

## ZBIÓR DOPUSZCZALNYCH PLANÓW MONTAŻU WIELKOWYMIAROWYCH KONSTRUKCJI OCEANOTECHNICZNYCH

### 1. Wstęp

Wielkowymiarowe konstrukcje oceanotechniczne (konstrukcje WO) należą do grupy stalowych konstrukcji powłokowych usztywnionych. Powłoki tworzone są przez płyty stalowe o grubościach 4-30 mm. Pełnią one funkcję rozdzielającą środowisko pracy człowieka od otaczającej wody, zapasów, ładunku. Powłoki, wraz z usztywnieniami, pełnią też funkcje wytrzymałościowe i stanowią o bezpieczeństwie konstrukcji WO. Usztywnienia są kształtownikami walcowanymi na gorąco, poddanymi obróbce lub prefabrykowanymi ramami, najczęściej o przekroju T.

Budowa konstrukcji WO realizowana jest w kilku etapach – od wytwarzania detali do łączenia ich w coraz większe zespoły technologiczne [3, 9]. Detale wycinane są z blach i kształtowników i łączone spoinami spawalniczymi. Ostatecznie konstrukcje WO mogą składać się z wielu tysięcy detali a procesy spawania zajmują około 40% czasu produkcji konstrukcji WO [1].

Wyprodukowana konstrukcja może być wyrobem gotowym do eksploatacji lub prefabrykatem, przeznaczonym do kolejnego etapu montażu.

Planowanie montażu konstrukcji WO jest zagadnieniem bardzo złożonym, obejmującym dobór technologii dla tysięcy operacji, zabezpieczenie zasobów do ich realizacji oraz harmonogramowanie. Dla procesów spawalniczych kluczowe są tu: kolejność wykonywania połączeń konstrukcji, dobór technologii spawania do każdego połączenia oraz wybór pozycji montażowej w jakiej operacje łączenia mają być realizowane (rys. 1).

Systemy komputerowego wspomaganie planowania montażu konstrukcji WO, proponowane w literaturze, bazują na systemach CBR – *Case Based Reasoning* (analiza przypadku) [4, 5, 11]. Systemy te znajdują coraz szersze zastosowanie we wspomaganie procesów projektowania i zarządzania produkcją [2, 3, 8, 10], wymagają jednak stosowania narzędzi weryfikujących generowane rozwiązania [7].



Rys. 1. Po lewej: przykładowe konstrukcje WO (sekcje kadłuba statku); po prawej: detale przygotowane do montażu

W artykule zaproponowano sposób numerycznego kodowania topologicznej struktury konstrukcji WO, koncepcję matematycznego modelu planu montażu oraz zbór warunków ograniczających przestrzeń planów dopuszczalnych.

Proponowane kodowanie odbywa się za pomocą macierzy połączeń między detalami oraz macierzy zależności pozycji spawalniczych od pozycji montażowych. Kodowanie macierzowe oparto na popularnej w literaturze koncepcji grafu połączeń [4, 5, 11].

Opisany matematycznie zbiór dopuszczalnych planów montażu zawiera między innymi rozwiązania nigdy wcześniej nie realizowane w praktyce, wykraczające poza możliwości wnioskowania systemów CBR. Pozwala on na sformułowanie obiektywnego kryterium, które oceni jakość różnorodnych rozwiązań, w tym również niespotykanych dotychczas, które nie są brane pod uwagę przez metody heurystyczne.

Podobnie jak w pozycji [4] wprowadzono klasyfikację typów połączeń między detalami, jednak rozszerzono zbiór typów do dwunastu, kierując się wskazaniem normy [6].

### 2. Konstrukcja jako uporządkowany zbiór detali i macierz połączeń

Dowolną wielkowymiarową konstrukcję oceanotechniczną  $\delta$  można scharakteryzować za pomocą zbioru tworzących ją detali:

$$D = \{\delta_1, \dots, \delta_n\}. \quad (1)$$

W zbiorze  $D$  rozważamy oddzielnie również detale identyczne pod względem materiału i geometrii (grubość, linia cięcia, ukosowanie krawędzi, linie i kąty gięcia). Zbiór  $D$  jest uporządkowany, czyli każdemu detalowi przypisuje unikalny numer ułatwiający identyfikację. Między każdą parą detali może wystąpić połączenie jedno- lub dwustronne oraz brak połączenia. Połączenie między detalami  $\delta_p$ ,  $\delta_j$  oznacza się

uporządkowaną parą indeksów:  $(i, j)$ . Występowanie połączeń w konstrukcji  $\sigma$  można zapisać w formie binarnej macierzy połączeń:

$$C = (c_{ij}) \in M(n \times n; \{0,1\}), \quad (2)$$

która spełnia następujące warunki:

- detal nie może być połączony sam ze sobą:  $\forall i = j: c_{ij} = 0$ ,
- jeśli połączenie  $(i, j)$  jest jednostronne:  $c_{ij} + c_{ji} = 1$ ,
- jeśli połączenie  $(i, j)$  jest dwustronne:  $c_{ij} + c_{ji} = 2$ ,
- jeśli połączenie  $(i, j)$  nie istnieje:  $c_{ij} + c_{ji} = 0$ .

Formalnie nie ma znaczenia, czy połączenie jednostronne zostanie zaznaczone powyżej, czy poniżej przekątnej macierzy  $C$ . Przyjęto konwencję zapisu nad przekątną.

