

Spis treści

Marek J. CIAK

Termokinetyczne aspekty prognozowania efektywności domieszek do betonu
Termokinetic aspects of predicting the efficiency of concrete admixtures..... 129

Tadeusz CHYŻY, Monika MACKIEWICZ

Koncepcja i zastosowanie specjalnych jednowymiarowych elementów skończonych
Conception and application of special onedimensional finite elements..... 135

Walery JEZERSKI, Nataljya KUZNECOVA

Zastosowanie odpadów produkcji płyt cementowo-wiórowych do wytwarzania kompozytów cementowych
Application of wastes from chip-cement board production in cement composites..... 141

Magdalena NAKIELSKA, Krzysztof PAWŁOWSKI

Komin słoneczny jako przykład pasywnego systemu chłodzenia budynku
Solar chimney as example of passive cooling system in building..... 149

Jerzy OBOLEWICZ

Koordinacja budowlanego procesu inwestycyjnego
Coordination of building investment process..... 153

Krzysztof PAWŁOWSKI, Magdalena NAKIELSKA

Analiza parametrów fizykalnych ścian zewnętrznych i ich złączy z zastosowaniem współczesnych materiałów termoizolacyjnych
The analysis of physical parameters of external walls and their joints regarding the use of modern heat insulating materials 165

Daniel PRZYWARA, Adam RAK

Szacowanie kosztów robocizny produkcyjnej harmonogramu na tle jego opóźnień czasowych
Evaluation of schedule labour costs in relation to production delays..... 171

Elżbieta SZAFRANKO

Możliwości wykorzystania analizy wielokryterialnej w procesie inwestycyjno-budowlanym
Possibility of using multi-criteria analysis in the investment process 179

Dmitry ZHDANOV, Wyacheslav ULASEVICH

Nonlinear analysis method for arch-shaped shell roofs made of cold-formed steel profiles..... 187

Abstracts Vol. 7 No. 3

Marek J. CIAK

Termokinetic aspects of predicting the efficiency of concrete admixtures

Admixtures are significant in modern concrete technology. However, their effective use is very often difficult due to the complex mechanism of their influence on the main stages, such as: adsorption, dissolution, chemical reactions and others. The study of these processes clearly indicates that regardless of the admixture mechanisms of interactions, they all influence the kinetic course of these processes and thereby the intensity and magnitude of the thermal effects. Based on the studies the basic assumptions and criteria for assessing the effectiveness of thermokinetic admixtures have been developed.

Tadeusz CHYŻY, Monika MACKIEWICZ

Conception and application of special onedimensional finite elements

The conception of special finite elements for analysis of structures with variable stiffness areas is presented in the paper. The elements are called as a multi-area elements and their implementation in form of simple one-dimensional elements is presented. The application of these special elements helps to reduce the number of finite elements (unknowns) and thereby to reduce the computational calculation time, compared with standard FEM solution. The conception is based on the assumption that area of the structure with different stiffness and geometrical parameters described by a single element. The stiffness matrix for multi-area element is determined in explicit form by the summation of the stiffness matrices of component sub-areas included in the finite element. Therefore the area of the finite element is divided into rectangular sub-areas with various geometric and stiffness parameters. In order to confirm the accuracy of the presented conception assumptions, comparative analysis was made and potential area of application for one-dimensional special elements were indicated.

Walery JEZERSKI, Nataljya KUZNECOVA

Application of wastes from chip-cement board production in cement composites

The paper presents the experimental results of the effect of addition of wastes from chip – cement board production on mechanical properties of cement composites. In accordance with the intended objective, compressive strength (answer Y_1) and the bending strength (answer Y_2) of cement mortar specimens were tested. The variable parameters were: cement contents (factor z_1), natural sand contents (factor z_2) and waste contents (factor z_3). Local symplex planning with limited variation range of the factors was applied in the experiment. Based on the research results, mathematical models of the analyzed dependencies were developed. Proportions between cement, natural sand and wastes were determined. It gave a starting point in determining the use of wastes in the production of cement composites..

Magdalena NAKIELSKA, Krzysztof PAWŁOWSKI

Solar chimney as example of passive cooling system in building

Nowadays, searching new solutions is a worldwide trend in creating buildings. Those solutions enable a comfortable use of building structures in harmony with natural environment and ensure reducing energy consumption. The article presents the issues connected with the ventilation of building structures which do not generate a rise of the maintenance costs in building. Based on the available literature, some exemplary solutions that make it possible to reduce the temperature in rooms in a way other than by installing air conditioning systems were shown. The description of a research stand and conducted research, confirming the legitimacy of using a solar chimney in order to intensify the air exchange in a room in parallel with a night ventilation of the room in the summer time, were presented.

Jerzy OBOLEWICZ

Coordination of building investment process

Practice resulting from the implementation of the construction investment process shows that coordination process becomes necessary. Investors more and more often use the so-called institutions of substitute investor, entrusting a portion or all of the duties related to the preparation, conducting and coordination of actions of participants of the investment process. The detailed definition of the scope entrusted to the inspector substitution activities requires identification of all activities needed to carry out the planned investment. This article reviews the literature on structural elements of the process and the organizational model of the construction investment process, as a tool for coordination with the level of the investor, was proposed.

Krzysztof PAWŁOWSKI, Magdalena NAKIELSKA

The analysis of physical parameters of external walls and their joints regarding the use of modern heat insulating materials

In connection to the introduction in 2014 of new and stringent heat and humidity requirements in Poland, making correct and detailed calculations and analyses is becoming extremely important and thus, those calculations should form the basis of choosing structural and insulating solutions. The construction market has been offering a lot of modern solutions for heat insulating materials which are slowly replacing traditional solutions. Therefore, there is a need for developing the guidelines that would support designing in accordance with new heat and humidity requirements regarding the application of professional computer programmes. The report presents the characteristics of technical parameters of modern heat insulating materials and model structural and material solutions for external walls and their joints. The calculations of physical parameters of external wall barriers and their joints have been made including heat and humidity requirements as well as the achievement of the low-energy standard of a building. Owing to the calculations that have been made, the design guidelines have been established within the scope of correct material system development of external wall barriers and their joints with reference to heat and humidity.

Daniel PRZYWARA, Adam RAK

Evaluation of schedule labour costs in relation to production delays

Rational management of renewable resources means of production is the basic criterion for assessing the quality of the schedule, both in terms of generated production costs and labour time involved in production and equipment. The above-mentioned factors, in addition to the built-in materials, constitute direct price-setting elements. The comparison of labour costs incurred can be applied in case of less than planned efficiency of work, organizational disruptions affecting the duration of processes, or the distribution of different wages for working hours. The article attempts to estimate the changing costs of production labour, which is prone to periodic fluctuations in the number of independent work teams, appointed to overcome the unplanned delays. Tests were carried out using the earned value method.

Elżbieta SZAFRANKO

Possibility of using multi-criteria analysis in the investment process

The process of investment is extremely complex and activities related to its implementation can be divided into several stages. The preparation stage is the most important of them. At the planning stage a number of decisions concerning, among others choice of location, choice of materials and technological solutions should be taken into account. The choice of the final solution may depend on many factors and making a decision in a direct way is extremely difficult. In complicated cases, it is necessary to support the use of mathematical methods. Due to the multiplicity of the considered factors methods of multi-criteria analysis are particularly useful. The article presents the possibility of supporting different decision problems using multi-criteria analysis. The procedure is exemplified by the analysis of the choice of location of the residential project, variants of road investment and choice of materials and construction solutions in the building object. The analysis of different methods shows their usefulness in cases of investment analysis of various features and functions.



Dmitry ZHDANOV, Wyacheslav ULASEVICH

Nonlinear analysis method for arch-shaped shell roofs made of cold-formed steel profiles

The paper deals with the problem of static structural analysis of shallow arch-shaped shell roofs assembled from curved cold-formed steel profiles. A nonlinear analysis procedure has been proposed to estimate the stress-strain state of such roof structures. It is based on two interrelated analysis models developed for the purpose – namely, an action effects model used for the static analysis of deformational behaviour of shallow arch-shaped structural systems, and a resistance model, for strength analysis of cold-formed steel profiles.

TERMOKINETYCZNE ASPEKTY PROGNOZOWANIA EFEKTYWNOŚCI DOMIESZEK DO BETONU

Marek J. CIAK*

Wydział Geodezji, Inżynierii Przestrzennej i Budownictwa, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie,
ul. Michała Oczapowskiego 2, 10-719 Olsztyn

Streszczenie: Domieszki odgrywają znaczną rolę we współczesnej technologii betonu. Efektywne ich wykorzystanie jest jednak bardzo często utrudnione ze względu na złożony mechanizm oddziaływania na podstawowe stadia, takie jak: adsorpcja, rozpuszczanie, reakcje chemiczne i inne. Badania tych procesów jednoznacznie wskazują, że niezależnie od mechanizmów oddziaływania domieszek, wszystkie one wpływają na zmiany kinetyki przebiegu tych procesów, a tym samym na intensywność i wielkość efektów cieplnych. W oparciu o przeprowadzone badania opracowano podstawowe założenia i kryteria termokinetycznej oceny efektywności domieszek.

Słowa kluczowe: cement, domieszki, kompatybilność, ciepło hydratacji, kryteria efektywności.

1. Wprowadzenie

Betony nowej generacji są efektem rozwoju wiedzy technicznej, a jedną z podstawowych zasad wytwarzania takich betonów jest wykorzystanie efektywnych domieszek chemicznych i mineralnych dodatków (Neville, 2012; Kucharska, 2000).

Wielu autorów podkreśla, że osiągnięcie i utrzymanie na zadanym poziomie oczekiwanych efektów technologicznych w wielu przypadkach jest determinowane kompatybilnością systemu cement/domieszka. Niedocenianie czynnika kompatybilności, jako jednego z podstawowych przejawów technologicznej efektywności domieszek, może doprowadzić do negatywnych następstw (szybka utrata urabialności przez mieszankę, segregacja, opóźnienie przyrostu wytrzymałości) i obniżenia wskaźników ekonomicznych zastosowanej technologii. Kompatybilność cement/domieszka badana jest między innymi w powiązaniu składu i struktury domieszek (na przykład budowa i masa cząsteczkowa oligomerów) z zawartością w cementach C₃A, gipsu, alkaliów, stopniem jego rozdrobnienia (Aïtcin, 2000; Grabiec, 2001; Jolicoeur i Simard, 1998; Kucharska, 2000; Kurdowski, 2010b).

Trafny dobór domieszek i dodatków do betonu jest jednym z czynników decydujących o jakości mieszanki a po jej stwardnieniu – betonu. Problem ten szczególnie wyraźnie przejawia się w przypadku stosowania nowych superplastyfikatorów, na przykład na bazie karboksylowego estru akrylowego czy eteru polikarboksylowego i innych. Stosowanie tego typu domieszek

pozwała na obniżenie W/C mieszanki betonowej nawet o 40%. Mechanizm ich oddziaływania jest niezwykle złożony i nadal właściwie pozostaje w sferze hipotez (Mierzwa i Lenart, 1998; Comparet i in., 2000).

Mimo postępów nauki nie dopracowano się wystarczającego teoretycznego uzasadnienia problemu kompatybilności – przyczyny tego stanu należy szukać w złożoności procesów zachodzących podczas wiązania i twardnienia, których interpretację komplikuje wielokomponentowy skład cementu i domieszek. Ten fakt, w znacznej mierze, uzasadnia wykorzystanie fenomenologicznego podejścia do prognozowania efektywności domieszek stosowanych w celu racjonalnej modyfikacji betonu.

Formowanie reologicznych i mechanicznych właściwości systemów cementowych jest rezultatem złożonych procesów fizyko-chemicznych (reakcji na granicy faz, powstawania zarodków krystalizacji, dyfuzji, itp.) wykazujących wyraźnie energetyczny charakter. Charakter zależności heterogennych reakcji i zmiany stopnia hydratacji cementu są ściśle związane z kinetyką zmian właściwości systemów cementowych i w wielu przypadkach okazuje się zbieżny z zależnościami termokinetycznymi (Mchedlov-Petrosjan i in., 1984; Usherov-Marshak, 2002; Usherov-Marshak i in., 2003).

Domieszki wykorzystywane w technologii betonu, niezależnie od mechanizmu ich działania, zmieniają kinetykę hydratacji, szczególnie wczesnej (poprzez wpływ na elementarne stadia – zmaczanie, adsorpcję, reakcje chemiczne, krystalizację, itd.), co odzwierciedla się

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: mciak@uwm.edu.pl

w intensywności i czasie trwania mierzonych efektów cieplnych. Pozwala to na przyjęcie tezy, że kinetyczne, w tym i termokinetyczne, charakterystyki wczesnych stadiów hydratacji rozpatrywane z fizyko-chemicznego i fenomenologicznego punktu widzenia mogą stanowić podstawę oceny ich efektywności. Tym bardziej, że pomiary ciepła hydratacji wykorzystywane były w badaniach nad mechanizmami modyfikacji, wyjaśnieniem związków pomiędzy procesami hydratacji a zmianami właściwości modyfikowanych systemów cementowych, a także badaniach kompatybilności cementów i domieszek (Nocuń-Wczelik i Maziarz, 2012; Uszerow-Marszak, 2000; Jolicoeur i Simard, 1998).

Ten ostatni kierunek rozwija się dostatecznie szybko w związku z rozwojem technologii betonów typu HPS, SCC, RPC. Został nawet opracowany dokument normalizacyjny ASTM C 1679 *Practice for Measuring Hydration Kinetics of Hydraulic Cementitious Mixtures Using Isothermal Calorimetry*. Jednak możliwości analizy termokinetycznej nie są w tym przypadku w pełni. Częściowo z powodu braku termo-kinetycznych kryteriów kompatybilności domieszek i cementów.

2. Metodyka i wyniki badań

Podstawową bazą prowadzonych badań była analiza termokinetyczna, oparta na prawach termodynamiki (Gibbsa, Kirchhoffa, Arrheniusa) i kalorymetrii, stanowiących zbiór metod i środków pomiaru ilości ciepła i efektów cieplnych towarzyszących procesom, na przykład podczas formowania struktury w systemach zdyspergowanych.

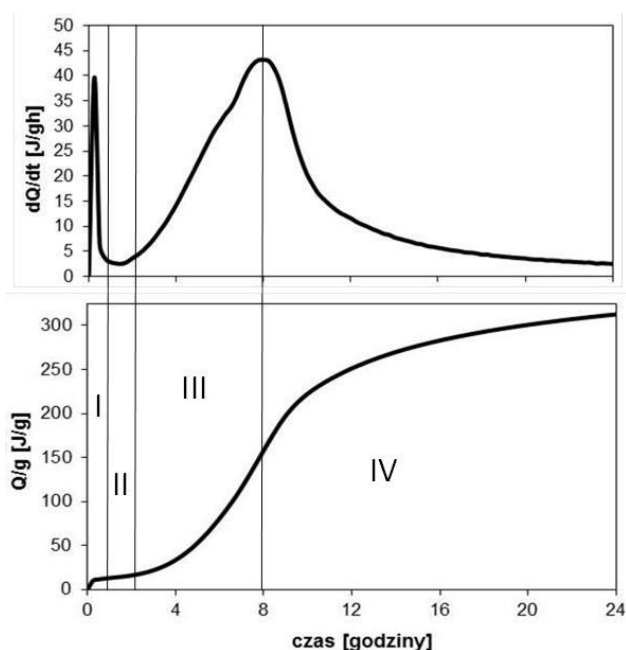
Podstawowym założeniem przyjętej metodyki, było wyznaczenie granicznych stadiów w zależnościach szybkości $dQ/d\tau = f(\tau)$ i ilości wydzielonego ciepła $Q = f(\tau)$ dla formalnego i konceptualnego opisanie i modelowania procesu hydratacji w celu oceny efektywności wpływu domieszek.

Teoretycznie, proces hydratacji opisywany jest jako szereg następujących po sobie elementarnych stadiów na bazie podstawowych praw rozpuszczania, krystalizacji i dyfuzji (Kurdowski, 2010a). Jednak ilościowe opisanie procesu hydratacji stanowi zadanie złożone – wymaga osiągnięcia takiego poziomu wiedzy, przy której łańcuch hipotez opisujących ilościowo kolejne stadia pozbawiony będzie „przerw” i może być opisany matematycznie we wszystkich ogniwach.

Kinetyczne zależności $dQ/d\tau = f(\tau)$ i $Q = f(\tau)$, integralnie odzwierciedlając rozwój wczesnych stadiów hydratacji pozwalają na wydzielenie, na fenomenologicznym poziomie, okresów z charakterystycznym spowolnieniem lub przyspieszeniem reakcji (rys. 1):

- I. początkowy, tak zwany przedindukcyjny (wzrost wydzielania ciepła determinowany reakcją C_3A , procesami zwilżania, tworzeniem ettryngitu, itd.),
- II. indukcyjny (blokada dyfuzji, zarodkowanie, itd.),
- III. przyspieszenia hydratacji (intensyfikacja hydratacji C_3S , przekształcenie ettryngitu, itd.),

IV. spowolnienia szybkości hydratacji i okres jej wygasania.



Rys. 1. Charakterystyczne okresy wczesnych stadiów hydratacji cementów

Skład domieszek, a szczególnie superplastyfikatorów, wpływa nie tylko na intensywność hydratacji poszczególnych minerałów klinkierowych, ale wpływają także wybiórczo na poszczególne stadia. Uzyskane dane są zgodne z koncepcją kinetycznej selektywności domieszek (Uszerow-Marszak, 2000) i świadczą o konieczności uwzględnienia wybiórczego wpływu domieszek przy ocenie kompatybilności z cementami.

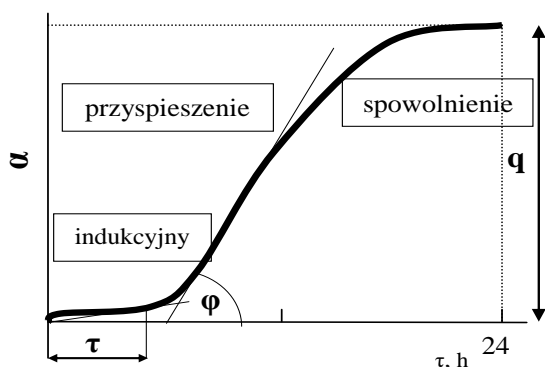
Identyfikacja rezultatów przy wykorzystaniu analizy termokinetycznej jest trudna ze względu na złożony charakter jednocześnie zachodzących i powiązanych ze sobą przemian. Jednak relacja efektów technologicznych z mechanizmami wpływu domieszek pozwala na ilościową, chociaż na poziomie fenomenologicznym, ocenę przeprowadzoną w oparciu o wartości efektów egzotermicznych (adsorpcji, długości okresów oddziaływania, uwarunkowanych hamowaniem lub przyspieszaniem hydratacji).

Ocena szybkości i ilości ciepła wydzielonego podczas hydratacji w poszczególnych jej stadiach pozwala, w sposób uogólniony i z pozycji kinetyki, na prognozowanie także technologicznej efektywności domieszki, na przykład czas trwania okresu indukcyjnego jest związany z takimi efektami technologicznymi, jak: wydłużenie lub skrócenie czasu wiązania, skrócenie urabialności mieszanki betonowej, przyspieszenie lub spowolnienie wzrostu wytrzymałości wczesnej zaczynu cementowego.

Wykazane okresy wczesnej hydratacji opisano ilościowo parametrami termokinetycznymi (rys. 2). Wyznaczają je charakterystyczne punkty na krzywych $Q = f(\tau)$ i $dQ/d\tau = f(\tau)$, określane jako punkty zmiany znaku zależności (1) (Ciak, 2015; Mchedlov-Petrosjan, 1984).

$$R(t) = Q(t) - \frac{1}{t} \int_0^t Q dt \quad (1)$$

gdzie: $R(t)$ jest badaną wielkością, a $Q(t)$ jest ciepłem hydratacji wydzielonym w czasie t .



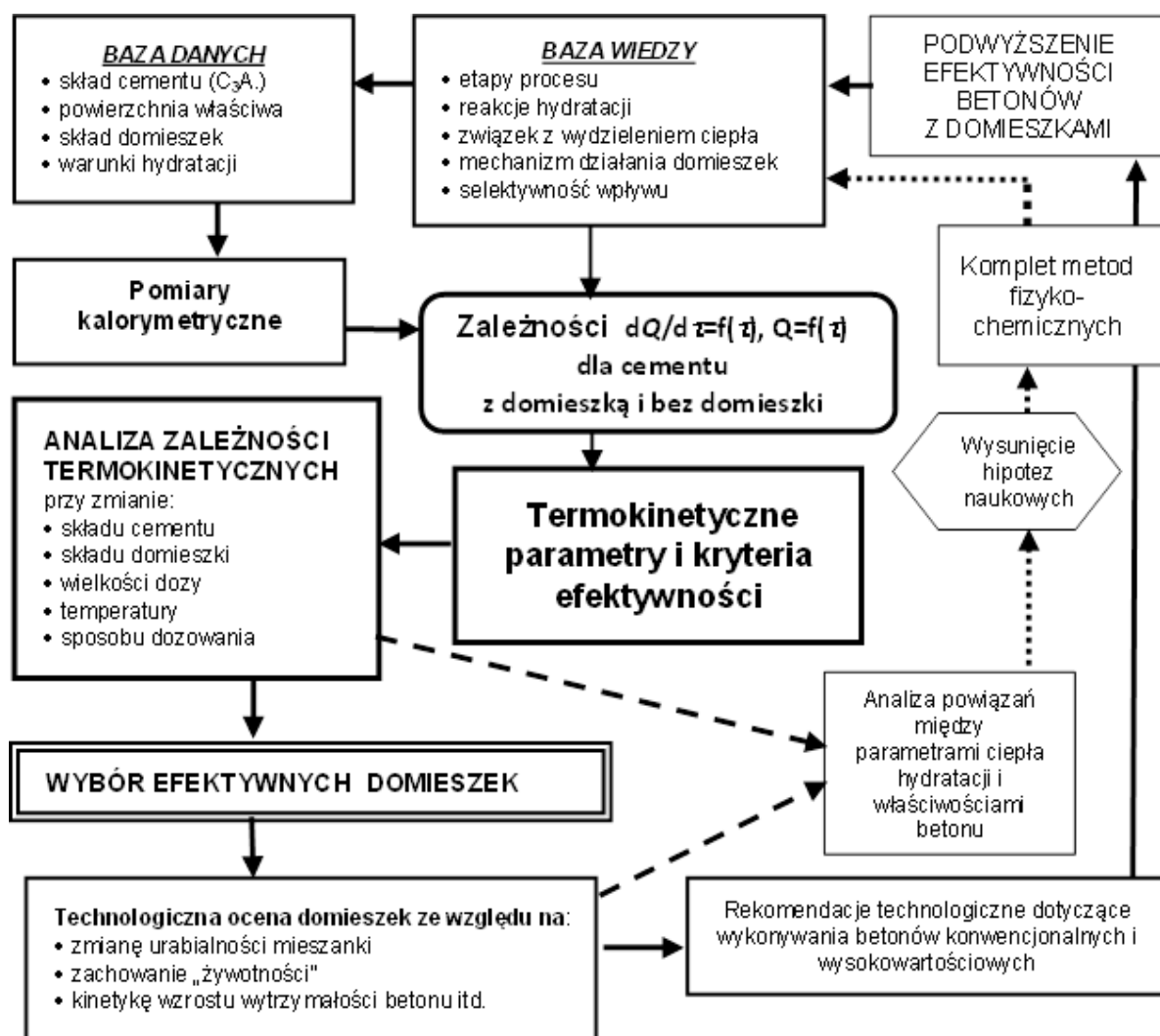
Rys. 2. Zasada wyznaczania parametrów termokinetycznych na krzywej ciepła hydratacji

Długość okresu indukcyjnego na krzywej $dQ/dt = f(\tau)$ określana jest w punkcie przejścia od bardzo wolnego do szybkiego przebiegu reakcji. Czas trwania okresu

przyspieszonego – w momencie zmiany szybkości procesu od szybkiego do wolnego – odzwierciedla okres najbardziej intensywnego przebiegu reakcji.

Termokinetyczne parametry charakteryzują czas trwania okresu indukcyjnego τ_{ind} , wielkość maksymalnego efektu egzotermicznego V_{max} i czasu $T(V_{max})$ jego wystąpienia, a stopień hydratacji jest mierzony sumarycznym ciepłem wydzielonym w ciągu 24 godzin hydratacji Q_{24} . Parametry te są oczywiście indywidualne dla różnych zestawów. Uzyskanie efektywnych informacji o oddziaływaniu pomiędzy cementami i domieszkami wymagało przeprowadzenia badań według algorytmu przedstawionego na rysunku 3.

Za kryteria efektywności wpływu domieszek przyjęto stosunek termokinetycznych parametrów hydratacji cementu z domieszką i odpowiednich wartości zarobów kontrolnych (cementu bez domieszki). Wykorzystywane są one w celu fizyko-chemicznej interpretacji efektów modyfikacji (z uwzględnieniem wydzielonych stadiów hydratacji) i porównania oddziaływania różnych domieszek i cementów w celu wyboru optymalnych warunków modyfikacji (Ciak, 2003; 2015).



Rys. 3. Algorytm wyznaczania efektywności domieszek w oparciu o termokinetyczne parametry i kryteria efektywności

Analiza zbioru zależności $dQ/d\tau = f(\tau)$ i $Q = f(\tau)$ wykazała, że wskaźniki termokinetyczne charakteryzujące intensywność, czas trwania i stopień przemian początkowego etapu twardnienia:

- τ – długość okresu indukcyjnego,
- φ – maksymalna wartość szybkości wydzielania ciepła,
- q – ciepło po 24 godzinach hydratacji.

w dostatecznym stopniu odzwierciedlają wpływ domieszek na efekt modyfikacji oraz na uzyskane efekty technologiczne.

Z powyższych wskaźników można wyznaczyć szereg kryteriów względnych, które wskazują na pozytywne lub negatywne zmiany $k_a = \alpha(A)/\alpha(C)$, osiągane w rezultacie wprowadzenia domieszki (D), w porównaniu do analogicznych wskaźników uzyskanych dla betonu wzorcowego (C) (Ciak, 2015):

- $k\{\tau\} = \tau^a/\tau^c$ – wydłużenie ($k\{\tau\} > 1$) lub skrócenie ($k\{\tau\} < 1$) okresu indukcyjnego;
- $k\{\varphi\} = \varphi^a/\varphi^c$ – przyspieszenie ($k\{\varphi\} > 1$) lub spowolnienie ($k\{\varphi\} < 1$) szybkości reakcji;

- $k\{q\} = q^a/q^c$ – zaawansowanie ($k\{q\} > 1$) lub zahamowanie ($k\{q\} < 1$) procesu.

Odzwierciedlając fenomenologiczne różnice w szybkości i stopniu przebiegu hydratacji, mogą one charakteryzować kompatybilność (lub jej brak) cementów i domieszek. Można wyróżnić aż 27 schematów wpływu domieszek ze względu na ich wpływ na kinetykę przebiegu reakcji. Najczęściej występujące przypadki przedstawiono w tabeli 1.

Im wartość k_q jest bliższa jedności, z tym większym prawdopodobieństwem można twierdzić, że szybkość hydratacji cementu z domieszką jest bliska szybkości hydratacji zarobu wzorcowego (bez domieszki). Pozwala to na twierdzenie o możliwej poprawie kompatybilności (systemu cement/domieszka) ze względu na przyrost wytrzymałości systemu cementowego. Okres indukcyjny w obecności tej domieszki wydłuża się, co pozwala sądzić o możliwym wydłużeniu „żywności” (okresu zachowania urabialności) mieszanki w porównaniu z mieszanką bez domieszki.

Tab. 1. Podstawowe schematy wpływu domieszek na kinetykę hydratacji cementów

Typ	Działanie	Schemat wpływu	Kryterium
Podstawowe			
I	Przyspieszające		$\tau_c < \tau_a$ $\varphi_c > \varphi_a$ $q_c > q_a$
II	Opóźniające		$\tau_c > \tau_a$ $\varphi_c < \varphi_a$ $q_c < q_a$
III	Neutralne		$\tau_c = \tau_a$ $\varphi_c = \varphi_a$ $q_c = q_a$
Złożone			
IV	Przyspieszenie z początkowym opóźnieniem		$\tau_c < \tau_a$ $\varphi_c > \varphi_a$ $q_c > q_a$
V	Opóźnienie z początkowym przyspieszeniem		$\tau_c > \tau_a$ $\varphi_c < \varphi_a$ $q_c < q_a$

Schematy wpływu opracowane na podstawie kryteriów termokinetycznych (Ciak, 2003, 2015) pozwalają na identyfikację i wybór domieszki ze względu na ich wpływ na kinetykę lub stopień hydratacji systemu. Umożliwiają zestawianie domieszek kompleksowych z uwzględnieniem wybranych schematów twardnienia odpowiadających kartom technologicznym produkowanych wyrobów i elementów. Zmiana zależności kinetycznych z jednego typu na drugi odzwierciedla zmianę charakteru oddziaływania domieszki, na przykład przy zamianie rodzaju cementu, co pozwala na prognozowanie kompatybilności systemu.

Uogólniona kinetyczna charakterystyka, tak zwany „bilans kryteriów” oddziaływania cementów i domieszek (nazwany indeksem kompatybilności) określana jest jako funkcja wartości kryteriów (2):

$$E_{C/D} = f(k_{\tau}; k_{\phi}; k_{\alpha}) \quad (2)$$

a postać funkcji dobierana jest w zależności od ustalonego schematu wpływu (Ciak, 2003).

Przeprowadzone badania wykazały dostateczną czułość termokinetycznych wskaźników i kryteriów efektywności na zmiany charakterystyk cementu.

Ocena kompatybilności cementów i domieszek została przeprowadzona w oparciu o parametry zależności $dQ/d\tau = f(\tau)$, $Q = f(\tau)$ i termokinetyczne kryteria efektywności domieszek przy uwzględnieniu zmiany rodzaju (składu) superplastyfikatorów, ich ilości, cementów o różnym składzie mineralnym, temperatury i sposobu dozowania (na przykład opóźnione). Uwzględnienie tych czynników jest ważne w technologii betonu ze względu na podniesienie efektywności superplastyfikatorów, w tym przy wydłużeniu okresu zachowania urabialności przez mieszanki betonowe z superplastyfikatorami.

Uzyskane dane potwierdziły stanowisko Batrakova i in. (1992) o celowości doboru domieszki z uwzględnieniem składu cementu, aby osiągnąć maksymalną efektywność domieszki w określonych technologiach.

Wydłużenie okresu indukcyjnego (tab. 2) przy dostatecznej szybkości wzrostu wytrzymałości cementu

Tab. 2. Zmiana kryteriów k_{α} (%) oceny efektywności domieszek

	Zawartość C_3A	Domieszka (0,5%)	Czas wystąpienia II efektu	Wartość efektu egzotermicznego		Okres indukcyjny	Ciepło po 24 h hydratacji
				I	II		
CEM I 42,5 HSR	1,8%	Grupa NSF	+15,4	-30,7	31,1	+7,5	-3,1
		Grupa PC	+53,8	-37,7	45,5	+31,3	-40,2
CEM I 42,5 R	10,7%	Grupa NSF	+33,3	-11,9	-18,6	+32,4	-6,2
		Grupa PC	+60,0	-12,7	-15,5	+55,5	-8,4

CEM I 42,5 HSR z niską zawartością C_3A w obecności superplastyfikatora na bazie polikarboksylatów (typu PC) może świadczyć o dłuższym zachowaniu urabialności przez mieszankę betonową (właściwość pożądana w technologii budownictwa monolitycznego). Z kolei CEM I 42,5 R z domieszką na bazie sulfonowanych polikondensatów naftaleno-formaldehadowych (typu NSF) wykazuje niższe wartości k_{τ} i wyższy wskaźnik k_{ϕ} , co predestynuje ten wariant w realizacji konstrukcji o wyższych wymaganiach dotyczących szybkości wzrostu wytrzymałości.

Połączenie superplastyfikatora z domieszką przyspieszającą stosowane jest w przypadkach konieczności uzyskania mieszanek ciekłych z wysoką urabialnością przy jednoczesnym dostatecznie szybkim naborze wytrzymałości wczesnej. W takim przypadku, przy doborze efektywnych domieszek kompleksowych, najbardziej odpowiednim schematem oddziaływania będzie schemat „początkowe opóźnienie z późniejszym przyspieszeniem” (Ciak, 2015).

W kombinacji superplastyfikatora z domieszką przyspieszającą na bazie azotanu wapnia działanie opóźniające cząstek powierzchniowo-aktywnych zostaje częściowo neutralizowane. Wartości termokinetycznych kryteriów efektywności oddzielnych domieszek znacznie różnią się od wartości uzyskanych w przypadku domieszek kompleksowych, a stopień zmian zależy od rodzaju cementu.

3. Podsumowanie

W oparciu o fenomenologiczną koncepcję selektywności wpływu domieszek chemicznych i dodatków mineralnych na procesy twardnienia spoiw zaproponowano sposób określenia efektywności (kompatybilności) domieszek i cementów, a także opracowano metodykę do jego realizacji. Na przykładzie kompatybilności różnych domieszek i cementów pokazano możliwości zaproponowanego sposobu oceny.

Literatura

- Aïtcin P.C. (2000). Cements of yesterday and today. Concrete of tomorrow. *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, Is. 9, 1349-1359.
- Batracov V.G., Kaprielov S.S., Scheinfeld A.V. (1992). Influence of different types of silica fume having varying silica content on the microstructure and properties of concrete. W: *Proceedings of the 4th International Conference "Fly Ash Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete"*, Istambul, 943-964.
- Ciak M. (2003). Calorimetric evaluation of the cement-admixture compatibility. W: *Proceedings of the 9th Conference on Calorim. and Thermal Analysis*, Zakopane, 92.
- Ciak M.J. (2015). Termokinetyczna Ocena Efektywności Domieszek w Technologii Betonu. *Astroprint*, Odessa (w języku rosyjskim).
- Comparet C., Nonat A., Pourchet S., Guicquero J. P., Gartner E., Mosquet M. (2000). Chemical interaction of di-phosphonate terminated monofunctional polyoxyethylene superplasticizer with hydrating tricalcium silicate. W: *Proceedings of the 6th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete*, Nice, France, 61-74.
- Grabiec A. (2001). Zagadnienia badawcze dotyczące domieszek upłynniających przedstawione na VI Międzynarodowej Konferencji na temat Superplastyfikatorów i Innych Domieszek Chemicznych do Betonu. *Cement Wapno Beton*, R. 6/68, Nr 5, 200-201.
- Jolicoeur C., Simard M.-A. (1998). Chemical admixture-cement interactions: phenomenology and physico-chemical concepts. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 20, Is. 2-3, 87-101.
- Kucharska L. (2000). Tradycyjne i współczesne domieszki do betonu zmniejszające ilość wody zarobowej. *Cement Wapno Beton*, R. 5/67, Nr 2, 46-61.
- Kurdowski W. (2010a). Chemia Cementu i Betonu. *Wyd. Nauk. PWN, SPB*, Warszawa-Kraków.
- Kurdowski W. (2010b). Inne spojrzenie na problem zgodności cementu z superplastyfikatorem. *Cement Wapno Beton*, R. 15/77, Nr 5, 296-305.
- Mchedlov-Petrosjan O.P., Ushero-Marshak A.V., Urzhenko A.M. (1984) Wydzielenie Ciepła Podczas Twardnienia Spoiw i Betonów. *Strojizdat*, Moskwa (w języku rosyjskim).
- Mierzwa J., Lenart M. (1998). Ocena efektywności działania domieszek na podstawie badań reologicznych zaczynów cementowych. W: *Materiały XVI Konferencji Naukowo-Technicznej „Beton i prefabrykacja”*, Jadwisin, t. 2, 329-336.
- Neville A. M. (2012). Właściwości Betonu. *Polski Cement*, Kraków.
- Nocuń-Wczelik W., Maziarz A., (2012). Wpływ wybranych domieszek na właściwości cementu portlandzkiego i portlandzkiego wieloskładnikowego. *Cement Wapno Beton*, R. 17/79, Nr 4, 225-232.
- Ushero-Marshak A.V. (2002). Kolorymetria Cementu i Betonu. *Wyd. Fakt*, Kharkov (w języku rosyjskim).
- Ushero-Marshak A.V., Ciak M.J., Zlatkovskij O.A. (2003). Kompatybilność cementów z domieszkami chemicznymi i dodatkami mineralnymi, cz. II Ocena ilościowa. *Cement i jego primienienie*, Nr 1. s. 38-40 (w języku rosyjskim).
- Ushero-Marshak A.W. (2000). Selektywność działania dodatków chemicznych na procesy twardnienia cementu. *Cement Wapno Beton*, R. 5/67, Nr 2. 61-64.

