

Węzeł hybrydowy – prognozowanie odkształcenia kąтового łącznika na podstawie planowanego eksperymentu trójwartościowego

Hybrid node

– predictions of angular distortion of the connector
on the basis of three dimensional designed experiment

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych odkształcenia kąтового łącznika węzła hybrydowego. Węzeł hybrydowy, będący częścią wielkogabarytowej konstrukcji stalowej, powstaje w wyniku połączenia panelu I-core z konwencjonalnie usztywnioną płytą stalową. Badania przeprowadzono wg zasad techniki planowania eksperymentu w warunkach laboratoryjnych, zbliżonych do warunków panujących w przemyśle. Przedstawiona analiza uwzględnia parametry technologiczno-konstrukcyjne wpływające na przydatność montażową węzła hybrydowego. Pokazana metoda oceny wyników eksperymentalnych umożliwia wykorzystanie zależności aproksymacyjnej do prognozowania odkształcenia kąтового w wielkogabarytowych konstrukcjach stalowych.

Słowa kluczowe: węzeł hybrydowy; odkształcenia spawalnicze; odkształcenie kątowe; planowanie eksperymentu; modele predykcyjne

Abstract

The article presents the results of experimental researches on angular distortion of the connector of a hybrid node. The hybrid node being a part of the large-size steel structure is formed as a result of joining I-core panel with conventional stiffened steel plate. The researches has been carried out according to design of experiment technique in laboratory conditions near-real-life production conditions. The presented analysis accounts for technological-constructional parameters influencing the suitability for assembly of a hybrid node. The presented appraisal method used for experiment results features implementation of approximation dependence to predict angular distortion in large-size steel constructions.

Keywords: hybrid node; weld distortions; transverse shrinkage; angular distortion; design of experiment; prediction models

Wstęp

Artykuł stanowi kontynuację tematu poświęconego prognozowaniu odkształceń spawalniczych węzła hybrydowego. W Przeglądzie Spawalnictwa, do chwili obecnej, ukazało się kilka artykułów, analizujących różne postacie odkształceń tego fragmentu konstrukcji (patrz [1÷3]).

Celem jednoznacznego sprecyzowania poruszanych w tekście zagadnień zaadaptowano następujące określenia [1,4]:

– węzeł hybrydowy – szczególny fragment wielkogabarytowej konstrukcji stalowej (np. okrętowej), w którym łączą się dwie odmienne pod względem konstrukcyjno-technologicznym części tej konstrukcji (w analizowanym przypadku – patrz rysunek 1: panel sandwich typu I-core oraz płyta

usztywniona konwencjonalnie). Oba fragmenty konstrukcji zespolone są elementem pośrednim – łącznikiem;

– przydatność montażowa – zdolność konstrukcji, bądź jej fragmentu, do połączenia z inną konstrukcją, bądź jej fragmentem, najlepiej bez dodatkowych zabiegów korekcyjnych.

Węzeł hybrydowy, potencjalnie, może znaleźć zastosowanie wszędzie tam, gdzie wykorzystywane są panele sandwich. W wielkogabarytowych konstrukcjach stalowych, w tym w kadłubach statków, przede wszystkim w rejonach nie posiadających krzywizn [4]. Idealnie nadają się do tego celu jednostki posiadające w swojej konstrukcji dużo powierzchni

Dr inż. Tomasz Urbański – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: tomasz.urbanski@zut.edu.pl

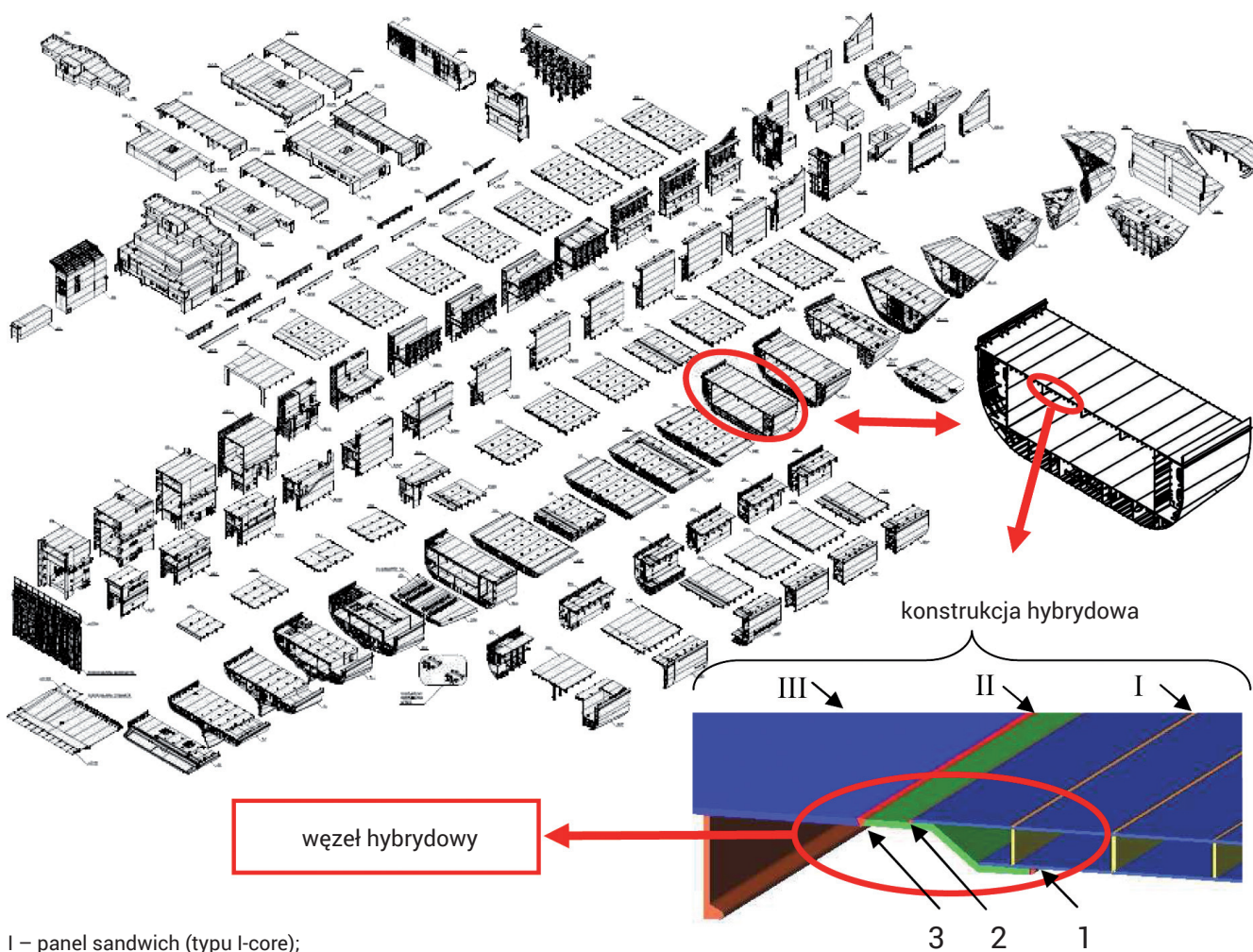
płaskich, jak np.: promy (pasażerskie, pasażersko-samochodowe), statki poziomego ładowania RO-RO (ang. *Roll On / Roll Off* – typ statku towarowego, pasażersko-towarowego przystosowanego do przewozu ładunków tocznych oraz pojazdów), statki wielozadaniowe CON-RO (tj. połączenie RO-RO i kontenerowca). Przykładowy plan montażu bloków oraz sekcji takiej jednostki pokazano na rysunku 1. Kadłuby wymienionych wysoko specjalistycznych typów statków wykonuje się w zawężonych tolerancjach ze względu na dużą ilość, dodatkowych, elementów wyposażeniowych. Dlatego szczególnego znaczenia przy ich budowie nabiera przydatność montażowa, która bezpośrednio wpływa na technologie wykonawcze.

