą sztywność elementu w stosunku do modelu CAD.



**Rys. 3.34.** Wynik przemieszczenia maksymalnego wyniku oddziaływania grawitacyjnego. Kolorem zielonym oznaczono przemieszczenie uzyskane na drodze doświadczalnej, a kolorem czerwonym wynik uzyskany na drodze symulacyjnej



Podobnie jak w przypadku wahacza poziomego istnieje możliwość podparcia wzorca płytkowego na mocowaniu kształtowym opracowanym w oparciu o model nominalny CAD elementu mierzonego. Wprowadzenie siły docisku spowoduje jednak deformację elementu i jego pomiar w stanie naprężonym. W tej sytuacji nie ma możliwości określenia chociażby przybliżonej wartości odchyłki płaskości.

Opracowany wzorec płytkowy jest elementem podatnym na odkształcenia grawitacyjne, a jego pomiar w orientacji podatnej bez uwzględnienia tego zjawiska nie pozwala na uzyskanie wiarygodnego wyniku pomiaru. Wzorec ten został opracowany w taki sposób, aby istniała możliwość jego pomiaru zarówno w orientacji podatnej jak i niepodatnej. Druga z wymienionych umożliwiła wykonanie wiarygodnego pomiaru błędu płaskości, a wynik ten został przyjęty jako wynik prawdziwy (referencyjny). Pozostałe pomiary tj. pomiar w orientacji podatnej bez podparcia oraz pomiar w orientacji podatnej z podparciem na aktywnych podporach zostały odniesione do wartości prawdziwej. Uzyskane wyniki pomiarów w pierwszej kolejności ujawniają potrzebę mocowania elementu zgodnie ze strategią, która umożliwia odseparowanie błędów związanych z odkształceniem grawitacyjnym. W analizowanym przypadku istniała możliwość ustawienia elementu w orientacji niepodatnej, jednak większość elementów niesztynnych, które są elementami zbudowanymi z powierzchni swobodnych nie posiada takiej orientacji w związku z tym istnieje potrzeba kompensacji błędów związanych z oddziaływaniem grawitacyjnym. Zaproponowana metoda mocowania adaptacyjnego umożliwia kompensację odkształceń grawitacyjnych, a uzyskany błąd pomiaru potwierdza jej skuteczność.

#### 4. Podsumowanie i wnioski

Celem niniejszej rozprawy jest opracowanie nowej metody adaptacyjnego mocowania elementów niesztynnych, dzięki której element niesztynny mocowany jest w stanie quasi-swobodnym, a jego pomiar możliwy jest w stanie zredukowanego naprężenia wynikającego z oddziaływań grawitacyjnych. Istniejące metody mocowań elementów niesztynnych opracowane są na podstawie wytycznych norm ISO 10579 oraz ASME Y 14.5 i zakładają one pomiar elementu w stanie naprężonym, w taki sposób, aby odwzorować jego kształt po zamocowaniu w docelowym zespole. Autor pracy zwrócił uwagę na fakt, że pomiar elementu niesztynnego w stanie naprężonym obarczony jest błędem związanym z wprowadzonym odkształceniem. To samo naprężenie wprowadzane jest podczas montażu elementu w docelowym zespole, co ma wpływ na jego parametry niezawodnościowe (np. parametr *MTBF*).

Opracowana metoda mocowania adaptacyjnego wykorzystuje analizę metodą elementów skończonych do wyznaczenia optymalnej pozycji podpór oraz reakcji podporowych. Wyznaczanie optymalnych parametrów podparcia elementu niesztynnego odbywa się w sposób automatyczny dzięki opracowanemu algorytmowi optymalnego lokowania podpór. Informacje o parametrach mocowania elementu niesztynnego potrzebne są do ustawienia opracowanych aktywnych podpór. Podpory te wyposażone są w czujniki siły oraz mechanizm pozwalający na regulację reakcji podporowych. Kontrola wartości reakcji podporowych oraz kalibracja czujników siły możliwa jest z poziomu opracowanego programu.

