

STRUCTURE AND ENVIRONMENT

ARCHITECTURE, CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENTAL ENGINEERING AND ENERGY

No. 3/2017 vol. 9 PL ISSN 2081-1500 www.sae.tu.kielce.pl KIELCE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Contents

structure

WOJCIECH MOCHOCKI, PAULINA OBARA, URSZULA RADOŃ, PAWEŁ ZABOJSZCZA

EFFECTS OF SINGLE-LAYER TRUSS DOME GEOMETRY ON CRITICAL LOAD CAPACITY

WPŁYW ZMIAN GEOMETRII NA NOŚNOŚĆ KRYTYCZNĄ JEDNOWARSTWOWEJ KOPUŁY KRATOWEJ 152

MAŁGORZATA DOROZ-TUREK

THE DETERMINANTS AFFECTING THE EXHIBITION OF ARCHITECTURAL RELICS IN A HISTORICAL BUILDINGS

UWARUNKOWANIA PREZENTACJI RELIKTÓW ARCHITEKTONICZNYCH W ZABYTKOWYCH BUDOWLACH 165

PRZEMYSŁAW CZAPIK, MACIEJ CZECHOWICZ

EFFECTS OF NATURAL ZEOLITE PARTICLE SIZE ON THE CEMENT PASTE PROPERTIES

WPŁYW ROZDROBNIENIA ZEOLITU NATURALNEGO NA WŁAŚCIWOŚCI ZAPRAWY CEMENTOWEJ 180

WIKTOR WCIŚLIK, PAWEŁ KOSSAKOWSKI, PIOTR SOKOŁOWSKI

STAINLESS STEEL IN BUILDING STRUCTURES – ADVANTAGES AND EXAMPLES OF APPLICATION

STAL NIERDZEWNA W BUDOWNICTWIE – ZALETY I PRZYKŁADY ZASTOSOWAŃ 191

LESŁAW HEBDA, ZDZISŁAWA OWSIAK

CEILING DAMAGE DUE TO SWELLING OF SLAG AGGREGATE IN TERIVA CONCRETE FILLER BLOCKS

USZKODZENIA STROPU SPOWODOWANE PĘCZNIENIEM KRUSZYWA ŻUŻLOWEGO W PUSTAKACH TERIVA 199

environment

TOMASZ KOZŁOWSKI, ŁUKASZ WALASZCZYK

THE USE OF THE FRACTAL GEOMETRY TO DESCRIBE THE PORE SPACE IN WET SOURCE CLAYS

ZASTOSOWANIE GEOMETRII FRAKTALNEJ DO OPISU PRZESTRZENI POROWEJ W WILGOTNYCH IŁACH 208

RYSZARD DACHOWSKI, PAULINA KOSTRZEWA

REALIZATION OF UNDERGROUND OBJECTS BY THE OPEN CAISSON METHOD IN CONDITIONS OF BUILT-UP AREAS

REALIZACJA OBIEKTÓW PODZIEMNYCH METODĄ STUDNI OPUSZCZANYCH W WARUNKACH SĄSIEDZTWA

ISTNIEJĄCYCH BUDOWLI 215

Editor-in-Chief:

Prof. Zdzisława OWSIAK – Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kielce University of Technology (Poland)

International Advisory Board:

Chairman: Prof. Wiesław TRĄMPCZYŃSKI – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Vadim ABIZOW – Kyiv's National University of Culture and Art (Ukraine)
Prof. Satoshi AKAGAWA – Hokkaido University, Sapporo (Japan)
Prof. Tomasz ARCISZEWSKI – George Mason University (USA)
Prof. Elżbieta BEZAK-MAZUR – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Mark BOMBERG – McMaster University (Canada)
Prof. Jan BUJNAK – University of Žilina (Slovakia)
Prof. Dorota CHWIEDUK – Warsaw University of Technology (Poland)
Prof. Barbara GOSZCZYŃSKA – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Krystyna GURANOWSKA-GRUSZECKA – Warsaw University of Technology (Poland)
Prof. Go IWAHANA – University of Alaska Fairbanks (USA)
Prof. Lucjan KAMIONKA – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Andrej KAPJOR – University of Žilina (Slovakia)
Prof. Zbigniew KOWAL – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Tomasz KOZŁOWSKI – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Andrzej KULICZKOWSKI – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Jozef MELCER – University of Žilina (Slovakia)
Prof. Mikhail NEMCHINOV – Moscow State Automobile and Road Technical University MADI (Russia)
Prof. Andrzej S. NOWAK – Auburn University (USA)
Prof. Ana Cristina Dinis Vicente PARDAL – Polytechnic Institute of Beja (Portugal)
Prof. Jorge Cruz PINTO – Universidade de Lisboa (Portugal)
Prof. Jerzy Z. PIOTROWSKI – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Karel POSPÍŠIL – The Transport Research Centre CDV (Czech Republic)
Prof. Claude VAN ROOTEN – Belgian Road Research Centre (Belgium)
Prof. Zbigniew RUSIN – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Waław SERUGA – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Jacek SZEWCZYK – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Jerzy WAWRZEŃCZYK – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Bogdan WOLSKI – Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Maria ŻYGADŁO – Kielce University of Technology (Poland)

Associate Editors:

Prof. Lidia DĄBEK – Faculty of Environmental, Geomatic and Energy Engineering, Kielce University of Technology (Poland)
Prof. Marek IWĄŃSKI – Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kielce University of Technology (Poland)

Secretary of the Editor Board:

Łukasz ORMAN, Ph.D., D.Sc. – Faculty of Environmental, Geomatic and Energy Engineering, Kielce University of Technology (Poland)

www.sae.tu.kielce.pl
sae@tu.kielce.pl

The quarterly printed issues of Structure and Environment are their original versions

The Journal published by the Kielce University of Technology

PL ISSN 2081-1500

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 2017

25-314 Kielce, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, tel. 41 34 24 581
www.wydawnictwo.tu.kielce.pl



Kielce University of Technology
2017



structure
structure

WOJCIECH MOCHOCKI¹

PAULINA OBARA²

URSZULA RADOŃ³

PAWEŁ ZABOJSZCZA⁴

Kielce University of Technology

¹e-mail: wmochocki@tu.kielce.pl

²e-mail: paula@tu.kielce.pl

³e-mail: zmbur@tu.kielce.pl

⁴e-mail: p.zabojscza@student.tu.kielce.pl

EFFECTS OF SINGLE-LAYER TRUSS DOME GEOMETRY ON CRITICAL LOAD CAPACITY

WPŁYW ZMIAN GEOMETRII NA NOŚNOŚĆ KRYTYCZNĄ JEDNOWARSTWOWEJ KOPUŁY KRATOWEJ

Abstract

The purpose of this article is to estimate the effect of geometric imperfections on critical loads. Special attention was paid to trusses subjected to large displacement gradients and vulnerable to stability loss due to snapping. The article uses the Lagrangian description for geometric nonlinearities. The truss stability analysis was performed using the Finite Element Method. The equilibrium path was determined using the scalar current parameter of stiffness and method of arc length constant.

