

Modelowanie numeryczne ugięcia podstawy robotów przemysłowych

Numerical modelling of the deflection of industrial robots' support

Streszczenie

Instalacja robota przemysłowego wymaga zapewnienia jego sztywnego zamocowania do podłoża oraz do maszyn i urządzeń stanowiska, które mają bezpośredni wpływ na realizowany proces technologiczny. W odniesieniu do stanowisk autonomicznych, np. spawalniczych, dobrą praktyką jest instalacja robota i pozycjonera na wspólnej ramie, podłodze lub podeście. W artykule przedstawiono studium modelowania numerycznego MES ramy nośnej stanowiska zrobotyzowanego, obrazujące proponowaną metodykę obliczeniową oraz podstawowe zalecenia projektowe dla tego typu konstrukcji.

Słowa kluczowe: podstawa robota, robot przemysłowy, MES, stanowisko zrobotyzowane

Abstract

The industrial robot installation requires rigid fixing of the robot to the substrate and to other machines and equipment, which have directly affect the technology processing. In relation to independent installations e.g. welding installations, a good practice is installing the robot and positioner on a joint frame, floor or platform. The article presents the study of numerical modeling (FEM) of a support frame of robotized installation, showing the calculation methodology and basic design guidelines for this type of construction.

Keywords: robot support, industrial robot, FEM, robotized installation

Wstęp

Budowa i konfiguracja zrobotyzowanego stanowiska produkcyjnego, w tym spawalniczego, wymaga nie tylko zgromadzenia odpowiednich maszyn i wyposażenia technologicznego, ale także ich prawidłowej instalacji mechanicznej, zabezpieczenia zgodnie z obowiązującymi przepisami oraz stworzenia systemu połączeń sygnałowych pomiędzy poszczególnymi urządzeniami i systemami [3, 8].

Jedną z podstawowych form organizacyjnych są stanowiska autonomiczne (rys. 1). Są to kompletne stanowiska produkcyjne wyposażone we wszystkie urządzenia technologiczne i peryferyjne, niezbędne do

realizacji określonego zadania. W odniesieniu do robotów małej i średniej wielkości tego typu stanowiska projektowane są na potrzeby prostych zadań spawalniczych: klejenia, montażu, obróbek wykańczających, a także obsługi innych maszyn, np. pras, wtryskarek itp. W skład autonomicznego stanowiska spawalniczego, oprócz robota przemysłowego (uniwersalnego, specjalnego lub specjalizowanego [3]), niezbędnego wyposażenia technologicznego i zabezpieczającego, wejść mogą także tzw. zewnętrzne osie robota: kierujące przedmiotem obrabianym (pozycjonery) oraz samym robotem, najczęściej w postaci torów jezdnych [3, 4, 7].

Z punktu widzenia instalacji mechanicznej, najważniejsze jest zapewnienie sztywnego zamocowania robota do

Dr hab. inż. Dariusz Golański, prof. nzw. PW; dr inż. Paweł Cegielski, mgr inż. Paweł Giżyński, dr hab. inż. Andrzej Kolasa, prof. nzw. PW – Politechnika Warszawska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: dgol@wip.pw.edu.pl

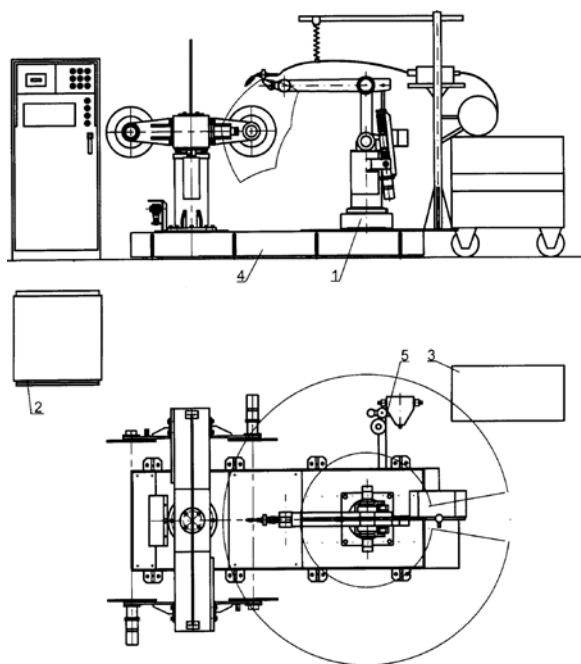
podłoża oraz tych maszyn i urządzeń stanowiska, które mają bezpośredni wpływ na proces technologiczny. Powtarzalne i dokładne pozycjonowanie ramienia robota względem np. pozycjonera i zamocowanych na nim spawanych elementów praktycznie wyklucza osobny montaż tych urządzeń. Dobrym rozwiązaniem jest ich umieszczenie na wspólnej ramie, platformie lub podeście [3].

Jak pokazuje praktyka, elementy konstrukcyjne łączące mały lub średniej nośności robot przemysłowy, np. spawalniczy, z pozycjonerem, mogą przyjmować różne formy:

- podestu, będącego jednocześnie częścią pozycjonera, np. osłoną niektórych napędów (rys. 1),
- przestrzennej ramy, np. w formie belki o przekroju prostokątnym (rys. 2),
- podłogi, będącej podstawą kompaktowego stanowiska kabinowego (rys. 3).

Poszczególne formy odznaczają się będą różną załozoną sztywnością, niekiedy wymagającą dodatkowego wzmocnienia w postaci odpowiedniego fundamentu, do którego zostaną zakotwiczone. Dodatkową funkcją tego typu konstrukcji, stanowiącą o ich funkcjonalności, jest prowadzenie i osłona kabli i przewodów zasilających i sterujących stanowiska. W przypadku kabin podłogi, znacznie większe od ram i podestów, stanowią dodatkowo bazę montażową dla pozostałych komponentów stanowiska, w tym osłon i zabezpieczeń.