W części badawczej wykonano pomiary elementów niesztynnych w postaci wahacza poziomego służącego jako element prowadzący w precyzyjnych wagach laboratoryjnych oraz opracowanego wzorca płytkowego. Obydwa elementy mocowane były w trzech orientacjach:

- niepodatnej na odkształcenia sprężyste związane z grawitacją,
- podatnej na odkształcenia sprężyste związane z grawitacją,
- podatnej na odkształcenia sprężyste związane z grawitacją z podparciem adaptacyjnym.

W pierwszej z zastosowanych strategii uzyskano wyniki pomiaru przyjęte jako wyniki prawdziwe, nieobarczone błędem związanym z odkształceniem grawitacyjnym. Pozostałe dwie strategie zakładały wykonanie pomiaru w orientacji podatnej na odkształcenia grawitacyjne, przy czym ostatnia z metod zakładała wykorzystanie mocowania adaptacyjnego. Opracowana metoda adaptacyjnego

mocowania umożliwiła redukcję błędu związanego z odkształceniem grawitacyjnym w skrajnym przypadku 33 krotnie.

Maksymalne przemieszczenia grawitacyjne zostały również określone na podstawie analizy MES. Uzyskane wyniki symulacji porównano z przemieszczeniami uzyskanymi na drodze doświadczalnej. W wyniku porównania tych rezultatów stwierdzono zgodność wyników doświadczalnych z symulacyjnymi, a błąd względny wyniósł w tym wypadku od 1% do 13 %.

Uzyskany stopień redukcji odkształceń sprężystych związanych z oddziaływaniem grawitacyjnym wskazuje, że opracowana metoda adaptacyjnego mocowania umożliwia znaczne zwiększenie dokładności współrzędnościowych pomiarów elementów niesztynnych w stosunku do istniejących klasycznych metod mocowania. Powyższe stwierdzenie stanowi dowód tezy niniejszej rozprawy.

## 6. Bibliografia

### 6.1. Artykuły w czasopismach, publikacje konferencyjne

- [1] Abenhaim G., Desrochers A., Tahan A. (2012): Nonrigid parts' specification and inspection methods: notions, challenges, and recent advancements. *Int J Adv Manuf Technol* 63, s. 741–752. 2012.
- [2] Abenhaim G., Desrochers A., Tahan A. (2013): An investigation of the repeatability of non-rigid parts measurements: A case Study of an aluminum panel. 12th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing. *Procedia CIRP* 10, s. 105 – 111.
- [3] Abenhaim GN, Desrochers A, Tahan AS, Lalonde J. (2013): Aerospace panels fixtureless inspection methods with restraining force requirements; a technology review. In: SAE technical paper.
- [4] Abenhaim GN, Desrochers A, Tahan AS, Bigeon J. (2014): A finite element boundary condition setting method for virtual mounting of compliant components. In: The thirteenth CIRP conference on computer aided tolerancing.
- [5] Abenhaim G., Tahan A., Desrochers A., Maranzana R. (2011): A Novel approach for the inspection of flexible parts without the use of special fixtures. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* Vol. 133.
- [6] Abenhaim G., Tahan A., Desrochers A, Bigeon J. (2015): A virtual fixture using a FE-based transformation model embedded into a constrained optimization for the dimensional inspection of nonrigid parts. *Computer-Aided Design* 62 s. 248–258.
- [7] Aidibe A., Tahan A.(2015): Adapting the Coherent Point Drift Algorithm to the Fixtureless Dimensional Inspection of Compliant Parts. A. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 79.
- [8] Aidibe A., Tahan A., Abenhaim G. (2012): Distinguishing profile deviations from a part's deformation using the maximum normed residual test. *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics* 7(1), s.18–28.
- [9] Aidibe A., Tahan A., Abenhaim G.N. (2011): Dimensioning control of non-rigid parts using the Iterative Displacement Inspection with the maximum normed residual test. 2nd International Conference on Theoretical and Applied Mechanics 2011, TAM'11, 4th WSEAS International Conference on UPT'11, CUHT'11
- [10] Aidibe A., Tahan A. (2014): The inspection of deformable bodies using curvature estimation and Thompson-Biweight test. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 71, s. 1733–1747.
- [11] Amberg B., Romdhani S., Vetter T. (2007): Optimal step non-rigid ICP algorithms for surface registration. 2007 in IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Minneapolis, MN, USA.