Na elementy spawanych konstrukcji działa cały kompleks odkształceń spawalniczych, wpływających na jakość elementów spawanych. Deformacje te są przyczyną odchyłek wymiarowych, położenia oraz kształtu, występujących w konstrukcji rzeczywistej, przez co różni się ona od zaprojektowanego wzorca. Łączenie sprefabrykowanych podzespołów technologicznych oraz sekcji może być realizowane w wydajny sposób tylko w przypadku przestrzegania odpowiedniego planu montażu [5] oraz (co jest z tym bezpośrednio powiązane) posiadania odchyłek rzeczywistych (deformacji) mieszczących się w zakresie dopuszczalnych

tolerancji (tzn. akceptowanych z punktu widzenia standardów wykonania konstrukcji wielkogabarytowych, np.: [6,7]). W przeciwnym wypadku konieczne jest stosowanie zabiegów korekcyjnych, które znacznie zwiększają pracochłonność wykonania wyrobu. Szacuje się, że tylko w ramach pracochłonności kadłuba, naprawy w ciągu montażu sekcji przestrzennych oraz bloków stanowią ok. 30% [8] (a więc tyle, ile przeciętnie wynosi procentowy czas kadłubowych prac spawalniczych, w całkowitym czasie budowy statku [9]).

Jednak znajomość całego kompleksu odkształceniowego nie jest zawsze wymagana, a w niektórych przypadkach jest wręcz niepotrzebna – np. gdy kluczowe znaczenie dla technologicznej przydatności montażowej mają tylko niektóre lub jedna postać deformacyjna. Dlatego w praktyce produkcyjnej ważne jest właściwe wyselekcjonowanie kluczowych postaci odkształceń, z punktu widzenia specyfiki określonej gałęzi przemysłu i technologii produkcji konkretnego wyrobu, oraz umiejętne ich przewidywanie.

W przypadku montażu panelu I-core z łącznikiem do płyt poszycia sekcji okrętowych kluczową postacią deformacyjną stanowi odkształcenie kątowe łącznika [4] (szczegółową analizę, dotyczącą wpływu wszystkich postaci odkształceń spawalniczych węzła hybrydowego na jego technologiczną przydatność montażową zawarto w [4]).



- I – panel sandwich (typu I-core);
- II – konwencjonalna płyta poszycia;
- III – element pośredni (łącznik);
- 1,2,3 – spoiny węzła hybrydowego

Rys. 1. Rysunek aksonometryczny kadłuba statku z węzłem hybrydowym
Fig. 1. Isometric drawing of the ship hull with the hybrid node

Badania eksperymentalne

Badania eksperymentalne realizowano według zasad teorii planowania eksperymentu. Węzeł hybrydowy, w analizowanym przypadku jego złącze zakładkowe, zawierające spoinę 2 (patrz rys. 1), rozpatrywano jako tzw. czarną skrzynkę (patrz rys. 2). Na wejściu skrzynki wprowadzono zmienne niezależne, tzn. wyselekcjonowane parametry decydujące o powstawaniu analizowanej formy deformacji, tj. zmiennej zależnej, którą rejestrowano jako odpowiedź od ww. parametrów na wyjściu czarnej skrzynki. Za najbardziej wpływające na odkształcenie kątowe łącznika uznano: energię liniową procesu spawania, grubość łącznika oraz szerokość fragmentu górnej płyty panelu I-core. Z czarną skrzynką eksperymentu planowanego (rys. 2) związane są jeszcze dwie grupy wielkości – tzw. czynniki zakłócające oraz czynniki stałe, którymi w opisywanych badaniach mogą być odpowiednio np.: własności cieplno-fizyczne spawanych materiałów (w przypadku czynników stałych) oraz np.: tzw. czynnik ludzki (w przypadku czynników zakłócających). Z uwagi na fakt, że ww. grupy wielkości nie są wielkościami sterowalnymi, ani mierzalnymi (w sposób jawny), w trakcie przeprowadzanych badań, uznano je za mało istotne.