Keywords: stability, nonlinear analysis, equilibrium path, geometric imperfections, critical loads

Streszczenie

Celem artykułu jest oszacowanie wpływu imperfekcji geometrycznych na obciążenie krytyczne. Szczególną uwagę zwrócono na kratownice poddane dużym gradientom przemieszczeń i podatne na utratę stateczności przez przeskok. W pracy zastosowano opis Lagrange'a uwzględniający nieliniowości geometryczne. Analizę stateczności kratownicy przeprowadzono za pomocą metody elementów skończonych. Do określenia ścieżki równowagi wykorzystano metodę skalarne parametru sztywności i metodę stałej długości łuku.

Słowa kluczowe: stateczność, analiza nieliniowa, ścieżka równowagi, imperfekcje geometryczne, obciążenie krytyczne

1. Introduction

Analysis of stability of bar structures with the finite element method [1-7] involves solving large systems of nonlinear equations. The relationship between displacements and loads in a $(N+1)$ -dimensional space is described by an equilibrium path. Elastic stability is closely related to singularities along this path. These singular points are considered as critical points, with an occurrence of a limit point known as snapping and that of a bifurcation point known as buckling. The article shows the significant role of geometric imperfections in shallow truss structures.

1. Wprowadzenie

Analiza stateczności konstrukcji prętowych, przy zastosowaniu metody elementów skończonych [1-7], polega na rozwiązywaniu dużych układów równań nieliniowych. Zależność przemieszczeń od obciążeń w przestrzeni $(N+1)$ opisuje ścieżka równowagi. Problem stateczności sprężystej jest ściśle związany z osobliwościami występującymi wzdłuż tej ścieżki. Te pojedyncze punkty są określane jako krytyczne. Klasyfikacja w punktach granicznych i punktach bifurkacji, które są związane z fizycznym pojęciem odpowiednio przeskoku i wyboczenia, jest dobrze znana. W artykule pokazano jak istotną rolę odgrywają imperfekcje geometryczne w kratownicach słabo wyniosłych.

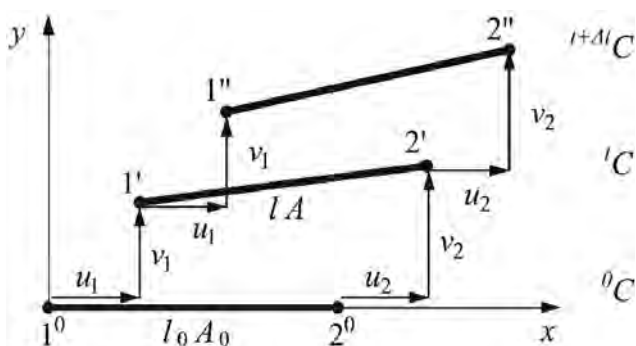
2. Tangent stiffness matrix for a truss element

Analysis covers a flat finite element of a truss in the undeformed (initial) configuration, 0C and in the deformed configuration, tC and ${}^{t+\Delta t}C$ (Fig. 1). The following material and geometric constants were adopted: E – Young's modulus, l_0 – the initial length, A_0 – the initial cross-sectional area, l – the length in the deformed configuration, A – the cross-sectional area in the deformed configuration. The deformation field in the deformed configuration tC is described by four components $\mathbf{q} = \{u_1, v_1, u_2, v_2\}$, and the displacement increment between time t and $t+\Delta t$ is described by vector $\Delta \mathbf{q} = \{\Delta u_1, \Delta v_1, \Delta u_2, \Delta v_2\}$. These displacement vectors correspond to nodal force vectors: ${}^t\mathbf{Q} = \{U_1, V_1, U_2, V_2\}$ and $\Delta \mathbf{Q} = \{\Delta U_1, \Delta V_1, \Delta U_2, \Delta V_2\}$.

The strain tensor in this case reduces to one non-zero quantity of the Green-Lagrange tensor that characterizes the elongation of a bar:

$$\varepsilon = {}^t\varepsilon = \frac{u_2 - u_1}{l_0} + \frac{1}{2} \left(\frac{u_2 - u_1}{l_0} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{v_2 - v_1}{l_0} \right)^2 \quad (1)$$

Equation (1) accounts for the effect of geometric nonlinearity, which means that large displacements were taken into account [2, 8]. The other components of the strain tensor are equal to zero. The Green-Lagrange strain tensor is coupled to the Pioli-Kirchhoff's second stress tensor. We use the initial reference configuration, thus axial force S defined as $S = EA\varepsilon$ is not the real force in the bar. It corresponds to component $S_{11} = \sigma$ of the 2nd Piola-Kirchhoff symmetric stress tensor. The real axial force $S' = Sl/l_0$.



Displacement, strain and stress fields in the deformed configuration ${}^{t+\Delta t}C$ are as follows:

$${}^{t+\Delta t}\mathbf{q} = {}^t\mathbf{q} + \Delta \mathbf{q}, \quad {}^{t+\Delta t}\varepsilon = {}^t\varepsilon + \Delta \varepsilon, \quad {}^{t+\Delta t}\sigma = {}^t\sigma + \Delta \sigma \quad (2)$$

2. Styczna macierz sztywności dla elementu kratowego

W pracy rozważany jest płaski, kratowy element skończony w konfiguracji nieodkształconej (początkowej) 0C i w konfiguracji zdeformowanej tC oraz ${}^{t+\Delta t}C$ (rys. 1). Do analizy przyjęto następujące stałe materiałowe i geometryczne: E – moduł Younga, l_0 – długość początkowa, A_0 – początkowy przekrój poprzeczny, l – długość w konfiguracji zdeformowanej, A – przekrój poprzeczny w konfiguracji zdeformowanej. Pole przemieszczeń w konfiguracji zdeformowanej tC opisane jest czterema składowymi $\mathbf{q} = \{u_1, v_1, u_2, v_2\}$, natomiast przyrost przemieszczeń pomiędzy chwilą t a $t+\Delta t$ opisany jest przez wektor $\Delta \mathbf{q} = \{\Delta u_1, \Delta v_1, \Delta u_2, \Delta v_2\}$. Podanym wektorom przemieszczeń odpowiadają wektory sił węzłowych: ${}^t\mathbf{Q} = \{U_1, V_1, U_2, V_2\}$ i $\Delta \mathbf{Q} = \{\Delta U_1, \Delta V_1, \Delta U_2, \Delta V_2\}$.