Podesty i podłogi kabin spawalniczych mają najczęściej konstrukcję skrzynkową, w postaci spawanych ram stalowych pokrytych arkuszami blachy. Ich ramy



Rys. 1. Typowe, autonomiczne zrobotyzowane stanowisko spawalnicze: 1 – spawalniczy robot przemysłowy, 2 – układ sterowania robota, 3 – spawalnicze źródło zasilające, 4 – pozycjoner dwustanowiskowy zintegrowany z podestem do zamocowania robota, 5 – układ czyszczenia dyszy gazowej (ZAP Robotyka)

Fig. 1. Typical autonomous robotic welding installations: 1 – industrial welding robot, 2 – robot control system, 3 – welding power source, 4 – two-stand positioner integrated with platform for mounting the robot, 5 – gas nozzle cleaning system (ZAP Robotics)



Rys. 2. Stanowisko osadzone na przestrzennej ramie, łączącej pozycjoner wrzecionowy (poszczególne moduły napędowe) z robotem (ZAP Robotyka)

Fig. 2. The installation embedded in the spatial frame, integrating the spindle positioner (individual drive modules) with a robot

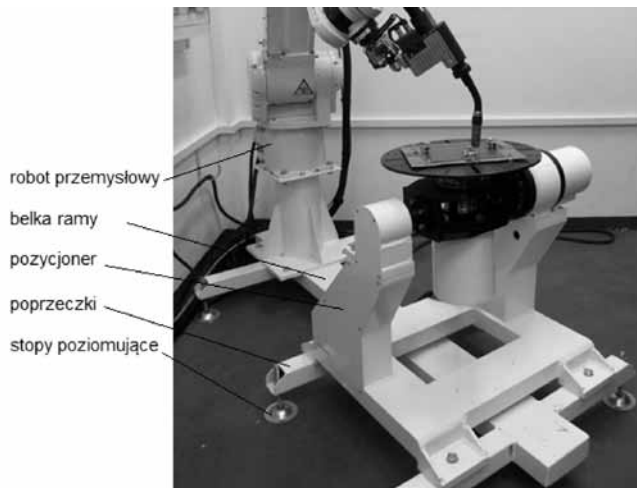


Rys. 3. Moduł podłogi (1800 x 3800 mm) wchodzącej w skład systemu kabin do instalacji i zabezpieczania robotów przemysłowych [6, 8]

Fig. 3. Module floor (1800 x 3800 mm) forming part of the system cabins for installation and protection of industrial robots [6, 8]

budowane są przede wszystkim z prefabrykowanych, stalowych ceowników (rzadziej teowników i dwuteowników) oraz rur o przekroju prostokątnym. Są zatem pochodną konstrukcji prostych ram nośnych robotów i pozycjonerów.

Na rysunku 4 pokazano ciekawe rozwiązanie ramy z ceownikiem nośnym o grzbiecie odwróconym do góry (rama długości 1900 mm, ceownik 180x70x8 mm) i przyspawanymi sześcioma poprzecznymi ramionami stabilizującymi o łącznej szerokości 1000 mm, zakończonymi regulowanymi, śrubowymi stopami poziomującymi. Ażurowa, przestrzenna konstrukcja prezentowanej ramy odznacza się niewielką masą, łatwością przenoszenia i poziomowania, np. w celach wystawienniczych i pokazowych, często realizowanych na nieprzygotowanym do tego podłożu. Takie też jest jej podstawowe zadanie, a potwierdzona eksperymentalnie mała sztywność nie stanowi przeszkody w realizacji zadań nieprodukcyjnych [2]. Z drugiej strony, prezentowana rama stanowiła wyzwanie jako obiekt modelowania i obliczeń.

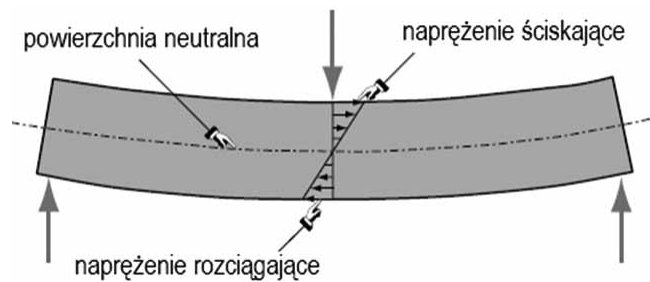


Rys. 4. Ażurowa rama nośna robota i pozycjonera stanowiska pokazowego z robotem Kawasaki FA06E i dwuosiowym pozycjonerem [2]
Fig. 4. The openwork support frame of robot and positioner in exhibitory installation of the Kawasaki FA06E robot and biaxial positioner [2]

Modelowanie ramy nośnej

Konstrukcje nośne robotów powinny mieć odpowiednią sztywność, gwarantującą minimalne odkształcenie (w tym wygięcie) wynikające z obciążenia, przede wszystkim robotem i pozycjonerem, a także siłami i momentami gnącymi wynikającymi z przyspieszenia robota w czasie ruchów ustawczych i roboczych. Możliwość określenia powstających w elementach nośnych konstrukcji podstawy wygięć, sił wzdłużnych, poprzecznych i momentów zginających na etapie ich projektowania umożliwia modelowanie za pomocą *metody elementów skończonych* (MES) [10]. Analiza taka umożliwia dobór odpowiedniego rodzaju elementów nośnych pod kątem wymiarów oraz kształtu przekroju poprzecznego dla zadanego obciążenia w postaci robota przemysłowego i pozycjonera [4+6].