### 3. Pozycje montażowe i spawalnicze

Ze względu na złożoność geometryczną konstrukcji WO i utrudnioną dostępność, wiele połączeń nie może być wykonanych wysokowydajnymi metodami automatycznymi (stanowiska portalowe, roboty spawalnicze), lecz wymaga zaangażowania człowieka. Spawanie półautomatyczne MIG, MAG, lub TIG wykonywane jest często w trudnych warunkach ergonomicznych, w pozycjach wymuszonych [6]. Jedną z operacji wspomagających procesy spawalnicze, jest obracanie konstrukcji dla uzyskania dogodniejszych pozycji spawania ręcznego lub dla umożliwienia zastosowania metod automatycznych, szczególnie na stanowiskach portalowych, które realizują jedynie spawanie w pozycji PA lub PB (oznaczenia według [6]). Pozycję montażową można precyzyjnie określić związuąc z dowolną konstrukcją wyjściową  $\sigma$  lokalny trójwymiarowy układ współrzędnych kartezjańskich (LUW) i podając położenie jego początku oraz kierunki osi w wybranym układzie globalnym, związanym na przykład z halą montażową. Dla procesu spawania nie jest istotne położenie początku LUW ani rotacja konstrukcji wokół pionu. Pozycja spawalnicza uzależniona jest jedynie od wzajemnej relacji wektora pionu i LUW.

W praktyce budowy konstrukcji WO dowolność pozycji montażowej jest znacznie ograniczona głównie z dwóch powodów:

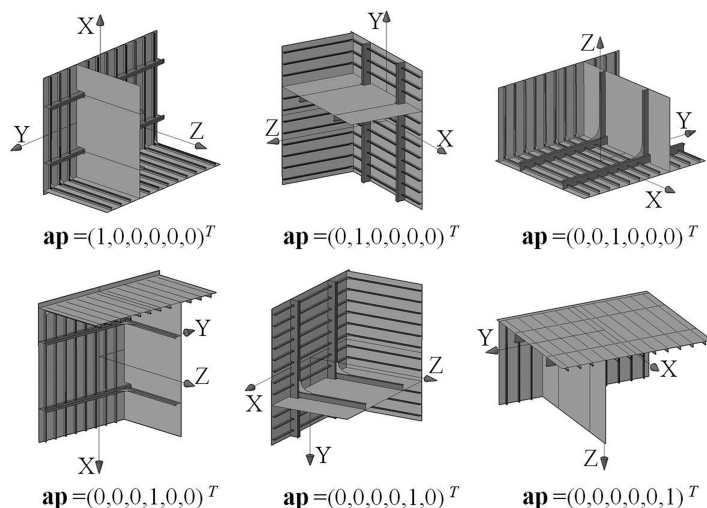
- ustawienie konstrukcji jest łatwiejsze w pozycjach, w których nie są wymagane dodatkowe podpory i usztywnienia technologiczne,
- wiele połączeń w konstrukcjach jest prostopadłych do siebie, co sprawia, że tylko wybrane pozycje montażowe mają uzasadnienie technologiczne.

Uwzględniając powyższe przesłanki przyjmuje się założenie upraszczające, że konstrukcja, podczas spawania jej połączeń, może być ustawiona w jednej z sześciu pozycji, mianowicie, skierowaną do góry dodatnią lub ujemną częścią jednej z trzech osi. Są to tak zwane pozycje główne. Pozycje takich jest sześć. Zbiór dopuszczalnych pozycji montażowych definiuje się następująco:

$$AP = \left\{ x \in M(6 \times 1, \{0,1\}) \mid \sum_{i=1}^6 x_i = 1 \right\}. \quad (3)$$

Pozycję montażową konstrukcji  $\sigma$  oznacza się wektorem  $\mathbf{ap} = (ap_i) \in AP$ , którego wartości są jednoznacznie przypisane pozycjom spawalniczym, jak na rysunku 2.

Ważne jest, aby LUW konstrukcji został zorientowany zgodnie z głównymi kierunkami połączeń spawanych oraz przy uwzględnieniu naturalnych płaszczyzn, które mogą stanowić podstawę konstrukcji podczas montażu.



Rys. 2. Główne pozycje montażowe konstrukcji

Znając pozycję montażową konstrukcji, można określić pozycje spawalnicze, w jakich wykonywane będą połączenia. W rozważanych konstrukcjach oceanotechnicznych występują złącza spawane doczołowe (głównie spoiny czołowe) i teowe (głównie spoiny pachwinowe).

Norma ISO 6947:2011 [6] wyróżnia 12 głównych pozycji spawalniczych dla spoin czołowych i pachwinowych występujących w wielkowymiarowych konstrukcjach oceanotechnicznych (rys. 3). Rodzaj pozycji, w jakiej wykonywane jest połączenie  $(i, j)$  w konstrukcji  $\sigma$ , oznaczmy wektorem  $\mathbf{wp}^{ij} = (wp_k^{ij}) \in M(1 \times 12, \{0,1\})$ .

Rysunek 3. przedstawia listę rozważanych pozycji spawalniczych i przypisane im wartości wektora  $\mathbf{wp}^{ij}$ , dla dowolnego połączenia  $(i, j)$ . Zakłada się, że zerowy wektor pozycji spawalniczej odpowiada połączeniu nieistniejącemu.

