

Radosław Rutkowski¹⁾

ANALIZA DOKŁADNOŚCI POMIARÓW WYSOKOŚCIOWYCH W PROCESIE BUDOWY WIELKOGABARYTOWYCH KONSTRUKCJI STALOWYCH

Streszczenie. Artykuł porusza zagadnienia kontroli wymiarowej w procesie budowy wielkogabarytowych konstrukcji stalowych. Przedstawiono w nim wyniki prac mających na celu zwiększenie jakości kontroli wymiarowej w zakładach produkujących wielkogabarytowe konstrukcje stalowe. Największy nacisk położono na pomiary wysokościowe.

Słowa kluczowe: wielkogabarytowe konstrukcje stalowe, jakość wymiarowa, pomiary, budownictwo okrętowe, technologia, metrologia.

WSTĘP

Jednym z podstawowych zadań zakładów produkujących wielkogabarytowe konstrukcje stalowe jest wytworzenie produktu o jak najwyższej jakości jednocześnie przy możliwie najniższym koszcie czyli przede wszystkim przy oszczędnym zużyciu materiałów i w jak najkrótszym cyklu produkcyjnym. Względy te są powodem bardzo wysokich wymagań jakościowych, tak w sensie projektowania procesów technologicznych, jak i racjonalizacji procesów wytwarzania oraz kontroli jakości produkcji.

Aby możliwe było prawidłowe zestawienie i połączenie elementów konstrukcji, niezbędne jest zachowanie, zgodnie z projektem, ich wymiarów, kształtów i wzajemnego usytuowania. Podstawowymi narzędziami służącymi do realizacji tego celu są prace kontrolno-pomiarowe prowadzone na każdym etapie budowy. Umożliwiają one sprawdzenie zgodności projektu z realizacją budowanego przedmiotu podczas cyklu budowy aż do jej zakończenia

Obecnie coraz częściej stosowane są systemy pomiarowe oparte na urządzeniach elektronicznych. Opis takich systemów można znaleźć m.in. w opracowaniach [3, 6]. Prace kontrolno-pomiarowe oparte na przyrządach elektronicznych wymagają odpowiedniego przygotowania technicznego stanowisk prefabrykacyjnych oraz montażowych. Zaplecze technologiczne w wielu przypadkach jednak uniemożliwia zastosowanie takich urządzeń pomiarowych we wszystkich etapach budowy. Przykładem może

¹⁾ Wydział Techniki Morskiej, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie.

być przemysł okrętowy, gdzie często proces produkcyjny odbywa się na stanowiskach nie przystosowanych do prowadzenia kontroli jakości wymiarowej zaawansowanymi technikami pomiarowymi.

Uwzględniając powyższe oraz stale rosnące wymagania co do jakości wymiarowej można stwierdzić, iż nadal niezbędne jest doskonalenie systemów pomiarowych opartych na klasycznych instrumentach umożliwiających wykonywanie pomiarów niemalże w każdych warunkach technicznych.

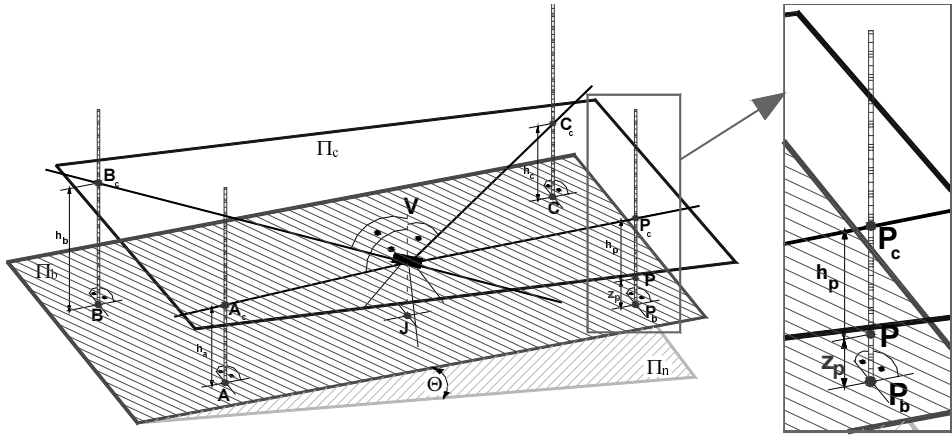
Niniejsze opracowanie przedstawia wyniki prac przeprowadzonych w celu racjonalizacji klasycznych metod pomiarowych. Zostały one wykonane głównie dla potrzeb przemysłu okrętowego, jednakże mogą zostać zastosowane w każdym zakładzie produkującym konstrukcje wielkogabarytowe.

