

SZACOWANIE ODDZIAŁYWANIA WIATRU NA RUSZTOWANIE W ŚWIETLE BADAŃ W SKALI RZECZYWISTEJ

Tomasz LIPECKI*, Paulina JAMIŃSKA-GADOMSKA, Ewa BŁAZIK-BOROWA, Jarosław BĘC

*Katedra Mechaniki Budowli, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska,
email: t.lipecki@pollub.pl; p.jaminska@pollub.pl; e.blazik@pollub.pl; j.bec@pollub.pl*

Streszczenie: W artykule zostało przedstawione oszacowanie oddziaływania wiatru na elementy rusztowania budowlanego, przeprowadzone na podstawie pomiarów w skali rzeczywistej. Oddziaływanie wiatru zostało przyjęte na podstawie uśrednionych pomiarów prędkości wiatru, zmierzonej z wykorzystaniem anemometrów wiatrakowych w 4–12 lokalizacjach na rusztowaniu. Pomiar w kolejnych lokalizacjach był wykonywany w środku przęsła, na wysokości ok. 1,7 m. Zaproponowano procedurę przyjmowania statycznego oddziaływania wiatru na podstawie uzyskanych wyników pomiarów prędkości. Pokazano działanie procedury na przykładowym rusztowaniu fasadowym. Wyznaczone obciążenie przyłożono do rusztowania, zamodelowanego w systemie MES.

Słowa kluczowe: rusztowanie, badania in-situ, oddziaływanie wiatru

1. WPROWADZENIE

Rusztowania są konstrukcjami tymczasowymi stawianymi przy obiektach inżynierskich w trakcie ich wznoszenia i prac wykończeniowych bądź w trakcie prowadzenia remontów. Literatura przedmiotu dotyczy przede wszystkim wypadków, które miały miejsce na rusztowaniach np. [1–3], aspektów badań wytrzymałościowych elementów rusztowania, modelowania MES, itp., np. [4–7]. Mało jest informacji na temat oddziaływania wiatru, które stanowi jeden z decydujących czynników wymiarujących konstrukcję rusztowania. W zakresie oddziaływania wiatru, obowiązującymi normami przy projektowaniu rusztowań są [8,9] i dodatkowo część wiatrowa Eurokodu 1 [10]. Badania modelowe w tunelu aerodynamicznym rusztowania stojącego przy budynku średniej wysokości zabezpieczonego plandeką przedstawiono w pracach [11,12], zaś badania w tunelu aerodynamicznym i symulacje CFD rusztowania z siatką i plandeką ochronną w [13]. Symulacje CFD opły-

wu wokół rusztowania ustawionego w różnych konfiguracjach wokół budynku były tematem prac [14,15].

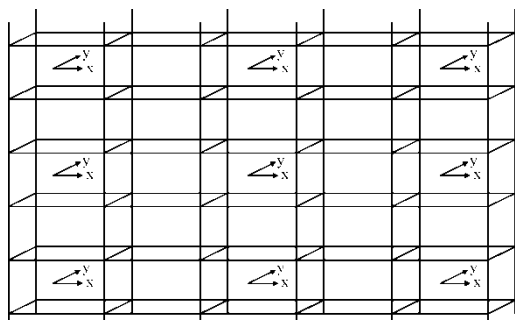
W niniejszej pracy przedstawiono próbę oszacowania obciążenia wiatrem konstrukcji rusztowania na podstawie badań in-situ wykonanych za pomocą anemometru wiatrakowego.