Dla konstrukcji  $\sigma$  określa się macierz relacji między jej pozycją montażową  $\mathbf{ap}$  a pozycją spawalniczą każdego z jej połączeń  $\mathbf{wp}^{ij}$ :

$$\mathbf{AW}^{i,j} = (aw_{k,l}^{i,j}) \in M(12 \times 6, \{0,1\}), \quad (4)$$

która określa, czy połączenie  $(i, j)$  w konstrukcji  $\sigma$  dla  $l$ -tej pozycji montażowej przyjmuje  $k$ -tą pozycję spawalniczą ( $aw_{k,l}^{i,j} = 1$ ), czy nie ( $aw_{k,l}^{i,j} = 0$ ). Dla połączeń nieistniejących przyjmuje się zerową macierz relacji między pozycją montażową i pozycją spawalniczą:  $\mathbf{AW}^{i,j} = \mathbf{0}_{12 \times 6}$ . Macierze  $\mathbf{AW}^{i,j}$  są operatorami liniowymi spełniającymi zależność:

$$\forall i, j = 1, \dots, n: \mathbf{wp}^{ij} = \mathbf{AW}^{i,j} \cdot \mathbf{ap}. \quad (5)$$

spoiny czołowe:		
pozycja spawalnicza:		wektor pozycji $\mathbf{wp}^{\sigma_0,i,j}$ :
1. PA		$(1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)^T$
2. PC		$(0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)^T$
3. PF		$(0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0)^T$
4. PG		$(0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0)^T$
5. PE		$(0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0)^T$
spoiny pachwinowe:		
6. PA		$(0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0)^T$
7. PB		$(0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0)^T$
8. PC		$(0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0)^T$
9. PD		$(0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0)^T$
10. PF		$(0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0)^T$
11. PG		$(0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0)^T$
12. PE		$(0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1)^T$
13. brak połączenia między $\delta_i$ a $\delta_j$		$(0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)^T$

Rys. 3. Wartości wektora pozycji spawalniczych (oznaczenia wg [6])

#### 4. Podział prefabrykacyjny i przestrzeń montażowa

Dana niech będzie konstrukcja  $\sigma$  scharakteryzowana macierzą połączeń  $\mathbf{C}$  w zbiorze detali  $D$ .

Definicja 1:

Przestrzenią prefabrykacyjną konstrukcji  $\sigma$  nazywamy zbiór konstrukcji  $S = \{\sigma_1, \dots, \sigma_m\}$  o zbiorach detali spełniających warunki:

$$\forall k = 1, \dots, m: D_k \subset D \quad (6)$$

i macierzach połączeń:

$$\mathbf{C}^k = (c_{ij}^k) \in M(n \times n; \{0,1\}) \quad (7)$$

takich, że:

$$\forall k = 1, \dots, m; \forall i, j = 1, \dots, n: c_{ij}^k \leq c_{ij} \quad (8)$$

Konstrukcje należące do przestrzeni prefabrykacyjnej  $S$  są rozważane jako potencjalne prefabrykaty konstrukcji  $\sigma$ .

Definicja 2:

Podziałem prefabrykacyjnym konstrukcji  $\sigma$  dla przestrzeni prefabrykacyjnej  $S$  nazywamy ciąg binarny  $\mathbf{p} = (p_k) \in M(n \times 1; \{0,1\})$  taki, że:

$$\forall i, j = 1, \dots, n: \sum_{k=1}^m (p_k \cdot c_{i,j}^k) \leq c_{i,j} \quad (9)$$

Ciąg  $\mathbf{p}$  określa, czy  $k$ -ta konstrukcja przestrzeni prefabrykacyjnej została wybrana jako prefabrykat ( $p_k = 1$ ), czy nie ( $p_k = 0$ ).

Definicja 3:

Przestrzenią montażową konstrukcji  $\sigma$  dla przestrzeni prefabrykacyjnej  $S$  i podziału prefabrykacyjnego  $\mathbf{p}$  nazywamy zbiór macierzy połączeń:

$$\mathbf{C}^{\mathbf{p}} = \left\{ \mathbf{C}^{\mathbf{p}} = (c_{ij}^{\mathbf{p}}) \in M(n \times n, \{0,1\}) \mid \forall i, j = 1, \dots, n: c_{ij}^{\mathbf{p}} \leq c_{ij} - \sum_{k=1}^m (p_k \cdot c_{i,j}^k) \right\} \quad (10)$$

Liczba połączeń, które należy wykonać podczas montażu (tzw. połączeń montażowych):

$$b = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left( c_{i,j} - \sum_{k=1}^m (p_k \cdot c_{i,j}^k) \right) \quad (11)$$

Moc przestrzeni montażowej wyraża się liczbą  $b$ -elementowych wariacji zbioru  $\{0,1\}$  z powtórzeniami:

$$|\mathbf{C}^{\mathbf{p}}| = 2^b \quad (12)$$

### 5. Technologie spawalnicze i zakres ich stosowania

Przedsiębiorstwo produkujące konstrukcję wyjściową  $\sigma$ , na etapie planowania montażu, dysponuje informacjami o stosowanych metodach spawania, kwalifikacjach pracowników oraz stosowanych urządzeniach i materiałach spawalniczych. Potencjalnie dostępnych metod może być wiele. Plan montażu musi określać technologię spawania, jaka zostanie użyta do wykonania każdego połączenia.

Niech różnych wykorzystywanych technologii spawania będzie  $H$ , a każda z nich będzie oznaczona  $\omega_h, h = 1, \dots, H$ . Zbiór dostępnych technologii oznaczmy:  $W = \{\omega_1, \dots, \omega_H\}$ . Podkreślić należy, że technologię spawania definiuje się niezależnie od pozycji spawalniczej. Natomiast istotne jest, w jakich pozycjach dana technologia jest możliwa do zastosowania. Zakres stosowania każdej technologii  $\omega_h$  określa się za pomocą wektora  $r^h = (r^h_j) \in M(1 \times 12; \{0, 1\})$  takiego, że:

- $r^h_j = 1$ , jeśli pozycja spawalnicza  $(0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)$  jest możliwa do zrealizowania metodą  $\omega_h$ ,
- $r^h_j = 0$  w przeciwnym przypadku.

Przykładowo, dla stanowisk portalowych, służących do doczołowego spawania płatów i spawania pachwinowego usztywnień do płatów możliwe do wykonania są jedynie spoiny w pozycjach podolnych (PA) i nabocznych (PB). Jeśli technologia  $\omega_h$  wykorzystuje tego typu oprzyrządowanie, to

zakres jej stosowania jest wektorem:  $r^h = (1, 0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)$ . W praktyce występują również stanowiska realizujące jedynie spawanie doczołowe lub spawanie pachwinowe w pozycji podolnej.