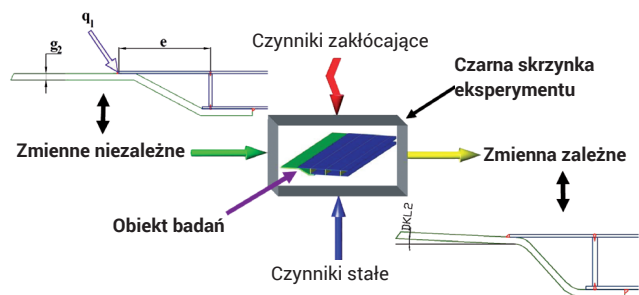
Ekspertyzy przeprowadzono na podstawie planu trójwartościowego $3^{k,p}$ Boxa-Benkena (np.: [10,11]), w którym wartości wejściowe zmieniano na trzech poziomach (tj.: minimalnym, średnim oraz maksymalnym). Liczba eksperymentów w jednym (wymaganym) bloku wynosiła 15 (w zależności od posiadanej objętości danych blok tych 15 eksperymentów

można realizować wielokrotnie). Minimalne, średnie oraz maksymalne wartości zmiennych niezależnych odpowiadały rozpiętością parametrów konstrukcyjno-technologicznym, stosowanych w warunkach produkcyjnych (patrz tabl. I). Liczba powtórzeń pomiarów dla każdego planu doświadczenia wynosiła $n_u \leq 3$, natomiast liczba powtórzeń układów, dla sprawdzenia adekwatności funkcji obiektu badań, w centrum planu wynosiła $n_o \leq 5$.

Ekspertyzy prowadzono w warunkach zbliżonych do warunków produkcyjnych, na stanowisku będącym segmentem stocznioowego łoża montażowego (patrz rys. 3). Materiał do badań stanowiły odpowiednio: stal gatunku AH36, zastosowana na łącznik oraz stal gatunku S355, zastosowana na płyty wierzchnie panelu I-core (elementy rdzenia panelu – stal S235). Gabaryty próbek pokazano na rysunku 3. Spoiny wykonywano metodą 136 w osłonie CO_2 , zgodnie z wytycznymi obowiązującymi w przemyśle, tj. [12], przez spawacza z kilkunastoletnim doświadczeniem zawodowym w branży okrętowej.

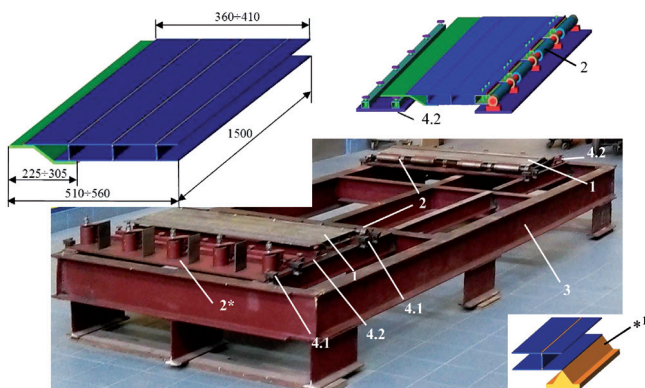
Jako elementy zamocowania próbek, symulujące założoną postać warunku brzegowego, zastosowano podparcie przegubowo-nieprzesuwne na panelu I-core (rys. 3).

Pomiary wykonywano niwelatorem libelowym NI 004. Przyrząd ten jest niwelatorem precyzyjnym, posiadającym płytkę płasko-równoległą. Metodę wyznaczania odkształcenia kąтового węzła hybrydowego przedstawiono na rysunku 4 oraz w tablicy II.



e – szerokość fragmentu górnej płyty panelu I-core [mm],
 g_2 – grubość łącznika [mm]
 q_1 – energia liniowa procesu spawania [kJ/mm],
 DKL2 – odkształcenie kątowe łącznika [°]

Rys. 2. Czarna skrzynka eksperymentu planowanego (na podst. [4])
Fig. 2. Planned experiment black box (on the basis of [4])



1 – obiekt badań, 2 – elementy zamocowań (symulujące warunki brzegowe),
 2* – elementy zamocowań (nie wykorzystywane w opisywanej części badań; mocujące płytę konwencjonalną), 3 – podstawa stanowiska (łoże montażowe),
 4 – elementy dodatkowe: 4.1 – elementy przytwierdzające, 4.2 – element podtrzymujący,
 *1 – podpora przegubowo-nieprzesuwna

Rys. 3. Stanowisko badawcze (na podst. [4])
Fig. 3. Research stand (on the basis of [4])

Tablica I. Plan eksperymentu – wartości unormowane (na podst. [4])
Table I. Plan of the experiment – normalised values (on the basis of [4])

Nr eksperymentu	Energia liniowa $x_1 (q_1)$	Grubość łącznika $x_2 (g_2)$	Szerokość fragmentu górnej płyty panelu I-core $x_3 (e)$
1	-1	-1	0
2	+1	-1	0
3	-1	+1	0
4	+1	+1	0
5	-1	0	-1
6	+1	0	-1
7	-1	0	+1
8	+1	0	+1
9	0	-1	-1
10	0	+1	-1
11	0	-1	+1
12	0	+1	+1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

Wartości rzeczywiste poszczególnych zmiennych niezależnych, należą do następujących przedziałów:

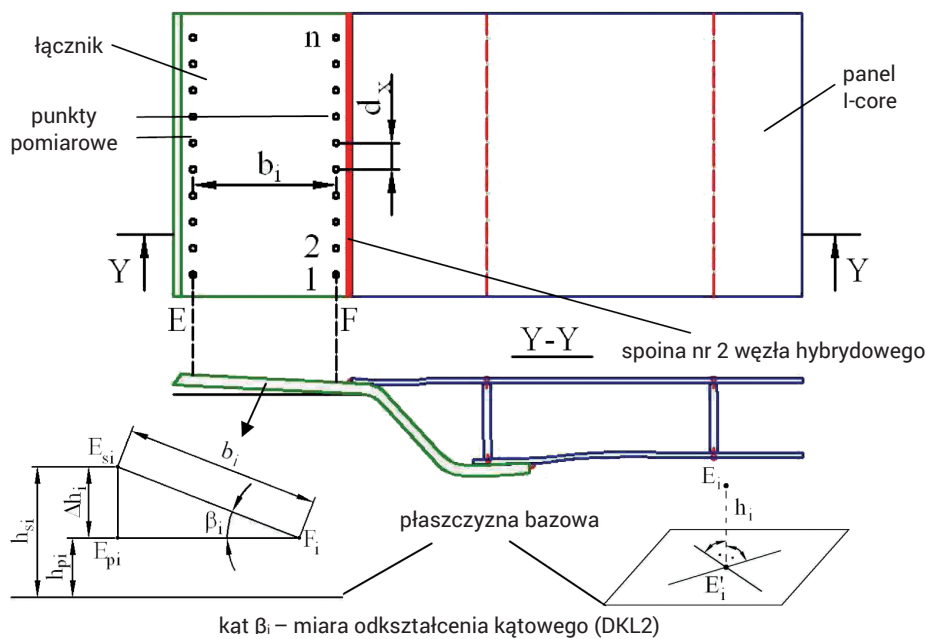
$q_1 \in [0,4; 0,9]$, kJ/mm, $g_2 \in [6; 10]$, mm, $e \in [60; 110]$, mm.