2. BADANIA W SKALI RZECZYWISTEJ NA RUSZTOWANIACH FASADOWYCH

Badania opisywane w niniejszej pracy dotyczą rusztowań fasadowych. W okresie od 2016 r. do 2018 r. zaplanowano przeprowadzenie badań na 120 konstrukcjach rusztowań zlokalizowanych w całej Polsce. Jednym z rodzajów prowadzonych badań są pomiary parametrów klimatycznych, takich jak prędkość wiatru, ciśnienie atmosferyczne, temperatura, wilgotność, poziom hałasu i nasłonecznienia. Badania prowadzone są przeważnie na trzech poziomach rusztowania: najniższym, środkowym i najwyższym. W zależności od rozmiaru konstrukcji pomiary powtarzane są w 2, 3 lub 4 punktach na poszczególnych poziomach. Całkowita liczba punktów pomiarowych waha się więc od 6 do 12. Badania prowadzone są w środku danego przęsła na wysokości 1,7 m nad poziomem pomostu. Przykładową lokalizację punktów, wraz z oznaczeniem zwrotów osi układu współrzędnych odpowiadających kierunkom prędkości wiatru analizowanym w dalszej części pracy pokazano na Rys. 1. Pomiary prowadzone są 3–4 razy na dobę, przez 5 kolejnych dni tygodnia. Do pomiarów wykorzystano urządzenie KIMO AMI 310. W niniejszej pracy przedstawiono sposób oszacowania oddziaływania wiatru na podstawie pomiarów przeprowadzonych za pomocą anemometru wiatrakowego SHT100 stanowiącego wyposażenie dodatkowe urządzenia KIMO. W każdej turze pomiarów i w każdym punkcie, pomiar polega na zmierzeniu

* Autor korespondencyjny, e-mail: t.lipecki@pollub.pl

prędkości w kierunku prostopadłym do fasady budynku (v_y) i następnie w kierunku równoległym (v_x). Każdy pomiar trwa 60 sekund, z częstotliwością zapisu co 1 sekundę. Dokładność próbkowania wynosi $\pm 3\%$ w przypadku prędkości wiatru w zakresie do 3 m/s oraz $\pm 1\%$ w przypadku prędkości 3,1–35 m/s.



Rys. 1. Lokalizacja punktów pomiarowych na rusztowaniu
Fig. 1. Location of measurement points on scaffolding

3. SZACOWANIE OBCIĄŻENIA WIATREM NA PODSTAWIE BADAŃ IN-SITU

Na podstawie pomiarów in-situ opracowano metodykę pozwalającą na oszacowanie obciążenia wiatrem działającego na konstrukcję rusztowania. Biorąc pod uwagę niejednoczesność wykonywania pomiarów – najpierw mierzono prędkość w kierunku prostopadłym do fasady budynku, a następnie równoległym – procedura stanowi jedynie przybliżenie możliwego oddziaływania wiatru, które może znacząco różnić się od sytuacji rekomendowanych przez normy.

W procedurze wyróżniono następujące kroki:

1. Na podstawie analizy prędkości wiatru zmierzonych w poszczególnych dniach i godzinach wybierany jest przykład oddziaływania wiatru. Wybór jest oparty na maksymalnych wartościach średniej prędkości wiatru we wszystkich punktach pomiarowych. Przykładowym kryterium może być suma wszystkich wartości wypadkowych prędkości we wszystkich punktach. Dodatkowym kryterium jest układ wektorów wypadkowych prędkości, tak aby tworzyły one sensowny schemat obciążenia – np. działały w podobnym kierunku, czy też formowały wir, który powstaje na krawędzi budynku, przy którym stoi rusztowanie. Oczywiście takie podejście przynosi niebezpieczeństwo popełnienia znacznego błędu w związku z niejednoczesnością prowadzenia pomiarów. Pomiaru w praktyce odbywają się w ciągu 1–1,5 godziny przy istniejącej możliwości zmiany warunków wietrznych. Zastosowanie obydwu kryteriów pozwala ten błąd w pewnym stopniu wyeliminować, a przynajmniej ograniczyć.

2. W celu dostosowania prędkości 1-minutowych zmierzonych na rusztowaniu do prędkości 10-minutowych, wymaganych w procedurach projektowych Eurokodu [8–10],

przyjęto sposób ich przeliczania. Badania przeprowadzone w latach 60-tych przez Dursta [16] pozwalają na konwersję wyników pomiarów prędkości wiatru uzyskanych dla różnych czasów uśredniania. Durst podał współczynniki przeliczeniowe z powszechnie stosowanych czasów uśredniania na czas uśredniania 1-godzinny, ale na podstawie podanych zależności można również oszacować współczynnik przeliczeniowy z czasu uśredniania 60-sekundowego na 10-minutowy jako równy 1,17. Późniejsze badania np. [17–19] potwierdziły poprawność tego założenia podając wartości współczynnika w granicach 1,12–1,21.