Ograniczenia wybranych technologii mogą wynikać z zakresu uprawnień i doświadczenia spawacza.

### 6. Dopuszczalny plan montażu

W celu zapewnienia możliwie najkorzystniejszych pozycji spawalniczych stosuje się zmiany pozycji montażowych konstrukcji podczas wykonywania połączeń.

Montaż odbywa się w kolejnych etapach. Podczas każdego etapu wykonywana jest część połączeń konstrukcji w ustalonej pozycji spawalniczej  $ap$ , z wykorzystaniem jednej z dostępnych technologii spawalniczych  $\omega_h$ .

Jeśli liczba etapów montażu wynosi  $q$ , to plan montażu przedstawia się jako macierz  $A$  złożoną z  $q$  kolumn:

$$\forall s = 1, \dots, q: \mathbf{A}^{(s)} = \begin{pmatrix} a_{1,s} \\ a_{2,s} \\ a_{3,s} \end{pmatrix}; a_{1,s} \in C^p, a_{2,s} \in W, a_{3,s} \in AP, \quad (13)$$

gdzie każda  $s$ -ta kolumna reprezentuje oddzielny etap.

Plany montażu mogą się różnić zbiorem etapów, jak i ich kolejnością. Ze wzoru na liczbę wariacji  $q$ -elementowych z powtórzeniami otrzymujemy wprost liczbę różnych planów montażu (por. równania , ):

$$\alpha^0 = (|C^p| \cdot H \cdot 6)^q = 2^{6q} \cdot H^q \cdot 6^q, \quad (14)$$

gdzie iloczyn  $2^6 \cdot H \cdot 6$  jest liczbą różnych etapów, jakie w planie montażu mogą wystąpić.

Pierwszym ograniczeniem, jakie proponuje się nałożyć na plany montażu, jest warunek kompletności planu:

$$\sum_{s=1}^q a_{1,s} = C - \sum_{k=1}^m (p_k \cdot C^k). \quad (15)$$

Warunek ten sprawdza czy wszystkie połączenia między prefabrykatami konstrukcji  $\sigma$  zostaną wykonane podczas montażu. Brane są tu pod uwagę wszystkie etapy, bez względu na ich kolejność. Inaczej mówiąc macierz połączeń montażowych musi zostać rozłożona na  $q$ -elementową sumę macierzy binarnych. Rozkład taki możemy rozumieć jako przypisanie numeru jednego z etapów  $(1, \dots, q)$  każdemu połączeniu montażowemu. Ponieważ takich połączeń jest  $b$  (por. równanie (11)), więc liczba możliwości jest równa liczbie  $b$ -elementowych wariacji zbioru  $q$ -elementowego z powtórzeniami:

$$\alpha^1 = q^b. \quad (16)$$

Plan montażu zawiera więc w pierwszym wierszu jeden z  $\alpha^1$  dopuszczalnych ciągów macierzy połączeń.

Drugi wiersz macierzy  $\mathbf{A}$  stanowi  $q$ -elementowy ciąg elementów zbioru  $W$ . Każdy taki ciąg stanowi wariację  $q$ -elementową zbioru  $H$ -elementowego. Liczba wariantów dana jest tu wzorem:

$$\alpha^2 = H^q. \quad (17)$$

Trzeci wiersz planu montażu jest  $q$ -elementowym ciągiem elementów zbioru  $AP$ . Liczbę różnych ciągów pozycji montażowych wyznacza się według wzoru:

$$\alpha^3 = 6^q. \quad (18)$$

Ostatecznie otrzymuje się liczbę dopuszczalnych planów montażu, spełniających warunek kompletności:

$$\alpha^4 = \alpha^1 \cdot \alpha^2 \cdot \alpha^3 = q^b \cdot H^q \cdot 6^q. \quad (19)$$

Porównując liczby wariantów  $\alpha^0$  i  $\alpha^4$  zauważyć można, że wskaźnik ograniczenia dla warunku kompletności planu wyraża się wzorem:

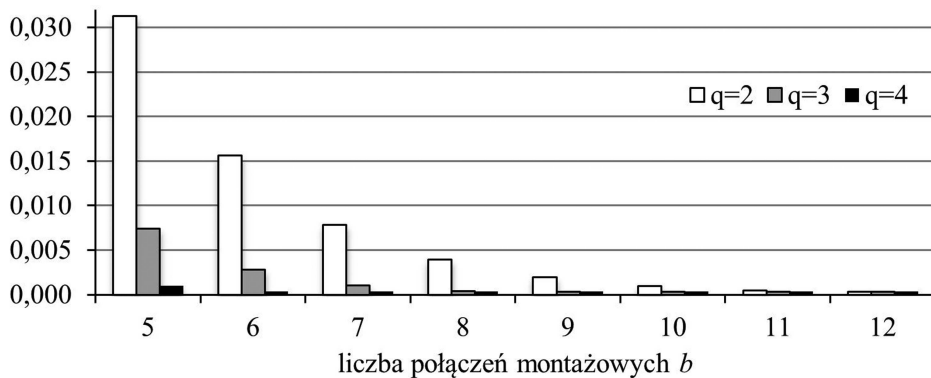
$$\frac{\alpha^4}{\alpha^0} = \frac{q^b}{2^{6q}} = \left(\frac{q}{2^6}\right)^b. \quad (20)$$

Rysunek 4. przedstawia wartości współczynnika (20) dla wybranych wartości pary  $(b, q)$ . Można zauważyć silne ograniczanie zbioru dopuszczalnych planów montażu wraz ze wzrostem zarówno liczby połączeń montażowych, jak i liczby etapów.