THERMOKINETIC ASPECTS OF PREDICTING THE EFFICIENCY OF CONCRETE ADMIXTURES

Abstract: Admixtures are significant in modern concrete technology. However, their effective use is very often difficult due to the complex mechanism of their influence on the main stages, such as: adsorption, dissolution, chemical reactions and others. The study of these processes clearly indicates that regardless of the admixture mechanisms of interactions, they all influence the kinetic course of these processes and thereby the intensity and magnitude of the thermal effects. Based on the studies the basic assumptions and criteria for assessing the effectiveness of thermokinetic admixtures have been developed.

Pracę wykonano na Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim w ramach tematu statutowego 16.610.001-300 „Optymalizacja materiałów, procesów technologicznych i inwestycyjnych w budownictwie oraz utylizacja surowców odpadowych w budownictwie”

KONCEPCJA I ZASTOSOWANIE SPECJALNYCH JEDNOWYMIAROWYCH ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

Tadeusz CHYŻY, Monika MACKIEWICZ*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 E, 15-351 Białystok

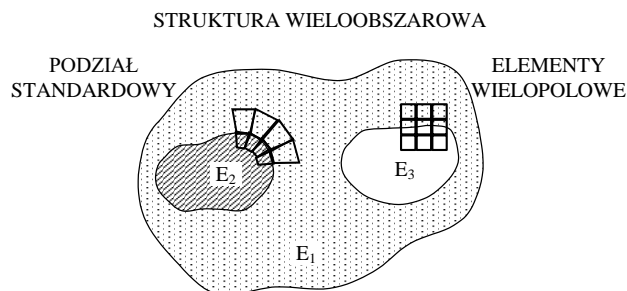
Streszczenie: W artykule została zaprezentowana koncepcja specjalnych elementów skończonych służących do analizy konstrukcji zawierających obszary o zmiennej sztywności. Elementy te określane są jako wielopolowe, a w referacie przedstawiono ich implementację w postaci najprostszyc elementóv jednowymiarowych. Zastosowanie specjalnych elementów wielopolowych przyczynia się do zmniejszenia liczby niewiadomych, a tym samym przyspieszenia czasu obliczeń w porównaniu do standardowego rozwiązania MES. Podstawowym założeniem koncepcji elementów wielopolowych jest możliwość opisanía fragmentóv konstrukcji o różniących się parametrach geometrycznych lub materiałowych jednym elementem. Macierz sztywności takiego elementu wyznaczana jest w sposób jawny poprzez sumowanie macierzy sztywności składowych podobszarów wchodzących w skład elementu skończonego. Obszar elementu skończonego jest więc dzielony na poszczególne podobszary, które mogą posiadać różne parametry geometryczno-sztywnościowe. W celu potwierdzenia poprawności przyjętych założeń wykonano analizy porównawcze oraz wskazano potencjalny obszar zastosowań jednowymiarowych elementów specjalnych w analizie osiadania podłoża gruntowego.

Słowa kluczowe: MES, elementy wielopolowe, całkowanie w podprzestrzeniach.

1. Wprowadzenie

W praktyce modelowania konstrukcji Metodą Elementóv Skończonev MES (Bathe, 1996; Zienkiewicz i in., 2005) niejednokrotnie zachodzi konieczność definiowania obszaróv o znacznie różniącej się charakterystyce sztywnościowej (różnice w parametrach materiałowych lub wymiarowych). Standardowo różniące się podobszary są wydzielane i opisywane oddzielnie odpowiednimi elementami skończonymi. Takie podejście mimo, że jest naturalne dla MES, często może być jednak obliczeniowo kosztowne (duża liczba elementóv skończonev), szczególnie dla materiałów o dużej niejednorodności.

Dlatego stwierdzono, że w uzasadnionych przypadkach obliczeniowych bardziej efektywnym rozwiązaniem może być zastosowanie elementóv skończonev, które mogą opisywać różniące się podobszary analizowanego continuum. Opisywany problem przedstawiono na rysunku 1, gdzie pomiędzy podobszarami E_1 i E_2 zastosowano standardową dla MES-u dyskretyzację, natomiast pomiędzy podobszarami E_1 i E_3 zastosowano elementy wielopolowe obejmujące różniące się podobszary.



Rys. 1. Ilustracja koncepcji elementóv wielopolowych

Koncepcja elementóv wielopolowych zakłada, że obszar konstrukcji o różnych parametrach sztywnościowo-geometrycznych opisuje się pojedynczym elementem. W związku z tym, elementy te mogą być przydatne w analizach wymagających zamodelowania konstrukcji wykonanych z materiałów niejednorodnych, gąbczastych, spienionych czy przewarstwionych, materiałów z inkluzjami, domieszkami lub z uszkodzeniami wewnętrznymi, a także materiałów perforowanych, itp. Szczególnie dotyczy to modeli trójwymiarowych 3D, gdzie standardowe podejście prowadzi do dużej liczby elementóv skończonev. Elementy wielopolowe pomagają wielokrotnie zmniejszyć liczbę niewiadomych, bez znaczącej utraty dokładności rozwiązania.

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: m.mackiewicz@pb.edu.pl

Ponadto zastosowanie specjalnych elementów wielopolowych może być przydatne w obliczeniach konstrukcji wymagających uwzględnienia losowości (przypadkowości) w zakresie lokalizacji miejsc potencjalnego uszkodzenia, osłabienia, wzmocnienia czy inkluzji, jak również zakresu lub rodzaju tych zmian. W takich przypadkach często używa się kosztownych obliczeniowo procedur ponownego modelowania (rearanżacji) siatki podziału. Elementy wielopolowe mogą skutecznie eliminować taką potrzebę.

2. Podstawy teoretyczne – jednowymiarowy element wielopolowy

Koncepcja i podstawowe założenia metody elementów wielopolowych zostaną zaprezentowane oraz zweryfikowane na przykładzie elementu prętowego. Dla porównania standardowe wyprowadzenie macierzy sztywności pojedynczego elementu jednowymiarowego można znaleźć w pracy Łodygowski i Kąkol (1991).

Ilustrację koncepcji elementów wielopolowych w odniesieniu do elementów jednowymiarowych stanowi rysunek 2, na którym pokazano pręt o węzłach i - j składający się z trzech pól składowych K_1, K_2, K_3 . Wyznaczenie macierzy sztywności elementu skończonego K_e wykonuje się poprzez całkowanie w podprzedziałach (podobszarach), a następnie sumowanie częściowych macierzy sztywności z każdego podobszaru, co wyrażone jest wzorem:

$$K_e = K_1 + K_2 + K_3 + \dots = \int_{\xi_1}^{\xi_2} K_e^1(\xi) + \int_{\xi_2}^{\xi_3} K_e^2(\xi) + \int_{\xi_3}^{\xi_4} K_e^3(\xi) + \dots = \sum_{k=1}^n K_e^k \quad (1)$$

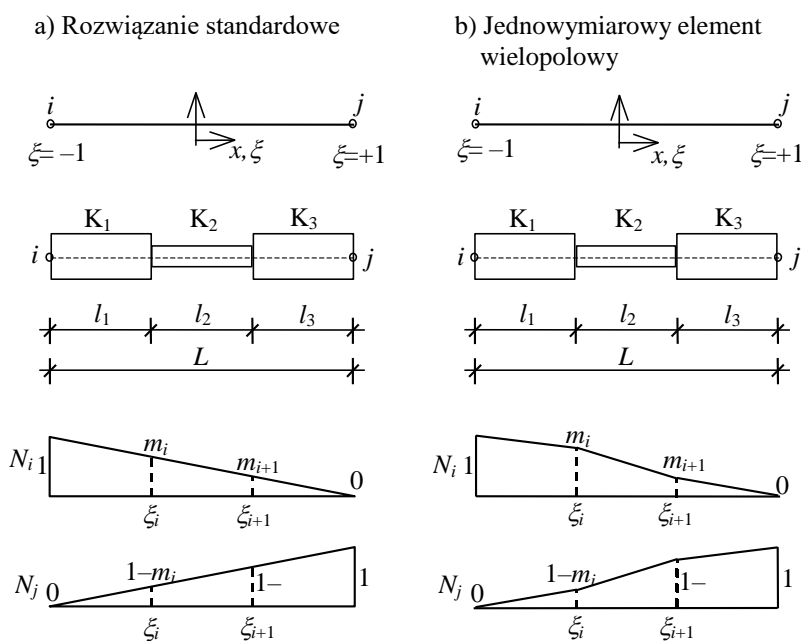
Standardowo przyjmuje się, że funkcje kształtu nie ulegają zmianie, czyli pozostają liniowe (rys. 2a). Jest to jednak uzasadnione tylko przy małych różnicach sztywności w poszczególnych podobszarach elementu skończonego, gdyż wpływ zmiany pola przemieszczeń na rozwiązanie jest niewielki. Przy dużych różnicach natomiast takie podejście prowadzi do dużych błędów obliczeniowych i modyfikacja pola przemieszczeń i odkształceń wewnątrz elementu skończonego jest niezbędna (Mackiewicz, 2012). Modyfikację pola przemieszczeń według koncepcji elementów wielopolowych przeprowadza się poprzez zastosowanie tzw. funkcji łamanej, określonej przez parametry m_i, m_{i+1}, \dots, m_n rozumiane jako wartości funkcji kształtu N_i na granicach poszczególnych pól składowych elementu wielopolowego (rys. 2b).

Macierz sztywności prętowego elementu wielopolowego jest wyznaczana w jawnej postaci, co zwiększa efektywność obliczeniową w stosunku do całkowania numerycznego. Wyrażenie (1) ilustruje fakt, że macierz elementu wielopolowego jest sumą macierzy składowych. Optymalnym rozwiązaniem jest więc wyznaczenie macierzy sztywności podobszaru w postaci sparametryzowanej, możliwej do powtórzenia i zastosowania we wszystkich podobszarach elementu. Uzyskuje się to poprzez przyjęcie ogólnych granic całkowania w postaci od ξ_i do ξ_{i+1} oraz wartości funkcji kształtu na początku i końcu podobszaru, odpowiednio m_i i m_{i+1} (rys. 2b).

Macierz sztywności pojedynczego pola składowego (podobszaru) K_e^k wyznaczana jest z następującego równania:

$$K_e^k = \int_{V_k} B_e^{kT} \cdot D_e^k \cdot B_e^k \cdot dV_k \quad (2)$$

gdzie: D_e^k jest macierzą materiałową podobszaru, $D_e^k = [E_k]$, a B_e^k jest macierzą odkształceń podobszaru k ,



Rys. 2. Element prętowy o zmiennych parametrach sztywnościowo-geometrycznych

$$\mathbf{B}_e^k = \mathbf{L} \cdot \mathbf{N}_e^k = \left[\frac{d}{d\xi} \right] \cdot [N_i^k, N_j^k] = \left[\frac{2(m_{i+1} - m_i)}{L(\xi_{i+1} - \xi_i)}, -\frac{2(m_{i+1} - m_i)}{L(\xi_{i+1} - \xi_i)} \right] \quad (3)$$

gdzie: \mathbf{L} jest macierzą operatorów różniczkowych, a \mathbf{N}_e^k jest macierzą funkcji kształtu wyrażoną w uogólnionych współrzędnych bezwymiarowych ξ ,

$$\mathbf{N}_e^k = [N_i^k, N_j^k] = \left[\frac{m_{i+1} - m_i}{\xi_{i+1} - \xi_i} (\xi - \xi_i) + m_i, 1 - N_i^k \right], \quad (4)$$

$$\xi \in \langle -1, +1 \rangle, \quad \xi = \frac{2}{L}x$$

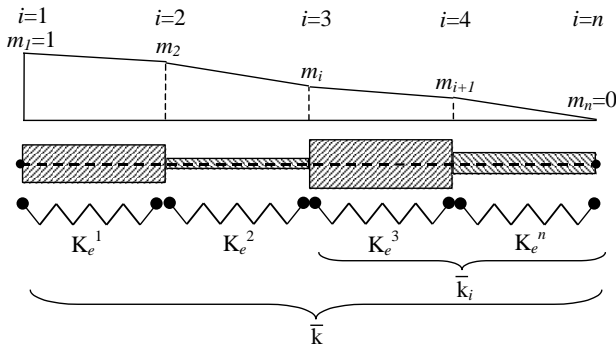
Po podstawieniu i wykonaniu przekształceń, z równania (2) jest uzyskiwana macierz sztywności pojedynczego pola składowego (podobszaru). Ostateczna postać macierzy sztywności pojedynczego pola składowego \mathbf{K}_e^k wyznaczona dla $\xi \in \langle -1, 1 \rangle$ zapisana z użyciem parametrów: ξ_i, ξ_{i+1}, m_i i m_{i+1} jest następująca:

$$\mathbf{K}_e^k = \begin{bmatrix} \frac{2(\mathbf{EA})_k (m_{i+1} - m_i)^2}{L (\xi_{i+1} - \xi_i)} & -\frac{2(\mathbf{EA})_k (m_{i+1} - m_i)^2}{L (\xi_{i+1} - \xi_i)} \\ -\frac{2(\mathbf{EA})_k (m_{i+1} - m_i)^2}{L (\xi_{i+1} - \xi_i)} & \frac{2(\mathbf{EA})_k (m_{i+1} - m_i)^2}{L (\xi_{i+1} - \xi_i)} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

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

gdzie: A_k jest polem przekroju poprzecznego podobszaru k , a L jest długością całego elementu.

Wartości współczynników łamanych funkcji kształtu m_i , (rys. 2b) dopasowujących rozkład pola odkształceń wewnątrz elementu wielopolowego do zmian sztywności, wyprowadzono przy założeniu, że podobszary tworzą układ szeregowo połączonych sprężyn (rys. 3) o sztywnościach $\mathbf{K}_e^k, k = 1, 2, \dots, n$ (n jest liczbą pól składowych).



Rys. 3. Geometryczna interpretacja wyznaczania wartości łamanej linii funkcji kształtu

Wartości współczynników łamanych funkcji kształtu m_i , wyznacza się według następującego wzoru:

$$m_i = \frac{\bar{k}}{k_i} \quad (6)$$

gdzie \bar{k} jest sztywnością wypadkową całego zespołu sprężyn opisaną wzorem:

$$\bar{k} = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{\mathbf{K}_e^k}} = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{\mathbf{E}_k \cdot \mathbf{A}_k}} \cdot l_k \quad (7)$$

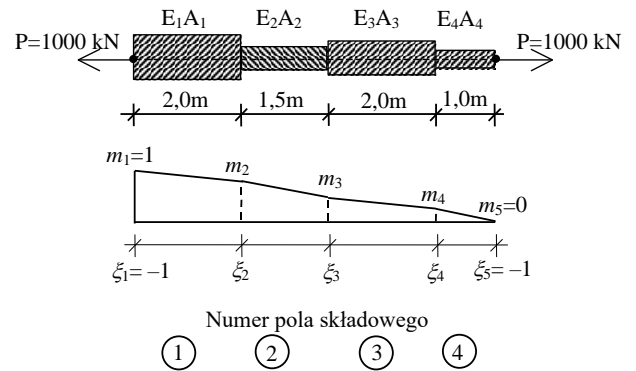
gdzie \bar{k} jest sztywnością wypadkową części układu sprężyn do punktu, w którym obliczana jest wartość m_i ; wartość k wyznaczana jest ze wzoru:

$$k_i = \frac{1}{\sum_{k=i}^n \frac{1}{\mathbf{K}_e^k}} = \frac{1}{\sum_{k=i}^n \frac{1}{\mathbf{E}_k \cdot \mathbf{A}_k}} \cdot l_k \quad (8)$$

3. Wyniki analizy przykładowych zastosowań wielopolowych elementów skończonych

3.1 Pręt rozciągany z czterema obszarami o różnicowanej sztywności

W przykładzie obliczeniowym wyznaczono przemieszczenie rozciąganego fragmentu konstrukcji zaprezentowanego na rysunku 4. Przeprowadzono obliczenia bez modyfikacji pola przemieszczeń (liniowe funkcje kształtu) oraz z zastosowaniem łamanych funkcji kształtu. Jako rozwiązanie oczekiwane (referencyjne) przyjęto wynik z obliczeń MES przeprowadzonych przy standardowym podziale rozciąganego fragmentu konstrukcji na 4 oddzielne elementy skończone o stałych sztywnościach $E_i A_i$.



Rys. 4. Rozciągany pojedynczy element skończony o zmiennej sztywności

Do obliczeń przyjęto, że moduł Younga jest stały we wszystkich podobszarach i wynosi $E = 30 \text{ GPa} = 3000 \text{ kN/cm}^2$. Pole przekroju poprzecznego elementu jest zmienne i w poszczególnych podobszarach wynosi odpowiednio: $A_1 = 100 \text{ cm}^2, A_2 = 50 \text{ cm}^2, A_3 = 80 \text{ cm}^2$ i $A_4 = 40 \text{ cm}^2$. Długości podobszarów według rysunku 4.

Wartości współczynników łamanych funkcji kształtu (m_1 do m_4) wyznaczono według wzorów (6), (7) i (8). W nawiasach podano wartości funkcji kształtu przy rozkładzie liniowym.

- $m_1 = 1,00$ – początek funkcji kształtu,
- $m_2 = \frac{\bar{k}}{k_2} = \frac{300}{375} = \frac{4}{5} = 0,80$ (bez modyfikacji $m_2 = \frac{9}{13}$),
- $m_3 = \frac{\bar{k}}{k_3} = \frac{300}{600} = \frac{1}{2} = 0,50$ (bez modyfikacji $m_3 = \frac{6}{13}$),
- $m_4 = \frac{\bar{k}}{k_4} = \frac{300}{1200} = \frac{1}{4} = 0,25$ (bez modyfikacji $m_4 = \frac{2}{13}$),

$m_4 = 0,0$ – koniec funkcji kształtu,
gdzie:

$$\bar{k} = \frac{1}{\sum_{k=1}^4 \frac{1}{K_e^k}} = \frac{1}{\frac{1}{K_e^1} + \frac{1}{K_e^2} + \frac{1}{K_e^3} + \frac{1}{K_e^4}} =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{\frac{3000 \text{ kN/cm}^2 \cdot 100 \text{ cm}^2}{200 \text{ cm}}} + \frac{1}{\frac{3000 \text{ kN/cm}^2 \cdot 50 \text{ cm}^2}{150 \text{ cm}}} + \frac{1}{\frac{3000 \text{ kN/cm}^2 \cdot 80 \text{ cm}^2}{200 \text{ cm}}} + \frac{1}{\frac{3000 \text{ kN/cm}^2 \cdot 40 \text{ cm}^2}{100 \text{ cm}}}} = 300 \text{ kN/cm}$$

$$\bar{k}_2 = \frac{1}{\sum_{k=2}^4 \frac{1}{K_e^k}} = \frac{1}{\frac{1}{K_e^2} + \frac{1}{K_e^3} + \frac{1}{K_e^4}} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{3000 \text{ kN/cm}^2 \cdot 50 \text{ cm}^2}{150 \text{ cm}}} + \frac{1}{\frac{3000 \text{ kN/cm}^2 \cdot 80 \text{ cm}^2}{200 \text{ cm}}} + \frac{1}{\frac{3000 \text{ kN/cm}^2 \cdot 40 \text{ cm}^2}{100 \text{ cm}}}} = 375 \text{ kN/cm}$$

$$\bar{k}_3 = \frac{1}{\sum_{k=3}^4 \frac{1}{K_e^k}} = \frac{1}{\frac{1}{K_e^3} + \frac{1}{K_e^4}} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{3000 \text{ kN/cm}^2 \cdot 80 \text{ cm}^2}{200 \text{ cm}}} + \frac{1}{\frac{3000 \text{ kN/cm}^2 \cdot 40 \text{ cm}^2}{100 \text{ cm}}}} = 600 \text{ kN/cm}$$

$$\bar{k}_4 = \frac{1}{\sum_{k=4}^4 \frac{1}{K_e^k}} = \frac{1}{\frac{1}{K_e^4}} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{3000 \text{ kN/cm}^2 \cdot 40 \text{ cm}^2}{100 \text{ cm}}}} = 1200 \text{ kN/cm}$$

Tab. 1. Wartości parametrów dla poszczególnych pól składowych

1	2	3	4
$E = 3000 \text{ kN/cm}^2$	$E = 3000 \text{ kN/cm}^2$	$E = 3000 \text{ kN/cm}^2$	$E = 3000 \text{ kN/cm}^2$
$A_1 = 100 \text{ cm}^2$	$A_2 = 50 \text{ cm}^2$	$A_3 = 80 \text{ cm}^2$	$A_4 = 40 \text{ cm}^2$
$\zeta_1 = -1,0$	$\zeta_2 = -5/13$	$\zeta_3 = +1/13$	$\zeta_4 = +9/13$
$\zeta_2 = -5/13$	$\zeta_3 = +1/13$	$\zeta_4 = +9/13$	$\zeta_5 = +1,0$
Wartości funkcji kształtu m_i z modyfikacją pola odkształceń – łamane funkcje kształtu			
$m_1 = 1,00$	$m_2 = 4/5$	$m_3 = 1/2$	$m_4 = 1/4$
$m_2 = 4/5$	$m_3 = 1/2$	$m_4 = 1/4$	$m_5 = 0,00$
Wartości funkcji kształtu m_i bez modyfikacji pola odkształceń – liniowe funkcje kształtu			
$m_1 = 1,00$	$m_2 = 9/13$	$m_3 = 6/13$	$m_4 = 2/13$
$m_2 = 9/13$	$m_3 = 6/13$	$m_4 = 2/13$	$m_5 = 0,00$

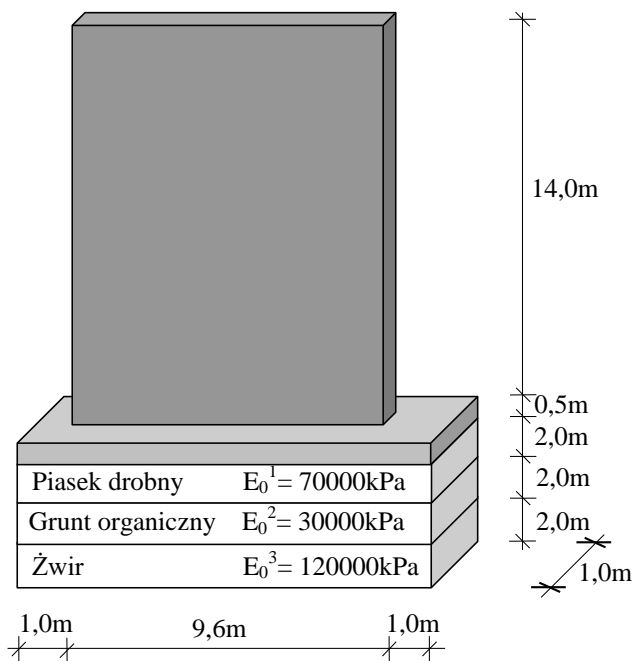
Tab. 2. Porównanie wartości przemieszczeń rozciąganego elementu pokazanego na rysunku 4

Metoda rozwiązania	Wartość przemieszczenia [cm]	Liczba zastosowanych elementów
Rozwiązanie dokładne MES	3,3333	4
Elementy wielopolowe z modyfikacją pola odkształceń	3,3333	1
Elementy wielopolowe bez modyfikacji pola odkształceń	2,9649	1

Wartości przyjętych założeń i wyznaczone wartości współczynników dla poszczególnych pól składowych zestawiono w tabeli 1. Natomiast w tabeli 2 zaprezentowano otrzymane wyniki przemieszczeń dla rozciąganego fragmentu konstrukcji.

3.2 Obliczenie wartości osiadania uwarstwionego podłoża gruntowego

Metoda jednowymiarowych specjalnych elementów skończonych została zaimplementowana w obliczeniach osiadania podłoża gruntowego (Chyży i Mackiewicz, 2013a, 2013b). Dotyczy to przede wszystkim obliczeń związanych z podłożem uwarstwowym, gdzie poszczególne warstwy różnią się od siebie miąższością i sztywnością. Jednym z przykładów może być analiza podłoża warstwowego zalegającego pod budynkiem, dla którego obliczono wartości osiadań. Przyjęto do obliczeń ławę fundamentową o wymiarach $11,6 \times 0,5 \times 1,0$ m oraz opartą na niej ścianę żelbetową o wymiarach $9,6 \times 14 \times 0,15$ m (rys. 5). Wartość obciążenia q stanowi obciążenie stropów poszczególnych kondygnacji, z uwzględnieniem ciężaru własnego ściany i ławy fundamentowej.



Rys. 5. Model obliczeniowy osiadania gruntu

W wariantcie I obliczeń przyjęto model podłoża sprężystego według hipotezy Winklera (Wiłun, 2005) w odniesieniu do podłoża warstwowego. Założono, że osiadanie podłoża s jest proporcjonalne do działającego obciążenia q , według zależności:

$$s = \frac{q}{k_z} \quad (9)$$

gdzie: q jest obciążeniem, a k_z współczynnikiem podatności.

Wartość współczynnika podatności k_z gruntu

jednorodnego do głębokości z wyznaczana jest według wzoru:

$$k_z = \frac{E_0}{\omega B(1-\nu^2)} \quad (10)$$

Współczynnik k_z w przypadku podłoża warstwowego jest sumą współczynników podatności poszczególnych warstw gruntu k_{z_i} . W odniesieniu do pojedynczej warstwy i współczynnik ten wyznacza się z zależności:

$$k_z^i = \frac{E_0^i}{\Delta\omega_i B(1-\nu^2)}; \quad \Delta\omega_i = \omega_i - \omega_{i-1}. \quad (11)$$

gdzie: E_0 jest modułem odkształcenia gruntu, E_0^i jest modułem odkształcenia poszczególnych warstw gruntu, B jest szerokością obciążonego obszaru, ν jest współczynnikiem bocznej rozszerzalności gruntu, a $\Delta\omega_i$ (ω_i) jest współczynnikiem wpływu, zależnym od kształtu obciążonego obszaru (fundamentu), dobieranym z tablic i nomogramów (Wiłun, 2005).

Wyznaczona wartość osiadania podłoża uwarstwowego pod ławą fundamentową jest sumą osiadań wszystkich 3 warstw:

$$s_1 = \frac{q \cdot \Delta\omega_1 \cdot B \cdot (1-\nu^2)}{E_0^1} = \frac{189,19 \text{ kN/m}^2 \cdot 0,86 \cdot 1,0 \text{ m} \cdot (1-0,3^2)}{70000 \text{ kPa}} = 2,115 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$s_2 = \frac{q \cdot \Delta\omega_2 \cdot B \cdot (1-\nu^2)}{E_0^2} = \frac{189,19 \text{ kN/m}^2 \cdot 0,337 \cdot 1,0 \text{ m} \cdot (1-0,3^2)}{30000 \text{ kPa}} = 1,934 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$s_3 = \frac{q \cdot \Delta\omega_3 \cdot B \cdot (1-\nu^2)}{E_0^3} = \frac{189,19 \text{ kN/m}^2 \cdot 0,259 \cdot 1,0 \text{ m} \cdot (1-0,3^2)}{120000 \text{ kPa}} = 3,716 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

– osiadanie $s = s_1 + s_2 + s_3 = 0,00442 \text{ m} = 4,42 \text{ mm}$.

W wariantcie II natomiast wykonano obliczenia z zastosowaniem opracowanych jednowymiarowych wielopolowych elementów skończonych wykorzystanych w autorskim systemie analizy konstrukcji ORCAN (<http://kmb.pb.edu.pl/dydaktyka/tchyzy/orcan.html>) (Chyży i in., 2014). Aby wyznaczyć wartość osiadania należy zastosować zastępczy moduł sprężystości E_{z_i} poszczególnych warstw dostosowany do modelu Winklera według wzoru:

$$E_z^i = \frac{E_0^i h_i}{\Delta\omega_i B(1-\nu^2)}; \quad \Delta\omega_i = \omega_i - \omega_{i-1}. \quad (12)$$

gdzie: h_i jest grubością (miąższością) poszczególnych warstw, zaś pozostałe oznaczenia jak we wzorach (10)

Literatura

i (11).

Obliczone wartości zastępczego modułu sprężystości oraz sumaryczna wartość osiadania są następujące:

$$E_z^1 = \frac{E_0^1 \cdot h_1}{\Delta\omega_1 \cdot B \cdot (1-\nu^2)} = \frac{70000 \text{ kPa} \cdot 2\text{m}}{0,86 \cdot 1\text{m} \cdot (1-0,3^2)} = 178890,88 \text{ kPa}$$

$$E_z^2 = \frac{E_0^2 \cdot h_2}{\Delta\omega_2 \cdot B \cdot (1-\nu^2)} = \frac{30000 \text{ kPa} \cdot 2\text{m}}{0,337 \cdot 1\text{m} \cdot (1-0,3^2)} = 195650,05 \text{ kPa}$$

$$E_z^3 = \frac{E_0^3 \cdot h_3}{\Delta\omega_3 \cdot B \cdot (1-\nu^2)} = \frac{120000 \text{ kPa} \cdot 2\text{m}}{0,259 \cdot 1\text{m} \cdot (1-0,3^2)} = 1018286,73 \text{ kPa}$$

– osiadanie $s = 0,00442 \text{ m} = 4,42 \text{ mm}$.

4. Podsumowanie

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, iż zastosowanie specjalnych jednowymiarowych elementów skończonych w obliczeniach układów konstrukcyjnych o zmiennych parametrach sztywnościowo-geometrycznych pozwala uzyskać wyniki, które są zgodne z rozwiązaniem oczekiwanym. W pierwszym przedstawionym przykładzie jako rozwiązanie oczekiwane przyjęto rozwiązanie według standardowego podziału MES na 4 oddzielne elementy o różnej sztywności. Wyniki zaprezentowane w tabeli 2 potwierdzają fakt, że stosowanie elementów całkowanych w podobozarach bez modyfikacji pola odkształceń wewnątrz elementu prowadzi do błędnych wyników. Natomiast dopasowanie pola odkształceń poprzez zastosowanie łamanych funkcji kształtu umożliwia uzyskanie rozwiązania oczekiwanego przy jednoczesnym zastosowaniu mniejszej liczby elementów skończonych.

W drugim przykładzie jako rozwiązanie oczekiwane przyjęto wyniki osiadania obliczone według modelu Winklera. Uzyskana wartość osiadania podłoża gruntowego z zastosowaniem jednowymiarowych elementów wielopolowych jest z nim zgodna. Model Winklera został uznany jako najbardziej zbliżony do jednowymiarowego elementu wielopolowego, stanowiącego sprężynę o skokowo zmiennej sztywności i dopasowującym się polu odkształceń wewnątrz tego elementu. Ocena przydatności praktycznej modelu Winklera oraz ograniczenia jego stosowania nie były przedmiotem tego artykułu. Zaprezentowane wyniki osiadania podłoża warstwowego potwierdzają możliwość wyznaczania wartości osiadania podłoża gruntowego z zastosowaniem jednowymiarowych elementów wielopolowych.

- Bathe K.J. (1996). Finite Element Procedures. *Prentice Hall, Englewood Cliffs*, New York.
- Chyży T., Mackiewicz M. (2013a). Liniowe elementy skończone o zmiennej sztywności w modelowaniu podłoża gruntowego pod budynkiem. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, Vol. 4, nr 1, 7-12.
- Chyży T., Mackiewicz M. (2013b). Method of embankment modeling using one-dimensional layered finite elements. W: *Building Structures in Theory and Practice*, Biała Podlaska, 167-175.
- Chyży T., Mackiewicz M., Matulewicz S. (2014). Podręcznik Użytkownika Systemu ORCAN. Nowoczesny Graficzny Język Opisu Konstrukcji Budowlanych ORCAN v. 091. Składnia i Zastosowania. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej*, Białystok.
- Łodygowski T., Kąkol W. (1991). Metoda Elementów Skończonych w Wybranych Zagadnieniach Mechaniki Konstrukcji Inżynierskich. *Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej*, Poznań.
- Mackiewicz M. (2012). Koncepcja liniowych elementów skończonych do analizy konstrukcji o dużych zmianach geometryczno-szywnościowych. W: *Badania Doświadczalne i Teoretyczne w Budownictwie: Prace Naukowe Doktorantów*, Gliwice, 173-180.
- Wiłun Z. (2005). Zarys Geotechniki. *Wydawnictwa Komunikacji i Łączności*, Warszawa.
- Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. (2005). The Finite Element Method: its Basis and Fundamentals. *Elsevier, Butterworth-Heinemann*, Amsterdam.

CONCEPTION AND APPLICATION OF SPECIAL ONE-DIMENSIONAL FINITE ELEMENTS

Abstract: The conception of special finite elements for analysis of structures with variable stiffness areas is presented in the paper. The elements are called as a multi-area elements and their implementation in form of simple one-dimensional elements is presented. The application of these special elements helps to reduce the number of finite elements (unknowns) and thereby to reduce the computational calculation time, compared with standard FEM solution. The conception is based on the assumption that area of the structure with different stiffness and geometrical parameters described by a single element. The stiffness matrix for multi-area element is determined in explicit form by the summation of the stiffness matrices of component sub-areas included in the finite element. Therefore the area of the finite element is divided into rectangular sub-areas with various geometric and stiffness parameters. In order to confirm the accuracy of the presented conception assumptions, comparative analysis was made and potential area of application for one-dimensional special elements were indicated.

Badania zostały zrealizowane w ramach pracy numer MB/WBiŚ/6/2014 i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW.