3. Kierunek średniej 10-minutowej prędkości wiatru zmierzony w najbliższej stacji meteorologicznej, w czasie odpowiadającym wybranemu do dalszej analizy przypadkowi obciążenia wiatrem, jest porównywany ze średnimi kierunkami wiatru uzyskanymi na rusztowaniu. Przy porównaniu należy rozpatrzyć również otoczenie budynku i na tej podstawie ocenić zgodność kierunków. W przypadku zadowalającej zgodności, prędkość 10-minutowa ze stacji jest przyjmowana jako prędkość referencyjna. W przypadku gdy wiatr oddziałuje z za budynku, nie ma możliwości uzyskania zgodności kierunków, ponieważ budynek „filtruje” kierunki prędkości na rusztowaniu. Rozwiązaniem jest zainstalowanie anemometru na dachu budynku w obszarze przepływu niezaburzonego. W części badań takie właśnie rozwiązanie zastosowano.

4. Przy przyjętych założeniach, prędkości 1-minutowe na rusztowaniu mogą zostać przeliczone na normowe 10-minutowe zależne od strefy klimatycznej Polski i stosunku do prędkości referencyjnej. Zakłada się więc, że na stacji osiągnięta jest wymagana prędkość projektowa (22 lub 26 m/s) lub inna służąca np. do oceny komfortu pracy pracowników na rusztowaniu.

5. Oddziaływanie wiatru na konstrukcję rusztowania, może zostać określone z następującego związku:

$$p_i = qD_i c_f \quad (1)$$

gdzie: $q = 0,5\rho v^2$ – ciśnienie prędkości wiatru, D_i – wymiar poprzeczny poszczególnych elementów wystawionych na oddziaływanie wiatru, c_f – współczynnik aerodynamiczny zależny od kształtu danego elementu.

6. Założono przykładanie obciążenia tylko do wybranych elementów rusztowania: słupków ram, krawężników i boku pomostu, stężeń, barierek. Pominięcie oddziaływania na pozostałe elementy nie spowoduje znacznego błędu w związku z ich małą powierzchnią wystawioną na działanie wiatru. Obciążenie jest przykładane zgodnie z wyznaczonym kierunkiem, z rozbięciem na dwie składowe poziome x oraz y . Jeśli na rusztowaniu wykonano pomiary w 12 punktach (3 poziomy, na każdym 4 lokalizacje) wówczas dodatkowo interpolowano średnie siły oddziaływania wiatru na dwóch poziomach pośrednich między 1. i 2. oraz 2. i 3. Przykładowo powierzchnia rusztowania została podzie-

lona na 20 obszarów ze środkami zlokalizowanymi w 12 punktach pomiarowych i w 8 punktach dodatkowych.

7. W celach porównawczych obciążenie przykładane jest również zgodnie z wytycznymi Eurokodu, według wzoru:

$$F = c_s \sum_{i=1}^n (A_i c_{f,i} q_i) \quad (2)$$

w którym q oraz c_f są przyjęte zgodnie z normą wiatrową [10], zaś współczynnik miejsca c_s na podstawie norm [8,9], jako że jest parametrem specyficznym dla tych norm. Pole na które oddziałuje wiatr A_i jest zastąpione przez wymiar poprzeczny D_i . W przypadku norm rusztowaniowych obciążenie wiatrem należy przykładać oddzielnie dla dwóch kierunków – prostopadłego i równoległego do konstrukcji. W przypadku pierwszym brane są pod uwagę elementy wymienione wcześniej, w przypadku drugim tylko słupki ramek rusztowania i stężenia jako wystawione na oddziaływanie wiatru w tym kierunku. Przyjęto podział wysokości rusztowania na pięć poziomów, dla których może występować różne obciążenie wiatrem.