Jak wspomniano, liczba różnych etapów, jakie można wygenerować w planie montażu wynosi  $2^6 \cdot H \cdot 6$ . W liczbie tej zawiera się jednak wiele etapów niemożliwych do realizacji, jeśli w zbiorze technologii spawalniczych  $W$  znajduje się przynajmniej jedna technologia  $\omega_h$  o ograniczonym zakresie stosowania, tzn. taka że:  $r^h_1 + \dots + r^h_{12} < 12$ . Wprowadza się więc warunek wykonalności etapów:

$$\forall s = 1, \dots, q, \forall i, j = 1, \dots, n: \mathbf{r}^{a_{2,s}} \cdot \mathbf{A} \mathbf{W}^{i,j} \cdot a_{3,s} \cdot (a_{1,s})_{i,j} = \|\mathbf{A} \mathbf{W}^{i,j} \cdot a_{3,s}\|_1 \cdot (a_{1,s})_{i,j}, \quad (21)$$

gdzie  $\|\cdot\|_1$  oznacza normę taksówkową wektora  $\circ$ .



Rys. 4. Współczynnik  $\alpha^p / \alpha^l$  dla wybranych liczb połączeń montażowych oraz etapów planu montażu

Liczba dopuszczalnych planów montażu spełniających warunki zależy od wielu parametrów i jej wartość może być wyznaczona w przybliżeniu dla konkretnej konstrukcji oraz ustalonego zbioru technologii. Zostanie to pokazane w dalszej części artykułu, w przykładzie obliczeniowym 2. W praktyce może być istotne wprowadzenie dodatkowych ograniczeń do planu montażu. Jednym z nich jest kolejność wykonywania połączeń. Ze względu na stabilność konstrukcji oraz dostępność połączeń dla automatów spawalniczych, niektóre połączenia powinny być wykonane na etapach wcześniejszych niż inne. Warunek, aby połączenie  $(i,j)$  było wykonane przed połączeniem  $(u,v)$  można wyrazić następująco:

$$\exists K \in \{1, \dots, q\} : \sum_{s=1}^K (a_{1,s})_{i,j} > \sum_{s=1}^K (a_{1,s})_{u,v}. \quad (22)$$

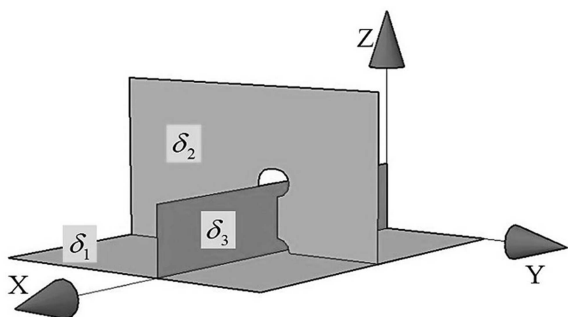
Żądanie równoczesnego wykonania połączeń  $(i,j)$  oraz  $(u,v)$  przyjmuje postać:

$$\forall s = 1, \dots, q : (a_{1,s})_{i,j} = (a_{1,s})_{u,v}. \quad (23)$$

**Przykład 1**

Niech konstrukcja  $\sigma$  przedstawia się jak na rysunku 5. Składa się ona z trzech detali. Konstrukcja  $\sigma$  ma ustalony układ współrzędnych, zawiera jedynie spoiny jednostronne, a jej macierz połączeń wygląda następująco:

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ & 0 & 1 \\ & & 0 \end{pmatrix}. \quad (24)$$



Rys. 5. Konstrukcja  $\sigma$  w pozycji montażowej  $ap = (0,0,1,0,0,0)^T$

Zależność pozycji spawalniczych połączeń od pozycji montażowych dla konstrukcji wyraża się trzema macierzami (tyle jest wszystkich połączeń):

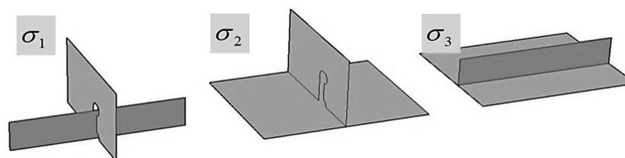
$$\mathbf{AW}^{1,2} = \begin{matrix} 7 \\ 9 \\ 10 \end{matrix} \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & 1 & 1 \\ & & & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{AW}^{1,3} = \begin{matrix} 7 \\ 9 \\ 10 \end{matrix} \begin{pmatrix} & 1 & 1 & & \\ & & & 1 & 1 \\ & & & & 1 \\ 1 & & & & 1 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{AW}^{2,3} = \begin{matrix} 7 \\ 9 \\ 10 \end{matrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 & & & \\ & & 1 & 1 & \\ & & & 1 & 1 \\ & & & & 1 \end{pmatrix}.$$

Pokazano tylko wiersze niezerowe (numery zaznaczono obok macierzy), taką konwencję zapisu stosuje się w dalszej części artykułu.

Założono dowolność kierunku spawania spoin pionowych, stąd decyzja o wyeliminowaniu trudniejszej pozycji PG i stosowaniu PF.

Założmy dalej, że przestrzeń prefabrykacyjną konstrukcji  $\sigma$  tworzą konstrukcje pokazane na rysunku 6.