Tablica II. Zależności matematyczne wykorzystywane przy wyznaczeniu odkształcenia kąтового łącznika (na podst. [4])
Table II. Mathematical dependence used to determine the angular distortion of the connector (on the basis of [4])

L.p.	Opis	Wzór	
1	Średnia (arytmetyczna) wartości kątów β_i	$\beta = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \beta_i$	(1)
2	Wartość kąta powstałego wskutek przemieszczenia punktów pomiarowych w kierunku pionowym (rys. 4)	$\beta_i = \arcsin\left(\frac{\Delta h_i}{\Delta b_i}\right)$	(2)
3	Średnia (arytmetyczna) różnicy odległości między punktami pomiarowymi, mierzona w kierunku poprzecznym (szerokość)	$b = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta b_i$	(3)
4	Różnica odległości między punktami pomiarowymi, w kierunku poprzecznym	$\Delta b_i = b_{si} - b_{pi}$	(4)
5	Średnia (arytmetyczna) różnicy odległości między punktami pomiarowymi, mierzona w kierunku pionowym (wysokość)	$h = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta h_i$	(5)
6	Różnica odległości między poszczególnymi punktami pomiarowymi, w kierunku pionowym	$\Delta h_i = h_{si} - h_{pi}$	(6)
7	Odległość między punktem pomiarowym a płaszczyzną bazową (rys. 4)	$h_{si} = h_{pi} = h_i = \frac{ A_{xi} + B_{yi} + C_{zi} + D }{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}$	(7)

oznaczenia:

- b_i – odległości między punktami pomiarowymi w kierunku poprzecznym;
- h_i – odległości między punktami pomiarowymi w kierunku pionowym;
- A, B, C, D – współrzędne równania płaszczyzny bazowej;
- x_i, y_i, z_i – współrzędne punktu pomiarowego;
- n – liczba punktów pomiarowych w szeregu siatki pomiarowej;
- indeksy dolne oznaczają: p – wartość przed spawaniem; s – po spawaniu; ($i = 1, \dots, n$).



Oznaczenia:

- b_i – odległość między punktami pomiarowymi w kierunku poprzecznym ($b_i = 120$ mm),
- d_{si} – odległości między kołkami pomiarowymi w kierunku wzdłużnym ($d_{si} = 100$ mm),
- Δh_i – różnica odległości między punktami pomiarowymi w kierunku pionowym,
- E, F – punkty pomiarowe wzdłuż danego rzędu siatki,
- E'_i – rzut prostokątny punktu E_i na płaszczyznę bazową,
- indeksy dolne oznaczają: p – wartość przed spawaniem; s – po spawaniu; ($i = 1, \dots, n$)

Rys. 4. Metoda wyznaczenia odkształcenia kąтового łącznika (na podst. [4])

Fig. 4. Method of determining the angular deformation of the connector (on the basis of [4])

Wyniki badań

Metodę wykorzystaną do prognozowania odkształcenia kąтового łącznika, wchodzącego w skład węzła hybrydowego, oparto na analizie modeli regresji zmiennych zależnych względem zmiennych niezależnych. Analiza modeli regresji jest powszechnie wykorzystywana w wielu obszarach badań naukowych, w tym badań eksperymentalnych z dziedziny spawalnictwa, np.: [13÷15].

Przy opracowywaniu wyników badań kierowano się zasadami zawartymi m.in. w [10,11,16÷19], przy wykorzystaniu pakietu wspomagającego analizę statystyczną STATISTICA.

Jako aproksymowaną funkcję obiektu badań przyjęto wielomian drugiego stopnia z interakcjami pierwszego rzędu, o postaci przedstawionej zależnością (8):

$$y_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 \quad (8)$$

gdzie:

y_i – wyznaczana zmienna zależna (odkształcenie kątowe łącznika),

b_0, b_1, \dots, b_{33} – współczynniki regresji,

x_1, x_2, x_3 – zmienne niezależne wybrane do eksperymentu (patrz rys. 2 oraz tabl. I).

Poszczególne współczynniki regresji, występujące w równaniu (8), wyznaczano przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$ (tzn. współczynnika ufności 95%).

Celem otrzymania zależności zawierających tylko istotne współczynniki stosowano metodę regresji krokowo postępującej lub krokowo wstecznej. W ostateczności wybrano wyniki uzyskane przy pomocy drugiej z metod, jako dającej wyższe wartości (tzn. bliższe jedności), najważniejszych z punktu widzenia oceny regresji, współczynników, tj.: współczynnika korelacji wielokrotnej (R), kwadratu współczynnika korelacji wielokrotnej (R^2) oraz skorygowanego kwadratu współczynnika korelacji wielokrotnej (Skoryg R^2).

Ocena wartości, uzyskanych dla odkształcenia kąтового łącznika, pozwala stwierdzić istotność wytypowanych

do eksperymentów zmiennych oraz współzależności pomiędzy nimi. Na wykresie Pareto efektów, zamieszczonym na rysunku 5, przedstawiono wpływ poszczególnych zmiennych niezależnych oraz ich wzajemnych oddziaływań na badane odkształcenie kątowe. Na wykresie tym przerywaną linią pionową zaznaczono wartość krytyczną dla testu t oceny istotności oddziaływania danego czynnika na zmienną zależną.

Wielomian opisujący zależność analizowanej postaci odkształcenia spawalniczego od przyjętych parametrów technologiczno-konstrukcyjnych przyjmuje postać równania (9). Wartości: skorygowanego kwadratu współczynnika korelacji wielokrotnej oraz statystyki F Snedecora, dla badanej postaci odkształcenia pokazano w tablicy III, natomiast podsumowanie regresji wraz z wykazem istotnych zmiennych pokazano w tablicy IV.

$$y_{DKL2} = b_0 - b_2g_2 - b_3e + b_{13}q_1e + b_{23}g_2e + b_{33}e^2 \quad (9)$$

gdzie:

y_{DKL2} – odkształcenie kątowe łącznika,

b_0, b_2, \dots, b_{33} – współczynniki regresji,

q_1, g_2, e – zmienne niezależne wybrane do eksperymentu (patrz rys. 2 oraz tabl. I).