METODY POMIAROWE

Podstawową cechą charakterystyczną prac pomiarowych prowadzonych podczas produkcji wielkogabarytowych konstrukcji stalowych jest konieczność wykonywania pomiarów w nachylonych układach współrzędnych oraz w układach zmieniających się dynamicznie – stanowiska montażu są przeważnie nachylone względem poziomu niwelacyjnego. Ponadto przykładowo w przemyśle okrętowym część prac wyposażeniowych statku wykonywana jest przy nabrzeżu (statek podlega kołysaniu). Uwarunkowania te utrudniają, a w wielu przypadkach uniemożliwiają bezpośrednie zastosowanie typowych metod pomiarowych wykorzystujących stały poziom niwelacyjny wyznaczony za pomocą libel lub mechanizmów samopoziomujących. Przedstawione wyżej uwarunkowania wymagają stosowania specjalnych metod pomiarowych pozwalających na uniezależnienie układu odniesienia od poziomu niwelacyjnego. Poniżej przedstawiono krótki opis podstawowej metody stosowanej w budownictwie okrętowym – metody niwelacji optycznej. Szersze omówienie tej metody oraz jej modelu matematycznego można znaleźć w piśmiennictwie [5, 6].

Metoda niwelacji optycznej

W przypadku gdy zachodzi konieczność odnoszenia pomiarów do płaszczyzn lub powierzchni zbliżonych do płaszczyzn nachylonych względem poziomu niwelacyjnego pod pewnym niewielkim kątem Θ odpowiednie pomiary wykonywane są przeważnie metodą niwelacji optycznej. Metoda ta nie korzysta z poziomu odniesienia, ale wykorzystuje pomocniczą płaszczyznę Π_c (rys. 1), względem której wykonuje się pomiar. Metodę tę można stosować zarówno podczas prowadzenia pomiarów na stanowiskach montażowych znajdujących się na lądzie, jak i na wodzie (dok pływający, statek po zwodowaniu). Omawianą metodę przedstawiono schematycznie na rysunku 1.



Rys. 1. Metoda niwelacji optycznej

Zasadniczym zadaniem podczas wykonywania pomiarów z wykorzystaniem metody niwelacji optycznej jest wyznaczenie współrzędnych z_p punktów P_i w pewnym układzie współrzędnych ortokartezjańskich $0xyz$. W przypadku, gdy powierzchnią odniesienia jest płaszczyzna Π_b , osie x i y tego układu przyjmuje się na tej właśnie płaszczyźnie, nadając im odpowiednią dla danych potrzeb orientację. Płaszczyzna Π_b wyznaczana jest przez trzy odpowiednio wybrane punkty A, B, C leżące przeważnie na konstrukcji mierzonej. Punkty te nazywane są bazą.

Wartość oblicza się według poniższego wzoru:

$$z_p = z_{P_c} - h_p \quad (1)$$

gdzie: z_{P_c} – współrzędna „ z ” punktu P_c .

Wartość z_{P_c} można wyznaczyć, korzystając ze wzoru wyrażającego równanie płaszczyzny Π_c przechodzącej przez punkty $A(x_A, y_A, h_A), B(x_B, y_B, h_B), C(x_C, y_C, h_C)$:

$$\begin{vmatrix} x_p & y_p & z_{P_c} & 1 \\ x_A & y_A & h_A & 1 \\ x_B & y_B & h_B & 1 \\ x_C & y_C & h_C & 1 \end{vmatrix} = 0 \quad (2)$$

Po przekształceniach powyższą zależność można przedstawić w następujący sposób:

$$z_{P_c} = \frac{(\Delta x_{AB} y_P + \Delta x_{BP} y_A - \Delta x_{AP} y_B) h_C + (\Delta x_{AP} y_C - \Delta x_{AC} y_P - \Delta x_{CP} y_A) h_B + (\Delta x_{BC} y_P - \Delta x_{BP} y_C + \Delta x_{CP} y_B) h_A}{\Delta x_{AB} y_C + \Delta x_{BC} y_A - \Delta x_{AC} y_B} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{gdzie: } \Delta x_{AB} &= x_B - x_A & \Delta x_{AP} &= x_P - x_A & \Delta x_{CP} &= x_P - x_C \\ \Delta x_{BP} &= x_P - x_B & \Delta x_{AC} &= x_C - x_A & \Delta x_{BC} &= x_C - x_B \end{aligned}$$