Rys. 6. Przestrzeń prefabrykacyjna konstrukcji  $\sigma$

Każda z konstrukcji  $\sigma_k, k=1, \dots, 3$ , ma określoną macierz połączeń spełniającą warunek, przykładowo:

$$\mathbf{C}^1 = \begin{pmatrix} 0 & & \\ & 0 & 1 \\ & & 0 \end{pmatrix}, \mathbf{C}^2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & \\ & 0 & \\ & & 0 \end{pmatrix}, \mathbf{C}^3 = \begin{pmatrix} 0 & & 1 \\ & 0 & \\ & & 0 \end{pmatrix}.$$

Zakłada się, że połączenia można wykonywać jedynie technologią spawalniczą  $\omega_1$  o zakresie stosowania:

$$\mathbf{r}^1 = (0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0),$$

z czego wynika, że  $H=1$ . Dla przyjętej przestrzeni prefabrykacyjnej dopuszczalne są następujące podziały prefabrykacyjne:

$$\mathbf{p} \in \{(0,0,0), (1,0,0), (0,1,0), (0,0,1)\}. \quad (25)$$

Wektor zerowy oznacza, że wszystkie połączenia dane macierzą (24) muszą zostać wykonane i uwzględnione w planie montażu. Pozostałe podziały prefabrykacyjne wymagają planu wykonania dwóch brakujących połączeń. Do dalszej analizy wybiera się podział (0,0,1). Macierz połączeń montażowych oblicza się następująco:

$$C = \sum_{k=1}^m (p_k \cdot C^k) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} + 0 \cdot \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} + 1 \cdot \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Liczba połączeń montażowych:  $b = 2$ . Przestrzeń montażową tworzą macierze połączeń:

$$C^p = \left\{ \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \right\}$$

Plan montażu może być jedno- lub dwuetapowy. W przypadku planu jednoetapowego liczba planów nieograniczonych (por. (14)):

$$\alpha^0 = 2^{bq} \cdot H^q \cdot 6^q = 2^2 \cdot 1^1 \cdot 6^1 = 24.$$

Przy uwzględnieniu warunku kompletności planu liczba planów dopuszczalnych (por. równanie (19)):

$$\alpha^1 = q^b \cdot H^q \cdot 6^q = 1^2 \cdot 1^1 \cdot 6^1 = 6.$$

Każdy z planów spełniających warunek kompletności obejmuje macierz połączeń  $\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ , jedną z sześciu pozycji montażowych oraz jedyną dostępną technologię spawalniczą. Warunek wykonalności etapów zostanie sprawdzony jedynie dla planów spełniających warunek kompletności, a więc dla połączeń montażowych (1,2), (2,3) i dla każdej z sześciu pozycji montażowych. Poniżej przedstawiono obliczenia dla połączenia (1,2) i pozycji  $a_{3,s} = (1,0,\dots,0)^T$ :

$$\mathbf{r}^{a_{2,s}} \cdot \mathbf{AW}^{i,j} \cdot a_{3,s} \cdot (a_{1,s})_{i,j} = \begin{pmatrix} \dots, 0, 1, 0, \dots \end{pmatrix}_{1 \times 12} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}_{12 \times 6} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}_{6 \times 1} \cdot 1 = 1$$

$$\|\mathbf{AW}^{i,j} \cdot a_{3,s}\| \cdot (a_{1,s})_{i,j} = \left\| \begin{pmatrix} \dots, 0, 1, 0, \dots \end{pmatrix}_{12 \times 1} \right\| = 1.$$

Połączenie (1,2) jest więc wykonalne w przyjętej pozycji montażowej za pomocą założonej technologii spawania. Należy pamiętać, że wszystkie połączenia montażowe danego etapu muszą być wykonalne. Należy więc sprawdzić jeszcze drugie z połączeń. W tabeli 1 zestawiono wyniki dla wszystkich wariantów spełniających warunek kompletności planu. Można zauważyć, że jedynie pozycja montażowa  $a_{3,s} = (1,0,\dots,0)^T$  umożliwia wykonanie obydwu połączeń założoną metodą spawania. Jedyny dopuszczalny plan montażu można więc zapisać następująco:

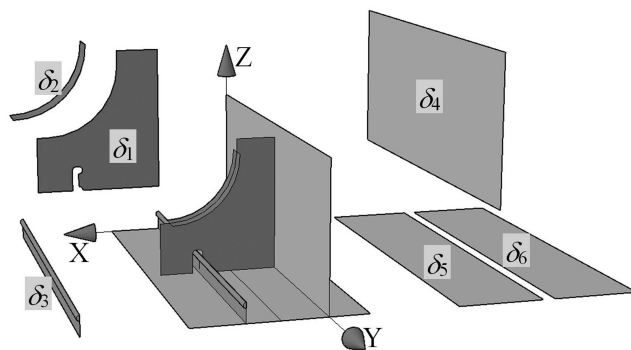
połączenie	pozycja montażowa					
	(1,0,...)	(0,1,0,...)	(0,0,1,0,...)	(...,0,1,0,0)	(...,0,1,0)	(...,0,1)
(1,2)	tak	nie	tak	nie	nie	nie
(2,3)	tak	tak	nie	nie	nie	nie

Tab. 1. Wyniki spełnienia warunku wykonalności

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 2 \begin{pmatrix} & & 1 \end{pmatrix} \\ \omega_1 \\ \left( \dots, 0, 1, 0, \dots \right)^T \end{pmatrix}. \quad (26)$$

**Przykład 2**

Niech konstrukcja  $\sigma$  przedstawia się teraz jak na rysunku 7. Składa się ona z sześciu detali.