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń do modelu regresji wybrano pięć funkcji. Z tablicy III wynika, że obliczona wartość statystyki F = 29,17 przekracza wartość krytyczną $F_{0,05,5,9} = 3,48$ przy pięciu stopniach swobody licznika i dziewięciu mianownika (wartość krytyczną uzyskano z tablic statystycznych zamieszczonych w [19]). Ponadto wartość p jest znacznie mniejsza od poziomu istotności α .

Wyniki szczegółowej analizy statystycznej tylko istotnych zmiennych przedstawiono w tablicy IV. Potwierdzają one przydatność otrzymanej funkcji obiektu badań. Wartości w kolumnach „B” stanowią współczynniki wszystkich istotnych zmiennych, natomiast wartości w kolumnach „Bł.Stand.B” są błędami standardowymi wszystkich współczynników regresji. Wartości „t(9)” oznaczają statystykę t

Tablica III. Porównanie wartości: skorygowanego kwadratu współczynnika korelacji wielokrotnej oraz statystyki F-Snedecora, dla DKL2 (na podst. [4])

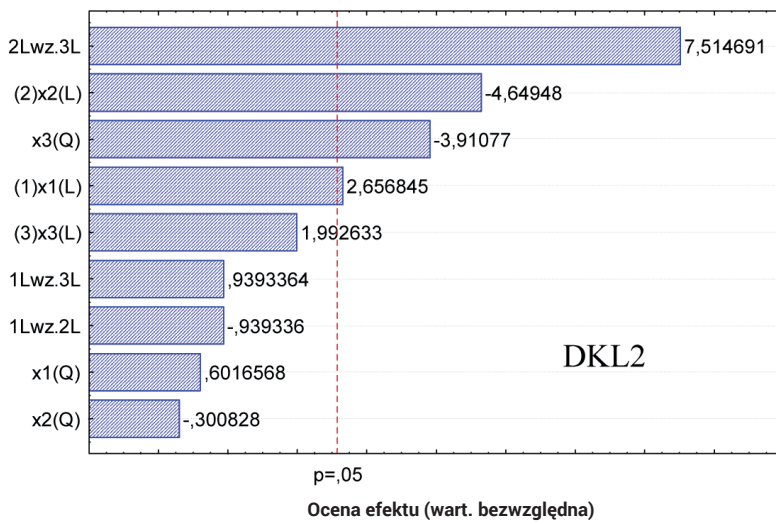
Table III. Comparison of values: corrected square of coefficient of multiple correlation and F Snedecor statistic, for DKL2 (on the basis of [4])

Symbol zmiennej zależnej	Wartość Skoryg. R^2	Wartość statystyki F, wyznaczona na podstawie analizy regresji	Wartość krytyczna F_{kr} z tablic statystycznych (dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$)
y_{DKL2}	0,90960	$F(5,9) = 29,173 \text{ p} < 0,00003$	$F(5,9) = 3,48$

Tablica IV. Zestawienie istotnych zmiennych, przy wykonywaniu metody regresji krokowo wstecznej, dla DKL2 (na podst. [4])

Table IV. Composition of significant variables for performed of backward stepwise regression method, for DKL2 (on the basis of [4])

Podsumowanie regresji zmiennej zależnej: y_{DKL2} $R = ,97050729$ $R^2 = ,94188440$ Skoryg. $R^2 = ,90959796$ $F(5,9) = 29,173 \text{ p} < 0,00003$ Błąd std. estymacji: ,11317						
N=15	Beta	Bł. Stand. Beta	B	Bł. Stand. B	t(9)	Poziom p
W. wolny			11,32571	1,026774	11,03039	0,000002
g_2	-3,85359	0,394651	-0,95938	0,098251	-9,76454	0,000004
e	-7,74514	0,925492	-0,15426	0,018433	-8,36867	0,000015
$q_1 * e$	0,32962	0,100383	0,00605	0,001843	3,28361	0,009475
$g_2 * e$	5,31938	0,601983	0,01000	0,001132	8,83643	0,000010
e^2	3,73782	0,803917	0,00044	0,000094	4,64951	0,001203



Oznaczenia zmiennych niezależnych oraz ich oddziaływań	
na wykresie	w wielomianie
(1)x1(L)	q_1
(2)x2(L)	g_2
(3)x3(L)	e
1Lwz.2L	$q_1 * g_2$
1Lwz.3L	$q_1 * e$
2Lwz.3L	$g_2 * e$
x1(Q)	q_1^2
x2(Q)	g_2^2
x3(Q)	e^2

Rys. 5. Wykres Pareto efektów dla DKL2 (na podst. [4])
Fig. 5. Pareto chart of effect for DKL2 (on the basis of [4])

(t-Studenta), która jest ilorazem wspomnianych wcześniej kolumn tablicy IV. Wysoka statystyka t oznacza, że współczynnik jest możliwy do oszacowania z poprawną dokładnością. Wartości, w kolumnie „Poziom p”, pokazują istotność każdej zmiennej. Im mniejsza jest ta wartość, tym większa istotność zmiennej. Uzyskana na tej podstawie ocena wartości otrzymanych dla analizowanego równania aproksymacyjnego pozwala stwierdzić, że najbardziej istotna dla odkształcenia kąтового łącznika węzła hybrydowego jest grubość tego elementu. Drugą zmienną, w hierarchii istotności, stanowi szerokość fragmentu górnej płyty panelu I-core. Oba z ww. parametrów stanowią ponadto najbardziej istotną interakcję równania regresji (przy drugim co do wielkości, ze wszystkich funkcji, poziomie p). Najmniej istotną zmienną niezależną okazała się energia liniowa procesu spawania. Nie występuje samodzielnie w wyznaczonym modelu matematycznym, a interakcja z jej udziałem posiada najwyższą wartość poziomu p.

Ponieważ średnia wariancja błędów losowych powtórzeń pomiarów (w obrębie planu eksperymentu) okazała się większa od średniej wariancji błędów aproksymacji nie przeprowadzono testu adekwatności (zgodnie z: [11,17,19]), uznając funkcję obiektu badań za adekwatną.