W przypadku konstrukcji ramowych często stosuje się elementy typu belka, których głównym zadaniem jest przenoszenie obciążeń poprzecznych na ich podparcia (łapy mocujące, za pośrednictwem których przylegają do podłoża). Belka przenosi tylko poprzeczne obciążenia głównie przez zginanie w taki sposób, że po jednej



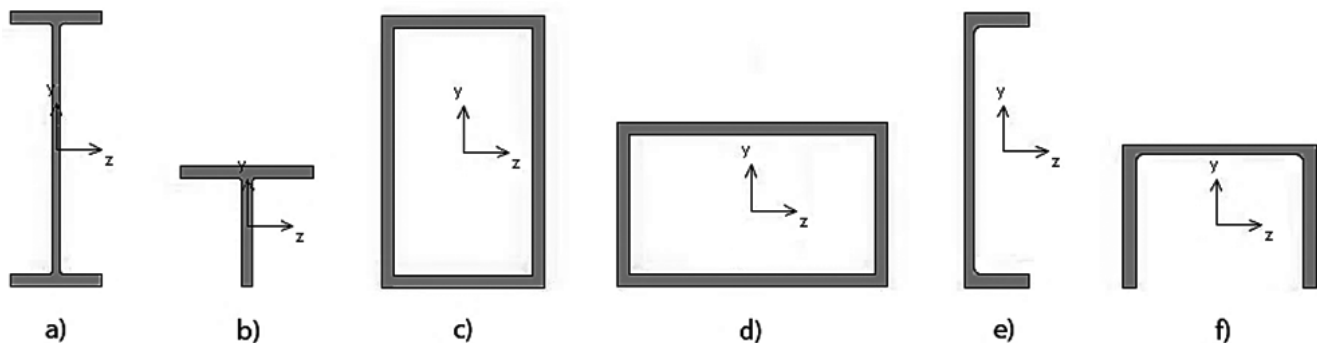
Rys. 5. Obciążenia poprzeczne belki powodujące przede wszystkim jej zginanie
Fig. 5. Beam The transverse loads of the beam resulting in its bending

stronie powstają podłużne naprężenia ściskające, a po drugiej stronie naprężenia rozciągające. Obie te strefy naprężeń oddzielone są od siebie neutralną powierzchnią o naprężeniu równym zero. Kombinacja naprężeń rozciągających oraz ściskających wytwarza wewnętrzny moment gnący, który stanowi główny mechanizm transportu obciążenia do łap mocujących (rys. 5).

Modele matematyczne jednowymiarowej belki strukturalnej konstruowane są na podstawie teorii belek. Ponieważ belki są w rzeczywistości ciałami trójwymiarowymi, to wszystkie modele muszą spełniać pewną formę aproksymacji. Najprostsze modele dla prostych, pryzmatycznych belek oparte są na teorii Bernoulliego-Eulera [1] nazywanej też klasyczną teorią belki lub teorią belki Timoszenko [11]. Modele te mogą być stosowane do sformułowania skończonych elementów w postaci belek.

Przedmiot badań

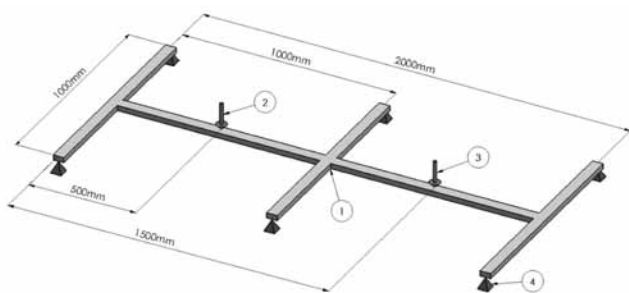
Przedmiotem badań modelowych jest rama nośna wzorowana na rzeczywistej konstrukcji przedstawionej na rysunku 4, wykonana w sześciu wariantach konstrukcyjnych (dwuteownik, teownik, rura prostokątna ułożona w pozycji pionowej i poziomej, ceownik ułożony w pozycji pionowej i poziomej – rys. 6), na której ustawiono uniwersalny robot przemysłowy i pozycjoner o powtarzalności pozycjonowania na poziomie +/- 0,1 mm. Nośność modelowanej ramy ustalono na poziomie 1800 kg.



Rys. 6. Analizowane warianty belek nośnych o przekroju: a) dwuteowym, b) teowym, c) prostokątnym w pozycji pionowej, d) prostokątnym w pozycji poziomej, e) ceowym w pozycji pionowej, f) ceowym w pozycji poziomej

Fig. 6. The analyzed variants of support beams with different cross-sections: a) I-shaped, b) T-shaped, c) upright rectangular shape, d) horizontal rectangular shape, e) upright C-shaped, f) horizontal C-shaped

Dla założonej, stałej długości belki (2000 mm), rozmieszczenia i szerokości ramion stabilizujących (1000 mm), a także jednakowych warunków obciążenia robota i pozycjonera (rys. 9), zmienne będą jedynie kształt i wymiary poprzeczne każdego z sześciu wariantów belki. Z uwagi na niemal niezliczoną liczbę rodzajów zabudowy i obciążenia podstaw kabin, wynikających między innymi z wzajemnego ustawienia robota i pozycjonera, koniecznych podstaw podwyższających robot, wariantów kinematycznych samych pozycjonerów, a także różnorodności elementów spawanych i zadań technologicznych, przyjęto rozmieszczenie maszyn przedstawione na rysunku 7.