8. Każde rusztowanie jest modelowane w programie MES jako układ składający się z elementów prętowych (wszystkie elementy konstrukcyjne) oraz płytowych (pomosty) o zastępczej sztywności. W trakcie badań terenowych prowadzone są pomiary geodezyjne, które określają dokładne położenie w przestrzeni węzłów rusztowania. W modelu MES uwzględniona jest rzeczywista geometria konstrukcji. Weryfikacja poprawności przyjęcia modelu MES jest przeprowadzana na podstawie pomiarów przyspieszeń drgań wymuszonych w różnych lokalizacjach i kierunkach. Do zweryfikowanego modelu MES rusztowania przyłożone jest obciążenie wiatrem oszacowane na podstawie badań oraz w celach porównawczych obliczone według Eurokodu.

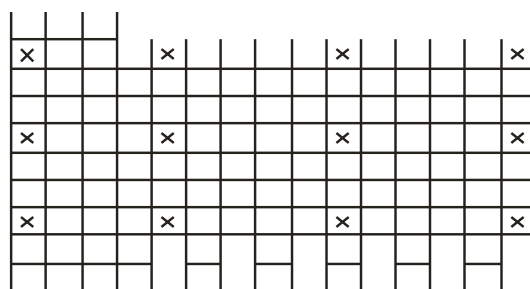
4. SZACOWANIA OBCIĄŻENIA WIATREM NA PRZYKŁADZIE BADAŃ IN-SITU KONKRETNEGO RUSZTOWANIA

Wybrane wyniki badań przedstawiono na przykładzie rusztowania wzniesionego w Warszawie, na którym pomiary prowadzono w dniach 22-28 sierpnia 2016 r. Rusztowanie ustawione było przy południowo-wschodniej elewacji dużego budynku biurowego, w terenie zabudowanym. Budynek miał konstrukcję szkieletową, o współczynniku zwartości oszacowanym na 0,3. Rusztowanie zbudowane było z 16 ram i 8 pełnych pomostów (Rys. 2).

Pomiary prowadzone były w 12 punktach (Rys. 3), o godzinach 8., 11., 14. i 17. przez pięć dni (pominięto dwa pomiary w związku z niekorzystnymi warunkami pogodowymi). Przykładowy przebieg pojedynczego pomiaru obydwu składowych prędkości wiatru pokazano na Rys. 4.



Rys. 2. Widok rusztowania
Fig. 2. View of the scaffolding

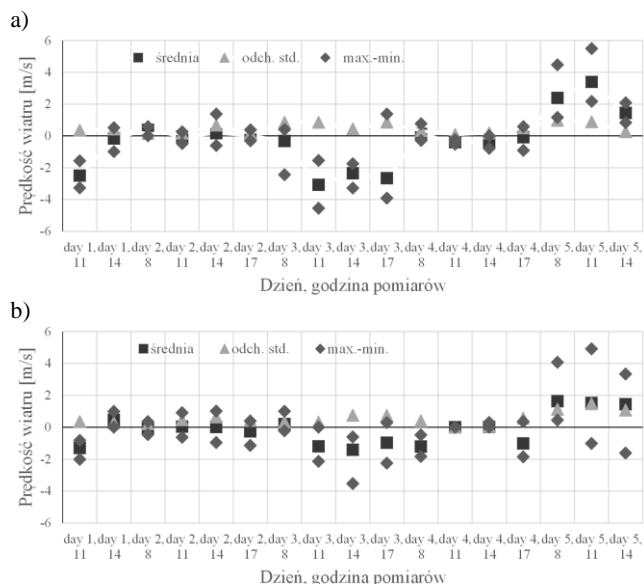


Rys. 3. Schemat rusztowania z punktami pomiarowymi
Fig. 3. Scheme of the scaffolding with measurement points