- [12] Ascione R., Polini W. (2010): Measurement of nonrigid freeform surfaces by coordinate measuring machine. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 51, s. 1055–1067.
- [13] Babanzehad K., Foucault G., Tahan., Bigeon J. (2016): A Bi-Criterion Flexible Registration Method for Fixtureless Inspection of Compliant Parts. 7th HPC 2016 – CIRP Conference on High Performance Cutting. *Procedia CIRP* 46, s. 307 – 310.
- [14] Bertagnolli F, Dillmann R (2003) Flexible automated process assurance through noncontact 3D measuring technology. In: *Proceedings of IEEE international conference on multisensory fusion and integration for intelligent systems*, vol 1, s. 27–31.
- [15] Besl P, McKay N. (1992): A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Trans Pat Anal Mach Intel* 14, s. 239–256 .
- [16] Bihlmaier BF. (1999): Tolerance analysis of flexible assemblies using finite element and spectral analysis (M.S. thesis), Utah (United States): Department of Mechanical Engineering, Brigham Young University.
- [17] Bi Z. M., Zhang W. J. (2001): Flexible fixture design and automation: Review, issues and future directions. *int. j. prod. res.*, vol. 39, no. 13, s. 2867-2894.
- [18] Bobet A., Johnson S, Fakhimi A., Morris J. (2009): Numerical models in discontinuous media: Review of advances for rock mechanics applications. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 135(11).
- [19] Camelio J. A., Hu J. S., Ceglarek D. (2004): Impact of fixture design on sheet metal assembly variation. *Journal of manufacturing systems*. Vol. 23/No. 3.
- [20] Dawant, B. M., (2002): Non-Rigid Registration of Medical Images: Purpose and Methods, A Short Survey.
- [21] Falgarone H., Thiébaud F., Coloos J., Mathieu L. (2016): Variation simulation during assembly of non-rigid components. Realistic assembly simulation with ANATOLEFLEX software. 14th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing (CAT). *Procedia CIRP* 43, s. 202 – 207.
- [22] Fan W., Zheng L., Wang Y. (2018): An automated reconfigurable flexible fixture for aerospace pipeline assembly before welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 97, s. 3791–3811.
- [23] Fan J, Yang J, Lu F, Ai D, Zhao Y, Wang Y (2016): 3-Points Convex Hull Matching (3PCHM) for fast and robust point set registration. *Neurocomputing*. Volume 194, s. 227-240.
- [24] Faraz Z., Waheed S., Baqi A., Tarar w., Ali L. (2014): Reconfigurable fixture locating layout for compliant sheet metal welded assemblies subjected to welding force variations. *Journal of Engineering Manufacture*, s. 228: 740.
- [25] Feldmar, J., and Ayache, N., (1994): Rigid and Affine Registration of Smooth Surfaces Using Differential Properties, *Proceedings of the Third European Conference on Computer Vision*, Stockholm, Sweden, Vol. 2, s. 397.