Tensor odkształceń w analizowanym przypadku redukuje się do jednej niezerowej wielkości tensora Greena-Lagrange'a charakteryzującej wydłużenie pręta:

$$\varepsilon = {}^t\varepsilon = \frac{u_2 - u_1}{l_0} + \frac{1}{2} \left(\frac{u_2 - u_1}{l_0} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{v_2 - v_1}{l_0} \right)^2 \quad (1)$$

Równanie (1) uwzględnia efekt nieliniowości geometrycznej, co oznacza, że w rozważaniach uwzględniono duże przemieszczenia [2, 8]. Pozostałe składniki tensora odkształceń są równe zero. Wielkością sprzężoną w stosunku do tensora Greena-Lagrange'a w opisie naprężeń jest drugi symetryczny tensor Pioli-Kirchhoffa. W związku z tym, że korzystamy z początkowej konfiguracji odniesienia, siła osiowa S zdefiniowana jako $S = EA\varepsilon$ nie jest rzeczywistą siłą panującą w pręcie. Odzwierciedla ona składową $S_{11} = \sigma$ drugiego symetrycznego tensora naprężeń Pioli-Kirchhoffa. Rzeczywista siła osiowa jest równa $S' = Sl/l_0$.

Fig. 1. Truss element in the undeformed (initial), 0C , and deformed tC and ${}^{t+\Delta t}C$ configurations

Rys. 1. Element kratowy w konfiguracji niezdeformowanej (początkowej) 0C i zdeformowanej tC oraz ${}^{t+\Delta t}C$

Pola przemieszczeń, odkształceń i naprężeń w konfiguracji zdeformowanej ${}^{t+\Delta t}C$ wynoszą odpowiednio:

$${}^{t+\Delta t}\mathbf{q} = {}^t\mathbf{q} + \Delta \mathbf{q}, \quad {}^{t+\Delta t}\varepsilon = {}^t\varepsilon + \Delta \varepsilon, \quad {}^{t+\Delta t}\sigma = {}^t\sigma + \Delta \sigma \quad (2)$$

where: ${}^t\mathbf{q}$, ${}^t\epsilon$, ${}^t\sigma$ – displacements, strain and stress at time t , $\Delta\mathbf{q}$, $\Delta\epsilon$, $\Delta\sigma$ – increments between time t and $t+\Delta t$. Strain increments can be written as:

$$\Delta\epsilon = \Delta e + \Delta\eta \quad (3)$$

where: Δe – linear part due to displacement increments, $\Delta\eta$ – nonlinear part due to displacement increments:

$$\begin{aligned} \Delta e &= \frac{\Delta u_2 - \Delta u_1}{l_0} \left(1 + \frac{u_2 - u_1}{l_0} \right) + \\ &+ \left(\frac{\Delta v_2 - \Delta v_1}{l_0} \right) \left(\frac{v_2 - v_1}{l_0} \right) \\ \Delta\eta &= \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta u_2 - \Delta u_1}{l_0} \right)^2 + \\ &+ \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta v_2 - \Delta v_1}{l_0} \right)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

Stress increments depend on the physical model adopted. For a linear-elastic material, Hooke's law, i.e., a linear relationship between stress and strain is valid:

$$\Delta\sigma = E\Delta\epsilon \quad (5)$$

The determination of the tangent stiffness matrix requires that variations of displacement vector increments and of strain increments be calculated:

$$\begin{aligned} \delta^{t+\Delta t}\mathbf{q} &= \delta \left({}^t\mathbf{q} + \Delta\mathbf{q} \right) = \\ &= \delta^t\mathbf{q} + \delta\Delta\mathbf{q} = \delta\Delta\mathbf{q} \\ \delta^{t+\Delta t}\epsilon &= \delta \left({}^t\epsilon + \Delta\epsilon \right) = \delta^t\epsilon + \delta\Delta\epsilon = \\ &= \delta\Delta\epsilon = \delta \left(\Delta e + \Delta\eta \right) = \delta\Delta e + \delta\Delta\eta \end{aligned} \quad (6)$$

where: $\delta^t\mathbf{q} = 0$ and $\delta^t\epsilon = 0$ because ${}^t\mathbf{q}$ and ${}^t\epsilon$ are constant at time t .

For the element under analysis, the principle of virtual work at $t + \Delta t$ is formulated as follows:

$$\int_{V_0} \left(\delta^{t+\Delta t}\epsilon \right) \left({}^{t+\Delta t}\sigma \right) dV_0 = \left(\delta^{t+\Delta t}\mathbf{q} \right)^T \left({}^t\mathbf{Q} + \Delta\mathbf{Q} \right) \quad (7)$$

which, after taking into account relationships (5) and (6), can be written as:

gdzie: ${}^t\mathbf{q}$, ${}^t\epsilon$, ${}^t\sigma$ – przemieszczenia, odkształcenie i naprężenie w chwili t , $\Delta\mathbf{q}$, $\Delta\epsilon$, $\Delta\sigma$ – przyrosty pomiędzy chwilą t a $t+\Delta t$. Przyrosty odkształceń można zapisać w postaci:

$$\Delta\epsilon = \Delta e + \Delta\eta \quad (3)$$

gdzie: Δe – liniowy człon ze względu na przyrosty przemieszczeń, $\Delta\eta$ – nieliniowy człon ze względu na przyrosty przemieszczeń:

$$\begin{aligned} \Delta e &= \frac{\Delta u_2 - \Delta u_1}{l_0} \left(1 + \frac{u_2 - u_1}{l_0} \right) + \\ &+ \left(\frac{\Delta v_2 - \Delta v_1}{l_0} \right) \left(\frac{v_2 - v_1}{l_0} \right) \\ \Delta\eta &= \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta u_2 - \Delta u_1}{l_0} \right)^2 + \\ &+ \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta v_2 - \Delta v_1}{l_0} \right)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