Podstawiając prawą stronę równania (3) do wzoru (1) otrzymano:

$$z_p = \left(\frac{(\Delta x_{AB} y_p + \Delta x_{BP} y_A - \Delta x_{AP} y_B) h_C + (\Delta x_{AP} y_C - \Delta x_{AC} y_p - \Delta x_{CP} y_A) h_B + (\Delta x_{BC} y_p - \Delta x_{BP} y_C + \Delta x_{CP} y_B) h_A}{\Delta x_{AB} y_C + \Delta x_{BC} y_A - \Delta x_{AC} y_B} \right) - h_p \quad (4)$$

Jest to model matematyczny niwelacji optycznej służący do analizy dokładności pomiarów wykonywanych tą metodą.

ANALIZA DOKŁADNOŚCI POMIARÓW WYSOKOŚCIOWYCH

Stosując do wzoru (4) prawo przenoszenia się błędów średnich otrzymano zależność (5) pozwalającą na wykonanie analizy dokładności.

$$\begin{aligned} m^2_{z_{P_i}} &= \left(\frac{\partial z_{P_i}}{\partial h_A} \right)^2 m^2_{h_A} + \left(\frac{\partial z_{P_i}}{\partial h_B} \right)^2 m^2_{h_B} + \left(\frac{\partial z_{P_i}}{\partial h_C} \right)^2 m^2_{h_C} + \\ &+ \left(\frac{\partial z_{P_i}}{\partial h_{P_i}} \right)^2 m^2_{h_{P_i}} + \left(\frac{\partial z_{P_i}}{\partial x_A} \right)^2 m^2_{x_A} + \left(\frac{\partial z_{P_i}}{\partial y_A} \right)^2 m^2_{y_A} + \\ &+ \left(\frac{\partial z_{P_i}}{\partial x_B} \right)^2 m^2_{x_B} + \left(\frac{\partial z_{P_i}}{\partial y_B} \right)^2 m^2_{y_B} + \left(\frac{\partial z_{P_i}}{\partial x_C} \right)^2 m^2_{x_C} + \\ &+ \left(\frac{\partial z_{P_i}}{\partial y_C} \right)^2 m^2_{y_C} + \left(\frac{\partial z_{P_i}}{\partial x_{P_i}} \right)^2 m^2_{x_{P_i}} + \left(\frac{\partial z_{P_i}}{\partial y_{P_i}} \right)^2 m^2_{y_{P_i}} \end{aligned} \quad (5)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

gdzie: n – ilość punktów P ,

$m_{h_A}, m_{h_B}, m_{h_C}, m_{h_{P_i}}$ – odchylenia standardowe odpowiednich odczytów na łąkach niwelacyjnych,

$m_{x_A}, m_{y_A}, m_{x_B}, m_{y_B}, m_{x_C}, m_{y_C}, m_{x_{P_i}}, m_{y_{P_i}}$ – odchylenia standardowe wyznaczania współrzędnych punktów A, B, C i P_i .

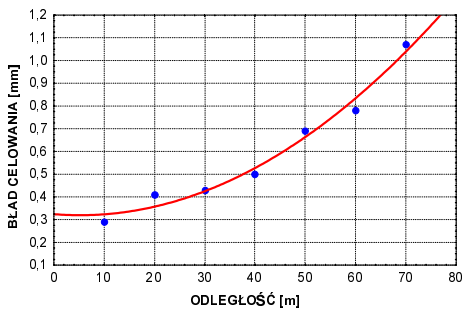
Przy zmiennej z_p wprowadzono parametr „ i ” () opisujący ilość punktów P , których współrzędne „ z ” należy wyznaczyć w jednym procesie pomiarowym.