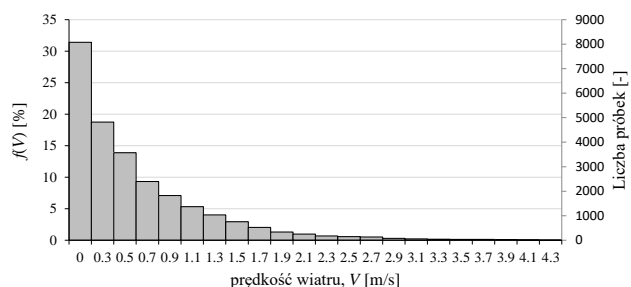


Rys. 4. Jednominutowy zapis składowych prędkości wiatru
Fig. 4. One-minute measurements of wind speed components

Statystyki prędkości wiatru: prędkość średnią, odchylenie standardowe oraz zakres porywów wiatru pokazano na Rys. 5, na przykładzie punktu zlokalizowanego w prawym górnym rogu rusztowania. Rozkład prawdopodobieństwa wartości bezwzględnych średnich prędkości jednosekundowych wyznaczony na podstawie wszystkich pomiarów przeprowadzonych w ciągu 5 dni, skomasowanych dla obydwu kierunków wiatru, obejmujących łącznie 25247 wartości pokazano na Rys. 6.



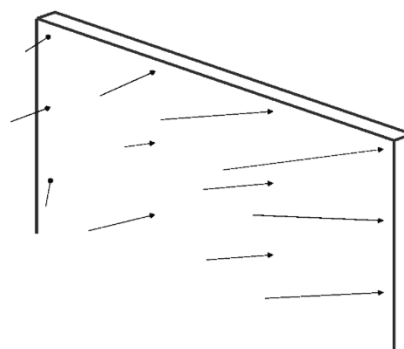
Rys. 5. Charakterystyki prędkości wiatru
Fig. 5. Characteristics of the wind speed



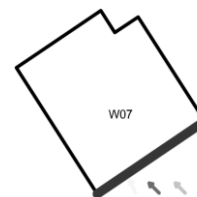
Rys. 6. Rozkład prawdopodobieństwa prędkości wiatru
Fig. 6. Probability distribution of the wind speed

Na podstawie analizy parametrów wiatru, w poszczególnych punktach pomiarowych wybrane zostało obciążenie o maksymalnych wartościach oraz o rozkładzie średnich kierunków wiatru zgodnym z przewidywaniami. Rozkład prędkości wiatru, a więc i oddziaływania wiatru (zgodnie ze wzorem 1) w najbardziej niekorzystnej konfiguracji – zdaniem autorów – miał miejsce piątego dnia o godzinie 11 (Rys. 7). W tym czasie prędkość średnia 10-minutowa na najbliższej stacji meteorologicznej była skierowana względem fasady budynku tak, jak przedstawiono na Rys. 8. Opracowano model MES konstrukcji rusztowania, który pokazany jest na Rys. 9. Model odzwierciedla rzeczywistą geometrię konstrukcji przyjętą na podstawie pomiarów geodezyjnych przeprowadzonych na placu budowy. W oparciu o przedstawioną powyżej procedurę, przyjęto obciążenie wiatrem przyłożone do elementów rusztowania, jak to opisano w punkcie 3. Fragment rusztowania z przy-

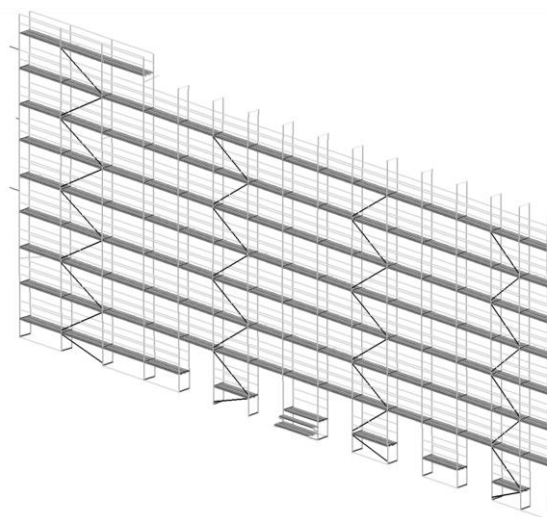
łożonym obciążeniem ciągłym oszacowanym na podstawie pomiarów pokazano na Rys. 10.