- [26] Ferrant, M., Warfield, S. K., Guttman, C. R. G., Vulkern, R. V., Jolesz, F. A., and Kikinis, R., (1999): 3D Image Matching Using a Finite Element Based Elastic Deformation Model," Proceedings of the Second International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention— MICCAI '99, Cambridge, UK, Vol. 1679, s. 202–209.
- [27] Gao, J., Gindy, N., and Chen, X., (2006): An Automated GD&T Inspection System Based on Non-Contact 3D Digitization, *Int. J. Prod. Res.*, 441, s. 117–134.
- [28] Gentilini I., Shimada K. (2011): Predicting and evaluating the post-assembly shape of thin-walled components via 3D laser digitization and FEA simulation of the assembly process. *Computer-Aided Design* 43, s. 316–328.
- [29] Gonzaloa O., Mari Searaa J., Gurucetaa E., Izpizuaa A., Espartab M., Zamakonab I., Utergab N., Aranburuc A., Thoelend J. (2017): A method to minimize the workpiece deformation using a concept of intelligent fixture. *Robotics and Computer–Integrated Manufacturing* 48, s. 209–218.
- [30] Habaibeh A., Gindy N., Parkin R. M. (2003): Experimental design and investigation of a pin-type reconfigurable clamping system for manufacturing aerospace components, *Journal of Engineering Manufacture*, vol. 217. no. 12, s. 1771-1777.
- [31] Han Z., Wang Y., Ma X., Liu S., Zhang X., Zhang G. (2017): T-Spline Based Unifying Registration Procedure for Free-Form Surface Workpieces in Intelligent CMM. *Applied Science*.
- [32] Holden, M., (2008), A Review of Geometric Transformations for Nonrigid Body Registration, *IEEE Trans. Med. Imaging*, 271, s. 111–128.
- [33] Iuliano L., Minetola P., Violante M.G. (2007): Design and production of fixtures for free-form components using SLS. *Rapid Prototyping Journal* 13(1), s. 30-37.
- [34] Jankowski M., **Byszewski M.**, Woźniak A. (2015): Automatic setup for triggering force testing of touch-trigger probes. XXI IMEKO World Congress, August 30 - September 4, Prague, Czech Republic, Proceedings, s. 242-245.
- [35] Jankowski M., Woźniak A., **Byszewski M.** (2014): Machine tool probes testing using a moving inner hemispherical master artefact. *Precision Engineering*, 38, s. 421–427; **Impact Factor: 1.517**
- [36] Jankowski M., Woźniak A. (2016): Mechanical model of errors of probes for numerical controlled machine tools. *Measurement*, 77, s. 317-326.
- [37] Jaramillo A. E., Boulanger P., Prieto F. (2009): On-line 3-D inspection of deformable parts using FEM trained radial basis functions. *IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops (ICCV Workshops)*, Kyoto, Japan, IEEE.
- [38] Jaramillo A., Prieto F., Boulanger P. (2013): Fast dimensional inspection of deformable parts from partial views. *Computers in Industry* 64, s. 1076–1081.
- [39] Jaramillo A., Prieto F., Boulanger P. (2013): Deformable part inspection using a spring–mass system. *Computer-Aided Design* 45, s. 1128–1137.