ZASTOSOWANIE ODPADÓW PRODUKCJI PŁYT CEMENTOWO-WIÓROWYCH DO WYTWARZANIA KOMPOZYTÓW CEMENTOWYCH

Walery JEZIERSKI^{a*}, Natalja KUZNECOVA^b

^a Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 A, 15-351 Białystok

^b Tambowski Uniwersytet Techniczny, ul. Miczurinska, 112E, 392032 Tambow, Rosja

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych wpływu dodatku z odpadów produkcji płyt cementowo-wiórowych na właściwości mechaniczne kompozytu cementowego. Zgodnie z przyjętym celem wytrzymałość na ściskanie (odpowiedź Y_1) oraz wytrzymałość na zginanie (odpowiedź Y_2) próbek wykonanych z zaprawy cementowej zbadano w zależności od udziałów cementu (czynnik z_1), piasku naturalnego (czynnik z_2) i odpadów (czynnik z_3). Przy realizacji eksperymentu zastosowano lokalne planowanie sympleksowe w warunkach ograniczenia zakresu zmienności wybranych czynników. Na podstawie wyników badań opracowano modele matematyczne analizowanych zależności oraz określono proporcje cementu, piasku naturalnego oraz dodatku odpadów, tworzące punkt bazowy przy podejmowaniu decyzji o zastosowaniu odpadów w produkcji kompozytów cementowych.

Słowa kluczowe: odpady produkcji, płyty cementowo-wiórowe, kompozyty cementowe, właściwości fizyko-techniczne.

1. Wprowadzenie

Perspektywicznym kierunkiem rozwoju przemysłu budowlanego jest opracowanie i wdrożenie technologii produkcji wyrobów betonowych zdolnych wytrzymać konkurencję. Obniżenie kosztów wyrobów przy zachowaniu wymaganej jakości może być osiągnięte przez zastosowanie dostępnych miejscowych kruszyw. Niektóre regiony europejskie charakteryzują się deficytem odpowiedniej jakości kruszyw do betonów. Aktualnym zadaniem jest opracowanie dla nich najlepszych receptur wieloskładnikowych betonów drobnoziarnistych i zapraw cementowych przy minimalnej materiałochłonności produkcji. Racjonalne wykorzystanie zasobów naturalnych można osiągnąć poprzez zagospodarowanie różnego typu odpadów, które często stają się cennym surowcem wtórnym. Celowym jest wykorzystanie jako dodatków odpadów technogennych. Pozwala to, równocześnie z rozwiązaniem problemów przemysłu budowlanego, rozwiązać również problemy ekologiczno-ekonomiczne w regionie.

Jednym z rodzajów odpadów, powstających w przedsiębiorstwach przemysłu budowlanego produkujących płyty cementowo-wiórowe (PCW), jest drewniano-cementowy proszek, który gromadzi się w dużych ilościach i tworzy wielkie problemy dla przedsiębiorstw-producentów. Magazynowanie lub transport i utylizacja tych odpadów wymagają bowiem znacznych nakładów materialnych.

W artykule przeprowadzono analizę możliwości

wykorzystania odpadów produkcji płyt cementowo-wiórowych jako dodatku w kompozytach cementowo-piaskowych. Wykonano badania eksperymentalne i opracowano modele matematyczne zależności właściwości mechanicznych uzyskanego materiału. Zaproponowano przy tym proporcje składników mieszanki, tworzące punkt bazowy przy podejmowaniu decyzji o zastosowaniu odpadów w produkcji kompozytów cementowych.

2. Charakterystyka PCW

Płyty cementowo-wiórowe są dosyć dobrym materiałem budowlanym dzięki swoim charakterystykom fizyczno-mechanicznym, ekologiczności i niskiej cenie. Wysoka jakość eksploatacyjna płyt określa szeroki zakres ich zastosowania. Z roku na rok, przede wszystkim w krajach Europy Wschodniej, skala produkcji płyt cementowo-wiórowych rośnie.

W procesie produkcji płyt w przedsiębiorstwach tworzy się duża ilość drewniano-cementowego proszku różnych frakcji, którego część stanowią od 5 do 10% ogólnej objętości produkcji PCW. Podstawowa masa odpadów powstaje na etapie odcinania nierównych brzegów gotowych płyt. Odcięte części są kruszone i usuwane ze strefy produkcji. Nasypowa gęstość proszku wynosi około 650 kg/m³. Skład granulometryczny proszku w poszczególnych frakcjach przedstawia się następująco (Il'icev i in., 2011): ponad 1 mm – 7 %, ponad 0,63 mm –

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: w.jezierski@pb.edu.pl

4%, ponad 0,32 mm – 81%, ponad 0,16 mm – 8%.

Płyty cementowo-wiórowe produkują się metodą pólusowego prasowania mieszanki na bazie cementu portlandzkiego. Komponentami, tworzącymi mieszankę do prasowania płyt są (Rahimov i in., 2009): cement portlandzki – 65%, wióry drewniane – 24%, woda – 8,5%, dodatek hydratacyjny (krzemian sodu i inne) – 2,5%.

Zakładając, że w składzie odpadów PCW przeważa komponent mineralny, można przyjąć, że odpady produkcji płyt można użyć w charakterze wypełniacza do kompozytów cementowych. Planuje się, że przed wprowadzeniem do mieszanki kompozytu cementowego, odpady PCW będą podlegać rozdrobnieniu w kulistym młynie wibracyjnym. Dzięki rozdrobnieniu, cement zawierający się w odpadach, w wyniku mechanicznej aktywacji może częściowo odbudować swoją zdolność do ponownej reakcji i będzie pozytywnie wpływać na trwałość kompozytu cementowego z dodatkiem odpadów. Z drugiej strony, proszek z PCW zastępując częściowo piasek naturalny w mieszance, nie daje gwarancji podwyższenia jakości kompozytu cementowego, ponieważ pochodzenie i właściwości ich istotnie różnią się. Ocena możliwości wykorzystania odpadów produkcji PCW w charakterze dodatku do kompozytów cementowych, a także określenie możliwie najlepszych parametrów składu mieszanki, były celem badań.

3. Sformułowanie problemu i planowanie badań

Zgodnie z przyjętym celem pracy 28-dniową wytrzymałość na ścislenie betonów cementowych (odpowiedź Y_1) oraz wytrzymałość na zginanie (odpowiedź Y_2) postanowiono zbadać w zależności od trzech wybranych czynników: udziału cementu (czynnik z_1), piasku naturalnego (czynnik z_2) i odpadów PCW (czynnik z_3).

Badanie zostało zrealizowane (tab. 1) według planu sympleksowego dla trzech zmiennych w układzie „skład-własność”, zawierającego $N = 7$ prób (Brodzki i in., 1982). Ten plan przewiduje określony układ realizacji pomiarów i opracowanie modelu w postaci niepełnego wielomianu trzeciego stopnia dla trzech zmiennych $z_1, z_2,$

z_3 :

$$\tilde{Y}_i = a_1 z_1 + a_2 z_2 + a_3 z_3 + a_{12} z_1 z_2 + a_{13} z_1 z_3 + a_{23} z_2 z_3 + a_{123} z_1 z_2 z_3 \quad (1)$$

W każdym punkcie takiego planu powinien być spełniony warunek:

$$z_1 + z_2 + z_3 = 1 \quad (2)$$

Według tego planu każdy z czynników z_1, z_2, z_3 należy rozpatrywać na czterech poziomach: 0; 0,333; 0,5; 1. Ostatni warunek nie odpowiadał przyjętemu celowi, ponieważ nie miało sensu i było niemożliwe wykonywać badania w całym zakresie zmiany udziałów wybranych czynników (od 0 do 1). Praktyczne znaczenie miały jedynie takie zakresy zmienności czynników, które odpowiadały realnym składom mieszanki z dodatkiem odpadów PCW. W związku z tym, przy realizacji danego eksperymentu zastosowano lokalne planowanie sympleksowe w warunkach ograniczenia zakresu zmienności wszystkich czynników (Zedginidze, 1986). Procedury realizacji tego podejścia zostały szczegółowo opisane przez jednego ze współautorów (Jeziński i Małaszkiwicz, 2015).

Na podstawie wstępnych badań został wybrany podobszar, obejmujący preferowane składy mieszanki cementu, piasku naturalnego i odpadów PCW. W tym podobszarze udziały masowe składników zmieniały się w zakresach: cementu (x_1) – od 0,143 do 0,333; piasku naturalnego (x_2) – od 0 do 0,75; odpadów PCW (x_3) – od 0 do 0,857. Wartości udziałów składników określały współrzędne wierzchołków podobszaru wybranego do badania: A_1 ($x_1 = 0,333; x_2 = 0,333; x_3 = 0,333$); A_2 ($x_1 = 0,25; x_2 = 0,75; x_3 = 0$); A_3 ($x_1 = 0,143; x_2 = 0; x_3 = 0,857$).

Wyżej wymieniony podobszar został transformowany do pełnego planu sympleksowego poprzez wprowadzenie pseudo składników z_1, z_2, z_3 , które w każdym u -tym układzie planu są związane z czynnikami rzeczywistymi x_1, x_2, x_3 zależnością:

$$x_i^{(u)} = x_i^{(1)} + z_2^{(u)}(x_i^{(2)} - x_i^{(1)}) + z_3^{(u)}(x_i^{(3)} - x_i^{(1)}) \quad (3)$$

Tab. 1. Plan eksperymentu i poziomy zmienności rozpatrywanych czynników

Numer punktu	z_1	z_2	z_3	x_1	x_2	x_3
1	1	0	0	0,333	0,333	0,333
2	0	1	0	0,25	0,75	0
3	0	0	1	0,143	0	0,857
4	0,5	0,5	0	0,2915	0,5415	0,167
5	0,5	0	0,5	0,2385	0,1665	0,595
6	0	0,5	0,5	0,1965	0,375	0,4285
7	0,333	0,333	0,333	0,242	0,361	0,397
8*	0,2	0,35	0,45	0,219	0,329	0,452

Poziomy zmienności czynników z_1, z_2, z_3 oraz odpowiadających im rzeczywistych x_1, x_2, x_3 przedstawiono w tabel 1. Po uzyskaniu wyników pomiarów można było opracować modele badanych cech w zależności od pseudo składników (z_1, z_2, z_3). Chcąc otrzymać modele matematyczne z czynnikami w postaci naturalnej (x_1, x_2, x_3), należało odkodować je przez podstawienie odpowiednich zależności.

W każdym punkcie planu przyjęto powtarne pomiary na 6 (dla Y_1) i 3 (dla Y_2) próbkach. Liczba pomiarów w całym badaniu, z uwzględnieniem dodatkowego punktu 8* poza planem dla uzyskania wyników do sprawdzenia adekwatności modeli, wynosiła 54. W trakcie realizacji planów eksperymentu przy wyborze kolejności pomiarów w próbach przestrzegano zasad randomizacji (Krasovskij i in., 1982).

4. Zastosowane materiały i metodyka badań

Badania przeprowadzono w ramach Umowy o współpracy naukowo-technicznej pomiędzy Politechniką Białostocką i Tambowskim Państwowym Uniwersytem Technicznym (Federacja Rosyjska) w laboratorium TPUT. Do przygotowania próbek zostały użyte:

- cement portlandzki CEM M 500 (bez dodatków) o gęstości 3,12 kg/dm³ SA „Sjebriakowcement”, Michajłowska;
- naturalny piasek kwarcowy o gęstości 2,71kg/dm³ z modułem grubości 1,8 zgodnie z GOST 8736-93 *Piasek dla robót budowlanych* z miejscowości Krasnieńkoje, obwód Tambowski;
- proszek odpadów PCW SA "TAMAK", Tambow;
- woda wodociągowa.

Wstępnie odpady są rozdrabniane w kulistym młynie wibracyjnym w ciągu 30 minut. Rozdrobnione odpady mają uziarnienie 0,05 mm i mniejsze. Do badań według planu eksperymentu (tab. 1) przygotowano 8 różnych mieszanek betonowych. Zgodnie z planem eksperymentu, skład procentowy poszczególnych składników przedstawiał się następująco: cementu – od 14,3 do 33,3%; wprowadzanych odpadów – od 0 do 85,7%; piasku naturalnego – od 0 do 75,0%. Wodę dodawano w takiej objętości, która zapewniała równą konsystencję mieszanek dla wybranych składów we wszystkich

punktach planu. Próbki 40×40×160 mm formowano bezpośrednio po wymieszaniu składników mieszanki. Próbki zagęszczano na stoliku Vebe i rozformowywano po 24 godzinach dojrzewania, a następnie umieszczano w komorze o temperaturze 20°C ± 2°C i wilgotności powietrza 90% ± 5%, gdzie dojrzewały przez kolejne 27 dni.

Badanie wytrzymałości na ściskanie i zginanie przeprowadzono zgodnie z GOST 10180-2012 *Beton. Metody oznaczania ściskania i wytrzymałości na rozciąganie, elementów betonowych i żelbetowych*.

5. Wyniki badań i opracowanie modeli matematycznych

Wstępna analiza wyników badania $\bar{Y}_{1i}, \bar{Y}_{2i}$ (tab. 2) pozwoliła zauważyć, że istnieje rozrzut wartości \bar{Y}_{ij} w poszczególnych próbach, jak i przy powtórnych pomiarach. Sprawdzenie jednorodności ocen wariancji powtórnych pomiarów S^2_{oji} z zastosowaniem kryterium Cochra (Krysicki i in., 2003) wykazało, że przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$ obliczeniowe wartości kryterium Cochra (dla $S^2_{o1i} - G_{01} = 0,2685$; dla $S^2_{o2i} - G_{02} = 0,253$) okazały się mniejsze od wartości krytycznych: $G_{kr(1);0,05;5;7} = 0,3974$ i $G_{kr(2);0,05;2;7} = 0,5612$.

Można więc przyjąć, że wariancje prób dla wszystkich badań są jednorodne, a wariancje niedokładności pomiarów w eksperymentach mogą być obliczone jako wartości średnie: $S^2_{o1} = 2,530$ przy liczbie stopni swobody $\nu = 35$; $S^2_{o2} = 0,131$ przy $\nu = 14$.

Na podstawie wyników eksperymentu (tab. 2) opracowano zależności $Y_i = f(z_1, z_2, z_3)$ za pomocą wzorów podanych w pracy (Brodskii i in., 1982):

- dla wytrzymałości na ściskanie

$$\bar{Y}_1 = 9,810 z_1 + 22,070 z_2 + 7,579 z_3 - 0,790 z_1 z_2 + 8,302 z_1 z_3 - 12,920 z_2 z_3 + 79,904 z_1 z_2 z_3 \quad (4)$$

- dla wytrzymałości na zginanie

$$\bar{Y}_2 = 0,325 z_1 + 0,523 z_2 + 0,289 z_3 + 0,096 z_1 z_2 + 0,172 z_1 z_3 - 0,148 z_2 z_3 - 1,548 z_1 z_2 z_3 \quad (5)$$

Tab. 2. Plan eksperymentu, wariancje i wyniki pomiarów $\bar{Y}_{1i}, \bar{Y}_{2i}$

Numer	x_1	x_2	x_3	\bar{Y}_{1i} MPa	S^2_{o1i}	\bar{Y}_{2i} MPa	S^2_{o2i}
1	0,333	0,333	0,333	9,810	0,6479	0,325	0,1322
2	0,25	0,75	0	22,070	6,9964	0,523	0,1550
3	0,143	0	0,857	7,579	1,2000	0,289	0,1391
4	0,2915	0,5415	0,167	15,743	8,1830	0,448	0,1202
5	0,2385	0,1665	0,595	10,770	1,5490	0,350	0,1179
6	0,1965	0,375	0,4285	11,593	4,7000	0,369	0,1642
7	0,242	0,361	0,397	15,509	0,5680	0,335	0,0901
8*	0,219	0,329	0,452	12,095	1,6600	0,263	0,0811

$S^2_{o1} = 2,5300$; $S^2_{o2} = 0,1312$

Sprawdzenie adekwatności opracowanych modeli wykonano za pomocą testu t-Studenta (Brodskii i in., 1982) z wykorzystaniem danych z pomiarów w dodatkowym punkcie 8*. Wartości \bar{Y}_{18} , \bar{Y}_{28} mierzone w tym punkcie oraz wariancje niedokładności pomiarów w eksperymentach pozwoliły obliczyć t-kryterium dla każdej z dwóch funkcji i po porównaniu z krytyczną wartością t-kryterium adekwatność modeli (4) i (5) została potwierdzona. Tym samym, uznano ich przydatność do dalszej analizy.

W celu praktycznego zastosowania uzyskanych modeli może być wykonane odkodowanie przez podstawienie zależności między naturalnymi wielkościami i pseudo składnikami. W tym celu opracowano formuły związku pomiędzy naturalnymi współrzędnymi x_i i współrzędnymi z_i . Dla przeniesienia współrzędnych z jednego systemu afinicznego do drugiego zastosowano wzory (Zedginidze, 1986):

$$z_1 = z_1^{(1)} + x_2(z_1^{(2)} - z_1^{(1)}) + x_3(z_1^{(3)} - z_1^{(1)}) \quad (6)$$

$$z_2 = z_2^{(1)} + x_2(z_2^{(2)} - z_2^{(1)}) + x_3(z_2^{(3)} - z_2^{(1)}) \quad (7)$$

$$z_3 = z_3^{(1)} + x_2(z_3^{(2)} - z_3^{(1)}) + x_3(z_3^{(3)} - z_3^{(1)}) \quad (8)$$

Ponieważ przeniesienie współrzędnych jest możliwe tylko dla niezależnych zmiennych, to jest niezwiązanych warunkiem (2), to równania (4) i (5) należało przekształcić pomijając jedną zmienną, na przykład z_3 . Dlatego wartości $z_i^{(j)}$ wyliczono poprzez rozwiązanie dwóch układów równań:

$$\begin{cases} x_1^{(1)} z_1^{(1)} + x_2^{(1)} z_1^{(2)} + x_3^{(1)} z_1^{(3)} = 1 \\ x_1^{(2)} z_1^{(1)} + x_2^{(2)} z_1^{(2)} + x_3^{(2)} z_1^{(3)} = 0 \\ x_1^{(3)} z_1^{(1)} + x_2^{(3)} z_1^{(2)} + x_3^{(3)} z_1^{(3)} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} x_1^{(1)} z_2^{(1)} + x_2^{(1)} z_2^{(2)} + x_3^{(1)} z_2^{(3)} = 0 \\ x_1^{(2)} z_2^{(1)} + x_2^{(2)} z_2^{(2)} + x_3^{(2)} z_2^{(3)} = 1 \\ x_1^{(3)} z_2^{(1)} + x_2^{(3)} z_2^{(2)} + x_3^{(3)} z_2^{(3)} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

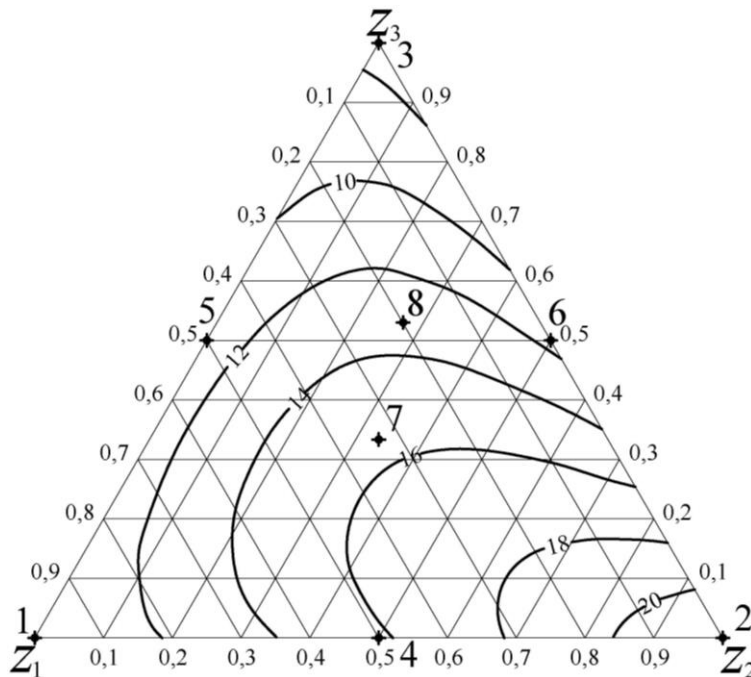
W wyniku rozwiązania układów równań (9) i (10) uzyskano wartości $z_i^{(j)}$ i po podstawieniu ich (6), (7) otrzymano formuły związku pomiędzy współrzędnymi naturalnymi x_i i systemem współrzędnych z_i :

$$z_1 = 6,0035 - 8,0047 x_2 - 7,0053 x_3 \quad (11)$$

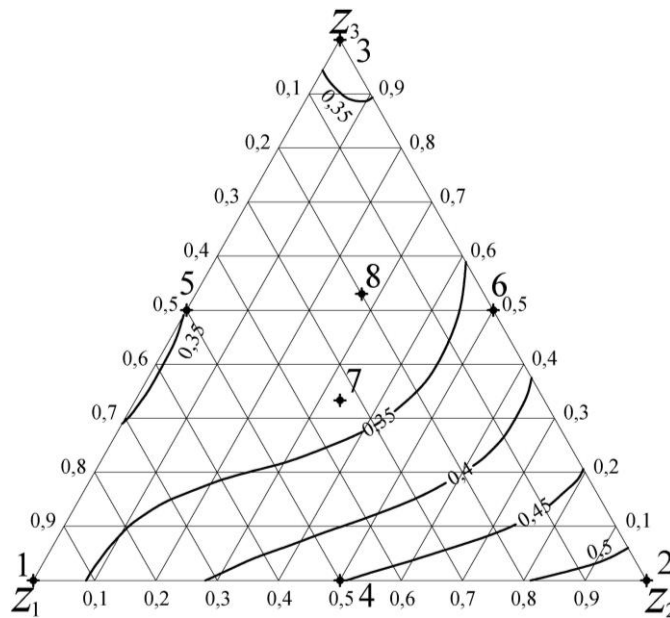
$$z_2 = -2,6680 + 4,8906 x_2 + 3,1132 x_3 \quad (12)$$

$$z_3 = -2,3356 + 3,1141 x_2 + 3,8921 x_3 \quad (13)$$

Po podstawieniu zależności (11), (12), (13) do (4) i (5) można uzyskać równania regresji w naturalnych współrzędnych. Do interpretacji wyników badań jednak zastosowano modele (4) i (5), na podstawie których opracowano wykresy w postaci izolinii badanych zależności we współrzędnych pseudo składników z_1, z_2, z_3 (rys. 1 i 2). Te modele pozwoliły powiększyć badany podobszar do pełnych trójkątów sympleksowych, znacznie ułatwiając interpretację wyników. Natomiast merytoryczną interpretację wykonano w oparciu o dane z tabel 1 i 2 przy zastosowaniu naturalnych współrzędnych x_1, x_2, x_3 .



Rys. 1. Wytrzymałość na ściskanie Y_1 próbek w zależności od zawartości składników: z_1 – cementu, z_2 – piasku naturalnego, z_3 – dodatku odpadów PCW



Rys. 2. Wytrzymałość na zginanie Y_2 badanych próbek w zależności od zawartości składników: z_1 – cementu, z_2 – piasku naturalnego, z_3 – dodatku odpadów PCW

6. Analiza wyników badań

Jak widać z rysunku 1, najwyższą wartość wytrzymałości na ściskanie Y_1 badanych próbek, wynoszącą około 22 MPa, uzyskano w punkcie 2 przy udziałach składników w mieszance: cementu $x_1 = 0,25$; piasku $x_2 = 0,75$; odpadów PCW $x_3 = 0$ (tab. 1). Taki rezultat można wyjaśnić tym, że dla punktu 2 planu przyjęto tradycyjnie rekomendowany skład i mieszanka nie zawierała dodatku. W całej pozostałej przestrzeni czynnikowej, w której każdym punkcie do mieszanki wprowadzano dodatek odpadów PCW, wartości wytrzymałości zmniejszały się. Ten fakt świadczy o negatywnym wpływie badanego dodatku na wytrzymałość na ściskanie próbek betonowych.

Przy przejściu z punktu 2 do punktu 1 zwiększa się zawartość cementu (od 0,25 do 0,333) i dodatku PCW (od 0 do 0,333) przy jednoczesnym obniżeniu zawartości piasku (od 0,75 do 0,333). W wyniku tej zmiany ma miejsce prawie równomierne obniżenie wytrzymałości na ściskanie od 22 do 10 MPa. Najmniejszą wytrzymałość na ściskanie Y_1 próbek, wynoszącą około 7,5 MPa, uzyskano w punkcie 3 przy zawartości dwóch komponentów w mieszance: cementu $x_1 = 0,143$ i odpadów PCW $x_3 = 0,857$. Przy przejściu z punktu 2 do punktu 3 zmniejsza się zawartość cementu (od 0,25 do 0,143) i piasku (od 0,75 do 0) przy jednoczesnym powiększeniu dodatku od 0 do 0,857. W wyniku takiej zmiany wytrzymałość na ściskanie zmniejsza się najbardziej istotnie – o 2,9 razy.

Przy przejściu z punktu 1 do punktu 3 następuje jednoczesne zmniejszenie się zawartości cementu od 0,333 do 0,143 i piasku od 0,333 do 0 przy powiększeniu zawartości dodatku od 0,333 do 0,857. Uwzględniając to zauważono, że na skutek zamiany części cementu i piasku na odpady PCW wytrzymałość na ściskanie Y_1 próbek waha się na poziomie 10-11 MPa,

osiągając najwyższą wartość około 11 MPa w punkcie 5, odpowiadającą zawartości cementu – 0,238; piasku – 0,167; dodatku – 0,595. Natomiast pełna zamiana piasku na odpady daje najmniejszą wartość wytrzymałości Y_1 (około 7,5 MPa).

Z rysunku 2 wynika, że najwyższą wytrzymałość na zginanie badanych próbek $Y_2 = 0,523$ MPa także uzyskano w punkcie 2, przy składzie mieszanki bez dodatku odpadów PCW. Podobnie jak dla wytrzymałości na ściskanie Y_1 , w pozostałej części przestrzeni czynnikowej, w każdym punkcie, w którym do mieszanki wprowadzano dodatek, wartości Y_2 zmniejszały się, co świadczy o negatywnym wpływie badanego dodatku także i na wytrzymałość na zginanie.

Przy przejściu z punktu 2 do punktu 1 zwiększa się udział cementu i dodatku przy jednoczesnym obniżeniu udziału piasku. W wyniku tej zmiany ma miejsce prawie równomierne obniżenie wytrzymałości na zginanie od 0,52 do 0,32 MPa. Przy przejściu z punktu 1 do punktu 3 zmniejsza się udział cementu i piasku przy powiększeniu dodatku od 0,333 do 0,857. Zamiana części cementu i piasku na odpady PCW spowodowała, że w środkowej części odcinka 1-3 (w okolicy punktu 5) wytrzymałość na zginanie ustabilizowała się na poziomie 0,35 MPa. Przy przemieszczeniu w kierunku od punktu 2 do punktu 7 następuje praktycznie liniowe obniżenie wytrzymałości na zginanie do 0,34 MPa.

Na izoliniach, pokazanych na rysunku 1, wykryto kierunek, dla którego charakterystyczna jest najmniejsza prędkość obniżenia wytrzymałości Y_1 . Ten kierunek pokrywa się z prostą prowadzoną przez punkty 2-7-5. Wyróżnia się tu zwłaszcza otoczenie punktu 7. Porównując składy mieszanek w punktach 2 i 7, zauważono, że zawartość cementu w nich jest praktycznie jednakowa i wynosi około 0,25. Jednocześnie w punkcie 7 około 50% piasku, zawierającego się w mieszance w punkcie 2 ($x_2 = 0,75$), zamienia się na odpady PCW

($x_2 = 0,361$; $x_3 = 0,397$). Ta zamiana spowodowała obniżenie wytrzymałości Y_1 materiału od 22,07 do 15,51 MPa, to znaczy o 29,7 %. Tak więc, na odcinku 2-7 przy zawartości cementu do mieszanki około 0,25, wprowadzenie w mieszankę dodatku odpadów PCW zamiast piasku powoduje najmniejsze straty wytrzymałości Y_1 , a mianowicie – każdy procent masowy wprowadzonego dodatku odpadów PCW powoduje straty wytrzymałości Y_1 w wysokości około 0,75% w stosunku do wytrzymałości materiału bez dodatku odpadów. Pozwala to, przy podjęciu decyzji o zastosowaniu dodatku odpadów PCW, oszacować straty wytrzymałości na ściskanie kompozytu cementowego oraz przyjęć punkt 7 jako punkt bazowy dla planowania dalszych badań na temat modyfikacji składu omówionych wyżej mieszanek poprzez zastosowanie innych dodatków lub domieszek w celu podwyższenia wytrzymałości kompozytów przy utylizacji odpadów PCW.

W taki sposób ustalono, że wykorzystanie odpadów PCW w charakterze dodatku dla kompozytów cementowych, wynikające z konieczności ich utylizacji albo częściowej zamiany piasku, przy nieobecności modyfikacji kompozytu innymi dodatkami, zawsze związane jest z obniżeniem się wytrzymałości materiału.

Nie potwierdziła się sformułowana hipoteza o możliwym wpływie mechanicznej aktywacji odpadów na rekonstrukcję reakcyjnej zdolności zawierającego się w nich cementu i jego pozytywnej roli w wzmocnieniu kompozytu z dodatkiem odpadów PCW. Obniżenie się wytrzymałości kompozytu cementowego przy wprowadzeniu tego dodatku oczywiście można wyjaśnić brakiem możliwości utworzenia gęstej i trwałej struktury materiału z powodu zawartości w nim dodatku składnika organicznego, to jest cząstek drewna.

Optymalizując parametry mieszanek z dodatkiem odpadów PCW należy podejmować kompromisową decyzję, zestawiając możliwe straty wytrzymałości materiału i zyski z utylizacji i/lub zamiany części piasku odpadami produkcji PCW.

7. Wnioski

Z przeprowadzonych badań oraz analizy opracowanych modeli matematycznych i wykresów wynikają następujące wnioski:

1. Przy badaniu próbek kompozytu cementowego w postaci beleczek 40×40×160 mm po 28 dniach dojrzewania, wykonywanych z cementu, piasku naturalnego i odpadów PCW, wykryto obniżenie ich wytrzymałości na ściskanie i zginanie w porównaniu z próbkami, przygotowanymi z cementu i piasku bez dodatku odpadów PCW.
2. Opracowane modele matematyczne i wykresy pozwoliły wykryć związek między wahaniami badanych właściwości i udziałem dodatku odpadów PCW w mieszance. Ujawnione efekty można wytłumaczyć obecnością cząstek drewna w odpadach PCW.

3. Przy utylizacji odpadów PCW poprzez ich zastosowanie w produkcji kompozytów cementowych należy uwzględnić, że dla kompensaty strat związanych z obniżeniem charakterystyk wytrzymałościowych materiału konieczna jest jego modyfikacja innymi dodatkami lub domieszkami, poprawiającymi właściwości mieszanki i wzmacniającymi strukturę materiału z dodatkiem odpadów PCW.
4. Określono punkt bazowy dla dalszych badań w kierunku modyfikacji kompozytu cementowego z dodatkiem odpadów PCW, któremu odpowiada skład mieszanki: cement – 0,237; piasek – 0,422; odpady PCW – 0,341. W tym punkcie wykonana zamiana około 50% piasku w mieszance na odpady PCW stanowi rozwiązanie problemu utylizacji (pozytywny efekt z punktu widzenia możliwości utylizacji odpadów), jednakże przy tym wykryto obniżenie wytrzymałości na ściskanie próbek na 30% (negatywny efekt z punktu widzenia obniżenia jakości materiału).

Literatura

- Brodskii V.Z., Brodskii L.I., Golikova T.I., Nikitsina E.P., Pančenko A.A. (1982). Tablicy Planov Eksperimenta dla Faktornyh i Polinomial'nyh Modelej. *Metallurgija*, Moskwa.
- GOST 8736-93 Piasek dla robót budowlanych. *Rosstandard*, FGUP Standartinform, Moskwa, 1993.
- GOST 10180-2012 Beton. Metody oznaczania ściskania i wytrzymałości na rozciąganie, elementów betonowych i żelbetowych. *Rosstandard*, FGUP Standartinform, Moskwa, 2013
- Il'icev V.A., Karpenko N.I., Yarmakovskii V.N. (2011). O razvitii proizvodstva stroitel'nykh materialov na osnove vtorichnykh produktov promishlennosti. *Stroitel'nie materialy*, No. 4, 36-42.
- Jeziński W., Małaszkiwicz D. (2015). Zastosowanie lokalnego planowania sympleksowego do oceny właściwości betonu z kruszywem z recyklingu. W: *Budownictwo ogólne: zagadnienia konstrukcyjne, materiałowe i cieplno-wilgotnościowe w budownictwie*, UTP, Bydgoszcz, 133-140.
- Krasovskij G.I., Filaretov G.F. (1982). Planirovanie Eksperimenta. *BGU*, Minsk.
- Krysicki W., Bartos J., Dyczka W., Królikowska K., Wasilewski M. (2003). Rachunek Prawdopodobieństwa i Statystyka Matematyczna w Zadaniach. Część II. Statystyka Matematyczna. *PWN*, Warszawa.
- Rahimov R.Z., Magdeev U.H., Yarmakovskii V.N. (2009). Ekologija, naučnie dostiženija i innovacii v proizvodstve stroitel'nykh materialov na osnove i s primeneniem tehnogenno go sir'a. *Stroitel'nie materialy*, No. 12, 8-12.
- Zedginidze I.G. (1986). Matematičeskoe Planirovanie Eksperymenta dla Issledovaniâ i Optimizacii Svoisty Smesej. *Mecniereba*, Tbilisi.

APPLICATION OF WASTES FROM CHIP-CEMENT BOARD PRODUCTION IN CEMENT COMPOSITES

Abstract: The paper presents the experimental results of the effect of addition of wastes from chip – cement board production on mechanical properties of cement composites. In accordance with the intended objective, compressive strength (answer Y_1) and the bending strength (answer Y_2) of cement mortar specimens were tested. The variable parameters were: cement contents (factor z_1), natural sand contents (factor z_2) and waste contents (factor z_3). Local simplex planning with limited variation range of the factors was applied

in the experiment. Based on the research results, mathematical models of the analyzed dependencies were developed. Proportions between cement, natural sand and wastes were determined. It gave a starting point in determining the use of wastes in the production of cement composites.

Badania zostały zrealizowane w ramach pracy S/WBiŚ/3/16 i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW.

KOMIN SŁONECZNY JAKO PRZYKŁAD PASYWNEGO SYSTEMU CHŁODZENIA BUDYNKU

Magdalena NAKIELSKA*, Krzysztof PAWŁOWSKI

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, al. prof. S. Kaliskiego 8, 85-796 Bydgoszcz, Polska

Streszczenie: Obecnie ogólnosiwiatowym trendem w kształtowaniu budynków jest poszukiwanie nowych rozwiązań, które umożliwiają komfortowe użytkowanie obiektów budowlanych w zgodzie ze środowiskiem naturalnym i zapewniając spadek zużycia energii. W artykule przedstawiono problematykę wentylacji obiektów budowlanych, które nie generują zwiększenia kosztów eksploatacyjnych obiektu. Na podstawie dostępnej literatury, zaprezentowano kilka przykładowych rozwiązań umożliwiających obniżenie temperatury w pomieszczeniach w sposób inny niż montaż instalacji klimatyzacyjnej. Przedstawiono opis stanowiska badawczego i wykonane badania potwierdzające zasadność stosowania kominu słonecznego w celu intensyfikacji wymiany powietrza w pomieszczeniu z jednoczesnym przewietrzeniem nocnym pomieszczeń w okresie letnim.