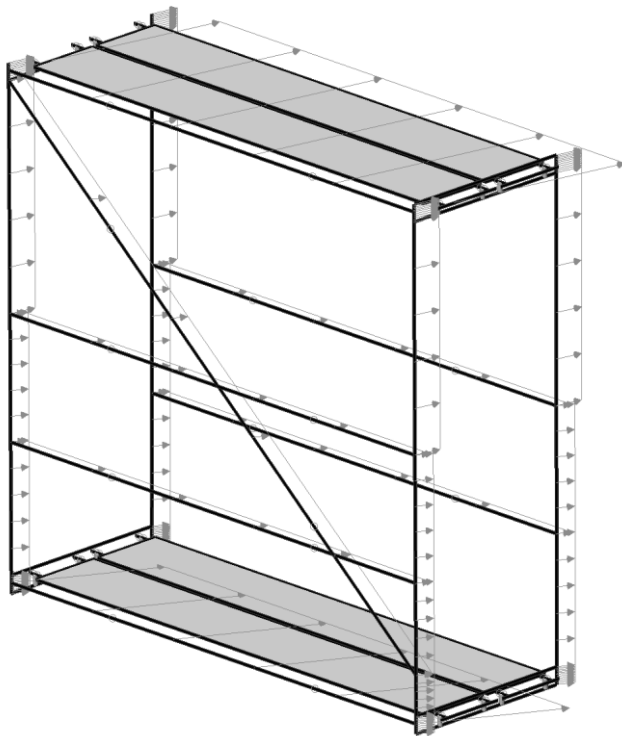
Rys. 7. Wektory wypadkowej prędkości wiatru
Fig. 7. Directions of wind speed vectors



Rys. 8. Kierunki prędkości 10-minutowej na stacji meteorologicznej (godzina 8, 11, 14)
Fig. 8. Directions of 10-minute mean wind speed at the weather station (8 a.m., 11 a.m., 2 p.m.)



Rys. 9. Model MES konstrukcji rusztowania
Fig. 9. FEM model of the scaffolding



Rys. 10. Fragment modelu MES rusztowania z obciążeniem wiatrem

Fig. 10. Part of the FEM model of the scaffolding with wind load forces

5. WNIOSKI

W pracy pokazano przykładowe wyniki badań prowadzonych w skali rzeczywistej na rusztowaniach fasadowych. Zaproponowano metodę szacowania obciążenia wiatrem na podstawie pomiarów anemometrem wiatrakowym, wykonywanych w wybranych punktach rusztowania. Wyniki prędkości wiatru na rusztowaniu odniesione zostały do najbliższej stacji meteorologicznej i przeliczone na prędkości projektowe. Wyznaczone obciążenia przyłożono do modelu MES rusztowania. Proponowany sposób, mimo obciążenia możliwym błędem, może służyć do szacowania obciążenia wiatrem konstrukcji rusztowania. Odzwierciedlone zostało rzeczywiste oddziaływanie wiatru, ponieważ pomiary odbywają się w obszarze rusztowania – w środku pomostu, na wysokości ok. 1,7 m, a więc prędkości zmierzone w wybranych punktach mogą zostać przyporządkowane do czterech najbliższych słupków rusztowania. Przybliżenie obciążenia wiatrem jest zapewne poprawne w przypadku napływu wiatru na fasadę budynku, przy której stoi rusztowanie. Wówczas jako wartości referencyjne można zastosować prędkości 10-minutowe pozyskane z najbliższej stacji meteorologicznej, gdyż kierunki są w większości przypadków zgodne. W przypadku napływu wiatru zza budynku – rusztowanie znajduje się w śladzie

aerodynamicznym budynku, czyli w obszarze niestabilności spowodowanych odrywającymi się z krawędzi wirami. Wtedy korzystniejsze jest odniesienie pomiarów do anemometru zainstalowanego w obszarze przepływu niezaburzonego, np. odpowiednio wysoko na dachu budynku.