Rys. 7. Konstrukcja  $\sigma$  w pozycji montażowej  $ap = (0,0,1,0,0,0)^T$

Konstrukcja  $\sigma$  ma ustalony układ współrzędnych, a jej macierz połączeń wygląda następująco:

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & & & & \\ & & 0 & 1 & & \\ 1 & & & 0 & 1 & \\ 1 & & & & 0 & 1 \\ 1 & & 1 & 1 & 0 & \end{pmatrix}. \quad (27)$$

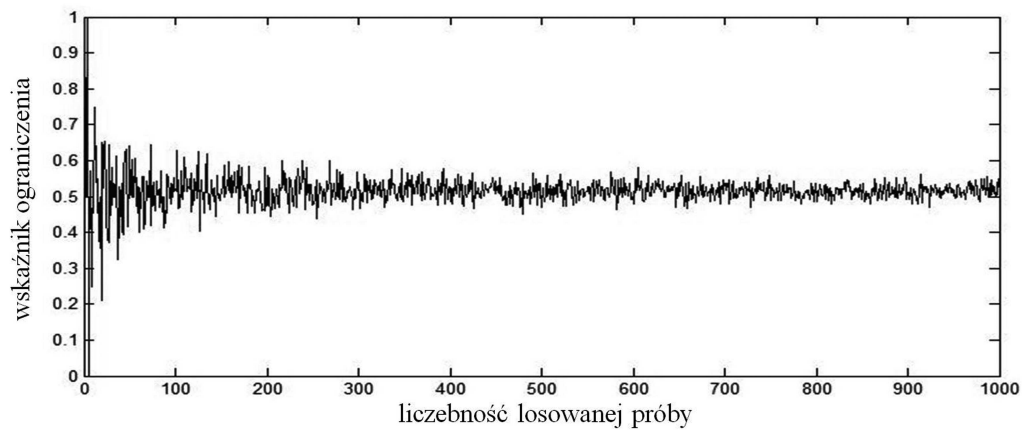
Zależność pozycji spawalniczych połączeń od pozycji montażowych dla konstrukcji wyraża się czternastoma macierzami (tyle jest wszystkich połączeń). Wybrane z nich są następujące:

$$\mathbf{AW}^{1,2} = \frac{7}{9} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{AW}^{1,4} = \frac{7}{9} \begin{pmatrix} 1 & 1 & & & & \\ & & 1 & 1 & & \\ & & & 1 & 1 & \\ & & & & 1 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{AW}^{5,6} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & & & & & \\ 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & 1 & & & \\ & & & 1 & & \\ & & & & 1 & \end{pmatrix}, \mathbf{AW}^{6,5} = \frac{1}{5} \begin{pmatrix} & & & & & 1 \\ & & & & & 1 \\ & & & & & 1 \\ & & & & & 1 \\ & & & & & 1 \end{pmatrix}.$$

W przypadku połączenia (1,2) można zauważyć dwie pozycje spawalnicze dla niektórych pozycji montażowych. Wynika to ze złożonego kształtu połączenia. W przypadku





Rys. 9. Wskaźnik ograniczenia warunku wykonalności etapów otrzymany metodą Monte Carlo

W pierwszym etapie planu wykonane są spoiny na stanowisku automatycznym w pozycji montażowej  $a_{3,1} = (0,0,1,0,0,0)^T$ . Następnie w tej samej pozycji spawacz za pomocą półautomatu wykonuje jedną spoinę (1,3). Trzeci etap realizowany jest w pozycji  $a_{3,3} = (1,0,0,0,0,0)^T$  również za pomocą półautomatu.

Zauważmy, że dla tego samego podziału prefabrykacyjnego można wygenerować inny plan montażu, w którym spoiny (4,6) i (6,4) zostaną przesunięte z etapu pierwszego na drugi:

$$A2 = \left( \begin{array}{c|c|c} \begin{matrix} 1(0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1) \\ 5(1 & & & & & ) \\ 6(1 & & & & & ) \end{matrix} & \begin{matrix} 4(0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1) \\ 6( & & & 1 & & ) \end{matrix} & \begin{matrix} 1(0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0) \\ 4(1 & & & & & ) \end{matrix} \\ \hline \omega_1 & \omega_2 & \omega_2 \\ \hline \begin{matrix} (\dots, 0, \overset{3}{1}, 0, \dots)^T \\ (\dots, 0, \overset{3}{1}, 0, \dots)^T \end{matrix} & \begin{matrix} (\dots, 0, \overset{3}{1}, 0, \dots)^T \\ (\dots, 0, \overset{3}{1}, 0, \dots)^T \end{matrix} & \begin{matrix} (1, 0, \dots)^T \\ (1, 0, \dots)^T \end{matrix} \end{array} \right) \quad (35)$$

## 7. Podsumowanie

Przedstawiony model pozwala zakodować istotne informacje o produkowanej konstrukcji oraz zasobach potencjalnie przydatnych do produkcji. Kodowanie rzeczywistych obiektów i procesów jest podstawowym warunkiem zastosowania metod automatyzujących procesy decyzyjne, w tym CBR. Zastosowanie proponowanej metody kodowania wymaga dostarczenia szeregu danych geometrycznych o konstrukcji. W praktyce macierz połączeń może zawierać wiele tysięcy wierszy i kolumn. Utworzenie takiej macierzy może się odbyć tylko poprzez automatyczne pozyskiwanie danych z systemu CAD, w którym projektowana jest konstrukcja. Również generator macierzy zależności pozycji spawalniczych od pozycji montażowych powinien działać automatycznie.

Jeśli zakres stosowania technologii spawalniczych wymaga określenia dodatkowych parametrów spoin, to oprócz rozróżnienia zgodnie z normą ISO 6947:2011 można wprowadzić dodatkowe pozycje. Przykładowo, pozycja PB może być zastąpiona pozycjami PB1 (pozycja PB, połączenie usztywnienia i powłoki), PB2 (pozycja PB, połączenie dwóch powłok). W ten sposób można rozróżnić zakres stosowania stanowisk portalowych o niskim prześwicie od stanowisk bez ograniczenia wysokości konstrukcji.