Rys. 7. Główne wymiary wraz z rozmieszczeniem najważniejszych elementów w analizowanej ramie: 1 – belka (jeden z sześciu wariantów wg rys. 6), 2 – miejsce przyłożenia robota, 3 – miejsce przyłożenia pozycjonera, 4 – miejsce podparcia konstrukcji (sześć podpór na obu końcach każdej belki poprzecznej)

Fig. 7. The main dimensions along with the location of the most important elements in the analyzed frame: 1 – beam (one of six variants according to Fig. 6), 2 – the place of application of a robot, 3 – application of the positioner space, 4 – location of the support structure (six supports at both ends of each transverse beam)

Założenia do modelowania

Analizę numeryczną wykonano z wykorzystaniem pakietu programów LUSAS FEA w wersji 14.0, służącego do analizy zagadnień inżynierskich, bazujący na metodzie elementów skończonych. W celu opracowania modeli MES do analizy deformacji oraz sił poprzecznych i momentów gnących w analizowanej konstrukcji belki nośnej (rys. 6, 7) przygotowano wstępny model bazowy, na bazie którego można było, w kolejnych etapach badań, tworzyć modele o zmiennych wariantach, w tym w przekrojach poprzecznych.

Modele poddane zostały analizie statycznej, w której zarówno robot, jak i pozycjoner znajdują się w spoczynku. Zważywszy na względnie nieduże prędkości robocze podczas większości prac spawalniczych uznano, że na ugięcie konstrukcji w głównej mierze będzie miała wpływ masa pozycjonera, robota i przedmiotów spawanych. W przypadku ruchów ustawczych prędkości są znacznie większe, a tym samym moment bezwładności robota i pozycjonera mają większy wpływ na ugięcia struktury nośnej. Jednak aby wykonać pełną analizę dynamiczną, należałoby rozpatrzyć konkretny przypadek pracy spawalniczej, w celu określenia konkretnych ruchów robota. Zaprezentowane wyniki badań mają jednak charakter ogólny, a analiza dynamiczna, specyficzna dla konkretnych rozwiązań, została pominięta.

Model geometryczny

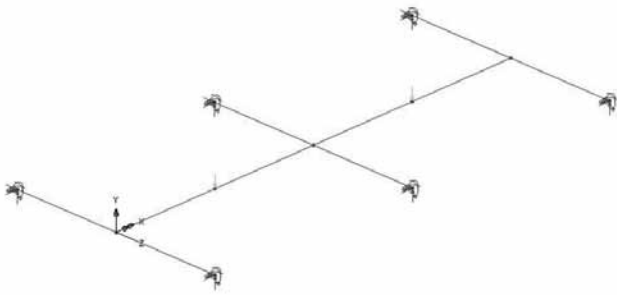
W celu opracowania modeli MES do analizy deformacji oraz sił poprzecznych i momentów gnących w analizowanej konstrukcji nośnej (rys. 6 i 7) przygotowano wstępny model bazowy, z którego można było, w kolejnych etapach badań, budować modele o zmiennych wariantach i przekrojach poprzecznych. Model geometryczny odpowiada konstrukcji belkowej przedstawionej na rysunku 7. Analizę przeprowadzono dla wybranych wymiarów belek, zebranych w tablicy I.

Tablica I. Wymiary belek do analizy sił poprzecznych i momentów gnących

Table I. The dimensions of beams used in the analysis of transverse forces and bending moments

| Belka dwuteowa | Belka teowa | Belka prostokątna pionowa | Belka prostokątna pozioma | Belka ceowa pionowa | Belka ceowa pozioma |
|---|-------------|--|---------------------------|---|---------------------|
| Wymiary: wys.×szer.×masa 1 mb. [mm×mm×kg] | | Wymiary: wys.×szer.×gr. ścianki (masa 1 mb.) [mm×mm×mm (kg)] | | Wymiary: wys.×szer.×masa 1 mb. [mm×mm×kg] | |
| 127x76x13 | 146x127x16 | 100x60x8(18) | 100x60x8(18) | 127x64x14,9 | 127x64x14,9 |
| 178x102x19 | 171x178x23 | 120x80x8(23) | 120x80x8(23) | 152x76x17,88 | 152x76x17,88 |
| 254x102x22 | 191x229x37 | 160x80x10(34) | 160x80x10(34) | 203x89x29,78 | 203x89x29,78 |
| 305x127x37 | 210x267x41 | 200x100x8(35) | 200x100x8(35) | 254x76x28,29 | 254x76x28,29 |
| 406x140x46 | 305x305x75 | 200x100x16(66) | 200x100x16(66) | 305x89x41,69 | 305x89x41,69 |
| – | – | – | 250x150x16(92) | – | 435x102x65,54 |

Głównym zadaniem elementów typu belka jest przenoszenie obciążeń poprzecznych na ich podparcia. Na rysunku 8 przedstawiono model MES będący bazą dla analizowanych konstrukcji belkowych.



Rys. 8. Model elementów skończonych z przyłożonym obciążeniem i podporami
Fig. 8. The finite element model of the support frame with the applied load and the supports

Warunki początkowe i brzegowe

Warunki początkowe opisują stan modelu w momencie rozpoczęcia analizy. W tym przypadku przyjęto, że łapy mocujące przytwierdzone zostały na stałe do podłoża (rys. 8), zatem w punktach podparcia nie występują przemieszczenia liniowe i rotacje. W odległości 500 mm od końca belki zamocowany został robot o masie 300 kg, w którego środku ciężkości przyłożono siłę poprzeczną o wartości $F_r = -2943$ N. Dalej, w odległości 1000 mm od robota, ustawiono pozycjoner, którego masa z pełnym załadunkiem wynosiła 1500 kg. W środku ciężkości pozycjonera przyłożono siłę $F_p = -14\ 715$ N. Konstrukcja obciążona została ponadto siłą ciężkości wynikającą z iloczynu masy ramy i przyspieszenia ziemskiego. Siłę ciężkości przyłożono na całej powierzchni modelu. Założono także, że belki wykonane zostały ze stali niestopowej S235 o następujących właściwościach: gęstość 7800 kg/m³, moduł sprężystości wzdłużnej Younga $E = 210\ 000$ MPa, liczba Poissona $\nu = 0,3$.