ESTIMATION OF WIND ACTION ON SCAFFOLDING BASED ON IN-SITU MEASUREMENTS

Summary: The paper presents estimation of wind action on elements of facade scaffoldings based on in-situ tests. Wind action is determined from mean wind speeds measured with use of vane anemometers in 4-12 locations on the scaffolding. Measurements in particular locations have been made in the middle of the span and on the height of 1.7 m. The procedure of assuming static wind action on the basis of in-situ data about wind speed components has been proposed. The application of the procedure has been demonstrated on the example of façade scaffolding. Determined wind load has been applied to the scaffolding which had been modelled in FEM system.

Literatura

- [1] Błazik-Borowa E., Szer J. *The analysis of the stages of scaffolding "life" with regard to the decrease in the hazard at building works*. Archives of Civil and Mechanical Engineering 15 (2015) 516-524
- [2] Whitaker S.M., Graves R.J., James M., McCann P. *Safety with access scaffold: development of a prototype decision aid based on accident analysis*. Journal of Safety Research 34 (2003) 249-261
- [3] Bellamy L.J., *Exploring the relationship between major hazard, fatal and non-fatal accidents through outcomes and causes*. Safety Science 71 (2015) 93-103
- [4] Beale R.G., Godley M.H.R. *Numerical modelling of tube and fitting access scaffold systems*. Advanced Steel Construction 2(3) (2006) 199-223
- [5] Hu C.M., Ge Z., Wang J. *Research on ultimate bearing capacity of coupler steel tube falsework with initial defect*. Advanced Material Research 163-167 (2011) 32-35
- [6] Peng J.L., Yen T., Lin I., Wu K.L., Chen W.F. *Performance of scaffold frame shoring under pattern loads and load paths*. Journal of Construction Engineering and Management 123(2) (1997) 138-45
- [7] Pieńko M, Błazik-Borowa E. *Numerical analysis of load-bearing capacity of modular scaffolding nodes*. Engineering Structures 48 (2013) 1-9
- [8] PN-EN 12810-1:2010. *Rusztowania elewacyjne z elementów prefabrykowanych – część 1: Specyfikacje techniczne wyrobów*

- [9] PN-EN 12810-2:2010. *Rusztowania elewacyjne z elementów prefabrykowanych – część 2: Specjalne metody projektowania konstrukcji*
- [10] PN-EN 1991-1-4. Eurokod 1. *Oddziaływania na konstrukcje. Oddziaływania wiatru*
- [11] Wang F., Tamura Y., Yoshida A. *Wind loads on clad scaffolding with different geometries and building opening ratios*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 120 (2013) 37-50
- [12] Wang F., Tamura Y., Yoshida A. *Interference effects of a neighboring building on wind loads on scaffolding*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 125 (2014) 1-12
- [13] Irtaza H., Beale R.G., Godley M.H.R. *A wind-tunnel investigation into the pressure distribution around sheet-clad scaffolds*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 103 (2012) 86-95
- [14] Jamińska P. *Analiza działania wiatru na układ budynek z rusztowaniem*. Budownictwo i Architektura 12(2) (2013) 111-118
- [15] Jamińska P., Błazik-Borowa E., Lipecki T. *CFD study on wind action on building-scaffolding system*. 6th International Symposium on Computational Wind Engineering, Hamburg, Germany, 2014
- [16] Durst C.S. *Wind speed over short period of time*. The Meteorological Magazine 89 (1960) 181-186
- [17] Ashcroft J. *The relationship between the gust ratio, terrain roughness, gust duration and the hourly mean wind speed*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 53 (1994) 331-355
- [18] Harper B.A., Kepert J.D., Ginger J.D. *Guidelines for converting between various wind averaging periods in tropical cyclone conditions*. World Meteorological Organization, 2010, Switzerland
- [19] ESDU 83045: *Strong winds in the atmospheric boundary layer. II: Discrete gust speeds*. Engineering Science Data Unit, London 2002

Artykuł powstał w ramach projektu NCBiR nr. PBS3/A2/19/2015 zatytułowanego „Model oceny ryzyka wystąpienia katastrof budowlanych, wypadków i zdarzeń niebezpiecznych na stanowiskach pracy z wykorzystaniem rusztowań”.