Słowa kluczowe: komin słoneczny, wentylacja naturalna, pasywny system chłodzenia.

1. Wprowadzenie

Od kilku lat obserwuje się w Polsce ciągły wzrost liczby instalowanych systemów klimatyzacyjnych, które poprawiają poziom komfortu cieplnego w pomieszczeniach w okresie letnim. Pomimo, że czas działania urządzeń chłodzących w odniesieniu do liczby dni w roku nie jest długi, można zauważyć zwiększenie zużycia energii w tym okresie. Zmniejszenie zapotrzebowania na moc chłodniczą do celów obniżenia temperatury w pomieszczeniu można osiągnąć między innymi poprzez wprowadzenie chłodniejszego powietrza z zewnątrz, bezpośrednie chłodzenie przegród budowlanych lub ochładzanie powietrza wentylacyjnego za pomocą wymienników ciepła (Oszczak, 2009).

Aktualne przepisy prawne w „Krajowym planie mającym na celu zwiększenie liczby budynków o niskim zużyciu energii” (M.P. z 2015r. poz. 614) wymieniają konkretne rozwiązania do eliminacji lub znacznej redukcji mocy układów chłodniczych klimatyzacji korzystających z agregatów chłodniczych. A mianowicie należy:

- ograniczyć zyski ciepła (redukcja zysków słonecznych przez ochronę przeciwsłoneczną i ograniczenie zysków wewnętrznych);
- dostosować strumienie powietrza do rzeczywistego obciążenia;
- wykorzystać alternatywne metody chłodzenia (chłodzenie nocne, wykorzystanie energii gruntu, *free cooling*, chłodzenie pasywne).

Celem artykułu jest prezentacja stanowiska badawczego jakim jest komin słoneczny, wraz z analizą wykonanych badań, potwierdzających zasadność stosowania kominu słonecznego w celu intensyfikacji wymiany powietrza w pomieszczeniu z jednoczesnym przewietrzeniem nocnym pomieszczeń w okresie letnim.

2. Naturalne chłodzenie pomieszczeń oparte na procesie wentylacji

W związku z tym, że człowiek coraz więcej czasu spędza w pomieszczeniach zamkniętych, należy dążyć do zapewnienia komfortu cieplnego a jednocześnie do minimalizacji kosztów utrzymania obiektu. Dodając do tego czynnik ludzki, jakim jest dążenie do życia w zgodzie z naturą, można stwierdzić, że naturalne klimatyzowanie budynków jest coraz bardziej pożądanym przez użytkowników sposobem utrzymywania komfortowego mikroklimatu wnętrza. Wentylacja naturalna jest skutecznym sposobem pozbycia się ogrzanego powietrza z wnętrza budynku. O jej efektywności decydują następujące czynniki: wiatr, temperatura powietrza zewnętrznego i wewnętrznego, a także wielkość i rozmieszczenie otworów cyrkulacyjnych. Przepływ powietrza może się odbywać przez otwory umieszczone w ścianach lub dachu, warunkując wentylację wyporową lub wentylację poprzeczną.

Wentylacja wyporowa zwana także grawitacyjną, polega na wykorzystaniu efektu kominowego, czyli

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: magdalena.nakielska@utp.edu.pl

niewymuszonego przepływu ciepłych mas powietrza ku górze i „zasysania” chłodniejszego u dołu. Powietrze dostaje się do pomieszczenia przez nieszczelności lub nawiewniki okienne, a wydostaje przez kanały wentylacyjne.

Wentylacja poprzeczna może zachodzić wówczas, gdy dwie różne ściany zewnętrzne budynku posiadają przynajmniej po jednym otworze cyrkulacyjnym, dzięki czemu zapewniony jest bezpośredni przepływ powietrza pomiędzy nimi. Wielkość otworów cyrkulacyjnych i ich usytuowanie wpływają na prędkość ruchu powietrza. Istotna jest też obecność pionowych przegród wewnętrznych. Brak przegród lub ustawienie ich równoległe do kierunku przepływu strumienia powietrza może spowodować zbyt dużą prędkość przepływu powietrza. Jeżeli przegrodę wewnętrzną ustawi się prostopadle do kierunku przepływu strumienia powietrza, to będzie ona stanowiła barierę i może wpływać na niedostateczne przewietrzanie przestrzeni wewnętrznej.

Wietrzanie nocne ma bezpośredni wpływ na obniżenie temperatury powietrza wewnętrznego, poprzez wtłoczenie chłodniejszego powietrza zewnętrznego. Przyczynia się także do zmniejszenia zakumulowanego ciepła w elementach konstrukcyjnych obiektu. Fakt ten powoduje także obniżenie temperatury powietrza wewnętrznego. Zakumulowany w masywnych przegrodach chłód ulega wypromieniowaniu w ciągu dnia.

3. Komin słoneczny jako system wspomagający chłodzenie pomieszczeń

Zasada działania komina słonecznego jest podobna do działania komina tradycyjnego z tą różnicą, że doprowadzany jest dodatkowy strumień ciepła do powietrza usuwanego z pomieszczenia, w celu zmniejszenia jego gęstości w przeszklonej przestrzeni komina. W wyniku tego wzrasta różnica gęstości powietrza usuwanego pomiędzy wlotem a wylotem z komina, a tym samym wzrasta różnica ciśnień, co powoduje zwiększenie tak zwanego „efektu kominowego”. W dni słoneczne komin wystający ponad dach budynku i jego ciemna barwa sprawiają, że w górnej części komina powietrze silnie się nagrzewa oraz następuje proces akumulacji ciepła w ścianach komina. W ciągu nocy ściany oddając ciepło podwyższają temperaturę powietrza w kominie słonecznym, co powoduje że powietrze z pomieszczenia jest szybciej usuwane na zewnątrz (Chalamoński i Nakielska, 2015).

Komin słoneczny znalazł zastosowanie jako element pomocniczy systemu chłodzenia budynku. Badania doświadczalne, mające na celu ocenę pasywnego systemu chłodzenia z wykorzystaniem idei komina słonecznego, przeprowadzone w Tajlandii opublikowali Chungloo i Limmeechokchai (2007). Stanowisko badawcze wyposażono w dwa takie same obiekty budowlane o wymiarach: 3,8 m × 2,8 m × 2,4 m. Jeden z nich stanowił jednostkę badaną, drugi – jednostkę kontrolną. Ściany obiektów o konstrukcji szkieletowej drewnianej wypełniono styropianem o grubości 0,076 m. Dach

nachylono pod kątem 45°, podzielono na dwie części: północną i południową. Część południowa składa się z płyty gipsowej o grubości 0,15 m po wewnętrznej stronie, warstwy powietrza i dachówki jako warstwy zewnętrznej. Północny dach na badanej jednostce składał się z dwóch warstw: zewnętrznej wykonanej z blachy ocynkowanej, w której umieszczono regulowane żaluzje, oraz wewnętrznej – wykonanej z blachy płaskiej, gdzie zamontowano przewody z wodą (ang. *water springer*). Północny dach jednostki kontrolnej pokryto dachówką, a od wewnątrz płytami gipsowymi. Obydwa obiekty wyposażono w komin słoneczny z wlotami powietrza na stronie południowej (ang. *solar chimney outlet*).

Badania na wyżej wymienionych obiektach prowadzono wielokierunkowo. Jednym z zagadnień było określenie temperatur powietrza i wpływu promieniowania słonecznego na przepływ powietrza dla trzech okresów w roku: lipiec-sierpień, wrzesień-październik, luty-marzec. Autorzy wykazali, że komin słoneczny może zmniejszyć temperaturę wewnętrzną od 1°C do 3,5°C w porównaniu do temperatury otoczenia i o 1,0-3,5°C w stosunku do jednostki kontrolnej, w zależności od temperatury otoczenia i intensywności promieniowania słonecznego. Innym zagadnieniem było sprawdzenie wpływu natrysku wodą. Ustalono, że natryskiwanie wody na dachu wraz z działaniem komina słonecznego może przyczynić się do zmniejszenia temperatury wewnętrznej o 2-6,2°C w stosunku do temperatury otoczenia, a o 1,4-3,0°C w odniesieniu do jednostki kontrolnej.

Tan i Wong (2012) przedstawili mechanizm działania komina słonecznego w budynku trzykondygnacyjnym w Singapurze. Zmodernizowany w 2009 roku budynek zyskał miano zeroenergetycznego. Zadaniem komina słonecznego miało być zwiększenie intensywności wentylacji grawitacyjnej w wydzielonym na cele badań pomieszczeniu. Znajdowało się ono na pierwszej kondygnacji i było połączone kanałami z górną kondygnacją, na której znajdował się wylot komina słonecznego. Badania, które trwały około 120 dni, wykazały iż system sprawdza się nawet w chłodne dni, kiedy obserwowano małe natężenie promieniowania słonecznego. Dokonano oceny warunków wewnątrz dwóch pomieszczeń: jednego z kominem słonecznym, drugiego bez komina. W upalny dzień w pomieszczeniu z kominem użytkownicy określili warunki jako „ciepłe do zaakceptowania”, natomiast w pomieszczeniu bez komina przeważały odpowiedzi, iż jest za gorąco. Badania te potwierdzają skuteczność działania komina słonecznego jako wspomagającego wentylację naturalną.

4. Opis stanowiska badawczego – komina słonecznego

W celu oceny działania systemu wentylacji naturalnej z kominem słonecznym, wykonane zostało stanowisko badawcze usytuowane na budynku 3.1 Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy przy ulicy Kaliskiego 7. Na istniejących kanałach wentylacyjnych została wykonana nadbudowa, stanowiąca komin

słoneczny, o wymiarach zewnętrznych $0,47\text{ m} \times 1,75\text{ m}$ i wysokości $1,46\text{ m}$. Trzy ściany wykonano z betonu B20 zbrojonego prętami $\phi 10$ co 15 cm . Czwartą ścianę o orientacji południowej stanowi przeszklenie o powierzchni $1,88\text{ m}^2$, wykonane z szyby bezpiecznej Pilkington Optilam 6,4, której grubość wynosi $6,38\text{ mm}$, o całkowitej przepuszczalności energii słonecznej 79% i współczynnika przenikania ciepła $5,7\text{ W/m}^2\text{K}$. W ciągu dnia stanowisko badawcze jest w naturalny sposób ogrzewane przez słońce, co doprowadza do powstania podciśnienia między wlotem a wylotem, jednocześnie wymuszając przepływ powietrza cieplejszego ku górze, w stronę otworu wylotowego. Dodatkowo, w ścianach zostaje zmagazynowana energia, która w okresie nocnym przy braku nasłonecznienia zostanie uwolniona. Żelbet, jako materiał do budowy kominu słonecznego, został wybrany po przeanalizowaniu licznych publikacji dotyczących akumulacyjności ciepła materiałów budowlanych. Potwierdzeniem zastosowania betonu zbrojonego jest publikacja Zegardły i Halickiej (2011), w której zaprezentowano wyniki badań laboratoryjnych dziesięciu próbek z różnych materiałów. Analizie poddano nagromadzoną w próbkach energię cieplną, która została wyemitowana w czasie stygnięcia. Przygotowane próbki umieszczono w suszarce na trzy godziny, gdzie panowała maksymalna temperatura 230°C . Następnie wyciągnięto i zbadano temperaturę na ich powierzchni, przez określony czas. Z otrzymanych wyników obliczono zdolność materiału do oddawania zgromadzonej energii w określonym czasie (9000 s). Najwyższą moc osiągnęła próbka stalowa $8,874\text{ W}$, niższą betony $5,3\text{--}6,6\text{ W}$, cegła ceramiczna $3,72\text{ W}$, a najniższą beton komórkowy $1,616\text{ W}$ oraz cegła szamotowa ($2,408\text{ W}$).

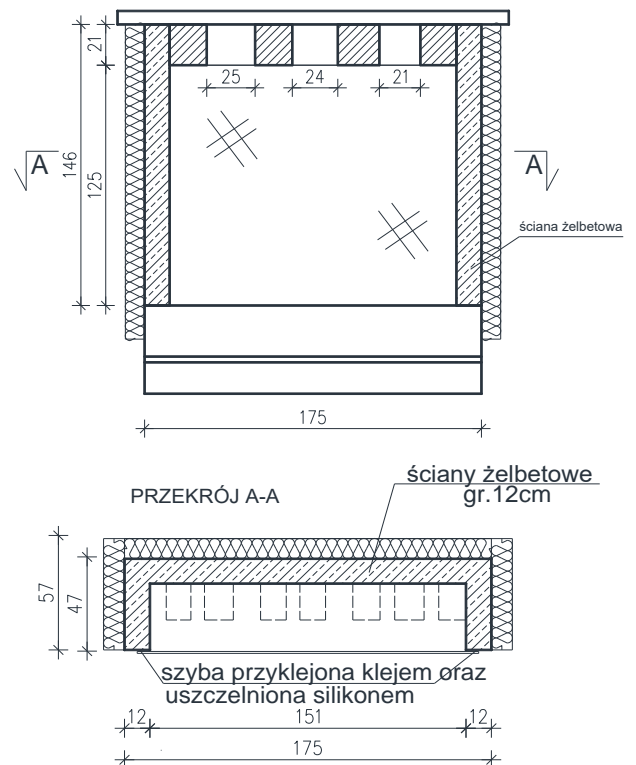
W celu wzmocnienia efektu kominowego, trzy ściany żelbetowe kominu słonecznego, pomalowano wewnątrz na kolor czarny, zaizolowano styropianem ESP 70-0,037 o grubości 10 cm i otynkowano. Górę kominu słonecznego stanowi płyta żelbetowa, pokryta warstwą papy. Zdjęcia stanowiska badawczego przedstawia rysunek 1. Na rysunku 2 zaprezentowano konstrukcję kominu słonecznego.

W sali dydaktycznej, nad którą wybudowano komin żelbetowy, znajduje się 5 krutek wentylacyjnych, o wymiary zewnętrznych $16,8\text{ cm} \times 16,8\text{ cm}$. Powierzchnia netto krutek wewnątrz sali, przez którą wydostaje się powietrze, wynosi $0,0620\text{ m}^2$.

Do przeprowadzenia badań wybrano okres letni, kiedy panują wysokie temperatury w ciągu dnia, a nocą temperatura się obniża. Do pomiarów wybrano dni bezwietrzne: 6-7 lipca, 19-20 lipca, 9-10 sierpnia 2014 roku. Aparatura użyta do badań to: termohigrometr C3120 i termoanemometr TA 430.



Rys. 1. Komin słoneczny – strona południowa, strona północna



Rys. 2. Komin słoneczny – rysunek konstrukcyjny

Pomiarów dokonywano co dwie godziny w cyklu 24 godzinnym, mierząc następujące parametry:

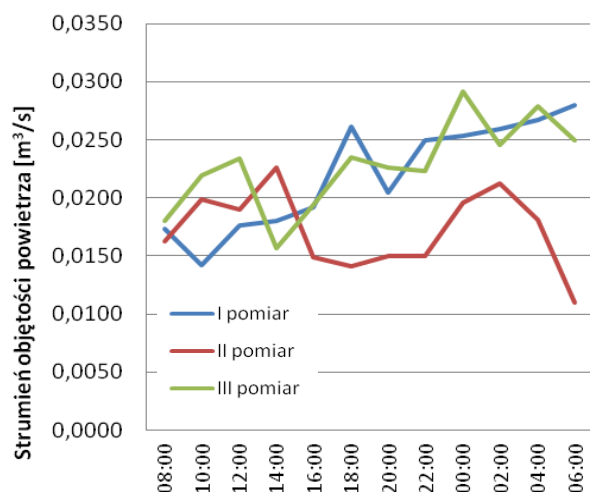
- prędkość powietrza na poziomie kratki nawiewnych,
- temperaturę i wilgotność powietrza wewnątrz pomieszczenia,
- temperaturę i wilgotność powietrza na zewnątrz pomieszczenia.

Z otrzymanych wyników pomiarów obliczono strumień objętości powietrza w poszczególnych godzinach według wzoru:

$$\dot{V} = P \cdot w_{pow} \quad (1)$$

gdzie: P jest powierzchnią wlotu powietrza, a w_{pow} sumą średnich prędkości powietrza mierzoną w $m \cdot s^{-1}$.

Wyniki z trzech cykli pomiarowych naniesiono na wykres zaprezentowany na rysunku 3. Wartość strumienia objętości powietrza w ciągu doby zmienia się w każdym z trzech cykli pomiarowych. Wartości te od godziny 8.00 do godziny 16.00 wykazują niewielkie wahania w zakresie od 0,015 do 0,023 m^3/s . Jest to czas bezpośredniego oddziaływania promieni słonecznych na przeszklenie, znajdujące się na stronie południowej komina słonecznego. Od godziny 16.00 do 4.00 mają tendencję wzrostową, a następnie zauważamy spadek wartości. Wyniki otrzymane z pomiaru I i III wykazują zbieżność co do otrzymywanych wartości strumienia objętości powietrza. Natomiast wartości otrzymane z pomiaru II, od godziny 16.00 wykazują spadek wartości, po czym o godzinie 22.00 zauważamy wzrost strumienia objętości powietrza do godziny 2.00 w nocy. Po tej godzinie, do końca cyklu pomiarowego, wartości mają tendencję spadkową.



Rys. 3. Wykres strumienia objętości powietrza

5. Podsumowanie i wnioski

Wobec konieczności ograniczania ilości zużywanej energii elektrycznej na cele chłodzenia obiektów

budowlanych, potrzeba wprowadzania alternatywnych rozwiązań w tym zakresie jest i będzie coraz większa.

W Polsce działanie komina słonecznego jako elementu systemu wentylacji naturalnej nie zostało jeszcze dostatecznie zbadane. Zamieszone w artykule badania wykonane na jednym stanowisku badawczym obrazują zasadność stosowania takiego rozwiązania. W godzinach nocnych we wszystkich trzech cyklach badawczych zaobserwowano zwiększenie strumienia objętości powietrza. Wynika to ze wzmożonej wymiany powietrza w pomieszczeniu. Ciepłe powietrze, które dostało się do pomieszczenia w ciągu dnia, zostało wymienione na chłodniejsze powietrze nocne.

Literatura

- Uchwała nr 91 Rady Ministrów z dnia 22 czerwca 2015 r. w sprawie przyjęcia „Krajowego planu mającego na celu zwiększenie liczby budynków o niskim zużyciu energii”. M.P. z 2015 r., poz. 614.
- Chungloo S., Limmeechokchain B. (2007). Application of passive cooling systems in the hot and humid climate: the case study of solar chimney and wetted roof in Thailand. *Building and Environment*, Vol. 42, Is. 9, 3341-3351.
- Chalamoński M., Nakielska M. (2015). Badanie Wydajności Komina Słonecznego. W: *Budownictwo ogólne: zagadnienia konstrukcyjne, materiałowe i cieplno-wilgotnościowe w budownictwie*. Wydawnictwo Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz.
- Oszczak W. (2009). Ogrzewanie Domów z Zastosowaniem Pomp Ciepła, *Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ*, Warszawa.
- Tan A.Y.K., Wong N.H. (2012). Natural ventilation performance of classroom with solar chimney system. *Energy and Buildings*, Vol. 53, 19-27.
- Zegardło B., Halicka A. (2011). Analiza właściwości cieplnych betonu z kruszywem z odpadów ceramiki sanitarnej. *Budownictwo i Architektura*, Vol. 9, No. 2, 39-49.

SOLAR CHIMNEY AS EXAMPLE OF PASSIVE COOLING SYSTEM IN BUILDING

Abstract: Nowadays, searching new solutions is a worldwide trend in creating buildings. Those solutions enable a comfortable use of building structures in harmony with natural environment and ensure reducing energy consumption. The article presents the issues connected with the ventilation of building structures which do not generate a rise of the maintenance costs in building. Based on the available literature, some exemplary solutions that make it possible to reduce the temperature in rooms in a way other than by installing air conditioning systems were shown. The description of a research stand and conducted research, confirming the legitimacy of using a solar chimney in order to intensify the air exchange in a room in parallel with a night ventilation of the room in the summer time, were presented.

KOORDYNACJA BUDOWLANEGO PROCESU INWESTYCYJNEGO

Jerzy OBOLEWICZ*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok

Streszczenie: Praktyka wynikająca z realizacji budowlanego procesu inwestycyjnego wykazuje, że potrzebną staje się koordynacja działań procesowych. Inwestorzy coraz częściej korzystają z tak zwanej instytucji inwestora zastępczego powierzając jej część lub całość obowiązków związanych z przygotowaniem, prowadzeniem i koordynacją działań uczestników procesu inwestycyjnego. Szczegółowe określenie zakresu powierzonych inspektorowi zastępczemu czynności wymaga identyfikacji wszystkich działań niezbędnych do zrealizowania zaplanowanej inwestycji. W artykule dokonano przeglądu literatury dotyczącej elementów struktury procesu i zaproponowano model organizacyjny budowlanego procesu inwestycyjnego jako narzędzie do koordynowania działań z poziomu inwestora.

Słowa kluczowe: budownictwo, struktura procesu inwestycyjnego, model organizacyjny procesu, koordynacja działań.

1. Wprowadzenie

Współczesna działalność budowlana kształtuje się w warunkach rewolucyjnych przeobrażeń społeczno-gospodarczych i techniczno-ekonomicznych. Rzemieślnicze formy produkcji budowlanej oraz odpowiadające im rozwiązania organizacyjne, charakterystyczne dla lat powojennych i gospodarki socjalistycznej, należą do przeszłości. Współczesne przedsięwzięcia budowlane są bardziej złożone, a ich istota tkwi w szczegółach planistycznych, projektowych i technicznych związanych z przygotowaniem, realizacją i eksploatacją inwestycji. Praktyka związana z realizacją budowlanego procesu inwestycyjnego wykazuje, że potrzebną staje się koordynacja działań procesowych. Inwestorzy coraz częściej korzystają z tak zwanej instytucji inwestora zastępczego powierzając jej część lub całość obowiązków związanych z przygotowaniem i prowadzeniem procesu inwestycyjnego. Wspecjalizowana jednostka – inwestor zastępczy w imieniu inwestora:

- identyfikuje i przyjmuje strukturę działalności inwestycyjnej oraz określa udział wszystkich uczestników procesu budowlanego zgodnie z uregulowaniami prawno-administracyjnymi;
- dokumentuje działania i postęp w procesie;
- wykazuje się znajomością sposobów i dostępności źródeł finansowania;
- koordynuje zasoby (ludzi, materiały i sprzęt) w poszczególnych etapach procesu.

2. Identyfikacja struktury budowlanego procesu inwestycyjnego

Budowlany proces inwestycyjny jest zbiorem czynności niezbędnych do zrealizowania określonej inwestycji budowlanej, wymagającym znajomości prawa i umiejętności, rozłożonym w czasie i angażującym duże środki. Czynności te dotyczą działań o charakterze planistycznym i projektowym, związanych z przygotowaniem inwestycji do realizacji, a także aspektów technicznych i organizacyjnych związanych z realizacją inwestycji oraz aspektów eksploatacji obiektów oddanych o użytkowania. Osoby biorące w nim udział powinny wykazać się szeroką wiedzą, odpowiednim przygotowaniem zawodowym i doświadczeniem (Obolewicz, 2011, 2014).

W literaturze tematyki istnieją rozbieżności co do liczby etapów, faz i czynności występujących w procesie inwestycyjnym oraz ich nazewnictwa.

Biliński (2010b) nazywa proces inwestycyjny w budownictwie procesem inwestycyjno-budowlanym i wyróżnia trzy jego etapy (tab. 1).

Grzywiński (2015) przedstawia budowlany proces inwestycyjny z perspektywy inwestora i ujmuje w czterech etapach (tab. 2):

1. ustalenie stanu prawnego i przeznaczenia nieruchomości,
2. określenie warunków zabudowy,
3. pozwolenie i realizacja budowy,
4. pozwolenie na użytkowanie i przystąpienie do eksploatacji obiektu budowlanego.

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: j.obolewicz@pb.edu.pl

Tab. 1. Etapy procesu inwestycyjno-budowlanego

Lp.	Etap	Nazwa czynności	Charakterystyka
1	ETAP A. Przygotowanie przedsięwzięcia inwestycyjnego	Formułowanie przedsięwzięcia	1. Studia i analizy przed inwestycyjne
		Programowanie przedsięwzięcia	1. Uzasadnienie celowości inwestycji 2. Lokalizacja 3. Zakres rzeczowy i okres realizacji 4. Przewidywane efekty rzeczowe 5. Ocena oddziaływania na środowisko 6. Ocena ekonomicznej efektywności
		Planowanie przedsięwzięcia	1. Decyzja o lokalizacji inwestycji 2. Ustalenie warunków realizacji 3. Studium wykonalności 4. Ustalenie podstawowych założeń projektowych 5. Plan zarządzania i realizacji przedsięwzięcia
		Wybór wykonawcy prac projektowych	1. Opracowanie specyfikacji istotnych warunków zamówienia i programu funkcjonalno-użytkowego 2. Przygotowanie procedury przetargowej 3. Przeprowadzenie postępowania dla wyboru wykonawcy 4. Zawarcie umowy na wykonanie prac projektowych
2	ETAP B. Prace poprzedzające rozpoczęcie robót bud.	Projektowanie	1. Opracowanie dokumentacji projektowo-kosztorysowej 2. Zatwierdzenie projektu budowlanego oraz opracowań towarzyszących 3. Uzyskanie pozwolenia na budowę 4. Opracowanie dokumentacji wykonawczej 5. Zatwierdzenie opracowań tworzących dokumentację wykonawczą 6. Opracowanie wytycznych realizacji przedsięwzięcia
		Wybór wykonawcy robót budowlanych	1. Przygotowanie i przeprowadzenie postępowania 2. Wybór wykonawcy i zawarcie umowy na wykonanie robót budowlanych
3	ETAP C. Budowa, utrzymanie i rozbiórka obiektu budowlanego	Budowa	1. Przygotowanie do rozpoczęcia robót budowlanych 2. Rozpoczęcie i prowadzenie robót 3. Zakończenie robót budowlanych i odbiór końcowy
		Oddanie obiektu budowlanego do użytku	1. Zawiadomienie właściwego organu o zakończeniu budowy 2. Uzyskanie pozwolenia na użytkowanie obiektu budowlanego
		Utrzymanie i rozbiórka obiektu budowlanego	1. Zarządzanie nieruchomością w okresie gwarancji 2. Odbiór ostateczny 3. Kontrole obowiązkowe. Remonty bieżące i kapitalne 4. Zakończenie użytkowania obiektu 5. Rozbiórka obiektu budowlanego. Recykling.

Źródło: Opracowanie własne na podstawie (Biliński 2010b)

Tab. 2. Etapy procesu inwestycyjnego zgodnie z prawem budowlanym

Lp.	Etap	Czynności do wykonania
1	Etap 1. Ustalenie stanu prawnego i przeznaczenia nieruchomości	1. Nabywanie prawa do dysponowania nieruchomością 2. Ustalenie przeznaczenia nieruchomości 3. Uzyskanie uprawnienia do dysponowania nieruchomością na cele budowlane
2	Etap 2. Określenie warunków zabudowy i opracowanie projektu budowlanego	1. Ustalenie przeznaczenia terenu zgodnie z miejscowym planem zagospodarowania przestrzennego 2. Uzyskanie decyzji o warunkach zabudowy i zagospodarowania terenu
3	Etap 3. Uzyskanie pozwolenia na budowę i realizacja robót budowlanych	1. Otrzymanie decyzji pozwolenia na budowę: - projekt zagospodarowania działki lub terenu - projekt architektoniczno-budowlany - informacja o obszarze oddziaływania obiektu 2. Zawarcie umowy z wykonawcą robót budowlanych 3. Przekazanie terenu budowy wykonawcy 4. Zapewnienie nadzoru inwestorskiego oraz ewentualnego nadzoru nad projektem 5. Opracowanie planu bezpieczeństwa i ochrony zdrowia 6. Zawiadomienie o zamierzonym terminie rozpoczęcia robót budowlanych 7. Uzyskanie dziennika budowy 8. Ustalenie dostaw energii, wody, ciepła lub gazu na potrzeby budowy
4	Etap 4. Pozwolenie na użytkowanie i przystąpienie do eksploatacji	1. Uzyskanie decyzji o pozwoleniu na użytkowanie 2. Przekazanie właścicielowi lub zarządcy obiektu dokumentacji budowy i dokumentacji powykonawczej 3. Założenie i prowadzenie książki obiektu

Źródło: Opracowanie własne na podstawie (Grzywiński 2015)

Tab. 3. Podstawowe obszary procesu inwestycyjno-budowlanego

Lp.	Obszar procesu	Czynności do wykonania w obszarze procesu
1	OBSZAR 1. Ocena warunków lokalizacji inwestycji	Ocena: – dostępności terenu – przydatności terenu pod inwestycję – warunków uzbrojenia terenu w zakresie infrastruktury technicznej – warunków budowy (użytkowania) inwestycji – warunków przygotowania dokumentacji inwestycji – ekonomiczna wyboru terenu lokalizacji inwestycji
2	OBSZAR 2. Przygotowanie dokumentacyjne inwestycji budowlanej	Faza I. Przygotowania podjęcia decyzji inwestycyjnej. Studia i analizy przed inwestycyjne Faza II. Przygotowanie projektów i opracowań w celu: uzyskania pozwolenia na budowę, przeprowadzenia procedury przetargowej i wyboru wykonawcy, wykonania robót budowlanych
3	OBSZAR 3. Wykonywanie robót budowlanych	1. Uzyskanie pozwolenia na budowę. Zgłoszenie budowy obiektów lub wykonania robót budowlanych – niewymagających pozwolenia na budowę 2. Prowadzenie robót budowlanych 3. Zawiadomienie o zakończeniu budowy 4. Opracowanie dokumentacji powykonawczej
4	OBSZAR 4. Eksploatacja obiektu budowlanego	1. Uzyskanie decyzji o pozwoleniu na użytkowanie 2. Przystąpienie do użytkowania 3. Prowadzenie dokumentacji eksploatacyjnej obiektu budowlanego

Źródło: Opracowanie własne na podstawie (Zabielski, 2014)

Zabielski (2014) w procesie budowlano-inwestycyjnym wyróżnia, czynności (tab. 3): administracyjno-prawne, cywilno-prawne, faktyczne, które lokalizuje w czterech podstawowych obszarach: ocena warunków lokalizacji inwestycji, przygotowanie dokumentacyjne, wykonywanie robót budowlanych, użytkowanie obiektu budowlanego.

Dzierżewicz i Dylewski (2011) analizują przebieg procesu realizacji inwestycji budowlanych w świetle ustawy Prawo budowlane. Zgodnie z prawem budowlanym realizacja inwestycji budowlanych powinna przebiegać według wymaganych procedur i decyzji właściwych organów w odniesieniu do obiektów budowlanych. Proces budowlany obejmuje ustalenie warunków zabudowy i zagospodarowania terenu, przygotowanie inwestycji do realizacji, realizację i utrzymanie obiektu budowlanego (tab. 4).

Według Strzeleckiej i in. (2014) budowlany proces inwestycyjny obejmuje pięć faz:

- fazę przedinwestycyjną – formułowanie przedsięwzięcia,
- prace analityczno-studialne (w dwóch fazach),
- realizację robót budowlanych,
- eksploatację.

Wykaz czynności wchodzących w zakres poszczególnych faz przedstawiono w tabeli 5.

Według Połońskiego (2009) budowlany proces inwestycyjny przebiega w trzech etapach: przygotowanie inwestycji do wykonania, realizacji oraz użytkowania

(eksploatacji) inwestycji (tab. 6).

Baryłka A. i Baryłka J. (2015) wyróżniają w procesie inwestycyjnym w budownictwie dwa zasadnicze obszary: budowlany proces inwestycyjny i eksploatacyjny proces inwestycyjny, w których identyfikują pięć etapów (tab. 7).

Dokonany przegląd wskazuje na różnorodność interpretacji elementów procesu inwestycyjnego w budownictwie i wymaga uprządkowania (rys. 1, tab. 8).

Całokształt czynności składających się na proces nie jest jednakowy dla wszystkich inwestycji, a o ostatecznym efekcie zakończenia inwestycji decyduje wiele czynników. W praktyce budowlanej największą uwagę, tradycyjnie zwraca się na najniższy koszt realizacji inwestycji w stosunku do kosztorysu inwestorskiego.

Wykorzystując doświadczenia holenderskie (Biliński, 2010b) można stwierdzić, że największy wpływ na koszt inwestycji (200-300%) ma jej koncepcja. W fazie wstępnego projektu wpływ na koszty maleje do poziomu 40-80%. W fazie projektu technicznego (wykonawczego) spada do 15-30% a w fazie realizacji obniża się do poziomu 5-10%.

Inwestorowi zależy, aby czas realizacji inwestycji był najkrótszy. W polskiej praktyce najczęściej ogranicza się czas przygotowania inwestycji, a więc paradoksalnie, czynności, które w praktyce holenderskiej mają największy wpływ na koszty realizacji przedsięwzięcia.