Opisane współzależności pomiędzy parametrami technologiczno-konstrukcyjnymi dają się wyraźnie przedstawić w formie graficznej, z wykorzystaniem wykresów trójwymiarowych. Przy czym na takich wykresach mogą być pokazane równocześnie tylko dwa parametry (występujące samodzielnie lub w formie interakcji). Wykresy tego typu, dla wybranych zmiennych pokazano na rysunku 6.

Również z tych wykresów wynika, że grubość łącznika oraz szerokość fragmentu górnej płyty panelu I-core (rys. 6a oraz b), jak i stworzona przez nie interakcja (rys. 6c oraz d) mają bardzo istotny wpływ na wartość odkształcenia kąтового łącznika. Zwiększenie ww. znacznie podnosi wartość deformacji, co może być powodem nieakceptowalnej przydatności montażowej prefabrykowanej konstrukcji zawierających węzeł hybrydowy, w tym sekcji kadłuba statku. Z kolei na rysunku 6d widać, jak niewielkie znaczenia dla postaci odkształcenia, w zestawieniu z najistotniejszą interakcją modelu matematycznego ma energia liniowa.

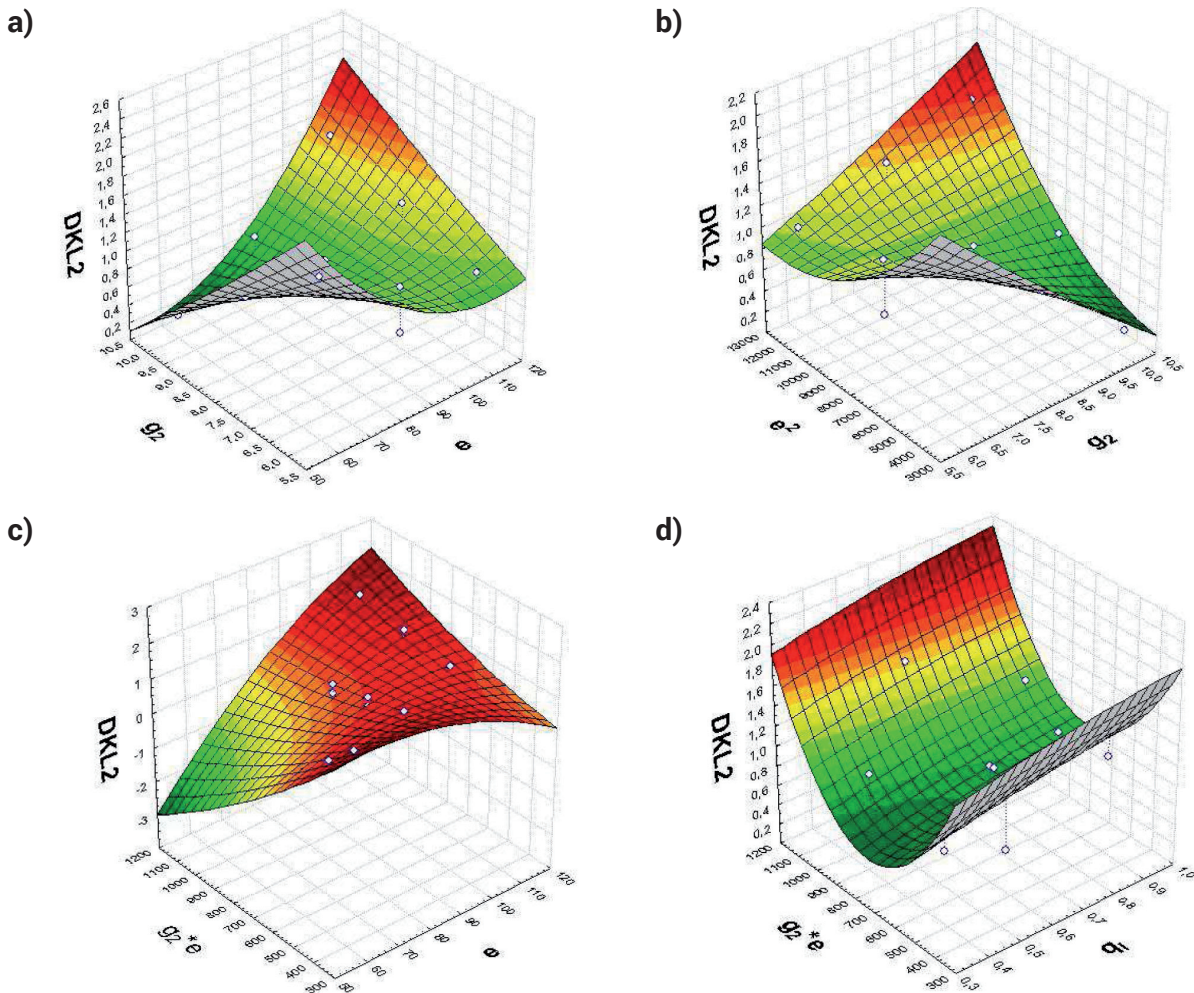
Przedstawione analizy potwierdzają, że zależność (9) jest istotna statystycznie i może być wykorzystywana do prognozowania wartości zmiennej DKL2 w funkcji wytypowanych zmiennych (tj.: q_1 , g_2 , e), a uzyskana wartość skorygowanego kwadratu współczynnika korelacji wielokrotnej (tabl. III oraz tabl. IV) świadczy o dopasowaniu powierzchni regresji do danych doświadczalnych na poziomie 90%.

Potwierdza to ostatecznie wykres normalności reszt dla analizowanego modelu (patrz rys. 7a). Usytuowanie punktów na tym wykresie pozwala stwierdzić, że rozkład reszt w przyjętym modelu nie odbiega znacząco od rozkładu normalnego.

Trafność prognozy oceniono poprzez porównanie wartości obliczonych na podstawie równania aproksymacyjnego z wartościami wyznaczonymi eksperymentalnie, co zobrazowano na rysunku 7b. Oba rodzaje ww. wartości umieszczone na jednym wykresie. Ponieważ wartości zmiennych niezależnych, uzyskanych oboma metodami, ułożyły się w pobliżu linii prostej, poprowadzonej z początku układu współrzędnych pod kątem 45°, można stwierdzić dobrą zgodność prognozy z rzeczywistością (największa różnica w wynikach dla obu metod wynosi 0,18°, natomiast najmniejsza 0,02°).