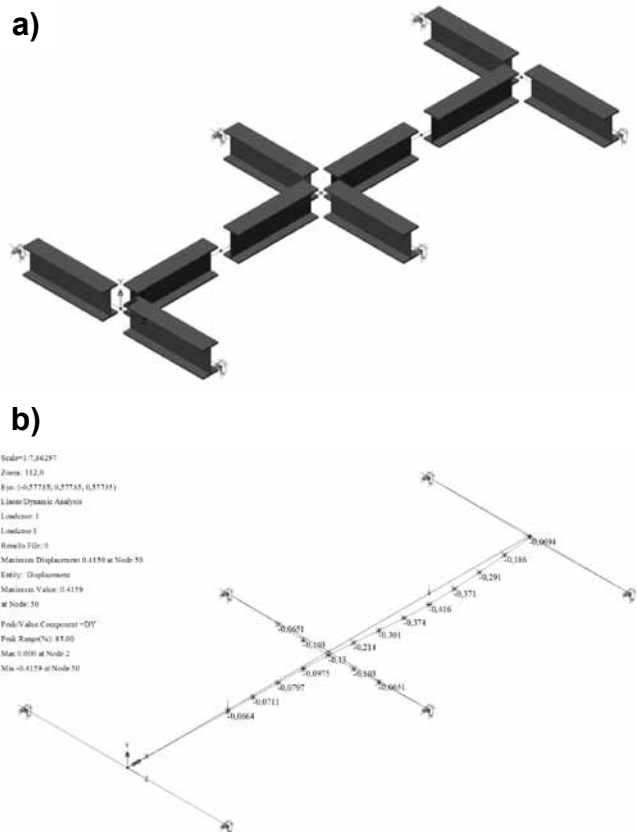
Wyniki modelowania

Zbudowano łącznie 52 modele różniące się między sobą rodzajem użytych profili. Analizie poddano zarówno ramy o budowie jednolitej (belka i ramiona stabilizujące wykonane z jednakowych profili), jak i mieszanej (wykonane z profili o różnych przekrojach). Dla każdego modelu wykonano wykres ugięć Δy , sił poprzecznych F_y oraz momentów gnących M_y i M_z . Na podstawie wykonanych wykresów określono maksymalne i minimalne wartości ugięć, siły poprzeczne F_y oraz momenty gnące M_y i M_z .

Maksymalne ugięcia konstrukcji

Ugięcie ramy można traktować jako podstawowy parametr określający podatność całej konstrukcji na wszelkiego rodzaju zwichrzenia. Przyjęto jako dopuszczalną wartość $0,1$ mm, na jaką rama mogła ulec wygięciu przy założonych warunkach początkowych. Modele, których ugięcie było większe niż $0,1$ mm, traktowano jako konstrukcje o niewystarczającej sztywności. Zakładając, że powtarzalność pozycjonowania robota i pozycjonera oraz maksymalne ugięcie ramy wynoszą $0,1$ mm, można przyjąć, że w najmniej korzystnych warunkach dokładność pozycjonowania całego stanowiska nie będzie gorsza niż $\pm 0,3$ mm.

Dobierając podstawę nośną stanowiska pod względem sztywności, należy zwrócić uwagę zarówno na wartości ugięć, jak i wymiary belek nośnych będących bazą całej ramy. Niemal w każdym z analizowanych rodzajów przekrojów belki osiągnięta została zamierzona sztywność dla danego rozmiaru belki. Wyjątkiem jest model wykonany z rur prostokątnych poziomych, w którym nawet przy największych wymiarach profilu nie uzyskano maksymalnego ugięcia zbliżonego do wartości $0,1$ mm. Przykładowe rozkłady ugięcia w konstrukcji wykonanej na bazie dwuteownika pokazano na rysunku 9.



Rys. 9. Model wykonany z belek dwuteowych o wymiarach $127 \times 76 \times 13$ mm: a) widok, b) wartości ugięcia w belkach [mm]
Fig. 9. The model made of I-shape beams with dimensions of $127 \times 76 \times 13$ mm: a) the view of the model, b) the deflection of beams [mm]

Wpływ profilu belki na ugięcia konstrukcji nośnej

Analizując otrzymane wyniki ugięć ramy, można stwierdzić, że rodzaj przekroju poprzecznego elementów konstrukcyjnych ma wpływ na wartości przemieszczeń, rozkład sił i momentów gnących w modelu. Belki o różnych profilach mają nieco inny rozkład sił F_y i momentów gnących M_y oraz M_z (rys.10). Porównując konstrukcje o ugięciu 0,1 mm można zauważyć znaczne różnice w wartościach F_y , M_y i M_z , które są wynikiem innego rozkładu sił i naprężeń w przedstawionych modelach.

Jak wiadomo, o wytrzymałości belki decyduje moment bezwładności przekroju względem osi obojętnej. Z tego też względu najbardziej odporne na ugięcia są przekroje, których większa część pola powierzchni położona jest jak najdalej od osi obojętnej. Na podstawie analizy można potwierdzić, że w warunkach zginania najlepiej sprawdzają się belki o przekroju dwuteowym, prostokątnym pionowym i ceowym pionowym.