Analizując przedstawiony powyżej opis matematyczny dokładności pomiarów wykonywanych metodą niwelacji optycznej można łatwo dojść do wniosku, iż na dokładność wyznaczania wartości mierzonych mają przede wszystkim wpływ błędy odczytu z łat pomiarowych. Wielkości te są opisywane w literaturze np. [2] wzorami przybliżonymi zdecydowanie za mało dokładnymi dla celów kontroli geometrycznej procesów budowy wielkogabarytowych konstrukcji stalowych. W związku z powyższym wielkości te zostały określone doświadczalnie. Proces badawczy został omówiony w [6]. Wybrane wyniki badań przedstawiono na rysunku 2.

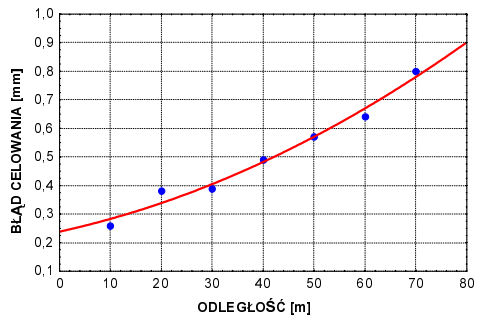
Biorąc pod uwagę fakt, iż w pomiarach prowadzonych w procesach produkcyjnych zachodzi często konieczność stosowania długich celowych wykonano analizę zastosowania w takich przypadkach metody płaszczyzn przyporządkowanych, która pozwala wykonać pomiar na dużej przestrzeni z jednoczesnym zmniejszeniem długości osi celowych.

Metoda płaszczyzn przyporządkowanych była dotychczas stosowana w przypadku gdy wykonywanie pomiarów metodą niwelacji optycznej było utrudnione a czasami

Niwelator NI 021A

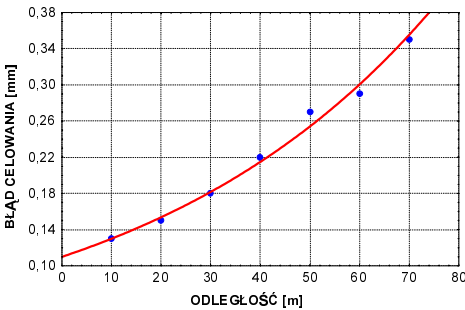


Niwelatorem NI 004
Pomiar bez wykorzystania płytki płasko-równoległej

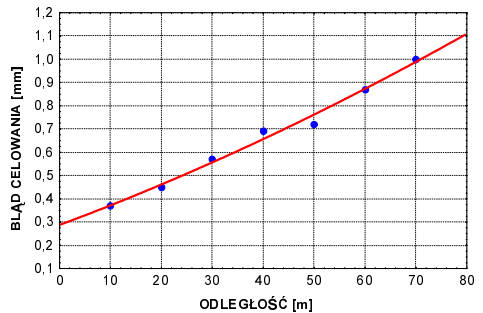


Niwelator NI 004

Pomiar z wykorzystaniem płytki płasko-równoległej



Teodolit T2



Rys. 2. Błędy celowania dla wybranych instrumentów pomiarowych

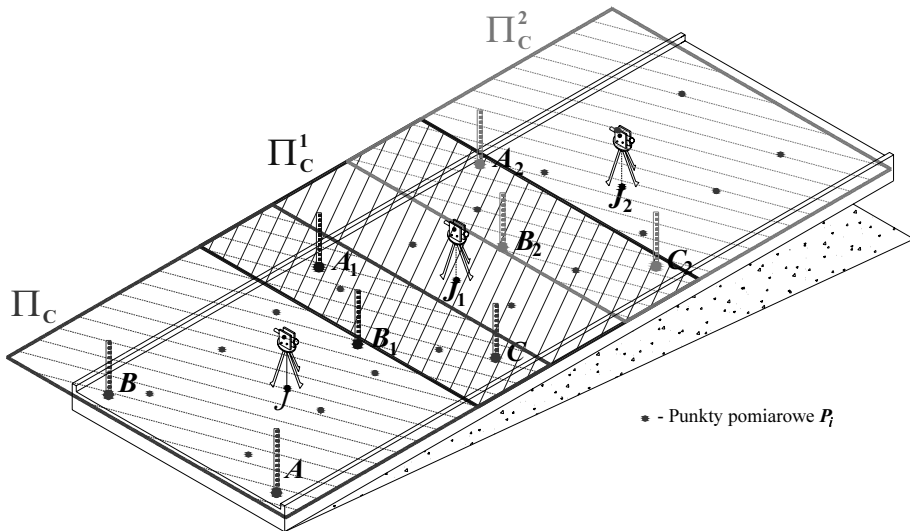
niemożliwe z powodu przeszkód ograniczających widoczność łat niwelacyjnych (np. elementy na pokładzie głównym statku podczas jego niwelacji). W przypadkach takich, powiązanie zasłoniętych punktów pomiarowych z punktami bazy ABC (rys. 1) można realizować wykorzystując zasadę płaszczyzn przyporządkowanych. Zasada ta polega na zastosowaniu baz pomocniczych $A_j B_j C_j$ (j – numer płaszczyzny przyporządkowanej Π_b^j), które posiadają znane rzędne ($z_{A_j}, z_{B_j}, z_{C_j}$) wyznaczone podczas wykonywania pomiarów względem płaszczyzny podstawowej Π_b utworzonej przez punkty ABC . Wartości z_{P_i} punktów pomiarowych P_i wyznaczanych względem płaszczyzny przyporządkowanej Π_b^j obliczamy według zależności (6) opracowanej na bazie wzoru (4):