- [40] Jaramillo A. E., Boulanger P., Prieto F. (2011): On-line 3D system for the inspection of deformable parts. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 57, s. 1053–1063.
- [41] Jaramillo, A., F. Prieto and P. Boulanger (2013): Fixtureless inspection of deformable parts using partial captures. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 14(1), s. 77-83.
- [42] Jerbić B., Šuligoj F., Švaco M., Šekoranja B. (2015): Robot Assisted 3D Point Cloud Object Registration. *Procedia Engineering* 100 847 – 852. 25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, DAAAM.
- [43] Józwiak J., **Byszewski M.** (2015): Badanie dokładności pozycjonowania osi obrotowych wieloosiowych obrabiarek CNC oraz błędów wolumetrycznych. *MECHANIK - 2015*, nr 3, s. 144-149.
- [44] Józwiak, J, **Byszewski M.**: (2015): Badanie dokładności ruchów osi wirującej wrzeczona oraz położenia środków osi obrotowych obrabiarek CNC, *MECHANIK - 2015*, nr 3, s. 150-155.
- [45] Karbacher, S., Babst, J., Häusler, G., and Laboureux, X., (1999): Visualization and Detection of Small Defects on Car-Bodies, *Modeling and Visualization '99*, Sankt Augustin, s. 1–8.
- [46] Kase K, Makinouchi A., Nakagawa T., Suzuki H., Kimura F. (2002): Shape error evaluation method of freeform surfaces. *CAD* 31, s. 495–505.
- [47] Lange n., Gndhi M. V., Thompsin B. S., Desai D. J. (1989): An experimental evaluation of the capabilities of a fluidized-bed fixturing system. *The International Journal of Avanced Manufacturing Technology*. Vol. 4, Issue 2 s. 192-206.
- [48] Lartigue C., Thiebaut F., Bourdet P., Anwer N. (2006): Dimensional metrology of flexible parts: identification of geometrical deviations from optical measurements. *Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology VII (72)*, s.196-203.
- [49] Lee S, Chang D. (2007): A laser sensor with multiple detectors for freeform surface digitization. *Int J Adv Manuf Technol* 31(11), s. 1181–1190.
- [50] Leonardo L., Zoppi M., Xiong L., Zlatanov D., Molfino R. (2013): A multi-robot-based reconfigurable fixture. *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 40 Issue: 4, s. 320-328,
- [51] Leopold, J., Günther, H., and Leopold, R., (2003): New Developments in Fast 3D-Surface Quality Control, *Measurement*, 332, s. 179–187.
- [52] Li, Y., Gu P. (2004): Free-form surface inspection techniques state of the art review. *Computer-Aided Design* 36(13), s. 1395-1417.
- [53] Li Y., Gu P. (2005): Inspection of free-form shaped parts. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 21(4-5), s. 421-430
- [54] Liao X., Wang G. (2008): Simultaneous optimization of fixture and joint positions for non-rigid sheet metal assembly. *Int J Adv Manuf Technol* 36, s. 386–394.
- [55] Liu SC, Hu SJ, Woo TC. (1996): Tolerance analysis for sheet metal assemblies. *Trans ASME, J Mech Des* 118, s. 62–67.

- [56] Liu SC, Hu SJ. (1997): Variation simulation for deformable sheet metal assemblies using finite element methods. *Trans ASME, J Manuf Sci Eng* 119, s. 368–73.
- [57] Masuda, T., and Yokoya, N., (1994): A Robust Method for Registration and Segmentation of Multiple Range Images, *Proceedings of the Second CAD-Based Vision Workshop*, Champion, PA, s. 106–113.
- [58] Merkle K, Chase K, Perry E (1996) An introduction to tolerance analysis of flexible assemblies. In: *Proceedings of the 1996 MSC world users conference*, Newport Beach.
- [59] Mounaud M, Thiébaud F, Bourdet P, Falgarone H, Chevassus N. (2010): Assembly sequence influence on geometric deviations propagation of compliant parts. *Int J Prod Res* 49, s.1021–1043
- [60] Möhring H., Wiederkehr P. (2016): Intelligent fixtures for high performance machining. *Procedia CIRP* 46, s. 383-390.
- [61] Möhring H., Wiederkehr P., Lerez Ch., Schmitz H., Goldau H., Czichy H. (2016): Sensor Integrated CFRP Structures for Intelligent Fixtures. *3rd International Conference on System-integrated Intelligence: New Challenges for Product and Production Engineering, SysInt*.
- [62] Myronenko, A., Xubo S. (2010): Point Set Registration: Coherent Point Drift. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* 32(12): s. 2262-2275.
- [63] Myronenko A., Song X., Carreira-Perpi M. A. (2006): non-rigid point set registration: Coherent Point Drift. *Advances in neural information processing systems* 19, s. 1009-1016.
- [64] Olaiz E, Zulaika J, Veiga F, et al. (2014): Adaptive fixturing system for the smart and flexible positioning of large volume workpieces in the wind-power sector. *Proc CIRP* 21, s. 183–188.
- [65] Orazi L., Tani G. (2007): Geometrical inspection of designed and acquired surfaces. *Int J Adv Manuf Technol.* 34, s. 149–155.
- [66] Papastathis T. (2011): *Modelling and design methodology for fully-active fixtures*. PhD thesis, University of Nottingham.
- [67] Papastathis T., Bakker O., Ratchev S., Popov A. (2012): Design methodology for mechatronic active fixtures with movable clamps. *Procedia CIRP* 3, s. 323-328.
- [68] Park, S. Y., and Murali, S., (2003): A Fast Point-to-Tangent Plane Technique for Multi-View Registration, *Proceedings of the Fourth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling 3DIM*, Banff, AB, Canada, s. 276–283.
- [69] Prieto F, Redarce T, Lepage R, Boulanger P. (2002): An automated inspection system. *Int J Adv Manuf Technol* 19(12), s. 917–925.
- [70] Radvar-Esfahlan H., Tahan S. A. (2012): Nonrigid geometric metrology using generalized numerical inspection fixtures. *Precision Engineering* 36, s. 1–9.
- [71] Ravishankar S., Dutt H., Gurumoorthy B. (2010): Automated inspection of aircraft parts using a modified ICP algorithm, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 46 (1–4), s. 227–236.