Tab. 4. Etapy i fazy budowlanego procesu inwestycyjnego

Lp.	Etapy procesu	Fazy w etapach	Czynności do wykonania
1	ETAP I. Ustalenie warunków zabudowy i zagospodarowania terenu	Faza przygotowania inwestycji budowlanych	1. Ustalenie warunków zabudowy i zagospodarowania terenu 2. Sporządzenie mapy zasadniczej i podkładów geodezyjnych do projektowania 3. Opracowanie dokumentacji geologiczno-technicznej 4. Ocena oddziaływania inwestycji na środowisko 5. Uzyskanie prawa do dysponowania nieruchomością na cele budowlane
		Faza projektowania	1. Opracowanie dokumentacji projektowej: projektu budowlanego, projektu wykonawczego, przedmiaru robót, informacji bioz, inwestorskich założeń organizacji budowy, specyfikacji technicznej wykonania i odbioru robót budowlanych, programu funkcjonalno-użytkowego, kosztorysu inwestorskiego oraz zaplanowanie kosztów prac projektowych 2. Uzyskanie opinii i uzgodnień projektu budowlanego
3	ETAP III. Realizacja inwestycji budowlanej	Faza administracyjno-prawna	
		Faza budowy	
4	ETAP IV. Utrzymanie obiektu budowlanego	Faza oddawania obiektu do użytku	
		Faza eksploatacji obiektu budowlanego	

Źródło: Opracowanie własne na podstawie (Dzierżewicz i Dylewski, 2011)

Tab. 5. Fazy procesu inwestycyjno-budowlanego

Lp.	Nazwa fazy	Czynności występujące w fazie
1	Faza I Formułowanie przedsięwzięcia	Programowanie, planowanie i inne działania niezaliczane do właściwego procesu inwestycyjnego (programy rządowe, plany wojewódzkie, plany miejscowe - MPZP)
2	Faza II Prace analityczno-studialne	1. Podjęcie decyzji o działaniach oraz wyznaczenie inwestora (zamawiającego) 2. Określenie wymagań dotyczących programu rzeczowego i funkcjonalnego 3. Wykonanie analiza – studium programowe 4. Określenie wartości kosztorysowej inwestycji 5. Uzyskanie decyzji o finansowaniu inwestycji
3	Faza III Prace analityczno-studialne	1. Określenie zakresu dokumentacji projektowej 2. Wybór wykonawcy dokumentacji projektowej – umowa 3. Opracowanie projektów i specyfikacji technicznej wykonania i odbioru robót 4. Opracowanie zbiorczego zestawienia kosztów – kosztorysu inwestorskiego
4	Faza IV Realizacja robót budowlanych	1. Wybór systemu realizacji robót 2. Wybór wykonawcy (wykonawców) robót i koordynatora – przetarg i umowa 3. Wykonanie robót 4. Rozliczenie, opracowanie dokumentacji powykonawczej, odbiory 5. Wyposażenie obiektu budowlanego i rozruch inwestycji
5	Faza V Eksploatacja obiektu budowlanego	1. Oddanie obiektu do użytkowania i przekazanie dokumentacji obiektu dla użytkownika 2. Usuwanie wad i usterek powstałych w okresie gwarancyjnym 3. Odbiór pogwarancyjny 4. Końcowe rozliczenie

Źródło: Opracowanie własne na podstawie (Strzelecka i in., 2014)

Tab. 6. Zasadnicze etapy budowlanego procesu inwestycyjnego

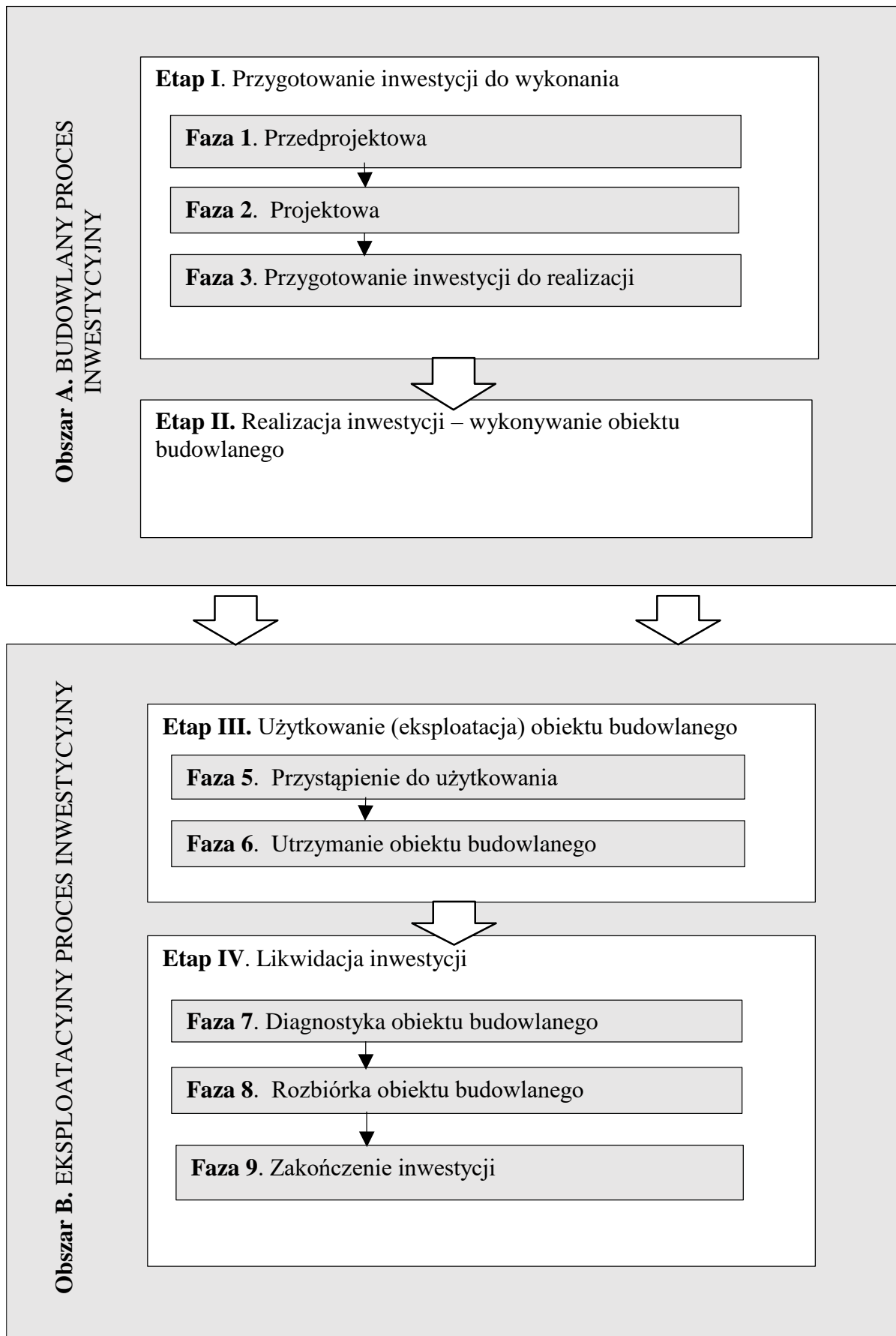
Lp.	Nazwa etapu	Czynności występujące w etapie
1	Przygotowanie inwestycji do wykonania	1. Pomysł na nową inwestycję. Zbieranie informacji na temat przyszłych działań: prognozowanie, programowanie, planowanie 2. Opracowanie wstępnej, wielowariantowej koncepcji lokalizacji, parametrów technicznych i technologicznych obiektu 3. Wybór konkretnego wariantu lokalizacji i technicznych warunków wykonania obiektu budowlanego i opracowanie studium wykonalności 4. Decyzja o kontynuowaniu prac nad przygotowaniem planowanego obiektu do realizacji 5. Opracowanie projektu i uzyskanie uzgodnień, w tym: pomiary i podkłady geodezyjne, plany infrastruktury technicznej, ocena oddziaływanie na środowisko, kosztorys inwestycyjny 6. Uzyskanie pozwolenia na budowę lub zgłoszenie robót budowlanych
2	Realizacja inwestycji budowlanej	1. Przygotowanie przedsięwzięcia do realizacji: opracowanie dokumentacji przetargowej, wybór wykonawcy, przygotowanie i przekazanie placu budowy wykonawcy, opracowanie planu BIOZ i zawiadomienie o terminie rozpoczęcia robót na budowie 2. Przeprowadzenie robót budowlanych (realizacja, montaż, wyposażenie w niezbędne urządzenia techniczne, rozruch i okres próbnej realizacji) 3. Odbiór końcowy i usunięcie ewentualnych usterek 4. Sporządzenie dokumentacji powykonawczej 5. Przekazanie obiektu inwestorowi 6. Uzyskanie pozwolenia na użytkowanie lub zgłoszenie do użytkowania obiektu budowlanego
3	Użytkowanie (eksploatacja) inwestycji	Obejmuje wszystkie działania niezbędne do ciągłego utrzymania obiektu w stanie pełnej użyteczności zgodnie z jej przeznaczeniem, obejmujące konserwację, naprawy bieżące i okresowe, remonty. Etap ten kończy się z chwilą likwidacji obiektu budowlanego (inwestycji)

Źródło: Opracowanie własne na podstawie (Połoński, 2009)

Tab. 7. Obszary i etapy procesu inwestycyjnego w budownictwie

Lp.	Obszar	Etap	Nazwa czynności
1	Obszar: Budowlany proces inwestycyjny	Etap I. Analiza programowo - studialne	1. Wykonanie studium programowo-przestrzennego
			2. Opracowanie programu funkcjonalno-użytkowego obiektu
			3. Ustalenie przewidywanych wartości zamówienie (kosztorys inwestorski) lub planowanych kosztów prac projektowych i robót budowlanych
			4. Ustalenie przewidywanych terminów wykonania zamówienia
1	Obszar: Budowlany proces inwestycyjny	Etap II Projektowanie obiektu inwestycji	1. Wybór projektanta obiektu budowlanego – inwestycji (umowa)
			2. Projektowanie obiektu (inwestycji)
			3. Opracowanie informacji BIOZ
			4. Uzyskanie decyzji o pozwoleniu na budowę od organów administracji architektoniczno-budowlanej
			5. Wybór wykonawcy obiektu budowlanego – inwestycji (umowa)
1	Obszar: Budowlany proces inwestycyjny	Etap III Prace przygotowawcze na terenie budowy	1. Wytyczenie geodezyjne obiektów w terenie
			2. Wykonanie niwelacji terenu
			3. Wykonanie zagospodarowania terenu budowy
			4. Opracowanie planu BIOZ
			5. Wykonanie przyłączy do sieci infrastruktury na potrzeby budowy
2	Obszar: Eksploatacyjny proces inwestycyjny	Etap IV Wykonanie robót budowlanych. Porządkowanie terenu. Oddanie obiektu do użytkowania	1. Prowadzenie robót budowlanych
			2. Odbiory częściowe
			3. Odbiór inwestycji
			4. Wyposażenie i rozruch
			5. Opracowanie dokumentacji powykonawczej
			6. Porządkowanie terenu budowy: rozbiórka obiektów zaplecza budowy, roboty terenowe
			7. Uzyskanie decyzji o pozwoleniu na użytkowanie
			8. Oddanie obiektu do użytkowania: przekazanie dokumentacji budowy, usuwanie wad i usterek, odbiór gwarancyjny, końcowe rozliczenie inwestycji)
2	Obszar: Eksploatacyjny proces inwestycyjny	Etap V Użytkowanie i utrzymywanie obiektu budowlanego	O prawidłowości eksploatacji obiektu budowlanego decydują: właściciel, zarządca i użytkownicy, na podstawie takich czynności jak:
			1. Przeprowadzanie okresowych kontroli obiektu budowlanego
2	Obszar: Eksploatacyjny proces inwestycyjny	Etap VI. Zakończenie eksploatacji i likwidacja (rozbiórka) obiektu budowlanego (inwestycji)	2. Bieżące naprawy, konserwacje, remonty
			3. Przeglądy techniczne obiektów będących na wyposażeniu obiektu
			4. Sprawdzenie stanu spełnienia wymagań podstawowych i użytkowych wynikających z: naturalnego zużycie elementów obiektu, uszkodzeń lub zniszczeń wywołanych sposobem użytkowania, dokonanych zmian w rozwiązaniu funkcjonalnym i użytkowym, wpływu otoczenia na dany obiekt budowlany
			1. W przypadku niespełnienia wymagań (technicznych, użytkowych) stawianych obiektom budowlanym należy zakończyć ich eksploatację – decyzja o rozbiórce
2	Obszar: Eksploatacyjny proces inwestycyjny	Etap VI. Zakończenie eksploatacji i likwidacja (rozbiórka) obiektu budowlanego (inwestycji)	2. Opracowanie projektu rozbiórki
			3. Przeprowadzenie robót rozbiórkowych
2	Obszar: Eksploatacyjny proces inwestycyjny	Etap VI. Zakończenie eksploatacji i likwidacja (rozbiórka) obiektu budowlanego (inwestycji)	4. Recykling

Źródło: Opracowanie własne na podstawie (Baryłka A. i Baryłka J., 2015)



Rys. 1. Modelowy proces inwestycyjny w budownictwie

Tab. 8. Proces inwestycyjny w budownictwie

Lp.	Obszar procesu	Etap procesu	Faza procesu	Czynności procesowe
1	BUDOWLANY PROCES INWESTYCYJNY	I. Przygotowanie inwestycji do wykonania	Przed- projektowa	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pomysł na nową inwestycję 2. Wielowariantowa koncepcja lokalizacji, parametrów technicznych, technologicznych i organizacyjnych obiektu budowlanego i dokonanie wyboru 3. Studium wykonalności wybranego wariantu 4. Decyzja na przygotowanie dokumentacji planowanego obiektu budowlanego
2			Projektowa	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ocena oddziaływania obiektu budowlanego na środowisko 2. Uzyskanie warunków zabudowy i prawa własności 3. Wybór projektanta. Wykonanie projektu budowlanego. Uzyskanie zezwoleń i uzgodnień. Opracowanie kosztorysu inwestorskiego 4. Uzyskanie pozwolenia na budowę lub zgłoszenie robót budowlanych
3			Przygotowanie inwestycji do realizacji	<ol style="list-style-type: none"> 1. Wybór wykonawcy robót 2. Przygotowanie i przekazanie terenu budowy wykonawcy 3. Opracowanie planu BIOZ i zawiadomienie o terminie rozpoczęcia robót budowlanych
4		II. Realizacja inwestycji	Budowa obektu budowlanego	<ol style="list-style-type: none"> 1. Prace budowlane. Odbiory częściowe. Odbiór końcowy 2. Sporządzenie dokumentacji powykonawczej 3. Przekazanie wykonanego obiektu budowlanego inwestorowi 4. Zawiadomienie o zakończeniu budowy
5		III. Użytkowanie (eksploatacja) obektu budowlanego	Przystąpienie do użytkowania	<ol style="list-style-type: none"> 1. Przyjęcie obiektu budowlanego do użytkowania 2. Założenie i prowadzenie książki obiektu 3. Bezpieczna eksploatacja obiektu
6			Utrzymanie obektu budowlanego	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ocena stanu technicznego obiektu budowlanego podczas użytkowania dokonywana w ramach okresowych kontroli oraz dokumentowanie kontroli okresowych 2. Identyfikacja rozmiarów zużycia lub uszkodzenia elementów obiektu budowlanego 3. Określenie możliwości dalszego bezpiecznego użytkowania obiektu 4. Opracowanie zakresu robót remontowych i kolejności ich wykonania 5. Podjęcie stosowanych działań naprawczych
7			Diagnostyka obektu budowlanego	<ol style="list-style-type: none"> 1. Określenie i ocena uszkodzeń (zniszczenia) elementów obiektu budowlanego: zużycie techniczne materiałów, działalność czynników środowiska zewnętrznego, nierównomierne osiadanie, korozja, drgania, działania nieprzewidziane
8		IV. Likwidacja inwestycji	Rozbiórka obektu budowlanego	<ol style="list-style-type: none"> 1. Podjęcie decyzji i rozbiórce obiektu budowlanego 2. Opracowanie dokumentacji dotyczącej robót rozbiórkowych 3. Rozbiórka obiektu budowlanego 4. Protokół oddziaływania na środowisko
9			Zakończenie inwestycji	<ol style="list-style-type: none"> 1. Zakończenie eksploatacji inwestycji 2. Sporządzenie dokumentacji związanej z likwidacją inwestycji

Poszukując dobrego rozwiązania, należy z jednej strony starannie zrealizować etap przygotowania inwestycji, a z drugiej strony – skrócić czas budowy, w którym następuje największe zgromadzenie zasobów niezbędnych do realizacji inwestycji. W takim ujęciu ważna jest spójność wszystkich etapów procesu inwestycyjnego. Spójność taką może zapewnić instytucja inwestora zastępczego, która koordynowałaby wszystkie działania występujące w procesie związane z czynnościami: cywilno-prawnymi, administracyjno-prawnymi oraz faktycznymi, takimi jak: czynności konsultacyjne, finansowe, prace projektowe, roboty budowlane czy prace związane z eksploatacją obiektu budowlanego.

3. Metodyka postępowania

Warunkiem pomyślnego przeprowadzenia działań w procesie jest adekwatne do konkretnej sytuacji zarządzanie przedsięwzięciem. Proponowane podejście wymusza w swoich procedurach identyfikację działań (czynności) i powiązań pomiędzy nimi oraz umożliwia identyfikację obszarów, etapów i faz procesu, które należy przypisać poszczególnym uczestnikom procesu inwestycyjnego. W takim układzie ostateczny efekt procesu jest wyraźnie widoczny we wszystkich jego etapach, a prawidłowa koordynacja działań w etapach przygotowania, realizacji i eksploatacji, umożliwia dotrzymanie terminów i zobowiązań finansowych. Dla inwestora istotnym jest, aby inwestycja zrealizowana była zgodnie z planem, projektem, oraz obowiązującym prawem i zasadami wiedzy technicznej (Biliński, 2007, 2010a).

Ustawa *Prawo budowlane* (Dz.U. z 2016 r. poz. 290) normuje działalność obejmującą sprawy projektowania, budowy, utrzymania i rozbiórki obiektów budowlanych oraz określa zasady działania organów administracji publicznej w tych dziedzinach. Obiektem budowlanym jest:

- budynek wraz z instalacjami i urządzeniami technicznymi,
- budowla stanowiąca całość techniczno-użytkową wraz z instalacjami i urządzeniami,
- obiekt małej architektury.

Każde przedsięwzięcie budowlane charakteryzuje się specyficznymi (konkretnymi) okolicznościami, które muszą być uwzględniane w procesie zarządzania.

Proces inwestycyjny, w którym powstaje obiekt budowlany, jest ciągiem skoordynowanych czynności o charakterze technicznym, prawnym, technologicznym, organizacyjnym, finansowym, obejmującym przygotowanie, realizację i eksploatację planowanej inwestycji budowlanej w określonym czasie przy ograniczonych zasobach finansowych. Mówiąc o skoordynowanych czynnościach w dłuższym okresie czasu, rozciągających się na kilka etapów realizowanych przez wielu uczestników, koniecznym staje się ich zharmonizowanie.

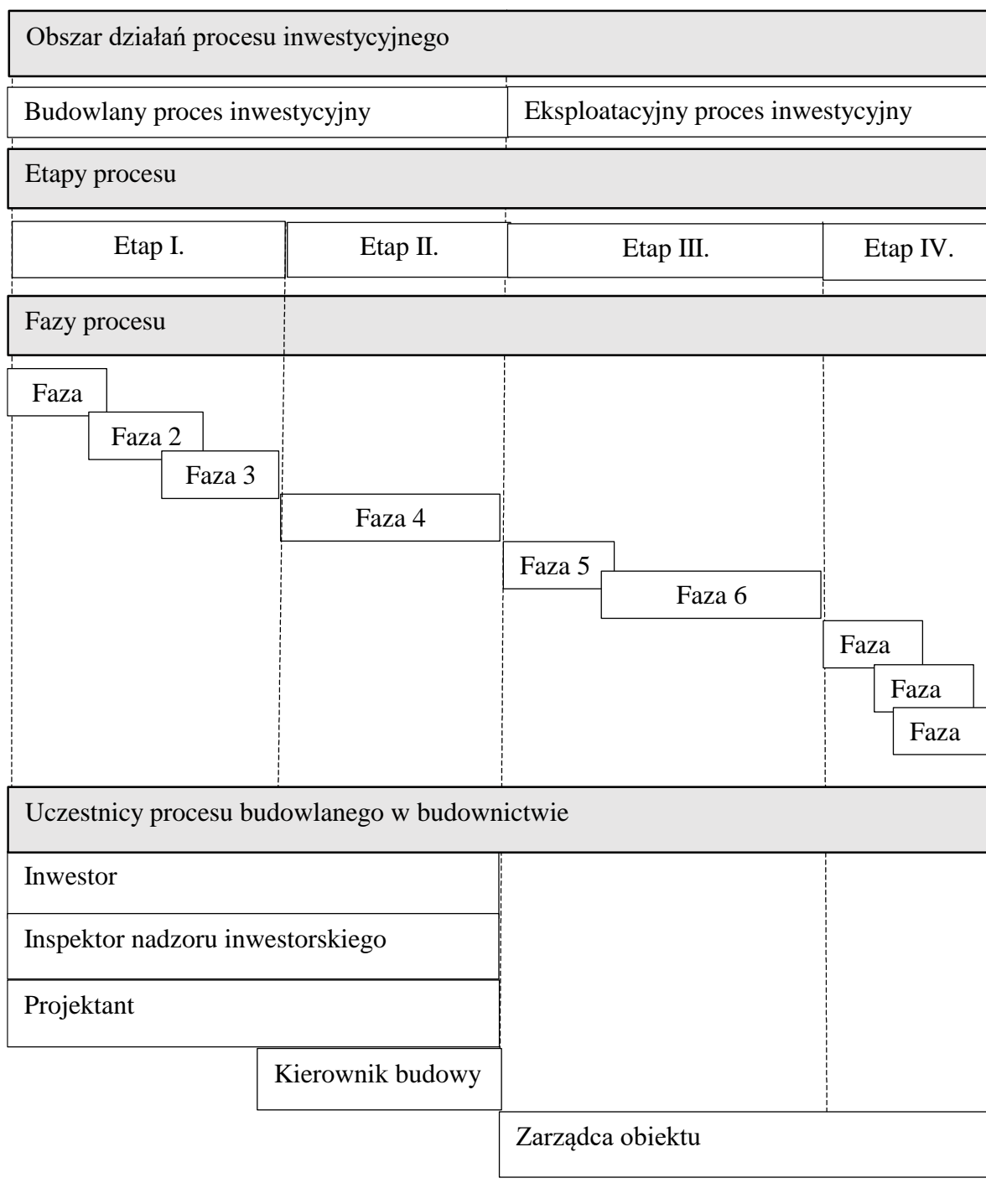
Czynności procesu inwestycyjnego w budownictwie można zlokalizować w dwóch obszarach: budowlanym

i eksploatacyjnym (rys. 2).

Budowlany proces inwestycyjny obejmuje dwa etapy: przygotowania inwestycji do wykonania oraz etap realizacji. W etapie przygotowania wyróżnia się trzy fazy (przedprojektową, projektową i przygotowanie inwestycji do realizacji). Etap realizacji inwestycji obejmuje fazę budowy obiektu budowlanego.

Eksploatacyjny proces inwestycyjny składa się z etapu użytkowania obiektu budowlanego oraz etapu likwidacji inwestycji. Etap użytkowania obiektu budowlanego obejmuje fazę przystąpienia do użytkowania oraz fazę utrzymywania obiektu budowlanego. Natomiast w etapie likwidacji inwestycji wyróżnia się fazę diagnostyki, rozbiórki obiektu budowlanego oraz fazę zakończenia inwestycji.

Wszystkie ważniejsze działania związane z przebiegiem procesu inwestycyjnego w budownictwie oraz prawa i obowiązki poszczególnych jej uczestników regulują odpowiednie przepisy. Ustawa *Prawo budowlane* (Dz.U. z 2016 r. poz. 290) identyfikuje głównych uczestników procesu budowlanego (inwestora, inspektora nadzoru inwestorskiego, projektanta, kierownika budowy lub kierownika robót) oraz określa ich obowiązki. Funkcję kontrolną nad prawidłowym przebiegiem całego procesu inwestycyjnego sprawuje instytucja nadzoru budowlanego. W ustawie nie podaje się natomiast definicji inspektora zastępczego. Korzystając z normy PN-ISO 6707-2:2000 *Budownictwo. Terminologia. Terminy stosowane w umowach* – umowa o zastępstwo inwestycyjne, można zdefiniować inwestora zastępczego jako jednostkę organizacyjną działającą odpłatnie w imieniu zamawiającego i odpowiedzialną przed nim za organizację i koordynację działań wszystkich stron uczestniczących w procesie inwestycyjnym oraz określić jego rolę oraz zakres obowiązków wykorzystując uregulowane prawem obowiązki inwestora, w imieniu którego działa inwestor zastępczy. Do podstawowych obowiązków inwestora zastępczego należy zorganizowanie procesu inwestycyjnego, z uwzględnieniem zawartych w przepisach zasad i wymogów prawa w poszczególnych jego etapach. Zakres obowiązków jaki można powierzyć inwestorowi zastępczemu jest szeroki. Może on być włączony w proces inwestycyjny już na etapie projektowania, w czasie realizacji prac budowlanych lub na etapie eksploatacji obiektu budowlanego. W każdym z tych przypadków zakres jego obowiązków będzie inny. Szczegółowe określenie zakresu powierzonych mu czynności jest bardzo istotne, gdyż jak wspomniano nie ma regulacji prawnych określających jednoznacznie zakres jego obowiązków.



Rys. 2. Proces inwestycyjny w budownictwie

4. Podsumowanie

Coraz bardziej złożone obiekty budowlane oraz wyższy poziom techniki, nowe technologie, nowoczesny sprzęt oraz wyższe wymagania stawiane obiektom budowlanym wymagają nowego podejścia do procesu inwestycyjnego w budownictwie.

Współczesny proces inwestycyjny to ciąg, układ współzależnych jakościowo etapów, faz i czynności. Niezwykle ważna jest w tym układzie jest spójność wszystkich elementów, zapewniająca ciągłość działań jego uczestników, szczególnie na etapie przygotowania przedsięwzięcia inwestycyjnego oraz prac poprzedzających rozpoczęcie robót budowlanych. Jednym ze sposobów rozwiązania problemu jest powołanie instytucji inwestora zastępczego, która koordynowałaby działania programowania, planowania, nadzoru i realizacji przedsięwzięcia inwestycyjno-budowlanego.

Literatura

- Baryłka A., Baryłka J. (2015). Funkcje Techniczne w Budownictwie. Przewodnik Po Inwestycyjnym i Eksploatacyjnym Procesie Budowlanym. *Polcen*, Warszawa.
- Biliński T. (2010a). Cechy charakterystyczne współczesnego procesu inwestycyjno-budowlanego. W: *materiały Konferencji „Działalność inwestycyjno-budowlana w realizacji celów zrównoważonego rozwoju”*. NOT-LIIB, Zielona Góra-Kęszycza.
- Biliński T. (2010b). Struktura i uwarunkowania współczesnego procesu inwestycyjno-budowlanego. *Przegląd budowlany* 11/2010, 46.
- Biliński T. (2007). Terminologia w Działalności Inwestycyjno-Budowlanej. *Wydawnictwo Izby Projektowania Budowlanego*, Warszawa.
- Dzierżewicz Z., Dylewski J. (2011). Proces Budowlany w Świetle Ustawy Prawo Budowlane. *Wyd. Grupa APEXnet*, Lublin.

- Grzywiński J. (2015). Proces Inwestycyjny Zgodnie z Polskim Prawem Budowlanym. *Wyd. Kancelarii Furtek Komosa Aleksandrowicz*.
- Obolewicz J. (2011). Koordynacja bezpieczeństwa i ochrony zdrowia w budowlanym procesie inwestycyjnym. *Przegląd budowlany*, 2/2011, 60.
- Obolewicz J. (2014). Raport z projektu badawczego numer N N115347038 Identyfikacja stanu bezpieczeństwa i ochrony zdrowia w polskich przedsiębiorstwach budowlanych po wejściu do UE i zaprojektowanie modelu zarządzania bioz spełniającego europejskie kryteria jakościowe, ochrony środowiska, ergonomii i ochrony pracy. *Politechnika Białostocka*.
- Połośki M. (2009). Kierowanie Budowlanym Procesem Inwestycyjnym. *Wyd. SGGW*, Warszawa.
- Strzelecka E., Glinkowska B., Maciejewska M., Wiaźel-Sasin B. (2014). Zarządzanie Przedsięwzięciami Budowlanymi. Podstawy, Procedury, Przykłady. *Wyd. Politechniki Łódzkiej*.
- Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. – Prawo budowlane. Dz. U. z 2016 r. poz. 290 (tekst jednolity).
- Zabielski J. (2014). Proces Inwestycyjno-Budowlany. Materiały Dydaktyczne Wydziału Prawa i Administracji UW. *Wyd. CRE Edukacja*.

COORDINATION OF BUILDING INVESTMENT PROCESS

Abstract: Practice resulting from the implementation of the construction investment process shows that coordination process becomes necessary. Investors more and more often use the so-called institutions of substitute investor, entrusting a portion or all of the duties related to the preparation, conducting and coordination of actions of participants of the investment process. The detailed definition of the scope entrusted to the inspector substitution activities requires identification of all activities needed to carry out the planned investment. This article reviews the literature on structural elements of the process and the organizational model of the construction investment process, as a tool for coordination with the level of the investor, was proposed.

ANALIZA PARAMETRÓW FIZYKALNYCH ŚCIAN ZEWNĘTRZNYCH I ICH ZŁĄCZY Z ZASTOSOWANIEM WSPÓŁCZESNYCH MATERIAŁÓW TERMOIZOLACYJNYCH

Krzysztof PAWŁOWSKI, Magdalena NAKIELSKA*

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, al. prof. S. Kaliskiego 8, 85-796 Bydgoszcz

Streszczenie: W związku z wprowadzeniem w 2014 roku nowych, zastrzonych wymagań ciepło-wilgotnościowych w Polsce niezwykle ważne staje się w procesie projektowym poprawne dokonywanie szczegółowych obliczeń i analiz, które powinny być podstawą wyboru rozwiązań konstrukcyjnych oraz izolacyjnych. Na rynku budowlanym pojawiło coraz więcej nowoczesnych rozwiązań materiałów termoizolacyjnych, powoli zastępujących tradycyjne rozwiązania. Dlatego istnieje potrzeba opracowania wytycznych wspomagających projektowanie według nowych wymagań ciepło-wilgotnościowych z zastosowaniem profesjonalnych programów komputerowych. W artykule przedstawiono charakterystykę parametrów technicznych nowoczesnych materiałów termoizolacyjnych oraz przykładowe rozwiązania konstrukcyjno-materiałowe ścian zewnętrznych i ich złączy. Przeprowadzono obliczenia parametrów fizykalnych przegród zewnętrznych i ich złączy z uwzględnieniem wymagań ciepło-wilgotnościowych oraz osiągnięcia standardu niskoenergetycznego budynku. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń opracowano wytyczne projektowe w zakresie poprawnego kształtowania układu materiałowego przegród zewnętrznych i ich złączy w aspekcie ciepło-wilgotnościowym.

Słowa kluczowe: ściana zewnętrzna, materiały termoizolacyjne, parametry fizykalne.

1. Wprowadzenie

W Krajowym planie wsparcia budownictwa o niskim zużyciu energii (M. P. z 2015 r. poz. 614) sformułowano rekomendowaną do stosowania w praktyce krajową definicję budynku niskoenergetycznego: „budynek o niskim zużyciu energii” to budynek, spełniający wymogi związane z oszczędnością energii i izolacyjnością zawarte w przepisach techniczno-użytkowych, o których mowa w art. 7 ust. 1 pkt 1 ustawy *Prawo budowlane* (Dz. U. z 201 r., poz. 1409 z późn. zm.), oraz w Rozporządzeniu Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej (Dz. U. z 2013 r. poz. 926), obowiązującym od 1 stycznia 2021 roku (w przypadku budynków zajmowanych przez władze publiczne oraz będących ich własnością – od 1 stycznia 2019 roku).

Zgodnie z Krajowym planem wsparcia i w myśl ww. rozporządzenia za energooszczędne można uznać budynki, które charakteryzują się powierzchniowym wskaźnikiem sezonowego zapotrzebowania na ciepło E_{PH+W} poniżej 70 kWh/(m²·rok) – dla budynku jednorodzinne oraz poniżej 65 kWh/(m²·rok) – dla budynku wielorodzinne. Jednocześnie przegrody zewnętrzne powinny spełniać wymagania w zakresie spełnienia podstawowego kryterium cieplnego $U_c \leq U_{c(max)}$. Wartość maksymalna współczynnika

przenikania ciepła $U_{c(max)}$ według rozporządzenia (Dz. U. z 2013 r. poz. 926), po 2021 roku dla ścian zewnętrznych ma wynosi 0,20 W/(m²·K). Wprowadzenie powyższych zmian spowoduje zwiększenie grubości powszechnie stosowanych izolacji cieplnych (styropian i wełna mineralna) oraz wprowadzenie nowych materiałów, między innymi takich jak: płyty z poliuretanu PIR, płyty izolacyjne o zamkniętej strukturze komórkowej z rdzeniem uzyskiwanym z żywicy fenolowo-formaldehydowej.

2. Charakterystyka rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych ścian zewnętrznych

Ściana zewnętrzna stanowi sztuczną przegrodę pomiędzy otoczeniem zewnętrznym (o zmiennej temperaturze i wilgotności) a wnętrzem (o określonej temperaturze i wilgotności).

W pomieszczeniach przeznaczonych na stały pobyt ludzi powinny być zapewnione użytkownikom odpowiednie warunki w zakresie:

- nośności konstrukcji,
- ochrony ciepło-wilgotnościowej,

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: krzypaw@utp.edu.pl, Magdalena.Nakielska@utp.edu.pl

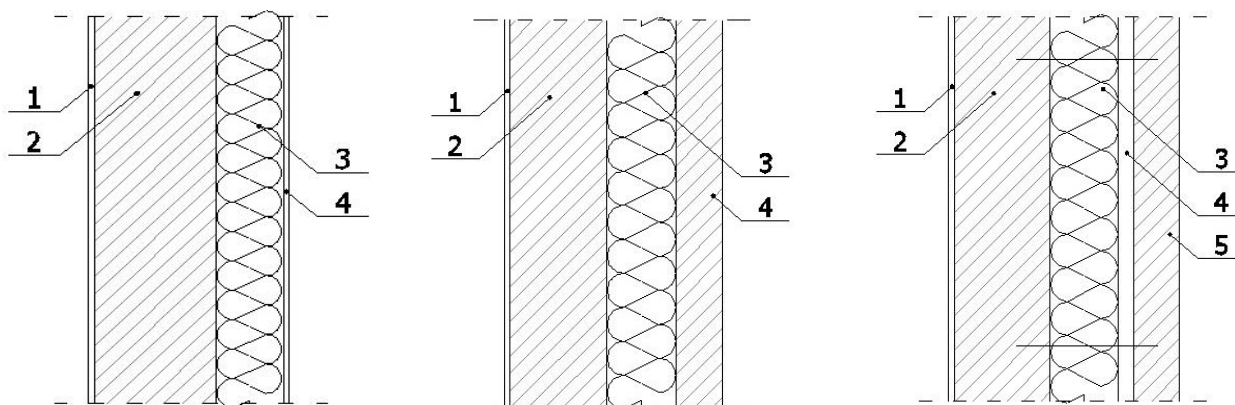
- ochrony przed zmiennymi warunkami klimatycznymi: zmianą temperatury, deszczem, wiatrem,
 - ochrony przed hałasem,
 - ochrony przeciwpożarowej,
 - walorów architektonicznych i estetycznych,
 - zrównoważonego wykorzystania zasobów naturalnych.
- Zmieniające się wymagania powodują, że na etapie projektowania i wykonywania pojawiają się nowe rozwiązania konstrukcyjno-materiałowe ścian zewnętrznych. Najczęściej stosowanymi technologiami wznoszenia ścian zewnętrznych budynków w Polsce są: technologia murowana lub drewniana.

Do analizy wybrano ściany zewnętrzne murowane warstwowe (rys. 1), które składają się z:

- warstwy konstrukcyjnej,
- warstwy izolacji cieplnej,
- warstwy pustki powietrznej dobrze wentylowanej (w przypadku ścian szczelinowych),
- warstwy elewacyjnej (w przypadku ścian trójwarstwowych i szczelinowych).