$$z_{P_i} = \left(\frac{(\Delta x_{A_j B_j} y_{P_i} + \Delta x_{B_j P_i} y_{A_j} - \Delta x_{A_j P_i} y_{B_j}) h'_{C_j} + (\Delta x_{A_j P_i} y_{C_j} - \Delta x_{A_j C_j} y_{P_i} - \Delta x_{C_j P_i} y_{A_j}) h'_{B_j} + (\Delta x_{B_j C_j} y_{P_i} - \Delta x_{B_j P_i} y_{C_j} + \Delta x_{C_j P_i} y_{B_j}) h'_{A_j}}{\Delta x_{A_j B_j} y_{C_j} + \Delta x_{B_j C_j} y_{A_j} - \Delta x_{A_j C_j} y_{B_j}} \right) - h_{P_i} \quad (6)$$

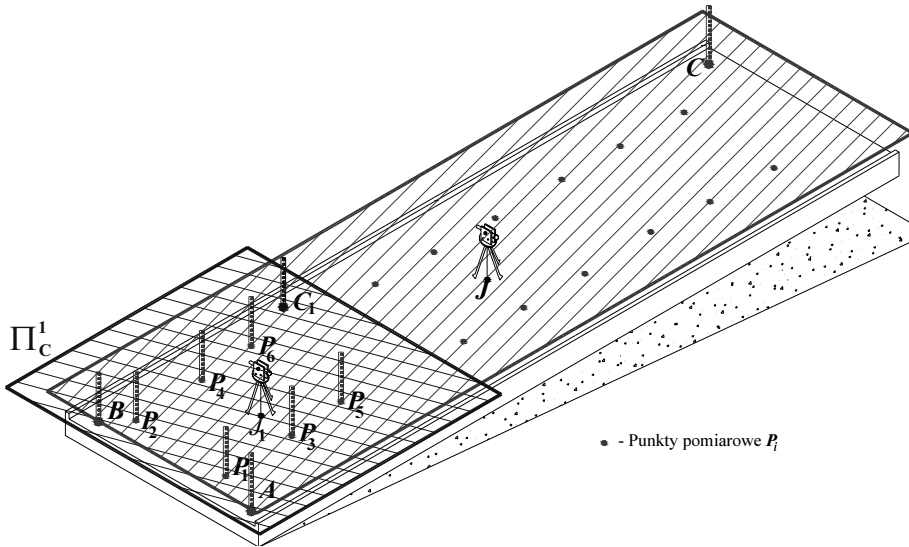
gdzie: $h'_{A_j} = (h_{A_j} + z_{A_j})$; $h'_{B_j} = (h_{B_j} + z_{B_j})$; $h'_{C_j} = (h_{C_j} + z_{C_j})$.

Przyporządkowanie pomocniczych płaszczyzn bazowych obrazuje schematycznie rysunek 3.

Omawianą zasadę pomiaru w szczególnym przypadku można wykorzystać w celu skrócenia celowych w procesach pomiarowych wykonywanych np. na całej długości statku. Sytuację taką przedstawia rysunek 4.