Przyrost naprężeń zależy od przyjętego modelu fizycznego. Dla materiału liniowo-sprężystego obowiązuje prawo Hooke'a, czyli liniowa zależność pomiędzy naprężeniami i odkształceniami:

$$\Delta\sigma = E\Delta\epsilon \quad (5)$$

Do określenia stycznej macierzy sztywności niezbędne jest obliczenie wariancji przyrostu wektora przemieszczeń oraz wariancji przyrostu odkształceń:

$$\begin{aligned} \delta^{t+\Delta t}\mathbf{q} &= \delta \left({}^t\mathbf{q} + \Delta\mathbf{q} \right) = \\ &= \delta^t\mathbf{q} + \delta\Delta\mathbf{q} = \delta\Delta\mathbf{q} \\ \delta^{t+\Delta t}\epsilon &= \delta \left({}^t\epsilon + \Delta\epsilon \right) = \delta^t\epsilon + \delta\Delta\epsilon = \\ &= \delta\Delta\epsilon = \delta \left(\Delta e + \Delta\eta \right) = \delta\Delta e + \delta\Delta\eta \end{aligned} \quad (6)$$

przy czym: $\delta^t\mathbf{q} = 0$ i $\delta^t\epsilon = 0$, ponieważ ${}^t\mathbf{q}$ i ${}^t\epsilon$ są stałe w chwili t .

Dla analizowanego elementu zasada prac wirtualnych w chwili $t + \Delta t$ jest sformułowana w postaci:

$$\int_{V_0} \left(\delta^{t+\Delta t}\epsilon \right) \left({}^{t+\Delta t}\sigma \right) dV_0 = \left(\delta^{t+\Delta t}\mathbf{q} \right)^T \left({}^t\mathbf{Q} + \Delta\mathbf{Q} \right) \quad (7)$$

którą po uwzględnieniu zależności (5) i (6) można zapisać jako:

$$\begin{aligned}
 & A_0 \left\{ \int_{l_0}^t \sigma(\delta \Delta e) dx_0 + \int_{l_0}^t \sigma(\delta \Delta \eta) dx_0 \right\} + \\
 & + EA_0 \left\{ \int_{l_0} \Delta e(\delta \Delta e) dx_0 + \int_{l_0} \Delta e(\delta \Delta \eta) dx_0 + \right. \\
 & \left. + \int_{l_0} \Delta \eta(\delta \Delta e) dx_0 + \int_{l_0} \Delta \eta(\delta \Delta \eta) dx_0 \right\} = \\
 & = \delta \Delta \mathbf{q}^T ({}^t \mathbf{Q} + \Delta \mathbf{Q}).
 \end{aligned} \quad (8)$$

Equation (8), satisfied for a random non-zero $\delta \Delta \mathbf{q}$, after transformation can be written in matrix notation:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{K}_T^e \cdot \Delta \mathbf{q} &= ({}^t \mathbf{Q} - \mathbf{F}^e) + \Delta \mathbf{Q}; \\
 \mathbf{K}_T^e &= \mathbf{K}_0 + \mathbf{K}_{u_1} + \mathbf{K}_{u_2} + \mathbf{K}_\sigma
 \end{aligned} \quad (9)$$

where: $\mathbf{F}^e$ – is the vector of internal forces in the member:

$$\mathbf{F}^e = S \left\{ -1 - \frac{\Delta_u}{l_0}, \quad -\frac{\Delta_v}{l_0}, \quad 1 + \frac{\Delta_u}{l_0}, \quad \frac{\Delta_v}{l_0} \right\}$$

$\mathbf{K}_T^e$ – is the tangent stiffness matrix of the element composed of linear stiffness matrix $\mathbf{K}_0$, geometric stiffness matrix $\mathbf{K}_\sigma$ and nonlinear stiffness matrices $\mathbf{K}_{u_1}$ and $\mathbf{K}_{u_2}$:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{K}_0 &= \frac{EA_0}{l_0} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{K}_\sigma &= \frac{S}{l_0} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{K}_{u_1} &= \frac{EA_0}{l_0^2} \begin{bmatrix} 2\Delta_u & \Delta_v & -2\Delta_u & -\Delta_v \\ \Delta_v & 0 & -\Delta_v & 0 \\ -2\Delta_u & -\Delta_v & 2\Delta_u & \Delta_v \\ -\Delta_v & 0 & \Delta_v & 0 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{K}_{u_2} &= \frac{EA_0}{l_0^3} \begin{bmatrix} \Delta_u^2 & \Delta_u \Delta_v & -\Delta_u^2 & -\Delta_u \Delta_v \\ \Delta_u \Delta_v & \Delta_v^2 & -\Delta_u \Delta_v & -\Delta_v^2 \\ -\Delta_u^2 & -\Delta_u \Delta_v & \Delta_u^2 & \Delta_u \Delta_v \\ -\Delta_u \Delta_v & -\Delta_v^2 & \Delta_u \Delta_v & \Delta_v^2 \end{bmatrix} \\
 & \Delta_u = u_2 - u_1, \quad \Delta_v = v_2 - v_1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & A_0 \left\{ \int_{l_0}^t \sigma(\delta \Delta e) dx_0 + \int_{l_0}^t \sigma(\delta \Delta \eta) dx_0 \right\} + \\
 & + EA_0 \left\{ \int_{l_0} \Delta e(\delta \Delta e) dx_0 + \int_{l_0} \Delta e(\delta \Delta \eta) dx_0 + \right. \\
 & \left. + \int_{l_0} \Delta \eta(\delta \Delta e) dx_0 + \int_{l_0} \Delta \eta(\delta \Delta \eta) dx_0 \right\} = \\
 & = \delta \Delta \mathbf{q}^T ({}^t \mathbf{Q} + \Delta \mathbf{Q}).
 \end{aligned} \quad (8)$$

Równanie (8), spełnione dla dowolnego różnego od zera $\delta \Delta \mathbf{q}$, po przekształceniach można zapisać w formie macierzowej:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{K}_T^e \cdot \Delta \mathbf{q} &= ({}^t \mathbf{Q} - \mathbf{F}^e) + \Delta \mathbf{Q}; \\
 \mathbf{K}_T^e &= \mathbf{K}_0 + \mathbf{K}_{u_1} + \mathbf{K}_{u_2} + \mathbf{K}_\sigma
 \end{aligned} \quad (9)$$

gdzie: $\mathbf{F}^e$ – wektor sił wewnętrznych elementu:

$$\mathbf{F}^e = S \left\{ -1 - \frac{\Delta_u}{l_0}, \quad -\frac{\Delta_v}{l_0}, \quad 1 + \frac{\Delta_u}{l_0}, \quad \frac{\Delta_v}{l_0} \right\}$$