- [72] Sabri V., Sattarpanah S., Tahan A., Cuillière J., François V., Pham X. (2017): A robust and automated FE-based method for fixtureless dimensional metrology of non-rigid parts using an improved numerical inspection fixture. *Int J Adv Manuf Technol* 92, s.2411–2423.
- [73] Sabri V., Tahan S.A., Pham X.T., Radvar-Esfahlan H., Louhichi B., Tahvilian A.M. (2013): Fixtureless profile inspection of non-rigid parts. *CIE43 Proceedings, The University of Hong Kong*.
- [74] Sabri V., Tahan S. A., Pham X. T., Moreau D., Galibois S. (2016): Fixtureless profile inspection of non-rigid parts using the numerical inspection fixture with improved definition of displacement boundary conditions. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology– Springer London, Volume 82, Issue 5*, s. 1343-1352.
- [75] Sattarpanah Karganroudi S et al (2016): Automatic fixtureless inspection of non-rigid parts based on filtering registration points. *Int J Adv Manuf Technol* 87(1), s. 687–712.
- [76] Savio E., De Chiffre L., Schmitt R. (2007): Metrology of freeform shaped parts. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 56(2), s. 810-835.
- [77] Savio E, De Chiffre L. (2019): An artefact for traceable freeform measurements on coordinate measuring machines. *Precis Eng* 26 (1), s. 58–60.
- [78] Thiébaud F et al (2017) Evaluation of the shape deviation of non-rigid parts from optical measurements. *Int J Adv Manuf Technol* 88(5), s. 1937–1944.
- [79] Thompson B. S, Gandhi M. V., Desai D. J.: (2016) Workpiece-fixture interactions in a compacted fluidized-bed fixture under various loading conditions, *International Journal of Production*
- [80] Tohidi H., Algeddawy T.: Planning of modular fixtures in a robotic assembly system. *Proc CIRP* 41, s. 252–257.
- [81] Valéry W., Tran D. T., Raynaud S. (2012): Flexible parts measurement simulation with a CAD model obtained by a reverse engineering method. *New Technologies and Products in Machine Manufacturing Technologies*.
- [82] Vaughan D, Branson D, Bakker OJ, et al. (2015): Towards selfadaptive fixturing systems for aircraft wing assembly. *SAE technical paper* 2015-01-2493.
- [83] Walczyk D., Munro C. (2009): Modeling and Analysis of an Active Reconfigurable Fixturing Device Using a Bed of Pins Lowered on a Moving Platen, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Volume 131, Issue 2.
- [84] Wan N, Wang Z and Mo R. (2013): An intelligent fixture design method based on smart modular fixture unit. *Int J Adv Manuf Tech* 69, s. 2629–2649.
- [85] Wang H., Zhou J., Zhao T., Tao Y. (2016): Springback compensation of automotive panel based on three-dimensional scanning and reverse engineering. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 85(5), s. 1187-1193
- [86] Weckenmann A., Knauer M., Killmaier T. (2001): Uncertainty of coordinate measurements on sheetmetal parts in the automotive industry. *J Mater Process Technol* 11, s. 9–13.