Rys. 3. Przyporządkowanie płaszczyzn bazowych



Rys. 4. Pomiary wysokościowe obejmujące całą długość statku

Postawioną tezę, iż zastosowanie metody płaszczyzn przyporządkowanych zwiększy dokładność pomiarów w przypadku niwelacji optycznej wykonywanej na dużych obszarowo konstrukcjach (przykładowo pokład statku) zweryfikowano przykładem obliczeniowym, który został przedstawiony poniżej.

Dokładność pomiarów metodą niwelacji optycznej wykonywanych względem bazy przyporządkowanej określono korzystając z prawa przenoszenia się błędów średnich:

$$\begin{aligned}
 m^2_{z_{P_i}} = & \left(\frac{\partial z_{P_i}}{\partial h_{A_j}} \right)^2 m^2_{h_{A_j}} + \left(\frac{\partial z_{P_i}}{\partial z_{A_j}} \right)^2 m^2_{z_{A_j}} + \left(\frac{\partial z_{P_i}}{\partial h_{B_j}} \right)^2 m^2_{h_{B_j}} + \left(\frac{\partial z_{P_i}}{\partial z_{B_j}} \right)^2 m^2_{z_{B_j}} + \left(\frac{\partial z_{P_i}}{\partial h_{C_j}} \right)^2 m^2_{h_{C_j}} \\
 & + \left(\frac{\partial z_{P_i}}{\partial z_{C1}} \right)^2 m^2_{z_{C1}} + \left(\frac{\partial z_{P_i}}{\partial h_{P_i}} \right)^2 m^2_{h_{P_i}} + \left(\frac{\partial z_{P_i}}{\partial x_{A_j}} \right)^2 m^2_{x_{A_j}} + \left(\frac{\partial z_{P_i}}{\partial y_{A_j}} \right)^2 m^2_{y_{A_j}} + \left(\frac{\partial z_{P_i}}{\partial x_{B_j}} \right)^2 m^2_{x_{B_j}} \quad (7) \\
 & + \left(\frac{\partial z_{P_i}}{\partial y_{B_j}} \right)^2 m^2_{y_{B_j}} + \left(\frac{\partial z_{P_i}}{\partial x_{C_j}} \right)^2 m^2_{x_{C_j}} + \left(\frac{\partial z_{P_i}}{\partial y_{C_j}} \right)^2 m^2_{y_{C_j}} + \left(\frac{\partial z_{P_i}}{\partial x_{P_i}} \right)^2 m^2_{x_{P_i}} + \left(\frac{\partial z_{P_i}}{\partial y_{P_i}} \right)^2 m^2_{y_{P_i}}
 \end{aligned}$$

gdzie: $m_{z_{A_j}}, m_{z_{B_j}}, m_{z_{C_j}}$ – odchylenia standardowe wyznaczania $(z_{A_j}, z_{B_j}, z_{C_j})$ względem płaszczyzny Π_b wyznaczone na podstawie wzoru (5).

Poniżej przedstawiono przykładowe obliczenia wielkości dla sytuacji zaprezentowanej na rysunku 4. Współrzędne stanowisk instrumentu, punktów A, B, C, C₁ oraz P_i zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1. Współrzędne stanowisk instrumentu oraz punktów bazowych i pomiarowych

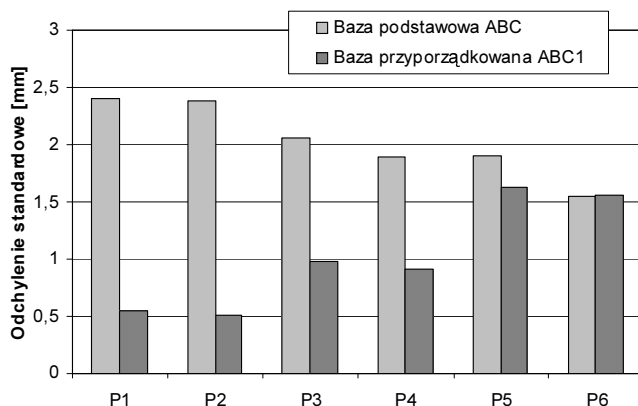
Punkty	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>C</i> ₁	<i>J</i>	<i>J</i> ₁
Współrzędne (x, y) [m]	(0,0)	(0,20)	(200,20)	(50,20)	(100,10)	(25,10)
Punkty	<i>P</i> ₁	<i>P</i> ₂	<i>P</i> ₃	<i>P</i> ₄	<i>P</i> ₅	<i>P</i> ₆
Współrzędne (x, y) [m]	(5,2)	(5,18)	(25,2)	(25,18)	(45,2)	(45,18)

Jako instrument pomiarowy przyjęto niwelator Ni-021A. Otrzymane wyniki zestawiono w tabeli 2 oraz zaprezentowano graficznie na rysunku 5.