$\mathbf{K}_T^e$ – styczna macierz sztywności elementu składająca się z liniowej macierzy sztywności $\mathbf{K}_0$, geometrycznej macierzy sztywności $\mathbf{K}_\sigma$ i nieliniowych macierzy sztywności $\mathbf{K}_{u_1}$ i $\mathbf{K}_{u_2}$:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{K}_0 &= \frac{EA_0}{l_0} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{K}_\sigma &= \frac{S}{l_0} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{K}_{u_1} &= \frac{EA_0}{l_0^2} \begin{bmatrix} 2\Delta_u & \Delta_v & -2\Delta_u & -\Delta_v \\ \Delta_v & 0 & -\Delta_v & 0 \\ -2\Delta_u & -\Delta_v & 2\Delta_u & \Delta_v \\ -\Delta_v & 0 & \Delta_v & 0 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{K}_{u_2} &= \frac{EA_0}{l_0^3} \begin{bmatrix} \Delta_u^2 & \Delta_u \Delta_v & -\Delta_u^2 & -\Delta_u \Delta_v \\ \Delta_u \Delta_v & \Delta_v^2 & -\Delta_u \Delta_v & -\Delta_v^2 \\ -\Delta_u^2 & -\Delta_u \Delta_v & \Delta_u^2 & \Delta_u \Delta_v \\ -\Delta_u \Delta_v & -\Delta_v^2 & \Delta_u \Delta_v & \Delta_v^2 \end{bmatrix} \\
 & \Delta_u = u_2 - u_1, \quad \Delta_v = v_2 - v_1
 \end{aligned}$$

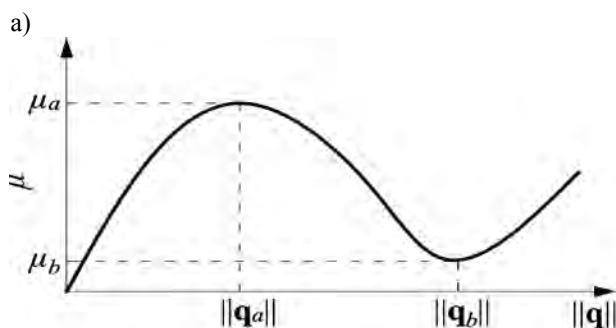
A similar procedure can be performed for the space truss element [2].

3. Description of numerical techniques

Two methods were used to solve nonlinear equation (9): the current stiffness parameter method and the arc length method. The concept for the first method, developed by Bergan and Soreide [9], is to characterize the behavior of a multidimensional nonlinear system by using one scalar quantity, the current stiffness parameter (CSP), representing the ratio of two quadratic forms formulated for the stiffness matrix at the initial and current times:

$$CSP = \frac{\Delta \mathbf{q}^{0T} \mathbf{K}_T^0 \Delta \mathbf{q}^0}{\Delta \mathbf{q}^{iT} \mathbf{K}_T^i \Delta \mathbf{q}^i} \quad (10)$$

This parameter can be used as a measure for the change in tangent stiffness matrix $\mathbf{K}_T$ during the motion in the N -dimensional, displacement solution space.



Analogiczne rozważania można przeprowadzić dla przestrzennego elementu kratowego [2].

3. Opis technik numerycznych

W celu rozwiązania równania nieliniowego (9) w pracy zastosowano metodę skalarnego parametru sztywności oraz metodę stałej długości łuku. Podstawowa idea pierwszej metody polega na scharakteryzowaniu zachowania się wielowymiarowego układu nieliniowego przez jedną skalarną wielkość. Autorami metody są Bergan i Soreide [9]. Tą skalarną wielkością jest skalarny parametr sztywności (CSP) określający stosunek dwóch form kwadratowych utworzonych dla macierzy sztywności w chwilach początkowej i aktualnej:

$$CSP = \frac{\Delta \mathbf{q}^{0T} \mathbf{K}_T^0 \Delta \mathbf{q}^0}{\Delta \mathbf{q}^{iT} \mathbf{K}_T^i \Delta \mathbf{q}^i} \quad (10)$$

Jest to miara zmian macierzy stycznej układu $\mathbf{K}_T$ przy poruszaniu się w N -wymiarowej, przemieszczeniowej przestrzeni rozwiązań.

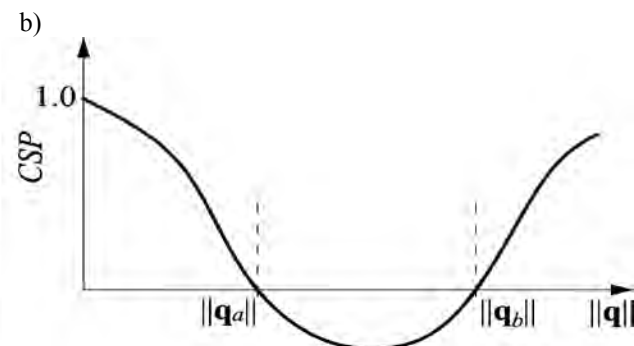


Fig. 2. a) Dependence of load parameter m on the norm of $\|\mathbf{q}\|$, b) dependence of the CSP on the norm of $\|\mathbf{q}\|$

Rys 2. a) Zależność parametru obciążenia m od normy $\|\mathbf{q}\|$, b) zależność parametru CSP od normy $\|\mathbf{q}\|$

Figure 2a shows the dependence of the load parameter μ on the norm of incremental displacements $\mathbf{q}$. Figure 2b shows the CSP variation curve with the change of $\mathbf{q}$. At an extremum point of the load-displacement curve, the CSP is zero (singular stiffness matrix). The CSP is positive for stable and negative for unstable configurations of equilibrium.

The method of constant arc length is one of the automatic control methods of incremental process. The two most simple ways to control the incremental process are: $\mu = \eta_i$ and $q_k = \eta_r$, with the load parameter μ and chosen displacement q being the controlling parameters. With the first of the two methods, subsequent points are the points of intersection between $\mu = \eta_i$ and the equilibrium

Na rysunku 2a przedstawiono zależność parametru obciążenia μ od pewnej normy $\mathbf{q}$ charakteryzującej stan przemieszczenia, natomiast na rysunku 2b pokazano krzywą zmienności CSP wraz ze zmianą $\mathbf{q}$. W punktach ekstremalnych krzywej obciążenie-przemieszczenie parametr CSP przyjmuje wartości zerowe (macierz sztywności jest osobliwa). Dla statecznych stanów równowagi parametr CSP jest dodatni, a dla stanów niestatecznych – ujemny.