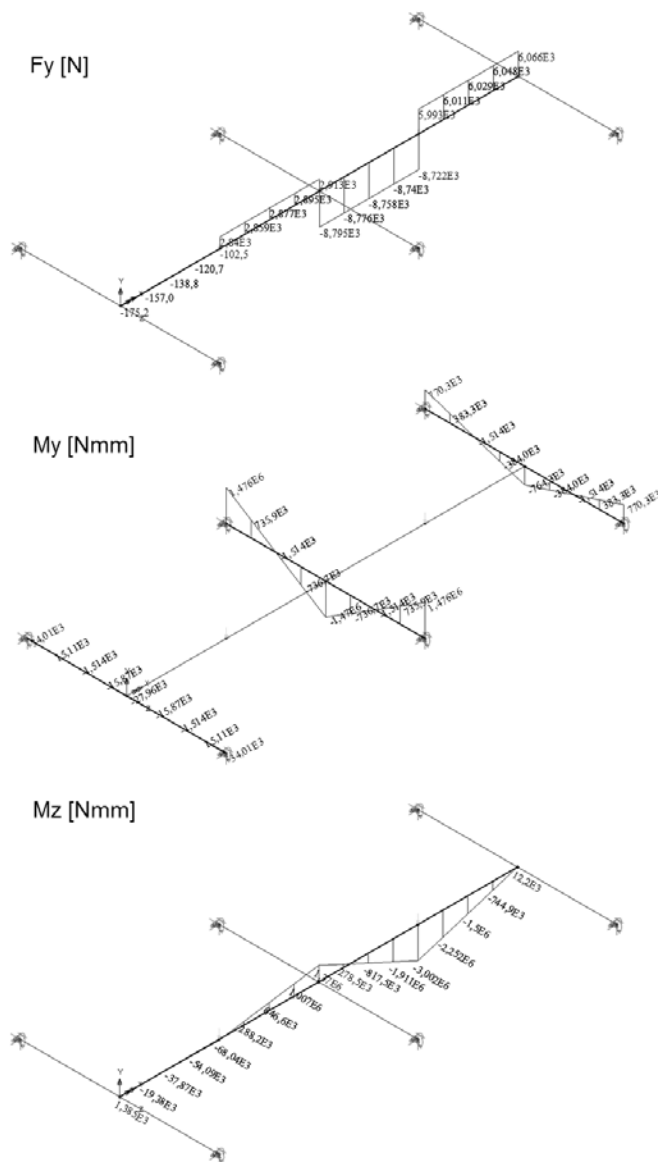
W celu weryfikacji wpływu rodzaju przekroju na wartości ugięć ramy wykonano analizę deformacji dla konstrukcji mieszanych, zbudowanych z elementów różnego typu. Wyniki zaprezentowane zostały w tabelicy II. W analizie wykorzystano przekroje, które w konstrukcjach jednolitych dawały ugięcie najbardziej zbliżone do dopuszczalnego, tj. 0,1 mm.

Wartości pogrubione dotyczą ugięcia konstrukcji jednolitych. Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że ramy o budowie mieszanej mogą dawać wyniki znacznie lepsze. Najkorzystniejsza w tym przypadku jest konstrukcja wykonana z belki głównej o profilu ceowym pionowym i belek bocznych (ramion stabilizujących) prostokątnych poziomych. Otrzymana struktura daje ugięcia rzędu 0,0888 mm. Zastępując profil ceowy przekrojem teowym bądź dwuteowym, można otrzymać równie dobre wyniki.

Tabelica II. Maksymalne ugięcia modeli wykonanych z belek o przekrojach mieszanych [mm]

Table II. The maximum deflections in models made of beams with mixed cross-sections [mm]

| Ugięcia modeli ram | | Stabilizujące belki boczne | | | | |
|--------------------|---|--------------------------------|-----------------------------|--|---|--------------------------------------|
| | | Przekrój dwuteowy (254x102x22) | Przekrój teowy (191x229x37) | Przekrój prostokątny pionowy (160x80x10) | Przekrój prostokątny poziomy (200x100x16) | Przekrój ceowy pionowy (203x89x29,8) |
| Główna belka nośna | Przekrój dwuteowy (254x102x22) | 0,0995 | 0,0972 | 0,0931 | 0,0897 | 0,098 |
| | Przekrój teowy (191x229x37) | 0,1028 | 0,1004 | 0,0941 | 0,0890 | 0,1011 |
| | Przekrój prostokątny pionowy (160x80x10) | 0,1242 | 0,1214 | 0,1064 | 0,0953 | 0,1223 |
| | Przekrój prostokątny poziomy (200x100x16) | 0,1350 | 0,1321 | 0,1140 | 0,1012 | 0,1330 |
| | Przekrój ceowy pionowy (203x89x29,78) | 0,1006 | 0,0982 | 0,0931 | 0,0888 | 0,0990 |