Znaczenie analizowanego fragmentu konstrukcji pod względem dalszej przydatności montażowej, przedstawiono na rysunku 8 (na siatkach deformacyjnych tego rys. nie uwzględniono efektu odbicia lustrzanego niwelatora). Dopuszczalne wartości przesunięcia krawędzi łączonych blach wynoszą w okrętownictwie odpowiednio: $\leq 0,15$ grubości blach dla spoin wytrzymałościowych oraz $\leq 0,2$ tej grubości dla innych spoin (max. dopuszcza się przesunięcie $\leq 3,0$ mm) [6,7]. Zatem dla badanego łącznika w/w wartości powinny zawierać się w przedziałach: 0,9÷1,5 mm dla spoin wytrzymałościowych oraz 1,2÷2,0 mm dla innych spoin. Po przekroczeniu dopuszczalnych wartości do zmontowania styku konieczny jest tzw. montaż siłowy. Wynika z tego, że odkształcenie łącznika decyduje w sposób bezpośredni o współliniowości styku doczołowego, a tym samym możliwości połączenia z innym fragmentem konstrukcji.

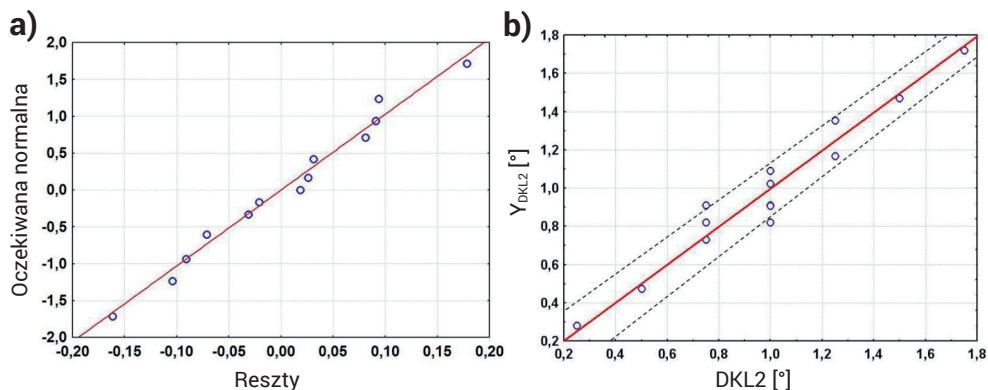
Możliwość przewidywania rzeczywistych wartości odkształceń jest bardzo cennym narzędziem wspomagającym np. bezzapasowe metody montażu wielkogabarytowych konstrukcji stalowych, w tym sekcji kadłuba statku. Przy pomocy równania aproksymacyjnego, uzyskanego w wyniku eksperymentów planowanych można dokonać technologicznej oceny fragmentu konstrukcji na podstawie przeprowadzonych symulacji, wykorzystujących wyznaczone równanie prognostyczne, w oparciu o parametry znaczące (tj. zmienne niezależne). Symulacje takie, bazujące również na zależności predykcyjnej analizowanej w niniejszym artykule, przedstawiono w [20]. Jak pokazują wykonane analizy, poprzez umiejętny dobór parametrów znaczących można wpływać na wartości odkształceń spawalniczych a tym samym decydować o przydatności montażowej prefabrykowanych fragmentów konstrukcji stalowych.



DKL2 – odkształcenie kątowe łącznika [°],
 e – szerokość fragmentu górnej płyty panelu I-core [mm],
 g₂ – grubość łącznika [mm],
 q₁ – energia liniowa procesu spawania [kJ/mm],

Rys. 6. Wpływ parametrów technologiczno-konstrukcyjnych na wartości odkształcenia kątowego łącznika, tzn.: a) szerokości górnej płyty panelu I-core oraz grubości łącznika, b) grubości łącznika oraz kwadratu szerokości górnej płyty panelu I-core, c) szerokości górnej płyty panelu I-core oraz grubości łącznika x szerokości górnej płyty panelu I-core, d) energii liniowej oraz grubości łącznika x szerokości górnej płyty panelu I-core (na podst. [4])

Fig. 6. The influence of technological-constructional parameters on angular distortion of the connector values, i.e.: a) width of the I-core panel upper plate and thickness of the connector, b) thickness of the connector and square of the width of the I-core panel upper plate, c) width of the I-core panel upper plate and thickness of the connector x width of the I-core panel upper plate, d) heat input and thickness of the connector x width of the I-core panel upper plate (on the basis of [4])

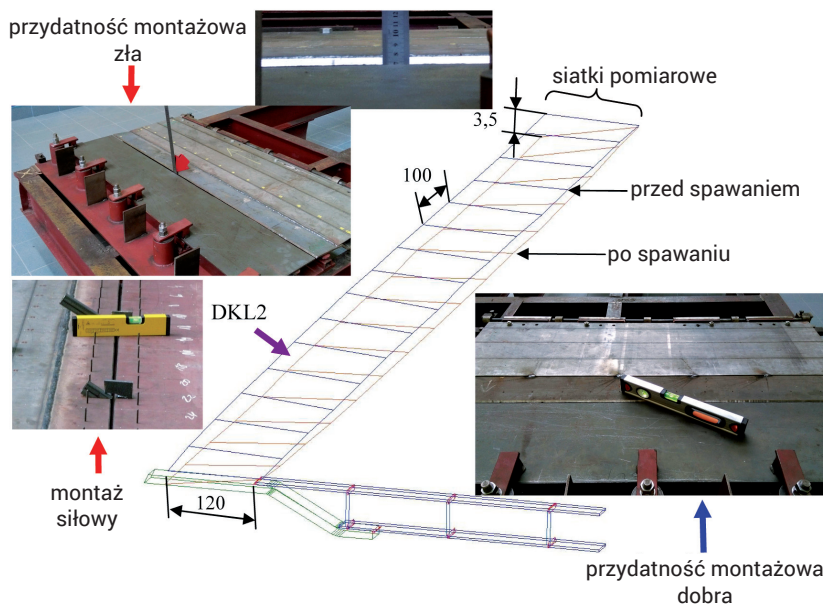


DKL2 – wartości wyznaczone eksperymentalnie, Y_{DKL2} – wartości aproksymowane

		Otrzymane wartości [°]														
DKL2		0,75	1,25	0,50	0,75	1,00	1,00	1,00	1,25	1,75	0,25	1,00	1,50	1,00	0,75	0,75
Y _{DKL2}		0,91	1,17	0,47	0,73	0,91	1,09	1,02	1,35	1,72	0,28	0,91	1,47	0,82	0,85	0,85