Metoda stałej długości łuku jest jedną z metod automatycznego sterowania procesem przyrostowym. Dwa najprostsze sposoby sterowania procesem przyrostowym to: $\mu = \eta_i$ i $q_k = \eta_r$. W pierwszym przypadku parametrem sterującym jest parametr obciążenia μ . W drugim przypadku parametrem sterującym jest wybrane przemieszczenie q . W pierwszej

path, and with the second method – as the points of intersection between $q_k = \eta_i$ with the same solution curve. Both procedures are inefficient at the vicinity of local extremum of the controlling parameter.

Note that at the limit points, the equilibrium path is tangent to the corresponding hyperplane. The angle θ between the tangent to the equilibrium path and the normal to the hyperplane is $\pi/2$. The intersection of the equilibrium path with this hyperplane is thus well defined when the angle θ is equal to or close to zero and poorly defined if it is close or equal to $\pi/2$. In this sense, the perfect family of surfaces will intersect the equilibrium path in perpendicular direction so that for every η the angle θ is zero. An equation describing a "perfect" family of surfaces cannot be constructed because it is based on the equilibrium path which is unknown. However, an approximation can be used so that the angle θ is close to zero. Riks [10] proposed the following equation:

$$(\dot{\mathbf{q}}_\alpha)^T \cdot (\mathbf{q} - \mathbf{q}_\alpha) + \dot{\mu}_\alpha \cdot (\mu - \mu_\alpha) = (\eta - \eta_\alpha) \quad (11)$$

where: $\mathbf{q}$ – generalized coordinate vector, $\eta - \eta_\alpha$ – parameter approximating the arc length; the dots appearing above the symbols indicate derivatives with respect to the arc length.

Equation (11) defines a hyperplane that is perpendicular to the vector $(\dot{\mathbf{q}}_\alpha, \dot{\mu}_\alpha)$ and distant from the point $(\mathbf{q}_\alpha, \mu_\alpha)$ by $(\eta - \eta_\alpha)$. It will intersect the equilibrium path almost perpendicular when the distance $\eta - \eta_\alpha$ is sufficiently small.

The decisive influence on the convergence of the iterative process takes the form of a governing equation. Bifurcation points may pose a serious problem, as their analysis requires additional algebraic operations leading to solving a certain, most often, linearized eigenproblem. Numerical problems of incremental process control in geometric nonlinear problems have been discussed in the literature, for example, in the works by Sokół and Witkowski [4, 11]. The authors proposed a method of constant work of reference load. This method gives a far simpler solution algorithm (matrix of equation system coefficients is symmetric) and surrounded by limit points is as reliable as the constant arc method. The influence of single-layer bar covering geometry in the reliability analysis was discussed in [12], where the authors

metodzie kolejne punkty otrzymujemy jako punkty przecięcia powierzchni $\mu = \eta_i$ i ścieżki równowagi, a w drugiej – jako punkty przecięcia powierzchni $q_k = \eta_i$ z tą samą krzywą rozwiązania. Obie metody zawodzą w pobliżu punktów lokalnych ekstremów parametru sterującego.

Zauważmy, że w punktach granicznych ścieżka równowagi jest styczna do odpowiedniej hiperpłaszczyzny. Kąt θ między styczną do ścieżki równowagi a normalną do hiperpłaszczyzny jest równy $\pi/2$. Przecięcie ścieżki równowagi z tą hiperpłaszczyzną jest więc dobrze określone gdy kąt θ jest równy lub bliski zera i źle jeśli jest bliski lub równy $\pi/2$. W tym sensie idealna będzie rodzina powierzchni, które przecinają ścieżkę równowagi prostopadłe, tzn. tak, aby dla każdego η kąt θ był równy zero. Oczywiście, nie jest możliwe skonstruowanie równania opisującego „idealną” rodzinę powierzchni, ponieważ wymagałoby to znajomości ścieżki równowagi, którą dopiero mamy wyznaczyć. Możemy jednak zadowolić się pewnym przybliżeniem, tak aby kąt θ był bliski zero. Riks [10] zaproponował równanie sterujące w postaci:

$$(\dot{\mathbf{q}}_\alpha)^T \cdot (\mathbf{q} - \mathbf{q}_\alpha) + \dot{\mu}_\alpha \cdot (\mu - \mu_\alpha) = (\eta - \eta_\alpha) \quad (11)$$

gdzie: $\mathbf{q}$ – wektor współrzędnych uogólnionych, $\eta - \eta_\alpha$ – parametr przybliżający długość łuku, kropka oznacza pochodną w odniesieniu do długości łuku.

Równanie (11) definiuje hiperpłaszczyznę prostopadłą do wektora $(\dot{\mathbf{q}}_\alpha, \dot{\mu}_\alpha)$ i odległą od punktu $(\mathbf{q}_\alpha, \mu_\alpha)$ o $(\eta - \eta_\alpha)$. Będzie ona przecinać ścieżkę równowagi prawie prostopadłe, gdy odległość $\eta - \eta_\alpha$ będzie dostatecznie mała.

Decydujący wpływ na zbieżność procesu iteracyjnego ma postać równania sterującego. Duży problem mogą stanowić punkty bifurkacji, których analiza wymaga dodatkowych operacji algebraicznych, związanych najczęściej z rozwiązaniem pewnego zlinearyzowanego zagadnienia własnego. Numerycznym problemom sterowania procesem przyrostowym w zagadnieniach geometrycznie nieliniowych poświęcone są prace między innymi Sokoła i Witkowskiego [4, 11]. Autorzy zaproponowali w nich metodę stałej pracy obciążenia porównawczego. Metoda ta daje zdecydowanie prostszy algorytm rozwiązania (macierz współczynników układu równań jest symetryczna), a w otoczeniu punktów granicznych jest równie niezawodna jak metoda stałej długości łuku. Wpływ geometrii jednowarstwowych przekryć prętowych w analizie niezawodności poruszono w pracy [12]. Zaobserwo-

observed that the sensitivity of the reliability index is the greatest for the random variable describing the position coordinates of the nodes.

4. Numerical examples

A lattice dome consisting of 25 nodes and 56 elements (Fig. 3) was analyzed. The dome's geometry is shown in Table 1. The elements of the structure were assumed to be made of steel tubes RO101.6 x 6 with yield point $f_y = 235$ MPa and Young's modulus $E = 210$ GPa.