Dla założonego podziału prefabrykacyjnego można wygenerować wiele dopuszczalnych planów montażu. Proponowany model może być wykorzystany do oceny dopuszczalności rozwiązań generowanych przez system zewnętrzny, lecz również jako samodzielny model optymalizacyjny. Oczywiście to drugie zastosowanie wymaga sformułowania kryteriów oceny planu. Mogą to być:

- minimalizacja liczby zmian pozycji montażowej – zmiany pozycji są kosztocłonne i często wymagają stosowania specjalnego oprzyrządowania do obrotu i ustabilizowania konstrukcji,
- maksymalizacja podobieństwa planu do wcześniej realizowanych przez producenta procesów montażu – zagadnienie może być zrealizowane z wykorzystaniem metod technologii grupowych,
- minimalizacja prawdopodobieństwa wystąpienia w spoinach wad zależnych od pozycji spawalniczych – problem istotny szczególnie w połączeniu z prognozowanymi skutkami wad wpływającymi na bezpieczeństwo konstrukcji,
- minimalizacja czasu realizacji planu – kryterium wymagające wykonania harmonogramu czasowego montażu z uwzględnieniem możliwości realizacji etapów równocześnie,
- minimalizacja odkształceń spawalniczych – problem związany między innymi z kolejnością wykonywania połączeń oraz stosowanymi technologiami spawania.

Pełne ujęcie problemu optymalnego planowania montażu jest zagadnieniem multykryterialnym. Połączenie wymienionych kryteriów w jedną funkcję celu wymaga subiektywnej oceny z punktu widzenia priorytetów przedsiębiorstwa.

Przedstawiony model opisu planu montażu uwzględnia podział prefabrykacyjny – specyficzne pojęcie występujące w technologii budowy wielkowymiarowych konstrukcji oceanotechnicznych. Dzięki temu model może być wykorzystany jako wspomaganie optymalizacji podziału prefabrykacyjnego oraz, w szerszym ujęciu, jako narzędzie oceny technologiczności konstrukcji na etapie jej projektowania.



**Literatura:**

- [1] Arregi, B., Granados, S., Hascoet, J.Y., Hamilton, K., Alonso, M., Ares, E.: *Automatic welding systems for large ship hulls*, "4th Manufacturing Engineering Society International Conference, AIP Conference Proceedings" 2012, Volume 1431, pp. 951-958
- [2] Barnuś B., Knosala R.: *Minimalizacja kosztów wytwarzania w fazie projektowania*, „Zarządzanie Przedsiębiorstwem”, nr 2/2007, s. 2-13.
- [3] Chi Z., Jun S.: *Intelligentized Work-Preparation For Ship Hull Construction With Optimized Assembly Planning System*, [w:] *Conference Proceedings - IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics 2010*, pp. 2740-2744.
- [4] Cho K.-K., Lee S.-H., Chung D.-S.: *An automatic process-planning system for block assembly in shipbuilding*, "Annals of the CIRP", vol. 45/1/1996, pp. 41-44.
- [5] Cho K.-K., Sun J.-G., Oh J.-S.: *An automated welding operation planning system for block assembly in shipbuilding*, "Int. J. Production Economics" 1999, no. 60-61, pp. 203-209.
- [6] EN ISO 6947:2011, *Welding and allied processes – Welding positions*.
- [7] Feelders A., Daniels H., Holsheimer M.: *Methodological and practical aspects of data mining*, "Information & Management" 2000, no. 37, pp. 271-281.
- [8] Kolodner J. L.: *An Introduction to Case-Based Reasoning*, "Artificial Intelligence Review" 6/1992, pp. 3-34.
- [9] Lee, S., Yu, J., Kim, E., Choi, W., Lim, R., Kim, H., Heo, J.: *Steel-yard planning support system: Optimizing the steel-yard planning and performance evaluation with simulation*, [w:] *International Conference on Control, Automation and Systems 2012*, pp. 605-609.
- [10] Pokojński J.: *Personal Knowledge Management in Engineering Design – Issues, Concepts and Applications*, [w:] *Coordination of Collaborative Engineering – State of the Art and Future Challenges, 5th International Workshop on Challenges in Collaborative Engineering (CCE«07)*, April 11-13, 2007 in Cracow, Poland P-120 (2007). Gesellschaft für Informatik, Bonn 2007, pp. 9-20.
- [11] Seo Y., Sheen D., Kim T.: *Block assembly planning in shipbuilding using case-based reasoning*, "Expert Systems with Applications" 2007, 32, pp. 245-253.

**SET OF FEASIBLE ASSEMBLY PLANS OF LARGE - SIZE MARINE STRUCTURES****Key words:**

marine structure, assembly, welding, position, ship hull, shipyard.

**Abstract:**

The aim of the article is presenting a mathematical model of the assembly process of large-size marine structures. Numerical encoding approach of essential features of the structure and welding methods is proposed. The model takes into account information about the geometry of the connections between elements and their orientation in space

during the assembly process. Welding processes are characterized by positions range of their application. The assembly process is shown as a matrix form. Assembly planning is based on the allocation of welding processes into stages and the selection of welding method and assembly position for each stage. It is shown that a lot of such plans can be generated and many of them are unacceptable. Space of feasible plans is defined by set of constraints. These conditions verify that the assembly plan performs a task of welding of all joints and whether it is feasible for particular methods. The methods for calculating the impact of all conditions – an accurate deterministic and randomized approximate are proposed. It is shown that assumed conditions dramatically reduce the set of assembly plans. Moreover, the method of including additional conditions into the model according to the connections making sequence is presented. Sample calculations are shown in two examples – first that is extremely simplified, allowing for a full deterministic analysis of the problem, and a second that is more complex, requiring a partial approximate approach. The article indicates the possibility of using the optimization of the assembly plan. Furthermore, the set of applicable criteria is proposed.

**Dr inż. Remigiusz IWANKOWICZ**

Katedra Konstrukcji, Mechaniki i Technologii Okrętów  
Wydział Techniki Morskiej i Transportu

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny  
w Szczecinie

remigiusz.iwankowicz@zut.edu.pl