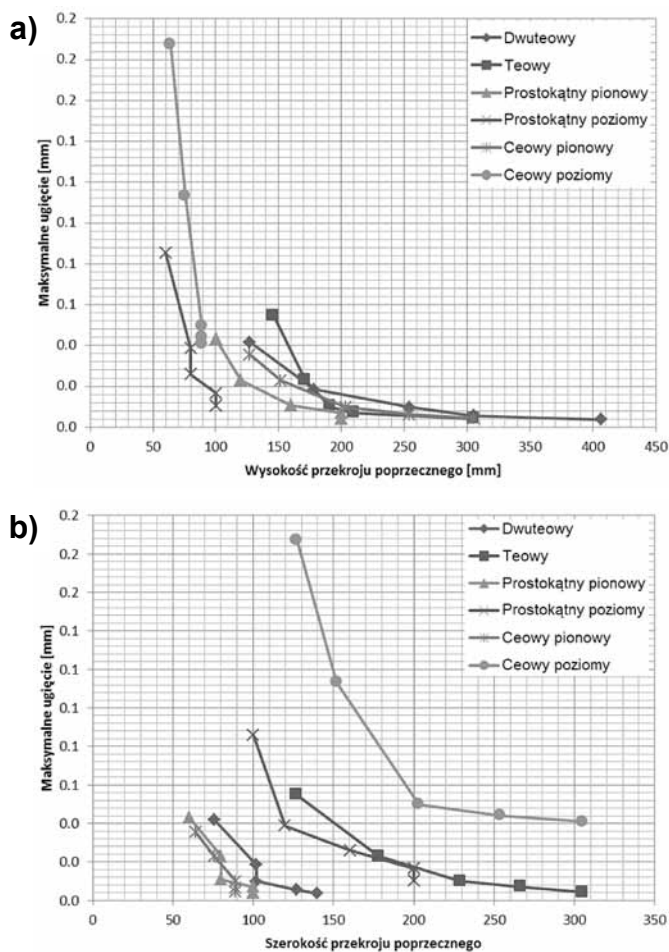


Rys. 10. Rozkład sił i momentów gnących w konstrukcji wykonanej z belki ceowej 127x64x14,9 mm

Fig. 10. The distribution of forces and bending moments in the structure made of the C-shaped beams (127x64x14,9 mm)

Wpływ wysokości, szerokości i masy belki na wartości ugięcia konstrukcji

Szerokość i wysokość profilu opisują ogólny wymiary przekroju i w dużym stopniu wpływają na wartości ugięć. Na rysunku 11 przedstawiono wykresy zmiany parametru ugięcia w funkcji wysokości i szerokości profilu. Na ich podstawie można stwierdzić, że większe znaczenie ma wysokość przekroju niż jego szerokość. Widać to na przykładzie profili prostokątnych i ceowych. Modele wykonane na ich bazie (prostokątny pionowy, poziomy i ceowy pionowy, poziomy) różnią się jedynie orientacją belki w ramie. Różnice najwyraźniej widać na przykładzie profilu ceowego pionowego i poziomego. W tym przypadku duże zmiany szerokości przy dość niewielkich zmianach wysokości dają niezadawalające rezultaty, bowiem maksymalne ugięcie osiąga wartość około 0,4 mm. Dokonując zmiany orientacji, wynik można zmienić w sposób znaczący i przy tym samym profilu otrzymać ugięcie rzędu 0,04 mm. W przypadku przekrojów prostokątnych pionowych sytuacja jest trochę mniej widoczna, gdyż stosunek wymiaru wysokości do szerokości w profilu jest mniejszy. Wysokość przekroju odgrywa większą rolę z uwagi na pionowy, działający wzdłuż osi Y kierunek działania sił obciążających w modelu.



Rys. 11. Wpływ wysokości (a) i szerokości przekroju (b) na maksymalne ugięcie konstrukcji podstawy robota dla różnych przekrojów belek

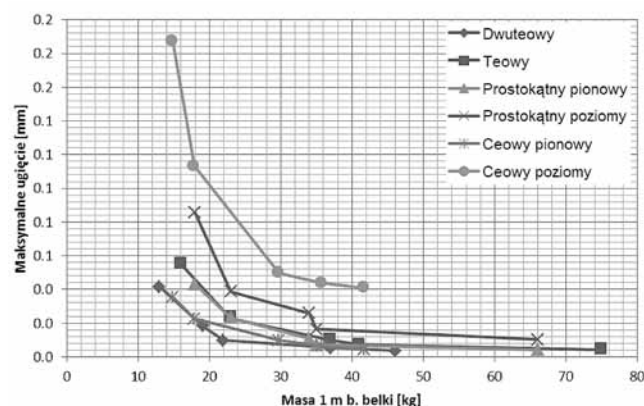
Fig. 11. The effect of the height (a) and the cross-sectional width (b) on the maximum deflection of the robot base support for different beam cross-section shapes

Dobierając elementy konstrukcyjne ramy nośnej stanowiska spawalniczego, trzeba również brać pod uwagę ich masę, a co za tym idzie – ciężar całej konstrukcji (rys. 12). Można stwierdzić, że im konstrukcja jest masywniejsza, cięższa, tym będzie bardziej odporna na zwichrzenie. Należy jednak zachować pewien kompromis pomiędzy masą całej konstrukcji a jej sztywnością, gdyż wpływa to na mobilność, a tym samym na elastyczność całego stanowiska spawalniczego.

W rozpatrywanych przypadkach przyjęto dopuszczalną wartość ugięcia na poziomie 0,1 mm, a także dokonano porównania na przykładzie modeli, których maksymalne ugięcie nie przekraczało 0,1 mm.

Analizując konstrukcje pod kątem mobilności, najlepiej wypada przekrój dwuteowy, który przy wymiarach 254x102x22 mm uzyskał ugięcie równe 0,0998 mm. Nieco lepiej pod względem ugięcia wypada przekrój ceowy pionowy (0,0990 mm), wymiary jego przekroju także są mniejsze (203x89x29,8 mm), większa jest natomiast masa 1 m.b. belki. Profil ceowy jest cięższy średnio o 7,8 kg. Wykorzystując przekrój prostokątny pionowy, można otrzymać ugięcie rzędu 0,1064 mm, przy mniejszych wymiarach (160x80x10 mm) i nieco większej masie. Na kolejnym miejscu znajduje się przekrój teowy (191x229x37 mm) o ugięciu równym 0,1004 mm. Jest on już znacznie cięższy od przekroju dwuteowego. Największą masę ma profil prostokątny poziomy (200x100x16 mm), gdzie 1 m.b. może ważyć nawet 66 kg. Profil prostokątny poziomy jest zdecydowanie najmniej korzystny z uwagi na duży ciężar.