The analysis aimed to identify the influence of change in the geometry of the bar covering on its critical load capacity. The assumptions made included a fixed span of the dome and variable rise of the keystone, h , (node 1) and the third, h_3 , (nodes: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9) and the second, h_2 , (nodes: 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17) rings:

$$\begin{aligned} h &= h_3 + 5 \tan(\alpha + \Delta\alpha), \\ h_3 &= h_2 + 4.239 \tan(\alpha_3 + \Delta\alpha), \\ h_2 &+ 5.761 \tan(\alpha_2 + \Delta\alpha) \end{aligned} \quad (12)$$

The rise of the 1st ring (nodes: 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25) is $h_1 = 0$. Three ways of modifying the rise were considered, whereby in each case the dome analyzed was a shallow dome. The load of the μP value was applied to the keystone (Fig. 4a), with a reference load established at $P = 10$ kN. The critical load multiplier at the time of the snap-through, μ_{cr} , was determined for each case. The parameters determined for the most stressed element included critical force at elastic buckling S_{cr} , normal force at snap-through N_{Ed} and the load bearing capacity of the element due to buckling $N_{b,Rd}$. In all cases, the bars reaching the keystone are the most stressed elements. The values of the parameters named above are given for bar 7. For selected cases, equilibrium paths for the vertical displacement of the keystone (node 1), q , and the dependence of the scalar stiffness parameter CSP on this displacement are shown.

wano, że wrażliwość wskaźnika niezawodności jest największa dla zmiennej losowej opisującej współrzędne położenia węzłów.

4. Przykłady numeryczne

Przedmiotem analizy jest kopuła prętowa składająca się z 25 węzłów i 56 elementów (rys. 3). Geometria analizowanej kopuły przedstawiona jest w tabeli 1. Założono, że elementy konstrukcji zbudowane są z rur stalowych RO101.6 x 6 o granicy plastyczności $f_y = 235$ MPa i module Younga $E = 210$ GPa.

W pracy analizowano wpływ zmiany geometrii przekrycia prętowego na nośność krytyczną. W rozważaniach założono stałą rozpiętość kopuły, a zmieniano wyniosłość zwornika h (węzeł 1) oraz wyniosłość 3-go h_3 (węzły: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9) i 2-go h_2 (węzły: 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17) pierścienia:

$$\begin{aligned} h &= h_3 + 5 \tan(\alpha + \Delta\alpha), \\ h_3 &= h_2 + 4.239 \tan(\alpha_3 + \Delta\alpha), \\ h_2 &+ 5.761 \tan(\alpha_2 + \Delta\alpha) \end{aligned} \quad (12)$$

Wyniosłość 1-go pierścienia (węzły: 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25) wynosi $h_1 = 0$. Rozpatrzono trzy sposoby modyfikacji wyniosłości, przy czym w każdym przypadku analizowana kopuła była słabo wyniosła. Obciążenie o wartości μP przyłożono w zworniku (rys. 4a), przy czym przyjęto obciążenie porównawcze $P = 10$ kN. Dla każdego przypadku wyznaczono mnożnik obciążenia krytycznego w chwili przeskoku μ_{cr} oraz dla najbardziej wyężonego elementu wyznaczono: siłę krytyczną przy wyboczeniu sprężystym S_{cr} , siłę normalną w chwili przeskoku N_{Ed} oraz nośność elementu ze względu na wyboczenie $N_{b,Rd}$. We wszystkich przypadkach najbardziej wyężonymi elementami są pręty dochodzące do zwornika. W pracy podano wartości wymienionych wyżej parametrów dla pręta 7. Dodatkowo dla kilku wybranych przypadków przedstawiono ścieżki równowagi dla przemieszczenia pionowego zwornika (węzeł 1) q oraz zależność skalarnego parametru sztywności CSP od tego przemieszczenia.