Przedstawione obliczenia dowodzą, iż w pomiarach wykonywanych metodą niwelacji optycznej przy długich celowych, zastosowanie zasady płaszczyzn przyporządkowanych może znacząco zwiększyć dokładność pomiarów. Błędy powstające podczas wyznaczania punktów bazowych płaszczyzn przyporządkowanych mają zdecydowanie mniejszy wpływ na wynik końcowy niż błędy wynikające z długich osi celowych.

Tabela 2. Odchylenia standardowe pomiarów wykonywanych z wykorzystaniem bazy podstawowej oraz baz płaszczyzn przyporządkowanych

Baza podstawowa wyznaczona przez punkty <i>A, B, C</i>							
Punkty	<i>C</i> ₁	<i>P</i> ₁	<i>P</i> ₂	<i>P</i> ₃	<i>P</i> ₄	<i>P</i> ₅	<i>P</i> ₆
Odchylenie standardowe wyznaczania rzędnej [mm]	1,63	2,40	2,38	2,06	1,89	1,90	1,54
Baza przyporządkowana wyznaczona przez punkty <i>A, B, C</i> ₁							
Punkty		<i>P</i> ₁	<i>P</i> ₂	<i>P</i> ₃	<i>P</i> ₄	<i>P</i> ₅	<i>P</i> ₆
Odchylenie standardowe wyznaczania rzędnej [mm]		0,54	0,51	0,98	0,91	1,62	1,55



Rys. 5. Odchylenia standardowe pomiarów wykonywanych z wykorzystaniem bazy podstawowej oraz baz płaszczyzn przyporządkowanych

PODSUMOWANIE

Przedstawiona w niniejszym artykule analiza dokładności wykazuje, iż optyczne metody pomiarowe przy zastosowaniu odpowiednich założeń i procedur zapewniają otrzymanie wyników dobrej jakości. Wartość niepewności pomiarowej jest częstoć mniejsza niż przy zastosowaniu metod elektronicznych. Ponadto metody optyczne nie wymagają specjalistycznego sprzętu oraz odpowiednio przygotowanych stanowisk montażowych. Reasumując, optyczne metody pomiarowe są nadal konkurencyjne w zakresie kontroli jakości wymiarowej w procesie budowy konstrukcji wielkogabarytowych.

BIBLIOGRAFIA

1. Humieny Z., Bialas S., Osanna P.H., Tamre M., Weckenmann A., Blunt L. (et. al.): Geometrical Product Specifications (GPS) – course for Technical Universities. Warsaw University of Technology Printing House, Warsaw 2001.
2. Jagielski A.: I (Geodesy I). Stabill Publishing House, Cracow 2002.
3. Niebylski J.: Optymisation of the collection of geometrical data in shipbuilding. International conference on marine technology ODRA 99, Computational Mechanics Publications Southampton Boston 2000.
4. Okumoto Y.: Optymization of Block Erection Using a Genetick Algorithm. Journal of Ship Production, Vol. 18, No 2, 2002.
5. Rutkowski R.: Dynamical control of dimensional quality of large steel structures in production enterprises of low – level technological support. Polish Maritime Research Vol 17, No 1(63), 2010.
6. Rutkowski R.: Geometrical control systems modelling of three-dimensional steel structures referring to the required accuracy standards. Rozprawa doktorska. Wydział Techniki Morskiej, Politechnika Szczecińska, 2005.

ANALYSIS OF HEIGHT MEASUREMENTS ACCURACY IN A BUILDING PROCESS OF LARGE DIMENSIONAL STEEL STRUCTURES

Abstract

Problems of measurement control in a building process of large dimensional steel structures are discussed in the paper. Results of works aiming at improvement of the measurement control in plants producing such constructions are presented. Levelling measurements are especially pointed.

Keywords: large-size steel structures, measurement quality, measurements, shipbuilding, technology, metrology.