Masa profili belkowych nie jest czynnikiem decydującym o ugięciu, gdyż zależy od rodzaju przekroju i jego wymiarów, jest jednak ściśle od nich uzależniona. Na rysunku 12 przedstawiono wykresy zmiany ugięcia w funkcji masy 1 m.b. belki. Na jego podstawie można stwierdzić, że wraz ze zwiększaniem masy profilu i tym samym całej konstrukcji maleją wartości ugięć i tym samym cała konstrukcja staje się sztywniejsza.



Rys. 12. Wpływ masy belki na maksymalne ugięcie konstrukcji dla różnych przekrojów belek

Fig. 12. The effect of the mass of the beam on the maximum structure deflection for various shapes of beams

Podsumowanie

Zbudowany model obliczeniowy konstrukcji ramy montażowej dla robota przemysłowego z pozycjonerem umożliwia określenie wygięcia belki wzdłużnej pod wpływem masy własnej konstrukcji oraz masy robota i pozycjonera. Przedstawione wyniki porównawcze dla różnych rodzajów i sposobów ułożenia belek konstrukcyjnych, różniących się kształtem i wymiarami wskazują, że za pomocą modelowania MES można określić ich wpływ na maksymalne wygięcie całego układu ramy nośnej stanowiska zrobotyzowanego.

Z uwagi na bardzo dużą ilość danych wyjściowych w badaniach skupiono się jedynie na kilku wybranych parametrach, mających wpływ na ugięcie modelowanej konstrukcji. Przy wykorzystaniu metody elementów skończonych udało się we względnie prosty sposób dokonać wielu analiz. Jak pokazały badania, modelowanie z wykorzystaniem MES bardzo dobrze sprawdza się w analizach porównawczych.

Podczas analizy w dużej mierze skupiono się na modelach, których maksymalne ugięcie oscylowało na poziomie 0,1 mm, porównywalnym z powtarzalnością pozycjonowania typowych robotów spawalniczych i pozycjonerów. Konstrukcje o ugięciu mniejszym bądź równym 0,1 mm uznano za poprawne, niewpływające w sposób istotny na dokładność pozycjonowania w procesie spawania zrobotyzowanego.

Podsumowując, na podstawie przeprowadzonych badań i analiz można wyciągnąć następujące wnioski:

- największe ugięcia belek występują w miejscu przyłożenia siły obciążającej F_p (miejsce ustawienia pozycjonera);
- wysokość profilu belek ramy nośnej ma większy wpływ na sztywność konstrukcji niż jego szerokość;
- konstrukcje o budowie mieszanej, przy odpowiedniej kombinacji pary belka wzdłużna – belka poprzeczna (ramiona stabilizujące), mogą być sztywniejsze od struktur jednorodnych;
- elementy konstrukcyjne typu belka o większej masie własnej są bardziej odporne na zwichrzenia;
- najmniejsze ugięcia belek wzdłużnych i poprzecznych występują dla przekrojów: dwuteowych, ceowych pionowych, prostokątnych pionowych oraz teowych;
- największe siły F_y oraz momenty M_y występują w belkach o przekroju ceowym poziomym;
- największe momenty M_z występują w belkach o przekroju teowym oraz ceowym pionowym.

Zaprezentowane modele przeanalizowano pod kątem obciążeń statycznych. Dalsze badania powinny uwzględniać występowanie obciążeń dynamicznych, wynikających z ruchów roboczych i ustawczych robota spawalniczego. Ponadto, w kolejnych badaniach należy uwzględnić występowanie nieidealnych połączeń pomiędzy belką wzdłużną a belkami poprzecznymi, co także może mieć wpływ na sztywność ramy.

Literatura

- [1] Beer F.P., Johnston E.R. Jr.: Mechanics of Materials McGraw-Hill, New York, 1981.
- [2] Cegielski P.: Robot Kawasaki w Zakładzie Inżynierii Spawania Politechniki Warszawskiej. Astor. Biuletyn Automatyki 2/2011, s. 10-11.
- [3] Cegielski P.: Robotyzacja. In: Technika spawalnicza w praktyce. Poradnik inżyniera konstruktora i technologa. Red. K. Ferenc. Warszawa, Verlag 2012.
- [4] Cegielski P., Golański D., Kolasa A., Sarnowski T.: Nowe konstrukcje i metody projektowania zewnętrznych osi robotów przemysłowych. Problemy Robotyki T. 1. Prace Naukowe. Elektronika. Z.175. OW Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2010, s. 263-274.
- [5] Cegielski P., Golański D., Kolasa A., Sarnowski T.: Nowe konstrukcje i metody projektowania zewnętrznych osi do lokomocji robotów przemysłowych. PAR 7-8/2013, s. 90-95.
- [6] Cegielski P., Kolasa A., Golański D., Sarnowski T., Oneksiak A.: Innowacyjne rozwiązania konstrukcyjne w przemysłowych urządzeniach do automatyzacji procesów spawalniczych. Przegląd Spawalnictwa 1/2013, s. 30-35.
- [7] Cegielski P., Kolasa A., Sarnowski T.: Pozycjonery i tory jezdne – nowe rozwiązania zewnętrznych osi robotów przemysłowych. Problemy Robotyki T. 1. Prace Naukowe. Elektronika. Z.166. OW Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2008, s. 357-366.
- [8] Cegielski P., Kolasa A., Sarnowski T., Oneksiak A.: Wdrożenia przemysłowe projektów badawczo-rozwojowych w zakresie mechanizacji i automatyzacji procesów spawalniczych. Przegląd Spawalnictwa 6/2011, s. 53–59.
- [9] LUSAS Modeller User Manual v.14.0. FEA Ltd. UK.
- [10] Cook R.D.: Finite element modelling for stress analysis. John Wiley, 1995.
- [11] Timoshenko S.P. and Goodier J.N.: Theory of Elasticity. Second Edition, McGraw-Hill, New York, 1951.