Rys. 7. Ocena trafności wartości prognozowanych: a) wykres normalności reszt, b) porównanie wartości eksperymentalnych z obliczonymi (na podst. [4])

Fig. 7. Estimation of accuracy of predicted deformations: a) diagram of normality of residuals, b) compare of the experimental values with calculated (on the basis of [4])



Rys. 8. Odształcenie łącznika (na podst. [4])
Fig. 8. Distortion of the connector (on the basis of [4])

Wnioski

W artykule pokazano, że ocena wyników eksperymentu planowanego pozwala na opracowanie modelu matematycznego w celu prognozowania odkształcenia kąтового łącznika węzła hybrydowego. Ocena taka umożliwiła określenie parametrów technologiczno-konstrukcyjnych o istotnym znaczeniu dla wartości analizowanej postaci odkształcenia spawalniczego. Model aproksymacyjny daje tym samym możliwość poszukiwania rozwiązań technologicznych gwarantujących utrzymanie geometrii węzła w założonych tolerancjach wymiarowych, co wpłynie na poprawę jego przydatności montażowej na etapach wytwarzania konstrukcji. W artykule udowodniono dobrą trafność prognozy. Ponadto wykazano, że najbardziej istotny wpływ na wartość odkształcenia kąтового łącznika mają dwie z wyselekcjonowanych do eksperymentu zmiennych niezależnych, tj.: szerokość fragmentu górnej płyty panelu I-core, oraz grubość łącznika. Wykorzystując model predykcyjny należy jednak pamiętać o dwóch bardzo istotnych kwestiach: po pierwsze, warunkiem, jaki musi zostać spełniony podczas prognoz tworzonych na podstawie uzyskanego wielomianu aproksymacyjnego, jest przynależność wykorzystywanych parametrów technologiczno-konstrukcyjnych do przestrzeni definicyjnej realizowanego planu eksperymentu. Po drugie, że nie w każdym przypadku można oczekiwać wyniku o porównywalnej jakości, ponieważ wartości parametrów technologicznych mają charakter probabilistyczny, co może prowadzić do większych różnic między prognozą a rzeczywistością.

Literatura

- [1] T. Urbański: Węzeł hybrydowy – technologiczność wielkogabarytowych konstrukcji spawanych – wprowadzenie, *Przegląd Spawalnictwa* Vol. 82 (11), s. 21-25, 2010.
- [2] T. Urbański: Węzeł hybrydowy – prognozowanie odkształceń spawalniczych panelu I core na podstawie planowanego eksperymentu dwuwartościowego, *Przegląd Spawalnictwa* Vol. 84 (3), s. 16-22, 2012.
- [3] T. Urbański: Węzeł hybrydowy – prognozowanie skurczu poprzecznego złącza doczołowego na podstawie planowanego eksperymentu dwuwartościowego, *Przegląd Spawalnictwa*, Vol. 87 (11), s. 22-26, 2015.
- [4] T. Urbański: Metoda prognozowania odkształceń spawalniczych węzła hybrydowego na podstawie badań eksperymentalnych, *Rozprawa doktorska*, Zakład Konstrukcji, Mechaniki i Technologii Okrętów, Wydział Techniki Morskiej, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin 2009.
- [5] R. R. Iwańkiewicz: An efficient evolutionary method of assembly sequence planning for shipbuilding industry, *Assembly Automation*, Vol. 36 (1), pp. 60-71, 2016.
- [6] Shipbuilding and Repair Quality Standard IACS, London 1996: Part A. Shipbuilding and Repair Quality Standard for New Construction; Part B. Repair Quality Standard for Existing Ships.
- [7] Norma zakładowa: T100-1, 2001. Stalowy kadłub statku. Dokładność konstrukcji kadłuba, Stocznia Szczecińska S.A.
- [8] B. Metschkow: Współczesna technika utrzymywania wysokiej jakości konstrukcji okrętowych, X Konferencja: Laboratoria technologiczne – aspekty utrzymania wysokiej jakości wyrobu, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 1999.
- [9] B. Metschkow, T. Graczyk: Laser welded joints in shipbuilding, *Second International Conference On Marine Technology – ODRA 1997*, Szczecin 13-15 May 1997, ed. Computational Mechanics Publications, Southampton & Boston 1997.
- [10] D. C. Montgomery: Design and analysis of experiments, John Wiley & Sons, Inc. fifth edition, New York, 2001.
- [11] Z. Polański: Planowanie doświadczeń w technice, PWN, Warszawa, 1984.
- [12] Norma zakładowa: T081-02, Spawanie łukowe w osłonie gazów ochronnych, część II – Instrukcje technologiczne spawania WPS, Stocznia Szczecińska S.A. 2001.
- [13] H. Remes, P. Varsta: Statistics of weld geometry for laser-hybrid welded joints and its application within notch stress approach, *Welding in the World*, Vol. 54 (7), pp. 189-207, 2010.
- [14] Y. P. Yang, H. Castner, R. Dull, J. Dydo, T. D. Huang, D. Fanguy, V. Długocki, L. Hepinstall: Complex-panel weld shrinkage data model for neat construction ship design engineering, *Journal of Ship Production and Design*, Vol. 30 (1), pp. 15-38, 2014.
- [15] Y. P. Yang, H. Castner, R. Dull, J. Dydo, D. Fanguy: Uniform-panel weld shrinkage data model for neat construction ship design engineering, *Journal of Ship Production and Design*, Vol. 29 (1), pp. 1-16, 2013.
- [16] N. R. Draper, H. Smith: Applied regression analysis, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1998.
- [17] M. Dobosz: Wspomagana komputerowo statystyczna analiza wyników badań, Akademyka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa, 2004.
- [18] E. Kołodziński: Symulacyjne metody badania systemów, PWN, Warszawa, 2002.
- [19] W. Oktaba: Elementy statystyki matematycznej i metodyka doświadczalnictwa, PWN, Warszawa, 1974.
- [20] T. Urbański: Analysis of assembly suitability of the hybrid node based on weld distortion prediction models, *Advances in Science and Technology Research Journal* Vol. 9 (27), pp. 28-34, 2015.