Materiały do warstwy izolacji cieplnej powinny charakteryzować się niskim współczynnikiem przewodzenia ciepła λ [W/(m·K)] i dużą porowatością. Inne parametry techniczne są zależne od ich pochodzenia. Do grupy materiałów warstwy izolacji cieplnej ścian zewnętrznych można zaliczyć między innymi:

- styropian – materiał syntetyczny, sztuczny, produkowany z granulek poliestrowych, które podczas spienienia powiększają swoją objętość ponad czterokrotnie;
- wełna mineralna – materiał nieorganiczny, włóknisty, produkowany z mieszaniny surowców naturalnych (bazyty, margle) i odpadowych (żużel wielkopiecowy);
- styropian grafitowy – materiał produkowany z gotowego półproduktu w postaci grafitowych granulek, które należy spenić, uformować i pociąć, proces produkcji styropianu grafitowego wygląda tak, jak w przypadku styropianu białego; posiada lepsze właściwości izolacyjne dzięki grafitowemu absorbentowi IR wyściełającemu komórki EPSu;
- płyty z poliuretanu (PUR) i poliizocyanuratu (PIR) – twarde płyty piankowe, które są odporne termicznie i niepalne o niższych wartościach współczynnika przewodzenia ciepła niż wełna mineralna czy styropian;
- aerozele – materiał będący rodzajem sztywnej piany o wyjątkowo małej gęstości (na jego masę składa się w 90-99,8% powietrze, resztę stanowi porowaty materiał tworzący jego strukturę);



dwuwarstwowa:

- 1 – tynk gipsowy,
- 2 – warstwa konstrukcyjna,
- 3 – izolacja cieplna,
- 4 – tynk cienkowarstwowy

trójwarstwowa:

- 1 – tynk gipsowy,
- 2 – warstwa konstrukcyjna,
- 3 – izolacja cieplna,
- 4 – warstwa elewacyjna

szczelinowa:

- 1 – tynk gipsowy,
- 2 – warstwa konstrukcyjna,
- 3 – izolacja cieplna,
- 4 – szczelna dobrze wentylowana,
- 5 – warstwa elewacyjna

- warstwa konstrukcyjna: bloczek z betonu komórkowego 24 cm, cegła pełna 25 cm, bloczek wapienno-piaskowy (silikatowy) 24 cm,
- warstwa izolacji cieplnej: styropian, styropian grafitowy, wełna mineralna, płyty z poliizocyanuratu (PIR), płyty rezolowe, płyty ekstrudowane XPS, płyty celulozowe, płyty klimatyczne
- warstwa elewacyjna: cegła klinkierowa 12cm, bloczek wapienno-piaskowy 12 cm

Ściana trójwarstwowa i szczelinowa są określane jako szczelinowe; pierwsza ze szczeliną całkowicie wypełnioną materiałem termoizolacyjnym, a druga - ze szczeliną częściowo wypełnioną materiałem termoizolacyjnym.

Kształtowanie układów materiałowych, szczególnie w przypadku ściany trójwarstwowej, powinno być poprzedzone szczegółowymi obliczeniami w zakresie wilgotnościowym i przeciwpożarowym.

Do rozwiązań ścian zewnętrznych przyjęto wybrane materiały konstrukcyjne, izolacyjne i osłonowe. Istnieją możliwości stosowania innych nowoczesnych materiałów, spełniających odpowiednie wymagania.

Rys. 1. Przykładowe rozwiązania materiałowe ścian zewnętrznych murowanych – opracowanie własne

- płyty klimatyczne – wytwarzane są z silikatu wapiennego na bazie mineralnej (kryształki tworzą szkielet); mikropory są powiązane wzajemnie między sobą i otaczającym z zewnątrz powietrzem, co umożliwia uzyskanie wysokiej kapilarności; jest to materiał paroprzepuszczalny, posiadający otwarte pory, kapilarnie aktywny, termoizolacyjny, przyjazny dla środowiska naturalnego, niepalny oraz zapobiegający tworzeniu się pleśni i zagrzybień;
- płyty rezolowe – sztywne płyty izolacyjne o zamkniętej strukturze komórkowej z rdzeniem uzyskiwanym z żywicy fenolowo-formaldehadowej; płyty pokryte są po obu stronach welonem szklanym spojonym z rdzeniem w procesie produkcji; charakteryzują się między innymi niską absorpcją wilgoci, dużą wytrzymałością mechaniczną.

Przed wyborem odpowiedniego materiału do izolacji cieplnej należy zwrócić uwagę na następujące właściwości: współczynnik przewodzenia ciepła λ [W/(m·K)], gęstość objętościową, izolacyjność akustyczna, przepuszczalność pary wodnej (współczynnik oporu dyfuzyjnego μ [-]) oraz wrażliwość na czynniki biologiczne i chemiczne.

3. Określenie parametrów fizykalnych ścian zewnętrznych trójwarstwowych i ich złączy

Do analizy wybrano ściany zewnętrzne trójwarstwowe o zróżnicowanym układzie warstw materiałowym (tab. 1).

Tab. 1. Wyniki obliczeń wartości współczynnika przenikania ciepła U_c według PN-EN ISO 6946:2008 w odniesieniu do ściany zewnętrznej trójwarstwowej

Warstwy materiałowe	d [m]	λ [W/(m·K)]	x [m]	y współczynnik przewodzenia ciepła materiałów izolacji cieplnej λ [W/(m·K)]				
				I	II	III	IV	V
				0,059	0,040	0,038	0,031	0,021
I Tynk gipsowy	0,01	0,40	0,10	0,324	0,261	0,253	0,222	0,170
Bł. z betonu komórkowego	0,24	0,21	0,12	0,294	0,233	0,225	0,197	0,149
Izolacja cieplna	x	y	0,15	0,258	0,201	0,194	0,168	0,126
Bł. wapienno-piaskowe	0,12	0,80	0,20	0,215	0,164	0,158	0,136	0,101
II Tynk gipsowy	0,01	0,40	0,10	0,415	0,315	0,304	0,260	0,191
Bł. wapienno-piaskowy	0,24	0,56	0,12	0,366	0,275	0,264	0,225	0,164
Izolacja cieplna	x	y	0,15	0,312	0,231	0,222	0,188	0,136
Bł. wapienno-piaskowy	0,12	0,80	0,20	0,250	0,183	0,176	0,148	0,107
III Tynk gipsowy	0,01	0,40	0,10	0,439	0,329	0,316	0,269	0,195
Cegła pełna	0,25	0,77	0,12	0,385	0,285	0,274	0,232	0,168
Izolacja cieplna	x	y	0,15	0,325	0,238	0,228	0,193	0,139
Cegła klinkierowa	0,12	1,05	0,20	0,259	0,187	0,180	0,151	0,108

Warianty izolacji cieplnej: I – płyty klimatyczne $\lambda = 0,059$ W/(m·K), II – płyty styropianowe $\lambda = 0,040$ W/(m·K), III – płyty z wełny mineralnej $\lambda = 0,038$ W/(m·K), IV – płyty ze styropianu grafitowego $\lambda = 0,031$ W/(m·K), V – płyty rezolowe $\lambda = 0,021$ W/(m·K); do obliczeń U_c przyjęto $\Delta U = 0,01$

W drugim etapie obliczeń określono parametry fizyczne wybranych złączy ściany trójwarstwowej (z zastosowaniem różnych materiałów termoizolacyjnych) o następującym układzie warstw materiałowych:

- tynk gipsowy gr. 1,5 cm o $\lambda=0,40$ W/(m·K);
- bloczek z betonu komórkowego grubości 24 cm o $\lambda = 0,20$ W/(m·K);
- izolacja cieplna:
 - wariant I (płyty z pianki PIR grubości 12 cm o $\lambda = 0,022$ W/(m·K)),
 - wariant II (płyty z pianki PUR grubości 12 cm o $\lambda = 0,035$ W/(m·K)),
 - wariant III (płyty styropianowe grubości 12 cm o $\lambda = 0,040$ W/(m·K));
- bloczek z betonu komórkowego grubości 12 cm o $\lambda = 0,20$ W/(m·K);
- tynk cienkowarstwowy grubości 0,5 cm o $\lambda = 0,76$ W/(m·K).

Do obliczeń numerycznych przyjęto następujące założenia początkowe:

- modelowanie geometryczne złączy budowlanych zgodnie z PN-EN ISO 10211:2008 *Mostki cieplne w budynkach. Strumienie ciepła i temperatury powierzchni. Obliczenia szczegółowe*;
- temperatura powietrza wewnętrznego $t_i = 20^\circ\text{C}$, temperatura powietrza zewnętrznego $t_e = -20^\circ\text{C}$;
- warunki przejmowania ciepła na wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni przegrody przyjęto zgodnie z PN-EN ISO 6946:2008 dla obliczeń wielkości strumienia cieplnego oraz zgodnie z PN-EN ISO 13788:2003 *Cieplno-wilgotnościowe właściwości*

komponentów budowlanych i elementów budynku. Temperatura powierzchni wewnętrznej umożliwiająca uniknięcie krytycznej wilgotności powierzchni wewnętrznej kondensacji. Metody obliczania przy obliczeniach rozkładu temperatur i czynnika temperaturowego f_{Rsi} .

Szczegółowe procedury określania parametrów fizycznych złączy budowlanych przedstawiono w pracach Pawłowski (2016) czy Dylla (2015). W tabeli 2 zestawiono wyniki parametrów fizycznych analizowanych ścian zewnętrznych trójwarstwowych i ich złączy.

Na podstawie prezentowanych wyników obliczeń parametrów fizycznych trójwarstwowych ścian zewnętrznych i ich złączy, które stanowią tylko część prowadzonych przez autorów pracy badań własnych, można sformułować następujące wnioski i wytyczne praktyczne:

- Do podstawowych parametrów fizycznych przegród zewnętrznych i ich złączy zalicza się: współczynnik przenikania ciepła U_c w W/(m²·K) – określany dla przepływów jednowymiarowych (1D), liniowy współczynnik przenikania ciepła Ψ w W/(m·K), czynnik temperaturowy f_{Rsi} [-] – określany na podstawie temperatury minimalnej w złączu w celu sprawdzenia ryzyka występowania kondensacji na wewnętrznej powierzchni przegrody (ryzyko rozwoju pleśni i grzybów pleśniowych). Rozpatrywanie tylko płaskiej przegrody zewnętrznej, bez uwzględnienia złączy budowlanych, staje się podstawowym błędem w aspekcie oceny cieplno-wilgotnościowej.

Tab. 2. Wyniki obliczeń parametrów fizycznych przegród zewnętrznych i ich złączy – opracowanie własne na podstawie (Walczak, 2015)

Parametry fizyczne przegród zewnętrznych i ich złączy						
wariant	I	II	III	I	II	III
U_c [W/(m ² ·K)]	0,134	0,184	0,199	$t_{min.} [^\circ\text{C}] / f_{Rsi} [-]$		
Złącze	Ψ_i [W/(m·K)]					
Z 1	0,057	0,070	0,074	16,48 / 0,912	15,43 / 0,886	15,12 / 0,875
Z 2	0,035	0,048	0,051	18,46 / 0,961	17,90 / 0,948	17,73 / 0,943
Z 3	0,043	0,059	0,065	18,37 / 0,959	17,69 / 0,942	17,47 / 0,937
Z 4	0,039	0,056	0,063	17,37 / 0,934	16,80 / 0,920	16,60 / 0,915
Z 5	0,017	0,022	0,024	13,64 / 0,841	13,08 / 0,827	12,84 / 0,821
Z 6	0,032	0,034	0,035	16,01 / 0,900	15,43 / 0,886	15,24 / 0,881
Z 7	0,137	0,159	0,168	15,89 / 0,897	14,78 / 0,869	14,41 / 0,860
Z 8	0,071	0,087	0,095	17,91 / 0,948	17,32 / 0,933	17,12 / 0,928
Z 9	0,265	0,327	0,349	14,34 / 0,858	13,99 / 0,850	13,87 / 0,847

Z1 – Połączenie ścian zewnętrznych w narożniku, Z2 – Połączenie ściany zewnętrznej z wewnętrzną, Z3 – Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez wieniec, Z4 – Połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez nadproże, Z5 – Połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez podokiennik, Z6 – Połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez ościeżnicę, Z7 – Połączenie ściany zewnętrznej ze stropodachem, Z8 – Połączenie ściany zewnętrznej z płytą balkonową (przy zastosowaniu łącznika izotermicznego), Z9 – Połączenie ściany zewnętrznej z podłogą na gruncie

- Wykonanie szczegółowych obliczeń, przy zastosowaniu programu komputerowego, pozwala na uzyskanie miarodajnych wyników parametrów fizycznych. Ich wartości zależą od zastosowanego materiału budowlanego (konstrukcyjnego), rodzaju i grubości izolacji cieplnej oraz ukształtowania struktury materiałowej analizowanego złącza. Posługiwanie się wartościami przybliżonymi i orientacyjnymi, na przykład w oparciu o PN-EN ISO 14683:2008 *Mostki cieplne w budynkach. Liniowy współczynnik przenikania ciepła. Metody uproszczone i wartości orientacyjne*, staje się nieuzasadnione, ponieważ nie uwzględniają zmiany układów materiałowych oraz rodzaju i grubości izolacji cieplnej.
- Analizowane ściany zewnętrzne trójwarstwowe należy ocenić w zakresie spełnienia kryterium cieplnego $U_c \leq U_{cmax}$, gdzie $U_{cmax} = 0,20 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ według rozporządzenia (Dz. U. z 2013 r. poz. 926), $U_{cmax} = 0,10 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ dla standardu NF 15 i $U_{cmax} = 0,15 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ dla standardu NF40 według Wymagań NFOŚiGW (www.nfosigw.gov.pl). Należy podkreślić, że nie niektóre rozwiązania materiałowe ścian zewnętrznych (tab. 1 i 2) nie spełniają podstawowego kryterium cieplnego.
- Rozpatrywane złącza budowlane nie spełniają wymagania w zakresie dodatkowych strat ciepła wynikających z występowania mostków cieplnych (wyrażonych w postaci liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ – tablica 2) w standardzie NF15, ponieważ wartości $\Psi > \Psi_{max} = 0,01 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Natomiast w przypadku spełnienia wymagań w zakresie standardu NF40 analizowane złącza budowlane (oprócz złącza 7 i 9 – tablica 2) spełniają kryterium $\Psi \leq \Psi_{max}$. Jednak przy ocenie strat ciepła należy przeanalizować także inne parametry Φ (moc strumienia cieplnego przepływającego przez złącze w W) lub L2D (współczynnik sprzężenia cieplnego w $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$) odzwierciedlające straty ciepła przez złącze. Zasadne staje się także określanie gałęziowych współczynników przenikania ciepła w przypadku określania strat ciepła przez pojedynczą przegrodę z uwzględnieniem przepływów ciepła (2D).
- Analizując złącza ścian zewnętrznych (tab. 2) można stwierdzić, że nie występuje ryzyko kondensacji powierzchniowej ponieważ, obliczone wartości czynników temperaturowych f_{Rsi} są większe od wartości granicznej czynnika temperaturowego $f_{Rsi,(kryt.)}$. Wartość graniczna (krytyczna) czynnika temperaturowego, przy uwzględnieniu parametrów powietrza wewnętrznego i zewnętrznego, analizowanych wariantów obliczeniowych wynosi $f_{Rsi,(kryt.)} = 0,778$.

4. Podsumowanie i wnioski

Analiza parametrów fizycznych przegród zewnętrznych i ich złączy, z zastosowaniem zróżnicowanych – współczesnych materiałów termoizolacyjnych, ma istotne

znaczenie w zakresie poprawnego kształtowania układów materiałowych i geometrii projektowanego budynku o niskim zużyciu energii.

Kompleksowa ocena cieplno-wilgotnościowa powinna dotyczyć nie tylko pełnej przegrody zewnętrznej, ale także jej złączy. Natomiast podane w rozporządzeniu (Dz. U. z 2013 r. poz. 926) wartości graniczne współczynnika przenikania ciepła U_{cmax} nie uwzględniają przepływów ciepła w polu (2D) i (3D), co powoduje rzeczywiste dopuszczenie większych strat ciepła przez przegrody budowlane i ich złącza. Dlatego zasadne staje się także określenie wartości granicznych liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ_{max} w rozporządzeniu (Dz. U. z 2013 r. poz. 926) na poziomie 0,10-0,20 $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$ w zależności od specyfiki analizowanego złącza.

Niektóre układy warstw materiałowych ścian zewnętrznych i ich złączy spełniają wymagania w zakresie izolacyjności cieplnej ($U_c \leq U_{cmax}$), jednak po przeprowadzeniu analizy w zakresie wymagań wilgotnościowych, akustycznych lub przeciwpożarowych usytuowanie warstwy izolacji cieplnej wewnątrz przegrody jest niedopuszczalne.

Literatura

- Dylla A. (2015). *Fizyka Ciepła Budowli w Praktyce. Obliczenia Ciepłno-Wilgotnościowe*. Wydawnictwo Naukowe PWN S.A., Warszawa.
- Pawłowski K. (2016). *Projektowanie Przegród Zewnętrznych w Świetle Aktualnych Warunków Technicznych Dotyczących Budynków*. Wydawnictwo Grupa Medium, Warszawa.
- Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowania (Dz. U. z 2013 r. poz. 926).
- Uchwała Rady Ministrów z dnia 22 czerwca 2015 r. w sprawie przyjęcia „Krajowego planu mającego na celu zwiększenie liczby budynków o niskim zużyciu energii” (M. P. z 2015 r. poz. 614).
- Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. – Prawo budowlane (Dz. U. z 2013 r. poz. 1409, z późn. zm.).
- Walczak S. (2015). *Analiza numeryczna złączy ścian zewnętrznych trójwarstwowych w świetle nowych wymagań cieplnych*. Praca magisterska, *Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy*, Bydgoszcz.
- Wymagania określające podstawowe wymogi niezbędne do osiągnięcia oczekiwanych standardów energetycznych dla budynków mieszkalnych oraz sposób weryfikacji projektów i sprawdzania wykonywanych domów energooszczędnych, > NFOŚiGW, www.nfosigw.gov.pl.

THE ANALYSIS OF PHYSICAL PARAMETERS OF EXTERNAL WALLS AND THEIR JOINTS REGARDING THE USE OF MODERN HEAT INSULATING MATERIALS

Abstract: In connection to the introduction in 2014 of new and stringent heat and humidity requirements in Poland, making correct and detailed calculations and analyses is becoming extremely important and thus, those calculations should form

the basis of choosing structural and insulating solutions. The construction market has been offering a lot of modern solutions for heat insulating materials which are slowly replacing traditional solutions. Therefore, there is a need for developing the guidelines that would support designing in accordance with new heat and humidity requirements regarding the application of professional computer programmes. The report presents the characteristics of technical parameters of modern heat insulating materials and model structural and material solutions for external walls and their joints.

The calculations of physical parameters of external wall barriers and their joints have been made including heat and humidity requirements as well as the achievement of the low-energy standard of a building. Owing to the calculations that have been made, the design guidelines have been established within the scope of correct material system development of external wall barriers and their joints with reference to heat and humidity.

SZACOWANIE KOSZTÓW ROBOCIZNY PRODUKCYJNEJ HARMONOGRAMU NA TLE JEGO OPÓŹNIEŃ CZASOWYCH

Daniel PRZYWARA*, Adam RAK

Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Opolska, ul. Katowicka 48, 45-061 Opole

Streszczenie: Racjonalność gospodarowania odnawialnymi zasobami środków produkcji stanowi podstawowe kryterium oceny jakości harmonogramu zarówno w aspekcie generowanych kosztów, jak i zaangażowanego czasu pracy robocizny produkcyjnej oraz sprzętu, stanowiących – obok wbudowanych materiałów – bezpośrednie składniki cenotwórcze robót. Porównanie ponoszonych kosztów robocizny może znajdować zastosowanie w przypadku mniejszej od planowanej wydajności prac, zakłóceń organizacyjnych mających wpływ na czas trwania procesów lub różnych wartości stawek placowych za roboczegodzinę pracy. W artykule podjęto próbę oszacowania różnicy kosztów robocizny produkcyjnej, która może ulegać zmianie wraz z okresowym zaangażowaniem do produkcji niezależnych brygad roboczych, uruchamianych w celu niwelacji nieplanowanych opóźnień czasowych. Badania przeprowadzono przy użyciu metody wartości uzyskanej.

Słowa kluczowe: koszty robocizny, opóźnienia czasowe, harmonogram, straty produkcyjne.

1. Wprowadzenie

Zarządzanie rozdziałem zasobów jest jednym z głównych problemów planowania produkcji w przedsiębiorstwie budowlanym, podobnie jak problem analizy kosztów w harmonogramach realizacji inwestycji, który był rozważany już od dawna (Marcinkowski, 2002).

Poszukiwanie scenariusza realizacji inwestycji, korzystnego dla wykonawcy z punktu widzenia kosztów robót, jest zagadnieniem bardzo złożonym. Marcinkowski (2002) opisuje, że problem ten w praktyce jest rozwiązywany uproszczonym rachunkiem kosztów, uwzględniającym charakterystyki kosztowe, poprzez analizy kosztorysowe. Służą one wartościowaniu rozwiązań organizacyjnych, nie zaś ocenie finansowych wyników działalności firmy.

Planowanie wykorzystania zasobów (*resource scheduling*) jest procesem przekształcania projektu w harmonogram prac, uwzględniającym dostępne zasoby. W powszechnym wyobrażeniu planowanie wykorzystania zasobów ogranicza się do czynnika ludzkiego (Lock, 2009). Przyjęta struktura organizacyjna podziału pracy w harmonogramie, w obrębie projektowanych procesów, musi podlegać kontroli, oceniającej stopień odchylenia czasowych i kosztowych od założonego planu. Cykliczny monitoring prac umożliwia wprowadzanie usprawnień, niwelujących powstające opóźnienia. Jeżeli problemy są spowodowane niedoborem siły roboczej, można im zapobiec, zlecając prace wykonawcom zewnętrznym (Przywara i Rak, 2016). W sytuacji skrajnej, kiedy

opóźnia się równocześnie wiele czynności, skutecznym zadaniem może być powołanie zespołu zadaniowego, który poprowadzi pozostałe do wykonania prace (Lock, 2009). Środki naprawcze okazują się jednak skuteczne tylko wtedy, gdy zostaną podjęte w terminie.

Ocena wykonania zadań za pomocą analizy odchylenia przynosi ponadto, w przypadku stosowania rachunku kosztów standardowych, wiele użytecznych informacji, takich jak odchylenia ilości i stawek w przekroju pozycji kalkulacyjnych (Nowak, 2011). Wdrożenie usprawnienia musi być poprzedzone określeniem celu poprawy oraz realnego planu jego realizacji przez odpowiednie narzędzia i metody działania (Kosieradzka, 2012), po wprowadzeniu zmiany należy zaś aktualizować standardy pracy, gdyż każda zmiana pociąga za sobą wzrost zmienności procesu i dalsze wdrażanie usprawnień możliwe jest po ustabilizowaniu produkcji.

Działania wspierające produkcję przejawiają się w zabezpieczeniu i zaopatrzeniu jej w zasoby ludzkie oraz materialno-techniczne (Kulińska i Dornfeld, 2009). Realizacja przedsięwzięć budowlanych jest szczególnie trudnym rodzajem działania zorganizowanego (Kasprowicz, 2002). Możliwość przekroczenia lub zmniejszenia zakładanych kosztów produkcji w tej dziedzinie wymuszają badania przewidywanych uwarunkowań realizacyjnych oraz związanych z nimi szans uzyskania oszczędności.

Elastyczność zarządzania zasobami ludzkimi wymaga umiejętności planistycznych, zwłaszcza w przypadku wystąpienia nieoczekiwanych zakłóceń organizacyjnych

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: d.przywara@po.opole.pl

w trakcie realizowanych procesów (Krupski, 2005), wymuszających aktualizowanie przyjętego harmonogramu.

Problemem podstawowym w zarządzaniu zasobami ludzkimi jest przypisanie im zestawów zadań w sposób umożliwiający wykorzystanie całego potencjału brygad roboczych, z uwzględnieniem ich wydajności (Marcinkowski, 2002). Dążeniem planisty powinno być jak najpełniejsze wykorzystanie środków produkcji, bowiem nieplanowane przestoje będą generowały straty. Z drugiej strony, zaplanowanie zadań brygad w ilości przekraczającej ich wydajność spowoduje opóźnienia czasowe w systemie produkcyjnym, również przekładające się na koszty. Racjonalna struktura podziału pracy w przyjętym harmonogramie wymaga więc dużego doświadczenia organizatorskiego w rozkładzie procesów.

2. Zastosowanie inżynierskie: rejestracja postępu robót metodą EV

Do przeprowadzenia studium wykonalności planu produkcyjnego posłużono się harmonogramem rzeczowo-finansowym przedsięwzięcia polegającego na wzniesieniu stanu surowego stalowo-żelbetowej hali produkcyjnej (rys. 1).

Alokacja środków produkcji w kalendarzu przedsięwzięcia, dyktowana koniecznością zachowania nienaruszalnej marszruty technologicznej, pozwoliła na skonstruowanie planu budowy w czasookresie 61 dni roboczych, z zakończeniem robót w dniu 31.12.2015 roku. Start systemu produkcyjnego ustalono na dzień 01.10.2015, wprowadzając dwie dodatkowe kotwice czasowe: zakończenie budowy hali do dnia 31.12.2015 oraz rozpoczęcie montażu konstrukcji stalowej ścian hali w dniu 27.11.2015. Procesy harmonogramu połączono zależnościami czasowymi, odzwierciedlające reżim technologiczny robót.

Pierwszy etap rejestracji robót wykonano w dniu 16.11.2015. Odnotowano łączne opóźnienie czasowe wynoszące pięć dni roboczych; zakończono stan zerowy hali (czynności 1÷8), a także rozpoczęto układanie podkładu betonowego. Opóźnienie na rozpatrywanym ciągu procesów wyniosło dwa dni robocze dla belek 1, 2, 3 (*Przygotowanie terenu, Zdjęcie humusu, Wykopy pod fundamenty*). Wydłużenie czasu realizacji o kolejne trzy dni robocze odnotowano dla procesów roboczych 4, 5, 6, 7 (*ustrój fundamentowy wraz z izolacją*). Dla czynności numer 9 (*Podkład pod płytę*) stanowiącej w dniu kontrolnym produkcję w toku, stwierdzono szacunkowy wzrost opóźnienia – do 7 dni roboczych (rys. 2).

Analiza postępu robót wykazała, poza opóźnieniem robót, również przekroczenie ich budżetu (rys. 3): koszty poniesione na produkcję wyniosły 4.695.393,81 zł, przy planowanym budżecie do dnia I etapu rejestracji robót 4.290.664,02 zł. Podobny obraz analizowanej produkcji budowlanej dają jej wskaźniki czasowo-kosztowe: rentowność wskaźnika kosztów (*Wartość Uzyskana / Koszty poniesione*) na poziomie 0,71 informuje, że z każdej zaangażowanej wartości kapitału w wysokości 1,00 zł jego zwrot wynosi 0,71 (brak nadwyżki, traktowany jako strata), zaś wskaźnik harmonogramu przy wartości 0,77 (*Wartość uzyskana / Koszty planowane*) obrazuje typową regresję robót w stosunku do planu.

3. Konstrukcja modelu naprawczego dla aktualizowanego harmonogramu

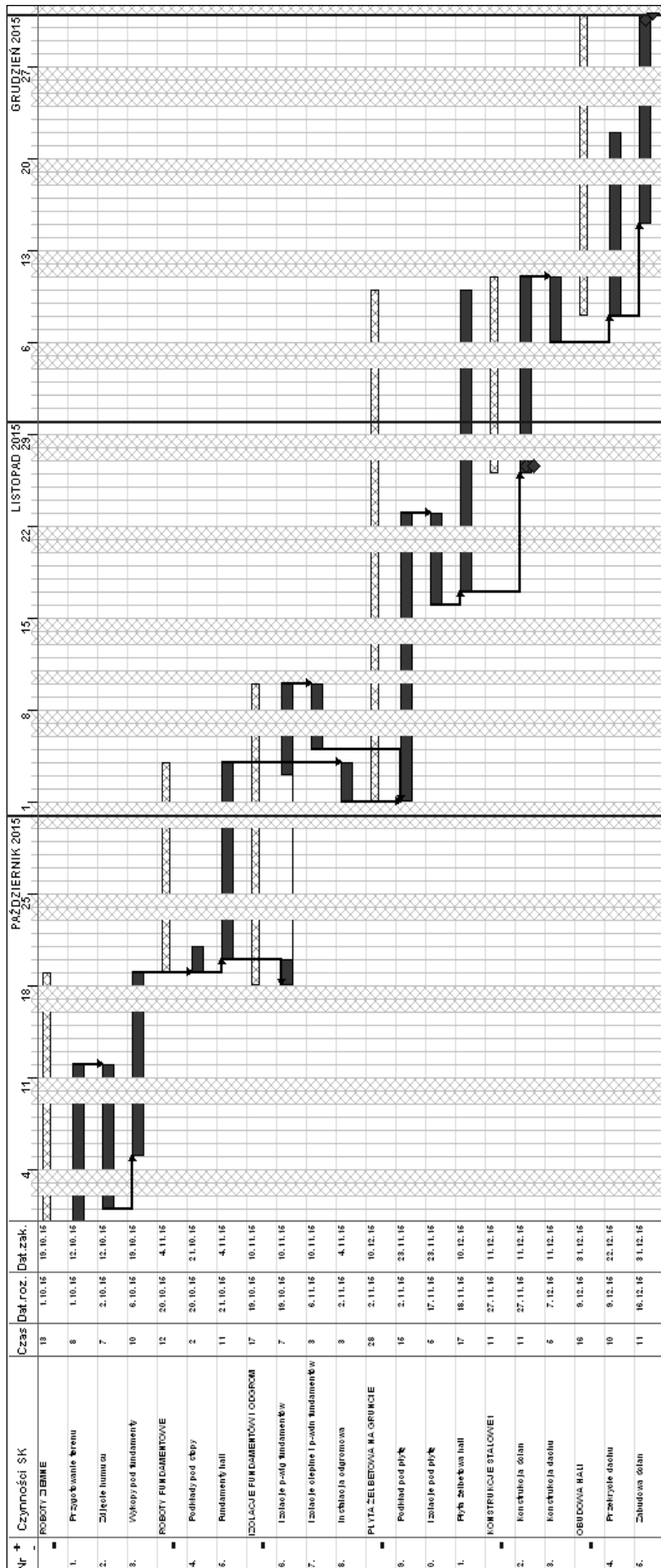
W celu usprawnienia przebiegu robót wykonano działania zaradcze dla pozostałych czynności, uruchamiając pracę na drugiej zmianie roboczej. Wprowadzono pracę niezależnych brygad, cena roboczogodziny określona została na 32,50 zł/r-g, przy stawce wyjściowej harmonogramu 25,50 zł/r-g. Kryterium doboru liczebności zespołów roboczych, realizujących asortymenty pozostałych prac, było dotrzymanie terminu czynności numer 12 (*Konstrukcja ścian*), której rozpoczęcie zaplanowano na dzień 27.11.2015.

Drugiego etapu rejestracji robót dokonano w dniu 31.12.2015 roku, kończącym roboty. Wyniki przedstawiono na rysunku 4. Analiza postępu robót metodą wartości uzyskanej wykazuje wpływ wykonanych działań zaradczych, przez podniesienie wartości wskaźników.

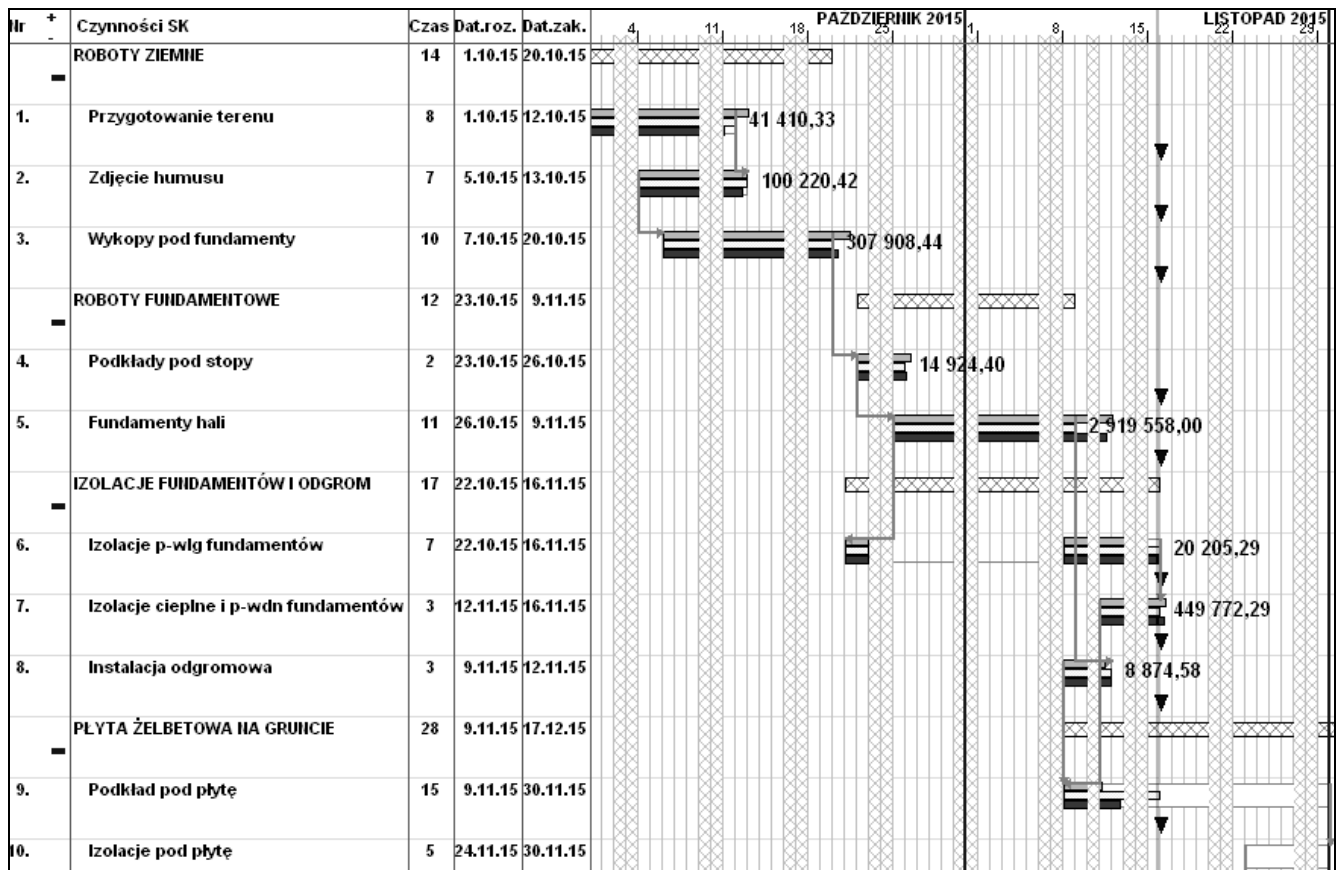
Wyższa, w stosunku do I etapu rejestracji, wartość wskaźnika harmonogramu obrazuje przyspieszenie robót o 15%, choć opóźnienia czasowe z pierwszego okresu, generujące nieplanowane koszty, plasują go ostatecznie na poziomie mniejszym od jedności – 0,92.

Wzrost wartości odnotowano także w przypadku wskaźnika kosztów (etap I: 0,71, etap II: 0,77). W tym przypadku niższy przyrost (8%) dyktują wyższe koszty robocizny produkcyjnej, odzwierciedlone w odchyleniu kosztów produkcji (*Wartość uzyskana / Koszty poniesione*).