- [87] Weckenmann A., Gall P., Gabbia A. (2005): 3D surface coordinate inspection of formed sheet material parts using optical measurement systems and virtual distortion compensation. 8th International Symposium LaserMetrology, Proc. of the 8th International Symposium, Merida, Mexico.
- [88] Weckenmann A., Gabbia A. (2005): Testing formed sheet metal part using fringe projection and evaluation by virtual distortion compensation. Fringe 2005, Proc. of 5th International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns.
- [89] Weckenmann A., Weickamnn J. (2006): Optical inspection of formed sheet metal parts applying fringe projection systems and virtual fixation. Metrology and Measurement Systems Vol. 13, nr 4, s. 321-334.
- [90] Weckenmann A., Weickamnn J., Petrovic N. (2007): Shortening of inspection processes by virtual reverse deformation. in Proceedings of the CIRP 4th International Conference and Exhibition on Machines and Design and Production of Dies and Molds. Cesme, Izmir, Turkey.
- [91] Woźniak A., Byszewski M., Jankowski M. (2013): Setup for triggering force testing of touch probes for CNC machine tools and CMMs. Measurement Science Review, Vol. 13, No. 1, 2013, s. 29–33; **Impact Factor: 1.162.**
- [92] Woźniak A., Byszewski M., Jankowski M. (2018): 3D characteristics of triggering force of CNC machine tool probe. XXII IMEKO World Congress, 3rd - 6th September 2018, Belfast, UK, Journal of Physics: Conference Series. 1065 42014, doi:10.1088/1742-6596/1065/14/142014.
- [93] Woźniak A., Byszewski M., Jankowski M., Krajewski G.: Spatial Characteristics of the Triggering Force of Touch Probes for CNC Machine Tools. 2nd International Conference on Virtual Machining Process Technology (VMPT 2013), May 13-17, 2013, McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada, Proceedings, pp. 260-267.
- [94] Woźniak A., Jankowski M. (2017): Variable speed compensation method of errors of probes for CNC machine tools. Precision Engineering, 49, s. 316–321.
- [95] Woźniak A., Jankowski M. (2016): Wireless communication influence on CNC machine tool probe metrological parameters. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 82, s. 535-542.
- [96] Woźniak A., Krajewski G., Byszewski M. (2019): A new method for examining the dynamic performance of coordinate measuring machines. Measurement, 134, s. 814-819; **Impact Factor: 2.218.**
- [97] Yang B., Wang Z., Yang Y., Kang Y., Li X. (2017): Optimum fixture locating layout for sheet metal part by integrating kriging with cuckoo search algorithm. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 91, s. 327–340.
- [98] Yao, A. W. L., (2005): Applications of 3D Scanning and Reverse Engineering Techniques for Quality Control of Quick Response Products, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2611–12, s. 1284–1288.

- [99] Yu JH, Chen ZT, Jiang ZP, et al. (2016): A control process for machining distortion by using an adaptive dual-sphere fixture. *Int J Adv Manuf Tech* 86 s. 3463–3470.
- [100] Yu K., Wang S., Wang Y., Yang Z (2018): A flexible fixture design method research for similar automotive body parts of different automobiles. *Advances in Mechanical Engineering* Vol. 10(2), s. 1–8.
- [101] Zhao J., Ma J., Jiang J., Zhou H. (2017): Non-Rigid point set registration with robust transformation estimation under manifold regularization. *Proceedings of the Thirty-First AAAI Conference on Artificial Intelligence*.