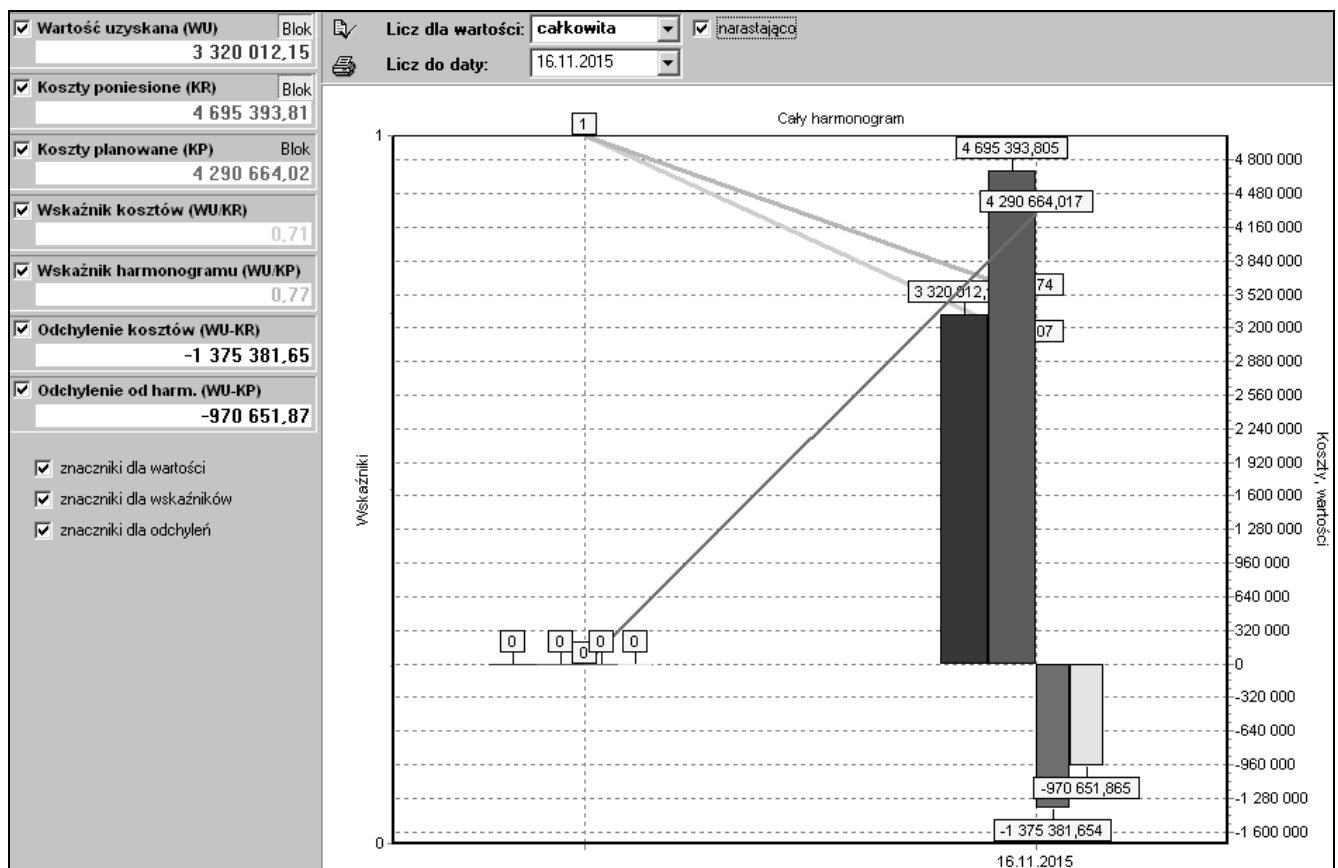
Konieczność terminowego zakończenia robót, dyktowana zazwyczaj wysokimi kosztami kar umownych za niedotrzymanie terminów kontraktowych, spowodowała ujemny wynik ekonomiczny budowy, ze stratami na poziomie 16,7% (*Koszty poniesione-Koszty planowane*).



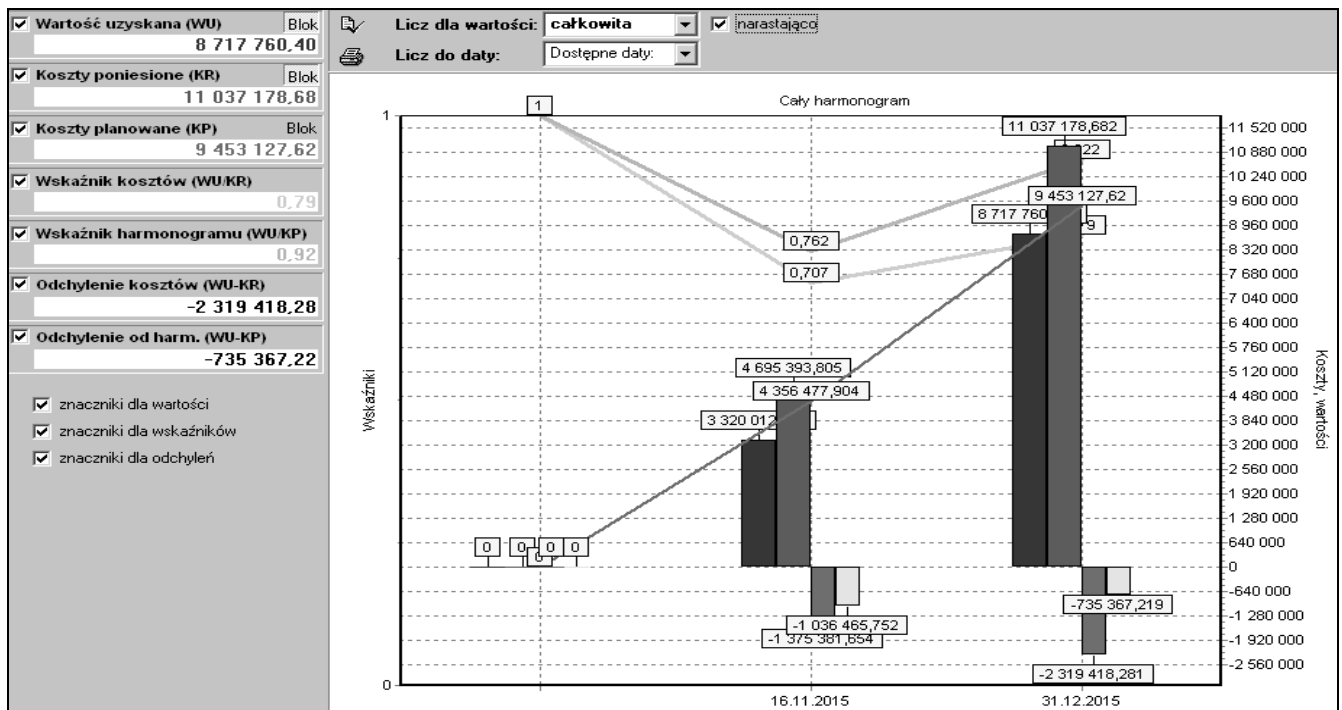
Rys. 1. Wyjściowy harmonogram belkowy Gantta dla przedsięwzięcia „Budowa stalowo-żelbetowej hali produkcyjnej”. Źródło: Program Planista 6.5.20



Rys. 2. Harmonogram postępu robót do dnia I etapu rejestracji: okres 01.10.2015 – 16.11.2015 (belki: szara – faktyczne wykonanie, biała – planowane wykonanie, czarna – koszty poniesione). Źródło: Program Planista 6.5.20



Rys. 3. Analiza postępu robót metodą wartości uzyskanej: I etap rejestracji. Źródło: Program Planista 6.5.20



Rys. 4. Analiza postępu robót metodą wartości uzyskanej: II etap rejestracji. Źródło: Program Planista 6.5.20

4. Analiza poniesionych kosztów robocizny produkcyjnej

Zarejestrowane wykonanie robót, w I i II etapie kontrolnym, obrazuje stan zaawansowania prac według ilości i wartości przepracowanych roboczogodzin. W tabeli 1 ujęto różnice czasowe (ilości roboczo-godzin) i kosztowe (wartości przepracowanych roboczo-godzin) dla planowanych modeli rozdziału brygad (modele: A1 – I etap i A2 – II etap) oraz faktycznie zrealizowanych (modele: A1' – I etap i A2' – II etap). Otrzymana nadwyżka finansowa (+5,96%) w I etapie rejestracji nie stanowi superaty dla wykonawcy – wynika z mniejszych od planowanych przerobów produkcyjnych.

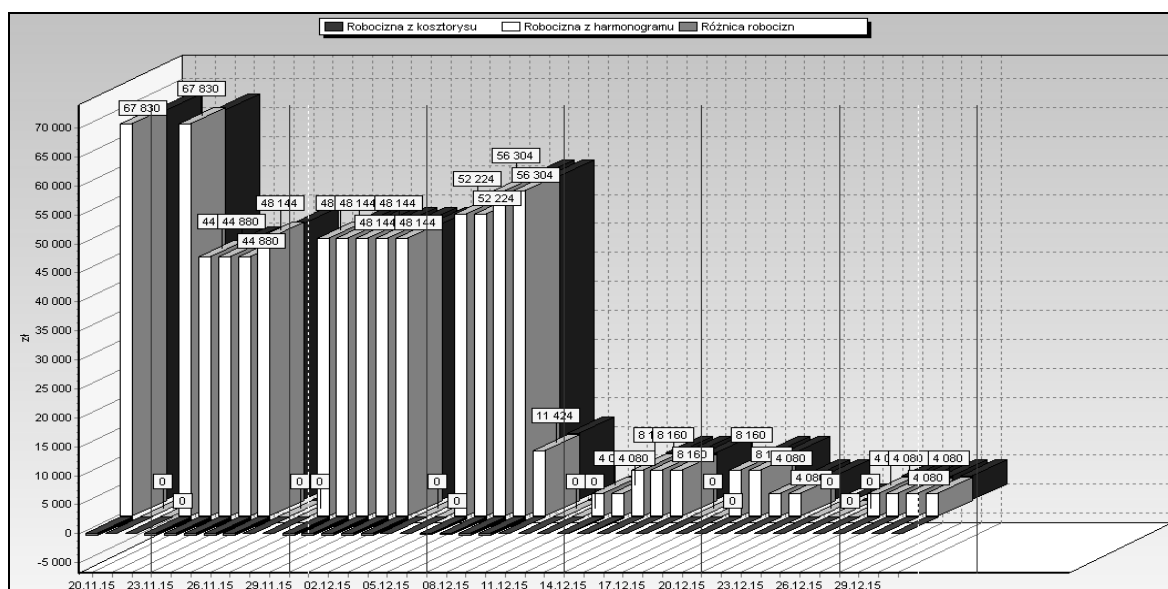
Modele A1 i A1', wykazują mniejsze wartości zarejestrowanego wykonania, co potwierdza spowolnienie robót (A1'), w stosunku do planu (A1). Zaplanowane

rozpoczęcie czynności numer 11 (*Płyta żelbetowa hali*), na dzień 18.11.2015, w modelu wykonanym zrealizowane zostało z opóźnieniem, w dniu 20.11.2015. Strata powstała w II etapie rejestracji (–10,37%) wynika z większej od planowanej ilości przepracowanych roboczogodzin w analizowanym okresie, a także z uzgodnionej wyższej od wyjściowej stawki.

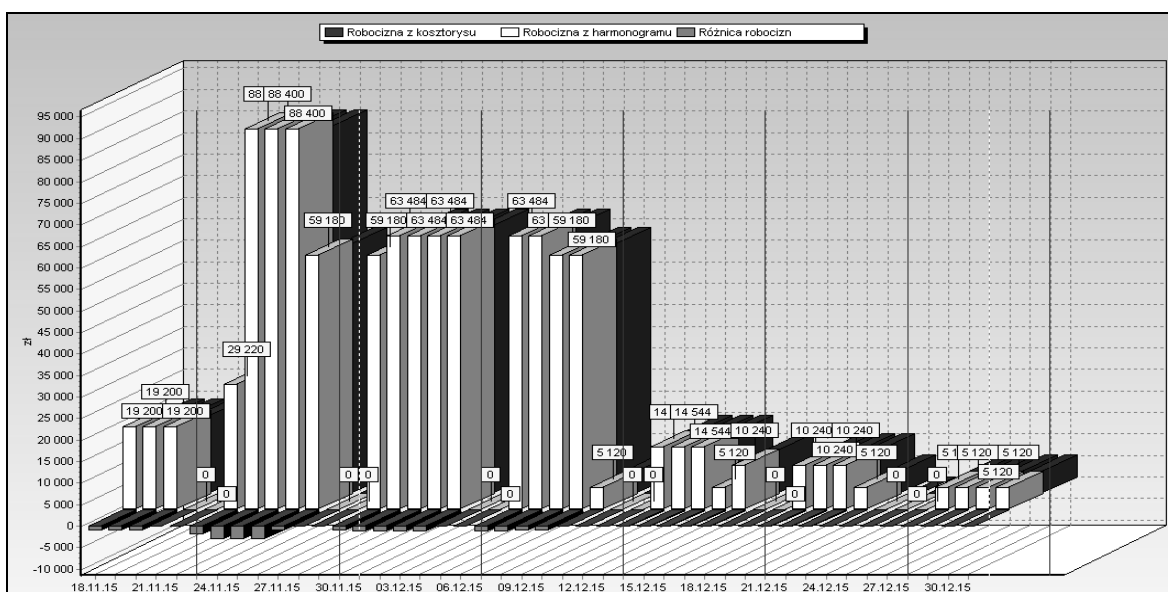
W uzupełnieniu do I etapu rejestracji, cyklogramy kontrolne II etapu (modele A2, A2' – rys. 5-6) obrazują przyspieszenie robót (A2'), wynikiem z zasilenia frontów roboczych dodatkowymi brygadami pracowniczymi, choć wyższy koszt ich pracy spowodował przekroczenie, założonego kosztorysem, budżetu robocizny produkcyjnej o łączną wartość 4,41% – obniżającą planowany zysk kalkulacyjny z inwestycji.

Tab. 1. Koszty robocizny produkcyjnej dla badanego przedsięwzięcia w I i II etapie rejestracji. Źródło: Program Planista 6.5.20

Modele doboru składu brygad (planowane i wykonane)	Ilość i wartość robocizny produkcyjnej (R) według budżetu kosztorysowego	Stawka roboczo-godziny na zmianie roboczej I / II	Planowane wykonanie według harmonogramu: Modele A1, A2	Zarejestrowane wykonanie według etapu rejestracji: Modele A1', A2'	Różnica wartości planowanej w stosunku do wykonanej
I etap rejestracji: (16.11.2015) Modele A1 / A1'		25,50 / 0,00	[13.048,68 r-g] 332.740,25 zł (23,35%)	[9.716,35 r-g] 247.765,89 zł (17,39%)	[+3.332,33 r-g] + 84.974,36 zł (+5,96%)
II etap rejestracji: (31.12.2015) Modele A2 / A2'	[55.882,14 r-g] 1.424.993,98 zł (100,00%)	25,50 / 32,50	[42.833,46 r-g] 1.092.253,73 zł (76,65%)	[46.165,79 r-g] 1.239.706,17 zł (87,02%)	[–3.332,33 r-g] – 147.452,44 zł (–10,37%)
Wartość końcowa:		-	[55.882,14 r-g] 1.424.993,98 zł (100,00%)	[55.882,14 r-g] 1.487.472,06 zł (104,41%)	[0,00 r-g] – 62.478,08 zł (– 4,41%)



Rys. 5. Cyklogram kontrolny: „porównanie kosztów robocizny w kosztorysie i harmonogramie”. Model planowany (A2) ciągu procesów harmonogramu do dnia II etapu rejestracji (16.11.2015 – 31.12.2015). Źródło: Program Planista 6.5.20



Rys. 6. Cyklogram kontrolny: „porównanie kosztów robocizny w kosztorysie i harmonogramie”. Model wykonany (A2') ciągu procesów harmonogramu do dnia II etapu rejestracji (16.11.2015 – 31.12.2015). Źródło: Program Planista 6.5.20

5. Wnioski z badań i analiz

Przekroczenie budżetu robocizny kosztorysowej o wartość 4,41%, spowodowane okresowym zaangażowaniem do robót dodatkowych brygad roboczych, których cena pracy – stawka roboczogodziny – przekracza o 27,5% wartość stawki planowanej, generuje wzrost kosztów budowy o 16,7% (rys. 4 – różnica łącznych kosztów poniesionych i kosztów planowanych). Zjawisko to wynika ze struktury stawki robocizny kosztorysowej brutto, obejmującej – poza stawką netto – pulę kosztów pośrednich (ogólnych budowy i zarządu) oraz założonego zysku kalkulacyjnego. Zasilenie produkcji na placu budowy dodatkowymi brygadami roboczymi, najczęściej w systemie podwykonawczym, w którym zewnętrzna

firma oferuje własną, wyższą stawkę pracy – zakamufLOWaną w stawce akordowej, znajduje zatem uzasadnienie jedynie w przypadku, gdy kary umowne za przekroczenie terminu kontraktowego inwestycji przewyższają straty powstałe w wyniku takiej reorganizacji opóźnionego harmonogramu.

Aktualizacja realizowanego planu produkcji metodą wartości uzyskanej – w zaplanowanych dwóch etapach rejestracji robót – oraz wprowadzenie działań zaradczych, pozwoliły na podniesienie wartości wskaźnika harmonogramu o 15% – z poziomu 0,77 do 0,92.

Warto również zwrócić uwagę na wykonaną w dniu pierwszej kontroli wartość całkowitą analizowanej produkcji, sięgającą 36% łącznego budżetu inwestycji.

Literatura

- Kasprowicz T. (2002). Inżynieria Przedsięwzięć Budowlanych. *Instytut Technologii Eksploatacji w Radomiu*, Warszawa-Radom.
- Kosieradzka A. (2012). Zarządzanie ProduktYWnością w Przedsiębiorstwie. *Wydawnictwo C.H. Beck*, Warszawa.
- Krupski R. (2005). Zarządzanie Przedsiębiorstwem w Turbulentnym Otoczeniu. *Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne*, Warszawa.
- Kulińska E., Dornfeld A. (2009). Zarządzanie Ryzykiem Procesów. *Wydawnictwo Politechniki Opolskiej*, Opole.
- Lock D. (2009). Podstawy Zarządzania Projektami. *Wydawnictwo P.W.E.*, Warszawa.
- Marcinkowski R. (2002). Metody Rozdziału Zasobów Realizatora w Działalności Inżynieryjno-Budowlanej. *Wydawnictwo Wojskowej Akademii Technicznej*, Warszawa.
- Nowak E. (2011). Zarządzanie Kosztami i Efektami. *Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej im. Oskara Langego we Wrocławiu*, Wrocław.
- Przywara D., Rak A. (2016). Outsourcing robót budowlanych jako sposób na rozwiązanie wysokich kosztów wewnętrznych w przedsiębiorstwie budowlanym. *Przegląd Budowlany*, 1/2016, 43-48.

EVALUATION OF SCHEDULE LABOUR COSTS IN RELATION TO PRODUCTION DELAYS

Abstract: Rational management of renewable resources means of production is the basic criterion for assessing the quality of the schedule, both in terms of generated production costs and labour time involved in production and equipment. The above-mentioned factors, in addition to the built-in materials, constitute direct price-setting elements. The comparison of labour costs incurred can be applied in case of less than planned efficiency of work, organizational disruptions affecting the duration of processes, or the distribution of different wages for working hours. The article attempts to estimate the changing costs of production labour, which is prone to periodic fluctuations in the number of independent work teams, appointed to overcome the unplanned delays. Tests were carried out using the earned value method.

MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA ANALIZY WIELOKRYTERIALNEJ W PROCESIE INWESTYCYJNO-BUDOWLANYM

Elżbieta SZAFRANKO*

Wydział Geodezji, Inżynierii Przestrzennej i Budownictwa, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie,
ul Heweliusza 4, 10-724 Olsztyn

Streszczenie: Proces inwestycyjno-budowlany jest niezwykle złożony a czynności związane z jego realizacją można podzielić na kilka etapów. Najważniejszym z nich jest etap przygotowania inwestycji. To wtedy zapada szereg decyzji dotyczących m. in. wyboru lokalizacji, wyboru rozwiązań materiałowych czy technologicznych. O wyborze ostatecznego rozwiązania może zadecydować wiele czynników i podjęcie decyzji w sposób bezpośredni jest niezwykle trudne. W skomplikowanych przypadkach decyzyjnych konieczne jest stosowanie matematycznych metod wspomagania. Ze względu na mnogość rozpatrywanych czynników, szczególnie przydatne są metody analiz wielokryterialnych. W artykule przedstawiono możliwości wspomagania różnych problemów decyzyjnych z wykorzystaniem metod analizy wielokryterialnej. Postępowanie zilustrowano przykładami analizy wyboru lokalizacji inwestycji mieszkaniowej, wariantowania inwestycji drogowej oraz wyboru rozwiązania materiałowo-konstrukcyjnego obiektu budowlanego. W wyniku analizy przeprowadzonej różnymi metodami stwierdzono ich przydatność w przypadkach analizy inwestycji o różnych cechach i funkcjach.

Słowa kluczowe: proces inwestycyjny, analizy, metody wielokryterialne.

1. Wprowadzenie

W działalności inwestycyjno budowlanej pojawia się wiele problemów decyzyjnych. Większość z nich wymaga rozstrzygnięcia na etapie planowania inwestycji (Dziadosz i Kończak, 2016). Są to na przykład problemy dotyczące wyboru różnych możliwości lokalizacyjnych, od których niejednokrotnie zależy powodzenie przedsięwzięcia, wybór wariantu inwestycji czy rozstrzygnięcia konstrukcyjno-technologiczne (Zavadskas i in., 2012). W każdym z tych przypadków inwestor, projektant lub wykonawca muszą przeanalizować wiele czynników, decydujących o przyszłej inwestycji. Czynniki te to kryteria oceny, a właściwe ich przygotowanie jest punktem wyjścia do oceny przy pomocy wielu znanych metod wspomagania matematycznego. Ze względu na mnogość informacji decydujących o ostatecznej decyzji, szczególnie przydatne stają się metody analizy wielokryterialnej (Marques i in., 2011). Metody różnią się sposobem postępowania, stopniem skomplikowania aparatu matematycznego i czytelnością uzyskanych wyników (Dytczak, 2010). Jednak we wszystkich przypadkach początkiem dalszych obliczeń jest ustalenie grupy lub grup kryteriów oraz oszacowanie ich znaczenia. Ważne jest właściwe zdefiniowanie kryteriów uwzględnianych w analizie. Ten etap może też przebiegać różnie a ocena, przeprowadzana w oparciu

o opinie ekspertów przeprowadzana jest na podstawie ankiet przygotowanych specjalnie dla każdej z metod, z uwzględnieniem ich specyfiki (Szafranko 2013). W zależności od stopnia skomplikowania rozważanego problemu, liczby i kategorii kryteriów oraz charakteru inwestycji, mogą być przydatne różne metody.

Celem pracy jest przeanalizowanie sposobu postępowania w różnych przypadkach inwestycyjnych. Dla zilustrowania problemów w artykule przedstawiono kilka przykładów.

2. Metodyka postępowania i przykłady obliczeniowe

Jednym z pierwszych problemów, rozstrzyganych na etapie planowania inwestycji jest wybór lokalizacji. W niektórych przypadkach dotyczy on wyboru pomiędzy dostępnymi działkami. W przypadku inwestycji liniowych ciągnących się dziesiątki kilometrów, jak przykładowo inwestycje drogowe, wybór trasy jaką będzie przebiegać analizowany odcinek.

Analiza lokalizacji inwestycji stanowi zawsze przypadek skomplikowany i wymaga oceny większej liczby kryteriów. Dla zilustrowania problematyki przedstawiono dwa przykłady.

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: elasz@uwm.edu.pl

2.1. Ocena lokalizacji inwestycji mieszkalnej

Problem wyboru terenu pod inwestycje mieszkaniowe jest związany z przeprowadzeniem analizy wielu czynników. Część z nich wynika z ogólnie znanych i stosowanych kryteriów lokalizacyjnych (Budner, 2007). Inne natomiast związane są ze specyfiką konkretnej lokalizacji oraz samej inwestycji (Szafranko i Pawłowicz, 2014). Analiza wielu podobnych przykładów wykazuje za każdym razem dużą liczbę wymagań, które należy uwzględnić. W analizowanym przypadku najważniejsze jest spełnienie warunków takich jak:

- A. Komunikacja:
 A1 – połączenie z siecią komunikacji lokalnej,
 A2 – rozwiązania dotyczące dojazdu,
 A3 – możliwość korzystania z transportu publicznego,
 A4 – odległość od centrum miasta;
- B. Infrastruktura techniczna:
 B1 – dostęp do sieci energetycznej,
 B2 – dostęp do sieci wodociągowej,
 B3 – dostęp do kanalizacji;
- C. Warunki terenowe i gruntowo-wodne:
 C1 – nośność gruntu,
 C2 – rodzaj gruntu,
 C3 – głębokość zalegania warstwy nośnej,
 C4 – poziom wód gruntowych,
 C5 – ukształtowanie terenu,
- D. Kryteria urbanistyczno-planistyczne:
 D1 – odległość od organów administracji architektoniczno – budowlanej,
 D2 – stan opracowań w zakresie planów miejscowych,
 D3 – stan opracowań strategii i programów rozwoju gminy,
 D4 – konieczność dodatkowych ustaleń (ochrona środowiska),
 D5 – konieczność wykonania ekspertyz;

Ze względu na dużą liczbę wymagań (17) wskazane jest zastosowanie metody hierarchicznej, pozwalającej połączyć je w grupy kryteriów głównych i podkryteriów. W tym przypadku proponuje się zastosowanie metody AHP (Szafranko, 2012). Metoda ta ponadto pozwala ocenić ważność poszczególnych kryteriów poprzez porównanie ich parami i zadecydowanie, które z nich są ważniejsze (The Analytic Hierarchy Process, 2004).

Obliczenia wykonano zgodnie z procedurą przedstawioną w literaturze (Saaty, 2008). W pierwszym kroku przeprowadzono ocenę porównywanych parami

kryteriów głównych. Macierz porównań (tab. 1) zbudowana jest w taki sposób, że po przekątnej znajdują się wartości równe jeden, co wynika z porównania każdego kryterium ze sobą, na przykład: A z A, B z B i tak dalej. Wartości większe od jedności świadczą o przewadze rozpatrywanego w danym wierszu kryterium z kolejnymi kryteriami umieszczonymi w układzie kolumnowym. Po drugiej stronie przekątnej są wartości odwrotne. W tabeli 2 przedstawiono obliczenia wartości znormalizowanej macierzy prowadzące do otrzymania wektora priorytetów. Poniżej (zgodnie z procedurami zawartymi w materiałach źródłowych) sprawdzono współczynnik niespójności potwierdzający prawidłowość obliczeń:

- wyznaczamy maksymalną wartość własną macierzy:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{w_i} \sum_{i=1}^n a_{ij} w_j \quad (1)$$

$$\lambda_{\max} = 12,00 \cdot 0,0812 + 4,83 \cdot 0,2221 + 1,67 \cdot 0,5817 + 9,50 \cdot 0,1150 = 4,11528 \quad (2)$$

- wartość współczynnika niespójności:

$$C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{4,11528 - 4}{4 - 1} = 0,0384 \quad (3)$$

- wskaźnik niespójności:

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} \quad (4)$$

gdzie $C.R.$ powinno osiągnąć wartość $< 10\%$, zaś $R.I. = 0,9$ (Saaty 2008).

$$C.R. = \frac{0,0384}{0,9} = 0,0427 \cdot 100\% = 4,27\% \quad (5)$$

Tab. 1. Macierz porównań dla kryteriów nadrzędnych

Kryteria nadrzędne	A	B	C	D
A	1,00	0,5	0,14	0,50
B	2,00	1,00	0,33	3,00
C	7,00	3,00	1,00	5,00
D	2,00	0,33	0,20	1,00
suma a_{ij}	12,00	4,83	1,67	9,50

Tab. 2. Wartości macierzy znormalizowanej i wektora priorytetu dla kryteriów nadrzędnych

Kryteria nadrzędne	A	B	C	D	suma w_{ij}	Wektor priorytetów W_j
A	0,0833	0,1034	0,0852	0,0526	0,3246	0,0812
B	0,1667	0,2069	0,1989	0,3158	0,8882	0,2221
C	0,5833	0,6207	0,5966	0,5263	2,3269	0,5817
D	0,1667	0,0690	0,1193	0,1053	0,4602	0,1151

W wielu przypadkach konieczne jest również przeanalizowanie kryteriów cząstkowych opisanych w podgrupach odpowiednio do kryteriów głównych. Analiza podkryteriów jest dyktowana z jednej strony ograniczeniem liczby kryteriów porównywanych bezpośrednio, a drugiej strony faktem, że niektóre z nich trudno by było porównać bezpośrednio.

W analizowanym przypadku mamy do wyboru 3 warianty lokalizacji. Każdy z wariantów w różnym stopniu spełnia wyróżnione wcześniej kryteria. Analizę można poprowadzić uwzględniając tylko część kryteriów – tych uznanych za najważniejsze. W tym przypadku ankiety wykazały najwyższą wagę kryteriów z grupy A i C. W tabeli 3 i 4 przedstawiono obliczenia przeprowadzone analogicznie jak dla kryteriów głównych, obejmujące analizowane warianty w aspekcie kryterium A, a w tabelach 5 i 6 dla kryterium C.

Otrzymane wartości wektora priorytetu dla analizowanych wariantów pokazują, że wariant 3 spełnia w największym stopniu oczekiwania pod względem komunikacji. Z analizy wariantów w aspekcie kryteriów terenowych i gruntowych (grupa C) wynika że wariant 1 spełnia je w największym stopniu.

Ciekawym będzie rozstrzygnięcie, który aspekt jest decydujący. W tym celu przeprowadza się obliczenia pokazujące, w jakim stopniu poszczególne kryteria są spełniane przez kolejne warianty. Wartości wektora priorytetów, dla każdego z kryteriów nadrzędnych i poszczególnych wariantów w kontekście analizowanych kryteriów są badane jako sumy ich iloczynów. Analizę ogranicza się do wybranych kryteriów.

Dla wariantu pierwszego:

$$W_1 = 0,5817 \cdot 0,6479 + 0,0812 \cdot 0,1638 = 0,3769 + 0,0133 = 0,3902$$

Dla wariantu drugiego:

$$W_2 = 0,5817 \cdot 0,2299 + 0,0812 \cdot 0,2973 = 0,1337 + 0,0241 = 0,1578$$

Dla wariantu trzeciego:

$$W_3 = 0,5817 \cdot 0,1222 + 0,0812 \cdot 0,5390 = 0,0711 + 0,0438 = 0,1149$$

Z przeprowadzonej analizy wynika, że wariant pierwszy lokalizacji spełnia wybrane wcześniej kryteria w największym stopniu. Decydujący wpływ na wynik analizy ma wysoka wartość wektora priorytetu w aspekcie kryterium C dla tego wariantu.

Tab. 3. Macierz porównań dla wariantów w aspekcie kryterium A

wariant	w1	w2	w3
w1	1,00	0,5	0,33
w2	2,00	1,0	0,50
w3	3,00	2,0	1,00
suma	6,00	3,5	1,83

Tab.4. Wartości macierzy znormalizowanej i wektora priorytetu – kryterium A

w_{ij}	w1	w2	w3	suma w_{ij}	Wektor priorytetu W_i^w
w1	0,166667	0,142857	0,181818	0,491342	0,1638
w2	0,333333	0,285714	0,272727	0,891775	0,2973
w3	0,500000	0,571429	0,545455	1,616883	0,5390

$$\lambda_{\max} = 3,01118, C.I. = 0,00559, C.R. = 0,00964 \cdot 100\% = 0,96\% < 10\%, R.I. = 0,58 \text{ (Saaty, 2008)}$$

Tab. 5. Macierz porównań dla wariantów w aspekcie kryterium C

wariant	w1	w2	w3
w1	1,00	3,0	5,00
w2	0,33	1,0	2,00
w3	0,20	0,5	1,00
suma	1,53	4,5	8,00

Tab. 6. Wartości macierzy znormalizowanej i wektora priorytetu – kryterium C

w_{ij}	w1	w2	w3	suma w_{ij}	Wektor priorytetu W_i^w
w1	0,652174	0,666667	0,6250	1,943841	0,6479
w2	0,217391	0,222222	0,25	0,689614	0,2299
w3	0,130435	0,111111	0,125	0,366546	0,1222

$$\lambda_{\max} = 3,005395, C.I. = 0,0027, C.R. = 0,00465 \cdot 100\% = 0,465\% < 10\%, R.I. = 0,58 \text{ (Saaty, 2008)}$$

2.2. Ocena wariantów inwestycji drogowej

Zadania inwestycyjne obejmujące budowę odcinków dróg są szczególnie trudne (Zavadskas i in., 2007). W większości przypadków, zwłaszcza dróg planowanych na terenach o wysokiej wartości przyrodniczej, wymagane jest opracowanie kilku wariantów przebiegu trasy oraz różnych rozwiązań technicznych i komunikacyjnych. Pozwala to na znalezienie rozwiązania spełniającego w najwyższym stopniu założenia projektu. Na podstawie analiz projektów realizowanych w regionie o wysokich walorach przyrodniczych (Szafranko, 2010) oraz opinii ekspertów określono, że najczęściej brane pod uwagę przy opracowaniu projektów są cztery grupy kryteriów (Szafranko, 2012, 2013).

W każdej grupie wyszczególniono najczęściej powtarzające się podkryteria:

A – Transportowe:

- A1 – praca przewozowa (liczba pojazdów × kilometry na dobę),
- A2 – koszty wynikające z czasu przewozów uwzględniające koszty czasu traconego w wyniku stania w korkach lub wydłużenia trasy,
- A3 – długość drogi w km,
- A4 – koszty wynikające z eksploatacji pojazdów (koszty napraw, spalanie);

B – Ekonomiczne:

- B1 – koszt budowy drogi,
- B2 – koszt wykupu terenu,
- B3 – koszty odszkodowań;

C – Środowiskowe:

- C1 – naruszenie obszarów chronionych,
- C2 – długość przebiegu tras przez obszary leśne,
- C3 – ilość drzew do wycięcia,
- C4 – przecięcie szlaków wędrówek zwierząt,
- C5 – przecięcie cieków wodnych;

D – Społeczne i przestrzenne:

- D1 – liczba budynków do wyburzenia,
- D2 – liczba budynków w odległości 0-50 m,
- D3 – liczba budynków w odległości 50-100 m,
- D4 – powierzchnia gruntów do wywłaszczenia,
- D5 – kolizje z planowanym zagospodarowaniem przestrzennym.

Można zauważyć, że przy analizie przebiegu inwestycji drogowych uwzględnione zostały inne kryteria oceny niż przy inwestycji mieszkaniowej. Jest to oczywiste i wynika z różnych funkcji i oddziaływań na środowisko społeczne i przyrodnicze tych obiektów. To właśnie te kryteria są często najważniejsze i do ich oceny zaproponowano zastosowanie metody wskaźnikowej (Szafranko, 2014). Jest to metoda, która w odróżnieniu od innych pozwala uwzględnić ujemne skutki inwestycji zarówno w skali lokalnej, jak i globalnej. Kryteria środowiskowe (C) są z reguły najtrudniejsze do oceny i oszacowania ze względu na ich niemierzalny charakter. Naruszenie obszarów chronionych zostało ocenione poprzez długość tras przebiegających przez obszary chronione (C1). Podobnie oszacowano przebieg tras przez obszary leśne (C2). Otrzymano mniejsze wartości, gdyż było trudno planując inwestycję ominąć całkowicie lasy, ale można było ominąć obszary chronione. Z przebiegiem terenów przez obszary leśne związane jest (C3) wycięcie pewnej liczby drzew. Kolejnym problemem (C4) jest przecięcie szlaków wędrówek zwierząt. Bez odpowiedniej infrastruktury może być to przyczyną zwiększenia liczby kolizji. Przecięcia cieków wodnych (C5) są koniecznością w praktyce inżynierskiej. Wiązą się z koniecznością zaprojektowania odpowiednich elementów infrastruktury tak, aby uniknąć problemów związanych z przepływem wody w gruncie oraz w korycie cieków wodnych. Kryteria społeczno-planistyczne dotyczą wpływu planowanej inwestycji na infrastrukturę społeczną. Uwzględniają minimum konieczność wyburzenia budynków (D1) z uwzględnieniem odległości od planowanej trasy drogi (D2, D3), konieczne wywłaszczenia oraz kolizje z planowanymi inwestycjami o innym niż drogowy charakterze. Wartości wag zostały również opracowane w oparciu o opinie ekspertów. Określili oni, które kryteria są najważniejsze oraz wskazali w każdej grupie podkryteria najważniejsze, z punktu widzenia różnych grup zainteresowanych. I tak, dla kryteriów środowiskowych uznano, że ochrona terenów przed naruszeniem obszarów chronionych jest najważniejsza, a wśród kryteriów społecznych i przestrzennych najistotniejszym problemem jest konieczność wyburzenia budynków. Obliczenia przeprowadzono w formie macierzy (tab. 7 i 8).

Tab. 7. Matryca obliczeń Metodą Wskaźnikową – kryterium C

Lp	Badane kryterium	Wariant numer 1 inwestycji			Wariant numer 2 inwestycji			Wariant numer 3 inwestycji			Waga kryterium
1	C1	-1	0	1	-1	-10	-1	-1	-10	-1	5
2	C2	-1	6	3	-1	3	2	-1	-3	0	3
3	C3	-2	-4	1	-1	-8	-1	2	4	-1	4
4	C4	-1	3	2	-1	-6	-1	-1	3	2	3
5	C5	1	4	1	1	4	1	-1	0	1	2
	suma		9			-17			-6		

Tab. 8. Matryca obliczeń Metodą Wskaźnikową – kryterium D

Lp	Badane kryterium	Wariant numer 1 inwestycji			Wariant numer 2 inwestycji			Wariant numer 3 inwestycji			Waga kryterium
1	D1	0	10	2	-1	-5	0	-2	-5	1	5
2	D2	-1	0	1	0	4	1	-1	-4	0	4
3	D3	-2	3	3	1	0	-1	0	3	1	3
4	D4	-2	-2	1	-1	-2	0	-1	4	3	2
5	D5	1	4	1	0	2	1	1	4	1	2
	suma		15			4			2		

W tabelach 7 i 8 można zauważyć oceny ujemne pokazujące negatywne skutki inwestycji w zakresie niektórych kryteriów. Najniższe oceny można stwierdzić w kryterium C3 opisującym liczbę drzew do wycięcia, a w grupie kryteriów środowiskowych D1 opisując konieczność wyburzeń. Najwyższą ocenę zarówno w aspekcie kryterium środowiskowego, jak i społeczno-przestrzennego uzyskał wariant 1.

2.3. Wybór rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych

Projektując obiekt budowlany należy rozpatrzyć szereg alternatywnych rozwiązań materiałowych i konstrukcyjnych. Dla zobrazowania problemu przedstawiono przykładową analizę możliwości zastosowania w obiekcie budowlanym dźwigara o konstrukcji strunobetonowej i dźwigara stalowego. W celu wyboru optymalnego rozwiązania uwzględniono zarówno aspekty natury technicznej, jak i warunki w jakich konstrukcja będzie eksploatowana. Elementy strunobetonowe mają wiele zalet i wad. Zalety to przede wszystkim wysoka ognioodporność, możliwość pracy w środowisku o podwyższonej wilgotności i agresywnym chemicznie, przenoszenie dużych obciążeń, odporność na obciążenia dynamiczne, ograniczenie korozji stali, duża smukłość elementów, modularność i typowość, małe ugięcia i możliwość recyklingu. Główne wady natomiast to wysokie koszty materiałowe, mniejsza powszechność ze względu na zaawansowane technologie realizacji, zwiększenie wymaganej jakości pod względem szczególnego nadzoru na każdym etapie realizacji, konieczność użycia ciężkiego sprzętu do montażu, kosztowny transport i ciężar konstrukcji.

Drugim rozpatrywanym rozwiązaniem jest dźwigar stalowy. Konstrukcje stalowe w porównaniu z konstrukcjami wykonanymi z innych materiałów wykazują znaczną jednorodność właściwości mechanicznych i fizycznych. Warsztatowa produkcja elementów stalowych umożliwia osiągnięcie wysokiego stopnia dokładności. Podstawowe zalety tych konstrukcji to lekkość konstrukcji wynikająca z korzystnego stosunku masy do nośności elementów, łatwy transport, szybkość montażu i demontażu, odzysk materiałów (recykling), jednorodne właściwości mechaniczne i fizyczne, łatwość scalania, montażu na placu budowy, możliwość wzmocnienia konstrukcji,

szybkość wznoszenia konstrukcji oraz łatwość obróbki i łączenia. Dodatkowo lekkość konstrukcji znacznie wpływa na obniżenie kosztów transportu, a montaż nie wymaga użycia dźwigów o dużych nośnościach. Podstawowe wady tego rozwiązania to niekorzystny wpływ wysokiej temperatury na właściwości wytrzymałościowe, podatność na korozję, ograniczona możliwość stosowania zależna od czynników środowiska, wrażliwość na obciążenia dynamiczne oraz duża liczba połączeń wymagających precyzji wykonania.

W oparciu o wymienione cechy rozwiązań oraz wymogi wynikające ze specyfiki obiektu, w którym dźwigar miał być zastosowany (Szafranko, 2015), zdefiniowano następujące kryteria oceny analizowanych wariantów:

- 1) łatwość montażu,
- 2) lekkość konstrukcji,
- 3) odporność konstrukcji na działanie czynników zewnętrznych,
- 4) ognioodporność,
- 5) możliwości jej recyklingu.

Ze względu na zdecydowanie mniejszą liczbę kryteriów, można zastosować prostsze metody oceny, jak na przykład Metoda Oceny Punktowej czy Multicriterial Evaluation Method (MCE). Nie wymagają one stosowania skomplikowanych obliczeń czy postępowania etapowego. Wyniki analizy przeprowadzonej metodą MCE przedstawiono w tabeli 9.

Z tabeli 9 można odczytać informacje o spełnieniu kryteriów cząstkowych, a w podsumowaniu wynik decydujący o tym, który wariant spełnia analizowane kryteria w najwyższym stopniu.

3. Dyskusja i podsumowanie

Przeanalizowane przykłady ilustrują różne, skomplikowane przypadki inwestycyjne. Można zauważyć, że w zależności od charakteru inwestycji kryteria mogą być różne i trudno by było opracować klucz usprawniający postępowanie. W przypadku wyboru lokalizacji inwestycji mieszkaniowej decydujące są czynniki związane z obsługą techniczną i eksploatacyjną inwestycji. Natomiast w przypadku inwestycji drogowych, pod uwagę brane są na przykład

Tab. 9. Analiza wielokryterialna dla analizowanych wariantów

Badane kryteria	Waga kryterium (w)	Wartość param. (x) – konstrukcja strunobetonowa	Spełnienie kryterium – wariant 1	Wartość param. (x) – konstrukcja stalowa	Spełnienie kryterium – wariant 2
1	0,10	4	0,40	5	0,50
2	0,25	3	0,75	4	1,00
3	0,35	5	1,75	2	0,70
4	0,20	4	0,80	2	0,40
5	0,10	2	0,20	6	0,60
suma	1,00		3,90		3,20

kryteria środowiskowe i społeczne, o których nie wspomina się w przypadku poprzedniej inwestycji. W analizowanym przykładzie dotyczącym rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych, analiza rozwiązania dźwigara generuje 5 istotnych czynników. W przypadku analizy rozwiązań konstrukcyjnych i materiałowych daje się zauważyć dużo mniejszą liczbę rozpatrywanych czynników niż w przypadku analizy lokalizacji.

W związku z powyższym, postępowanie w pierwszych przykładach powinno obejmować grupy kryteriów głównych i podkryteria, natomiast w ostatnim przykładzie, ze względu na zdecydowanie mniejszą liczbę kryteriów – nie ma takiej potrzeby. Analiza kryteriów w grupach i podgrupach ułatwia postępowanie i pozwala wybrać kryteria decydujące przy dużej ich liczbie. Gdyby nie zastosowano tego podziału, analiza kilkunastu kryteriów na tym samym poziomie mogłaby doprowadzić do zbyt dużego rozproszenia wag, a to dałoby bardzo spłaszczony i mało zróżnicowany wynik. Analiza tak dużej liczby kryteriów utrudnia wskazanie czynników decydujących.

Przedstawione przykłady pokazują jak można rozwiązać różnorodne sytuacje decyzyjne, które spotyka się w praktyce inżynierskiej.

Literatura

- The Analytic Hierarchy Process. Application in Solving Multiple Criteria Decision Problems (2004). W. Adamus (red.) *J U Publications*, Krakow, 6-32.
- Budner W. (2007). Czynniki lokalizacji inwestycji a możliwości rozwoju ekonomicznego gmin w Polsce. *Acta Scientiarum Polonorum, Administratio Locorum*, 6/2006, 43-58.
- Dytczak M. (2010). Wybrane Metody Rozwiązywania Wielokryterialnych Problemów Decyzyjnych w Budownictwie. *Politechnika Opolska*, Opole.
- Dziadosz A., Kończak A. (2016). Review of selected methods of supporting decision-making process in the construction industry. *Archives of Civil Engineering*, Vol. 62, Is. 1, 111-126.
- Marques G., Gourc D., Lauras M. (2011). Multi-criteria performance analysis for decision making in project management. *International Journal of Project Management*, Vol. 29, Is. 8, 1057-1069.
- Saaty T.L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, Vol. 1, Is. 1, 83-98.
- Szafranko E. (2014). Applicability of the indicator method to evaluation of the impact of road building projects on the natural environment. W: *Proceedings in EIIC-The 3rd Electronic International Interdisciplinary Conference* (Vol. 1).
- Szafranko E. (2010). Evaluation of a possible development of the transportation network in Poland supported by the EU Funds. *Olsztyn Economic Journal*, Vol. 5, Is. 2, 355-379.
- Szafranko E. (2015). Możliwości zastosowania metod analizy wielokryterialnej przy doborze rozwiązań materiałowo-technologicznych w konstrukcjach budowlanych. *Materiały Budowlane*, 5/2015, 49-50.
- Szafranko E. (2013). Ocena ekspertów w analizach prowadzonych metodą AHP przy wyborze wariantów inwestycji. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 5/2013, 400-404.
- Szafranko E. (2012). Zastosowanie analizy hierarchicznej w ocenie wariantów planowanej inwestycji. *Archives of Institute of Civil Engineering*, 13/2012, 319-333.
- Szafranko E., Pawłowicz J. A. (2014). Metody Analizy Wielokryterialnej jako Narzędzie Oceny Możliwości Inwestycyjnego Wykorzystania Obszarów Wiejskich. *Instrumenty Kształtowania Przestrzeni Obszarów Wiejskich. Wydawca UWM w Olsztynie i TROW*, Olsztyn.
- Zavadskas E.K., Kaklauskas A., Peldschus F., Turskis Z. (2007). Multi-attribute assessment of road design solutions by using the COPRAS method. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, Vol. 2, Is. 4, 195-203.
- Zavadskas E. K., Vainiūnas P., Turskis Z., Tamošaitienė J. (2012). Multiple criteria decision support system for assessment of projects managers in construction. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, Vol. 11, Is. 2, 501-520.

POSSIBILITY OF USING MULTI-CRITERIA ANALYSIS IN THE INVESTMENT PROCESS

Abstract: The process of investment is extremely complex and activities related to its implementation can be divided into several stages. The preparation stage is the most important of them. At the planning stage a number of decisions concerning, among others choice of location, choice of materials and technological solutions should be taken into account. The choice of the final solution may depend on many factors and making a decision in a direct way is extremely difficult. In complicated cases, it is necessary to support the use of mathematical methods. Due to the multiplicity of the considered factors methods of multi-criteria analysis are particularly useful. The article presents the possibility

of supporting different decision problems using multi-criteria analysis. The procedure is exemplified by the analysis of the choice of location of the residential project, variants of road investment and choice of materials and construction solutions in the building object. The analysis of different methods shows their usefulness in cases of investment analysis of various features and functions.

A NONLINEAR ANALYSIS METHOD FOR ARCH-SHAPED SHELL ROOFS MADE OF COLD-FORMED STEEL PROFILES

Dmitry ZHDANOV*, Wyacheslav ULASEVICH

Department of Building Structures, Brest State Technical University, 267 Moskovskaya str., 224017, Brest, Republic of Belarus

Abstract: The paper deals with the problem of static structural analysis of shallow arch-shaped shell roofs assembled from curved cold-formed steel profiles. A nonlinear analysis procedure has been proposed to estimate the stress-strain state of such roof structures. It is based on two interrelated analysis models developed for the purpose – namely, an action effects model used for the static analysis of deformational behaviour of shallow arch-shaped structural systems, and a resistance model, for strength analysis of cold-formed steel profiles.

Keywords: arch-shaped shell roof, cold-formed steel profiles, nonlinear analysis method, action effects model, structural resistance model.

1. Introduction

The arch-shaped shell roof made of curved cold-formed steel profiles is a lightweight frameless roofing structure designed to perform both a load-bearing and enclosing function. It is said to be shallow if its rise-to-span ratio does not exceed 1/8 in value. Despite all the research and experimental work that has been done to date, the problem of modelling and analysing the behaviour of such structures still persists since it turns out to be rather complex both in theoretical and practical aspects.

Basically, there are three different types of structural models which can be used for the stress-strain analysis of arch-shaped shell roofs: a 3-D folded shell model (Biegus and Kowal, 2013, Casariego et al., 2011, Narvydas and Puodžiūnienė, 2013, Zahurul Islam et al., 2005), a 3-D thin shell model (Abdel-Sayed et al., 1980, El-Atrouzy, 1997, Krasotina, 2014), and a 2-D curved bar model (Abdel-Sayed et al., 1980, La Puebla-Ferri et al., 2009, Makelainen and Hyvarinen, 1990). Unfortunately, none of these structural models permits one to carry out such an analysis and interpret its results both effectively and efficiently, for the time being at least.

Thus, the 3-D folded shell model, while allowing the strain-and-stress state to be evaluated with utmost precision at any given point of the shell, turns out to be hugely time-and labour consuming and costly to construct.

The thin shell model, in contrast, takes one less time and effort to create, but in order to provide accurate solutions, first, the shell needs to be orthotropic, and secondly, provisions should be made in the analysis

method to take into account the non-linear peculiarities of thin-walled structures' behaviour under loading, which is not an easy thing to do.

Finally, the curved bar model, though being the least complex one, can be used only in the case of arch-shaped shell roof structures with both uniform boundary conditions and loads uniformly distributed in direction perpendicular to the roof's span. Moreover, in order to provide realistic solutions it has to take into account possible structural effects due to geometrical non-linearity as well as local and distortional buckling.

The paper describes a novel nonlinear strain-stress analysis procedure developed by the authors on the basis of the 2-D curved bar model which takes into account the above mentioned structural effects.

2. Nonlinear analysis method and its constituents

The nonlinear analysis procedure presented in this paper is based on two functionally interrelated analysis models – namely, an action effects model and a structural resistance model which correspondingly allow for geometric nonlinearity (2nd order effects) and both local and distortional buckling to be taken into account.

The action effects model is based on the theory of deformational analysis of both arched and cable-stayed structural systems (Ulasevich, 1984). The span part of such systems is viewed as an elastic curved bar fixed on elastic supports, and being in equilibrium under the action of a specified initial state load $g_0(x)$ (Fig. 1).

As to the initial state itself, it is assumed to be given

* Corresponding Author, e-mail: zhdmitr@gmail.com

by an adequate number of parameters and their values so that all the other ones that are dependent on them can be calculated on the basis of equilibrium equations only. All equilibrium states other than the initial one are taken as the deformed ones, for all of which, with the exception of equilibrium equations, it is necessary to consider linear and angular deformation equations when calculating the required parameters values in the general case.

The equilibrium equation for a bar in the deformed state is of the form:

$$\frac{d^4 v}{dx^4} - \frac{H}{EI} \cdot \frac{d^2 v}{dx^2} = \frac{H - H_0}{EI} \cdot \frac{d^2 y_0}{dx^2} - \frac{g(x)}{EI} \quad (1)$$

where: EI is the bending stiffness of the elastic bar in the deformed state; H_0 and H are the arch thrust in the initial and deformed equilibrium states respectively; y_0 is the curved bar axis shape in the initially deformed state, taken in (1) as

$$y_0 = \frac{1}{H_0} \left[\left(\sum_{k=1}^n G_k^0 (l - t_k) \right) \frac{x}{l} - \sum_{k=1}^{m_x} G_k^0 (x - t_k) - M_0 \right] + x \cdot tg \varphi \quad (2)$$

with $0 \leq x \leq l$ and $0 \leq t_k \leq x$.

The bending moment M_0 in (2) equals

$$M_0 = \frac{r_0}{a_0} \cdot \sin(a_0 \cdot x) - \frac{1}{a_0} \sum_{k=1}^{m_x} G_k^0 \cdot \sin[a_0(x - t_k)] \quad (3)$$

where:

$$a_0 = \sqrt{\frac{|H_0|}{EI_0}}$$

$$r_0 = \frac{1}{\sin(a_0 \cdot l)} \sum_{k=1}^n G_k^0 \cdot \sin[a_0(l - t_k)]$$

and EI_0 is the bending stiffness of an elastic bar in the initial state.

The general solution of equation (1) obtained in the analytical form, with the arbitrary load function $g(x)$ replaced by a system of discrete forces G_k on the basis of the mean value theorem, can be written as follows:

$$v = \frac{1}{H} \left[\left(\sum_{k=1}^n P_k (l - t_k) \right) \frac{x}{l} - \sum_{k=1}^{m_x} P_k (x - t_k) + M^a - (M^a - M^b) \frac{x}{l} \right] - \bar{y}_0 \quad (4)$$

where: $P_k = G_k^0 + G_k$; $\bar{y}_0 = y_0 - x \cdot tg \varphi$; M^a and M^b are the support moments.

The bending moment M in (4) equals

$$M = \frac{r}{a} \sin(a \cdot x) - \frac{1}{a} \sum_{k=1}^{m_x} (P_k - \beta G_k^0) \sin[a(x - t_k)] + \frac{M^a}{\sin(a \cdot l)} \sin[a(l - x)] + \frac{M^b}{\sin(a \cdot l)} \sin(a \cdot x) + \beta M_0 \quad (5)$$

where:

$$a = \sqrt{\frac{|H|}{EI}}$$

$$\beta = \frac{EI - EI_0}{(EI \cdot H_0)/(H - EI_0)}$$

$$r = \frac{1}{\sin(a \cdot l)} \sum_{k=1}^n (P_k - \beta G_k^0) \cdot \sin[a(l - t_k)].$$

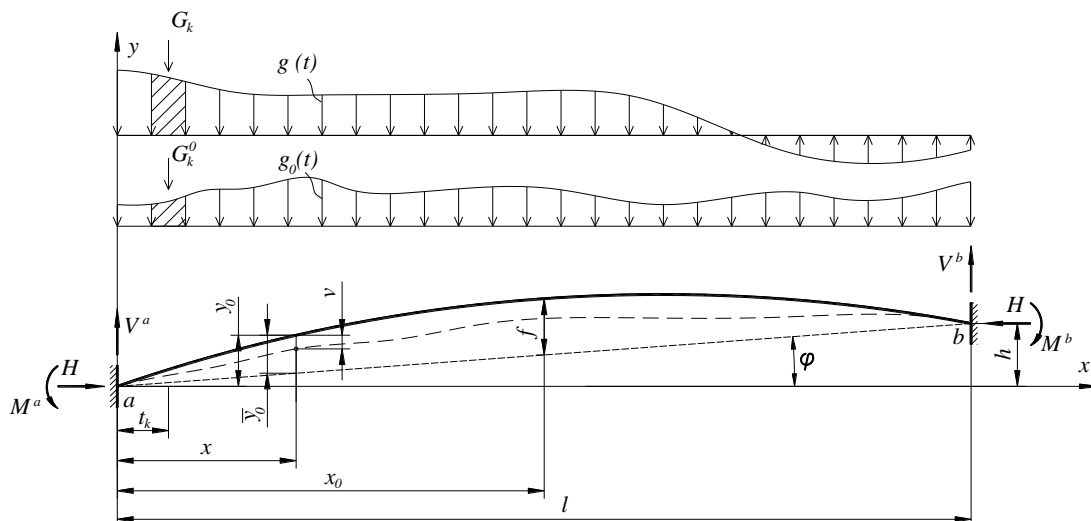


Fig. 1. Analysis model for elastic curved bar.

Function (4) under longitudinal and angular deformation conditions makes it possible to form a non-linear system of basic equations to be solved for H , M^a and M^b :

$$\left. \begin{aligned} & \frac{H \cdot l}{EA \cdot \cos^2(\varphi)} + \left(\frac{H}{EA} - \frac{\cos^3(\varphi)}{2} \right) \frac{D(H)}{H^2} + \frac{1}{\cos(\varphi)} \cdot \\ & \cdot \left[(H - H_0)(c_h^a - c_h^b) + \left(\alpha \cdot l \cdot \Delta t - \frac{P_n \cdot l}{EA} \right) \right] + J_0 = 0 \\ & \left(\frac{tg(a \cdot l) - a \cdot l}{H \cdot l \cdot tg(a \cdot l)} - c_y^a \left[1 + \left(\frac{dy_0}{dx} \right)_{x=0}^2 \right] \right) M^a - \\ & - \frac{\sin(a \cdot l) - a \cdot l}{H \cdot l \cdot \sin(a \cdot l)} M^b = \frac{dv}{dx} \Big|_{x=0, M^a=0, M^b=0} \\ & \frac{\sin(a \cdot l) - a \cdot l}{H \cdot l \cdot \sin(a \cdot l)} M^a - \left(\frac{tg(a \cdot l) - a \cdot l}{H \cdot l \cdot tg(a \cdot l)} - \right. \\ & \left. - c_y^b \left[1 + \left(\frac{dy_0}{dx} \right)_{x=l}^2 \right] \right) M^b = \frac{dv}{dx} \Big|_{x=l, M^a=0, M^b=0} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

where:

$$J_0 = \frac{1}{H_0^2} \left(\frac{\cos^3 \varphi}{2} - \frac{H_0}{EA_0} \right) \cdot \int_0^l \left(\frac{1}{l} \sum_{k=1}^n G_{0,k} (l - t_k) - \sum_{k=1}^n G_{0,k} - \frac{dM_0}{dx} \right)^2 dx - \frac{H_0 \cdot l}{EA_0 \cos^2 \varphi}$$

$$D(H) = \int_0^l \left(\frac{x}{l} \sum_{k=1}^n P_k (l - t_k) - \sum_{k=1}^n P_k - \frac{1}{l} (M^a - M^b) - \frac{dM}{dx} \right)^2 dx$$

α is the linear temperature expansion coefficient; Δt is the change in temperature with relation to initial state; P_n is the prestressing force; c_y and c_h are the angular and linear elastic characteristics of arch supports; EA_0 and EA is the arch longitudinal stiffness at the initial and deformed equilibrium states respectively.

Expressions (2), (3), (5) and (6) are valid only for arched structural systems functioning like a compressed-bent bar ($H/EI < 0$), while in the case of their functioning like a tensioned-bent bar ($H/EI > 0$), the trigonometric functions should be replaced by the hyperbolic ones.

Peculiarities of the structural behaviour of thin-walled cold-formed steel profiles due to local and distortional buckling are taken into consideration in the structural resistance model by way of using the so-called effective section properties, instead of the gross ones.

The effective cross-section properties are normally determined following the procedures specified in EN 1993-1-3 & EN 1993-1-5. Thus, the local buckling of plane elements without intermediate stiffeners is taken into account by reducing the gross width of plane elements, while flexural buckling of the stiffener is done by reducing the thickness of both the stiffener itself and the adjacent effective portions of plane elements.

However, the basic analysis procedure specified in EN 1993-1-3 doesn't bring out the real stress-strain state of cold-formed steel profiles as it requires that the effective cross-section properties be calculated at the values of stresses in the compressed elements corresponding to the yield strength of steel (Zhdanov and Ulasevitch, 2013). Furthermore, in accordance with EN 1993-1-3 rules, the effective area A_{eff} should be determined assuming that the cross section is subject only to stresses due to uniform axial compression, while the effective moment of inertia I_{eff} should be calculated assuming that the cross section is subject only to bending stresses (Ulasevitch and Zhdanov, 2015), so the calculated effective cross-section properties can significantly differ from the real ones.

In order to obtain more realistic values of the effective properties, an analysis procedure that uses the real stress distribution under a simultaneous action of axial force N_{Ed} and bending moment M_{Ed} , acting simultaneously, has been developed (Fig. 2).

The effective width of the compressed plane elements is calculated on the basis of the buckling curve as given in EN1993-1-5:

$$\rho = \begin{cases} 1,0 \\ \bar{\lambda}_p - \frac{0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \end{cases} \quad (7)$$

for

$$\bar{\lambda}_p \leq 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi}$$

where ψ is the stress ratio.

The relative slenderness in (7) is taken as

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}_p &= \frac{\bar{b}}{t} \cdot \frac{1}{\sqrt{k_\sigma}} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{com.Ed} \cdot \gamma_{M0}}{E} \cdot \frac{12(1 - \mu)}{\pi^2}} = \\ &= \frac{\bar{b}}{t} \cdot \frac{0,951}{\sqrt{k_\sigma}} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{com.Ed} \cdot \gamma_{M0}}{E}} \end{aligned} \quad (8)$$

where: \bar{b} is the appropriate flat width; t is the thickness of compressed element; k_σ is the buckling factor corresponding to the stress ratio ψ and boundary conditions; E is the modulus of elasticity of steel; μ is the Poisson's ratio of steel; $\sigma_{com.Ed}$ is the maximum design compressive stress in the element caused by all simultaneous actions; γ_{M0} is the partial safety factor.

To calculate the reduced thickness of intermediate stiffeners in compression use is made of the buckling curve as given in EN1993-1-3:

$$\chi_d = \begin{cases} 1,0 & \bar{\lambda}_p \leq 0,65 \\ 1,47 - 0,723 \cdot \bar{\lambda}_d & \text{for } 0,65 \leq \bar{\lambda}_p \leq 1,38 \\ 0,66/\bar{\lambda}_d & \bar{\lambda}_p \geq 1,38 \end{cases} \quad (9)$$

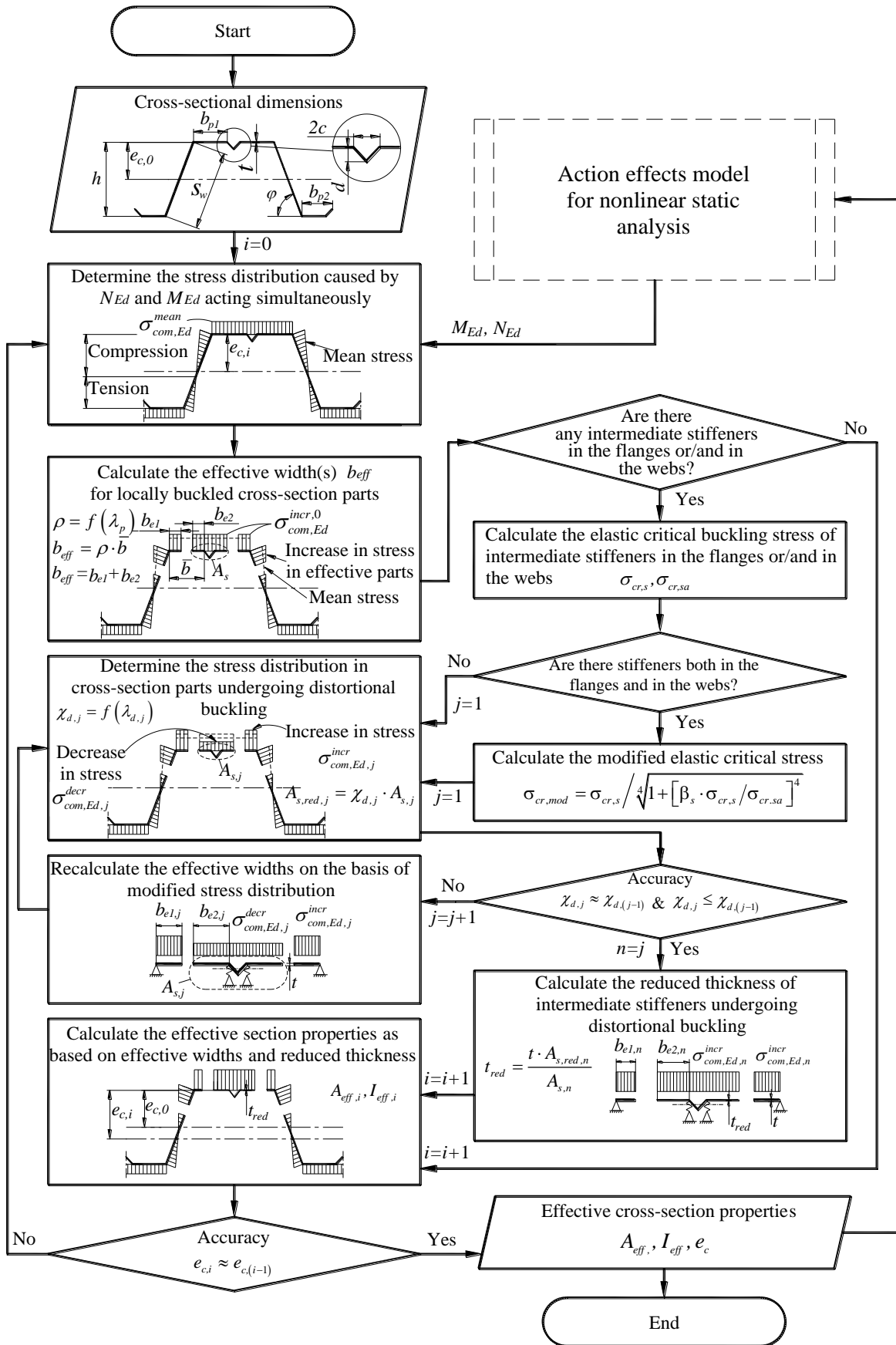


Fig. 2. Flow-chart for determining effective section properties.

The relative slenderness in (9) is taken as

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{\sigma_{com.Ed} \cdot \gamma_{M0}}{\sigma_{cr,s}}} = \quad (10)$$

where: $\sigma_{cr,s}$ is the elastic critical stress for a stiffener.

Using effective section properties A_{eff} , I_{eff} and e_c , determined through the proposed procedure, the load bearing capacity of the curved cold-formed profiles forming a shell roof structure can be checked as follows:

$$\frac{N_{E,d}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed+\Delta M_{y,ED}}}{M_{cy,Rd,com}} \leq 1 \quad (11)$$

where: $N_{c,Rd} = A_{eff} \cdot f_{yb} / \gamma_{M0}$ is the design resistance of the cross-section to compression; $M_{cy,Rd,com} = W_{eff} \cdot f_{yb} / \gamma_{M0}$ is the design moment resistance of the cross-section to bending; $\Delta M_{y,Ed} = N_{Ed} \cdot e_{Ny}$ is the additional moment due to the shift of the centroidal axis; e_{Ny} is the shift of y-y centroidal axis due to axial forces.

3. Conclusion

There are a number of structural analysis methods a structural engineer or researcher can make use of to predict the behaviour of arch-shaped shell roofs made of cold-formed steel profiles. However, the problem is that the analysis procedures that are simple and easy enough to perform, turn out to lack accuracy, while those that prove to be highly accurate, are far too much time- and labour consuming.

In this paper, a novel nonlinear strain-stress analysis method has been proposed. It is based on two functionally interrelated analysis models – namely, an action effects model and a structural resistance model which correspondingly allow for geometric nonlinearity as well as local and distortional buckling to be taken into account. When implemented in a corresponding computer program, the technique is likely to significantly reduce the time and effort currently needed to effectively and efficiently analyse the arch-shaped shell roofs made of curved cold-formed steel profiles, with the required level of reliability at that.

References

- Abdel-Sayed G., Pierce G.L., Siddall W.D. (1980). Doubly corrugated barrel cold-formed steel shells. In: *Fifth International Specialty Conference on Cold-formed Steel Structures*, St. Louis, 113-143.
- Biegus A., Kowal A. (2013). Collapse of halls made from cold-formed steel sheets. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 31, 189-194.
- Casariogo P., Casafont M., Muñoz J., Floreta A., Ferrer M., Marimon F. (2011). Failure mechanisms of curved trapezoidal steel sheeting. In: *Proceedings of the EUROSTEEL 2011 6th European Conference on Steel and Composite Structures: Research – Design – Construction*, Budapest, 63-68.
- El-Atrouzy M.N. (1997). Cylindrical shell roofs made of corrugated metal sheets. In: *Proceedings of the Fourth International Symposium on Roofing Technology*, Gaithersburg, 138-143.
- Krasotina L. V. (2014) Vybor parametrov sbornyh profilirovannyh nesuschih oboloček po kriteriam pročnosti i žestkosti. *Avtoref. dis. kand. tehn. nauk*, Omsk (in Russian).
- La Puebla-Ferri A., Jimenez-Mocholi A.J., Cervera-Lopez J.R. (2009). On code formulation, testing and computer simulation of cold-formed thin-sheet steel arches. In: *Symposium of the International Association for Shell and Spatial Structures*. Editorial Universitat Politècnica de València, València, 2716-2747.
- Makelainen P., Hyvarinen J. (1990). Stability of arched roof made of profiled steel sheeting. In: *Proceedings of Tenth international specialty conference on cold-formed steel structures*, S&T, Missouri, 131-148.
- Narvydas E., Puodžiūnienė N. (2013). A preliminary approach to the load and stress analysis of the arc-shaped corrugated steel structure. *Mechanics*, Vol. 19. No. 1, 12-18.
- Ulasevich V. P. (1984). Deformacionnyj rasčet i issledovanie napraženno-deformirovannyh sostojanij pologih odnopojasnyh system. *Avtoref. dis. kand. tehn. nauk*, Moskva (in Russian).
- Ulasevitch V.P., Zhdanov D.A. (2015). A deformation-based analysis of self-supported arch-shaped roof structures made from thin-walled cold-formed steel sections. *Transactions of Brest State Technical University*, Vol. 91, No. 1, 66-72 (in Russian).
- Zahurul Islam S.M., Abang-Abdullah A.A., Jafar M.S. (2005). Finite element and experimental investigation on profiled steel sheet to develop self-supporting roofing element. *Journal of Applied Science*, Vol. 5, Is. 6, 1113-1121.
- Zhdanov D.A., Ulasevitch V.P. (2013). On the determination of effective cross-sections of frameless steel arched coverings as per Eurocode. *Construction Science And Engineering*, Vol. 43, No. 2, 22-26 (in Russian).