## 6.2. Podręczniki

- [102] Białas S., Humienny Z., Kiszka K. (2014): *Metrologia z podstawami specyfikacji geometrii wyrobów*. Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- [103] Białas S. (2006): *Metrologia techniczna z podstawami tolerowania wielkości geometrycznych dla mechaników*. Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- [104] Bucior J. (2004): *Podstawy teorii i inżynierii niezawodności*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów.
- [105] Jakubiec W., Zator S., Majda P. (2014): *Metrologia*. Polskie wydawnictwo ekonomiczne S.A. Warszawa.
- [106] Przemieniecki J. S. (1968): *Theory of matrix structural analysis*. Dover Publications, Inc. New York 1968.
- [107] Rakowski G, Kacprzyk Z. (2016): *Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji*. Oficyna wydawnicza PW.
- [108] Ratajczyk E., Woźniak A. (2016): *Współrzędnościowe systemy pomiarowe*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- [109] Śladek J. (2012): *Dokładność pomiarów współrzędnościowych*. Politechnika Krakowska, Kraków 2012.
- [110] Wrotny L. T. (1996): *Kinematyka i dynamika maszyn technologicznych i robotów przemysłowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 1996.

## 6.3. Normy

- [111] ASME-Y14.5, ASME Y14.5-(2009), in *Dimensioning and tolerancing 2009*, The American Society of Mechanical Engineers National Standard: The American Society of Mechanical Engineers, New York.
- [112] ISO-1101; ISO 1101:(2004), in *Geometrical product specifications (GPS)—geometrical tolerancing—tolerances of form, orientation, location and run-out 2004*, International Organization for Standardization (ISO).
- [113] ISO-10579; ISO 10579:(2010), in *Geometrical product specifications (GPS)—dimensioning and tolerancing—non-rigid parts 2010*, International Organization for Standardization (ISO).

- [114] ISO 10360-2: 2009 Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Badania odbiorcze i okresowe współrzędnościowych maszyn pomiarowych (CMM) – Część 2: CMM stosowane do pomiaru wymiarów liniowych.
- [115] ISO 10360-4: 2000 Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Badania odbiorcze i okresowe współrzędnościowych maszyn pomiarowych (CMM) – Część 4: CMM stosowane w trybie pomiaru skaningowego.
- [116] ISO 10360-5 :2010 Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Badania odbiorcze i okresowe współrzędnościowych maszyn pomiarowych (CMM) – Część 5: CMM z zestawami głowic pomiarowych stykowych z pojedynczym trzpieniem pomiarowym i wielotrzpieniowych.
- [117] ISO 5459 Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Tolerancje geometryczne – Bazy i układy baz.

#### 6.4. Specyfikacje techniczne i materiały producentów sprzętu pomiarowego

- [118] [www.creaform3d.com](http://www.creaform3d.com)
- [119] [www.dk-fixiersysteme.de](http://www.dk-fixiersysteme.de)
- [120] [www.faro.com](http://www.faro.com)
- [121] [www.hexagon.com](http://www.hexagon.com)
- [122] [www.kreon3d.com](http://www.kreon3d.com)
- [123] [www.laserdesign.com](http://www.laserdesign.com)
- [124] [www.matrix-innovations.com](http://www.matrix-innovations.com)
- [125] [www.nikonmetrology.com](http://www.nikonmetrology.com)
- [126] [www.renishaw.com](http://www.renishaw.com)
- [127] [www.rfixtures.com](http://www.rfixtures.com)
- [128] [www.spreitzer.de](http://www.spreitzer.de)
- [129] [www.trimos.com](http://www.trimos.com)
- [130] [www.werth.de](http://www.werth.de)
- [131] [www.wenzel-group.com](http://www.wenzel-group.com)
- [132] [www.zeiss.pl](http://www.zeiss.pl)

#### 6.5. Raporty z projektów badawczych

- [133] Raport z grantu NCBiR PBS2/B6/16/2013, pt., „Opracowanie i zastosowanie wysokiej dokładności metod pomiarowych do optymalizacji konstrukcji wag laboratoryjnych o ultrawysokiej rozdzielczości”, realizowany w latach 2013-2016.
- [134] Raport z grantu rozwojowego MNiSW nr NR01-0014-10 /2010, pt.: „Opracowanie przenośnego przyrządu do badania charakterystyk metrologicznych głowic stykowych stosowanych we współrzędnościowych maszynach pomiarowych i obrabiarkach”, realizowany w latach 2010-2013.