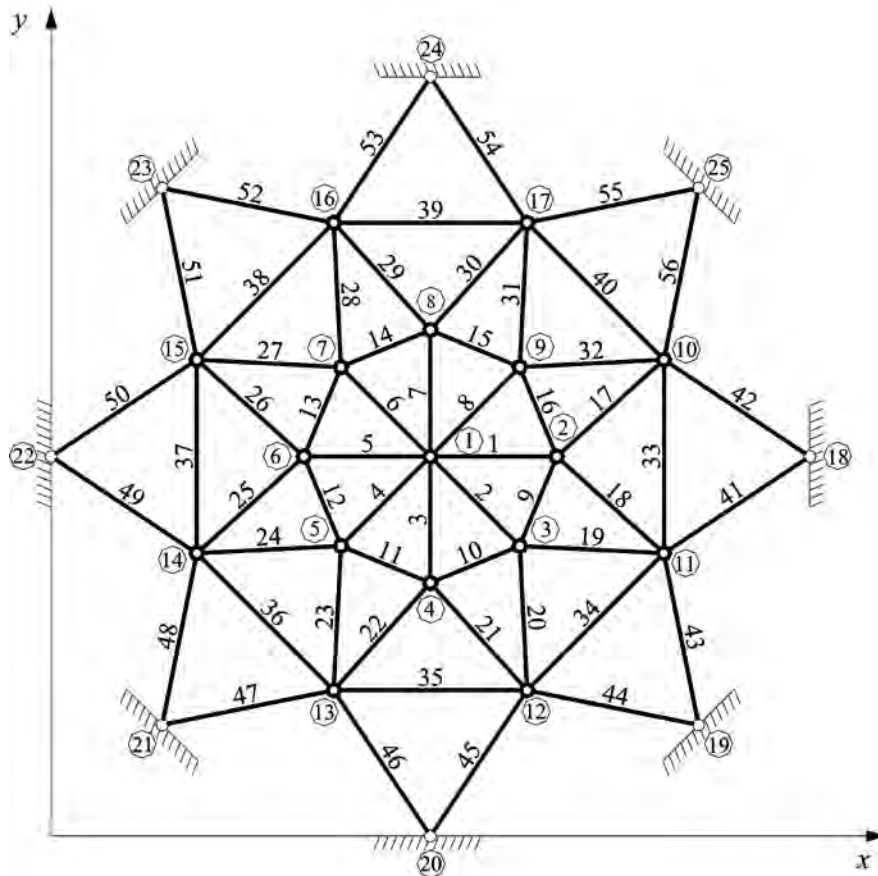


Fig. 3. Mesh of the lattice dome elements

Rys. 3. Siatka elementów kopuły prętowej

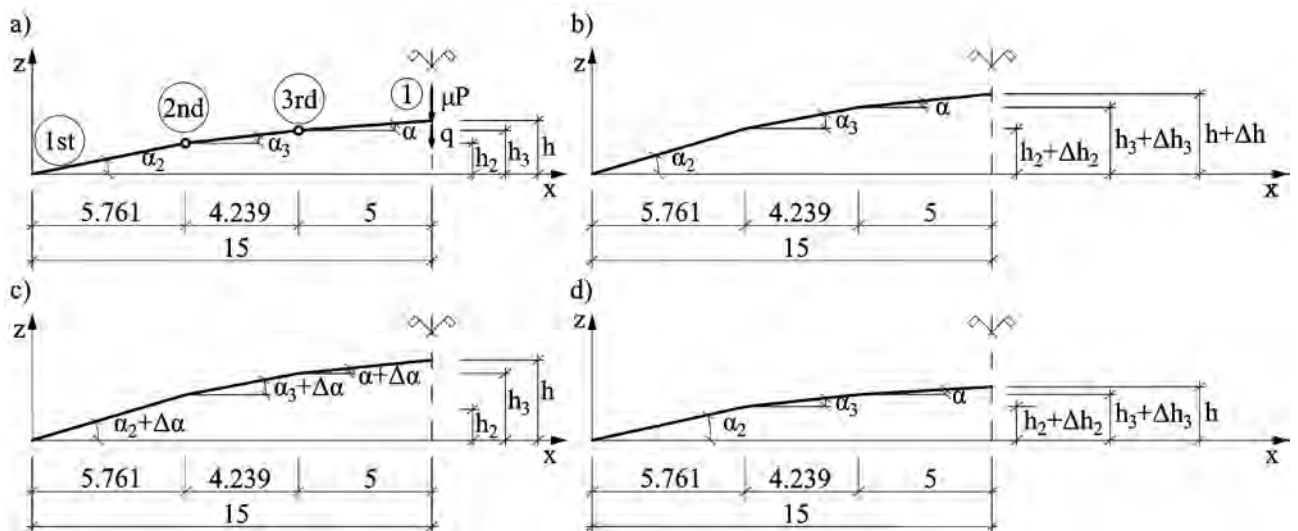


Fig. 4. a) Geometry of the lattice dome, b) constant height increments on the rings, c) constant slope increments of the rings, d) change in ring slope for a constant height dome

Rys. 4. a) Geometria kopuły prętowej, b) stały przyrost wysokości pierścieni, c) stałe przyrosty kąta nachylenia pierścieni, d) zmiana kąta nachylenia pierścieni dla kopuły o stałej wysokości

Table 1. Geometry of the lattice dome

Tabela 1. Geometria kopuły prętowej

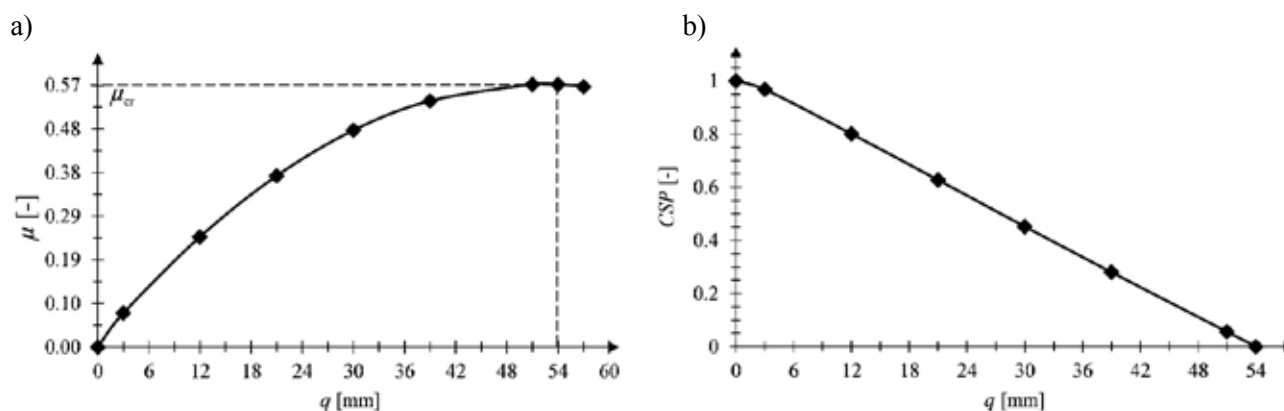
No. of node	x [m]	y [m]	z [m]	No. of node	x [m]	y [m]	z [m]
1	15.000	15.000	h	14	5.761	11.173	h_2
2	20.000	15.000	h_3	15	5.761	18.827	h_2
3	18.536	11.464	h_3	16	11.173	24.239	h_2
4	15.000	10.000	h_3	17	18.827	24.239	h_2
5	11.464	11.464	h_3	18	30.000	15.000	0
6	10.000	15.000	h_3	19	25.607	4.393	0
7	11.464	18.536	h_3	20	15.000	0.000	0
8	15.000	20.000	h_3	21	4.393	4.393	0
9	18.536	18.536	h_3	22	0.000	15.000	0
10	24.239	18.827	h_2	23	4.393	25.607	0
11	24.239	11.173	h_2	24	15.000	30.000	0
12	18.827	5.761	h_2	25	25.607	25.607	0
13	11.173	5.761	h_2				

4.1. Example 1

In the first approach, the modification of the dome's geometry was by increasing the rise of the second ring $h_2 + \Delta h_2$, the third ring $h_3 + \Delta h_3$, and the keystone $h + \Delta h$ (Fig. 4b). The results for the following increments were: $\Delta h_2 = n \cdot 0.06$ m, $\Delta h_3 = n \cdot 0.07$ m and $\Delta h = n \cdot 0.0535$ m, for 9 cases considered ($n = 0, 1, \dots, 8$): W1-W9. The total height of the dome varied from 1.486 m to 1.914 m. The results of the analysis are compiled in Table 2 and Figure 5.

4.1. Przykład 1

W pierwszym podejściu modyfikacja geometrii kopuły odbywała się poprzez przyrost poszczególnych wyniosłości pierścienia drugiego $h_2 + \Delta h_2$, trzeciego $h_3 + \Delta h_3$ oraz zwornika $h + \Delta h$ (rys. 4b). W pracy przedstawiono wyniki dla następujących wartości przyrostów: $\Delta h_2 = n \cdot 0,06$ m, $\Delta h_3 = n \cdot 0,07$ m i $\Delta h = n \cdot 0,0535$ m, przy czym rozpatrzono 9 przypadków ($n = 0, 1, \dots, 8$): W1-W9. Całkowita wysokość kopuły zmieniała się od 1,486 m do 1,914 m. Wyniki analiz przedstawiono w tabeli 2 oraz na rysunku 5.


 Fig. 5. a) Equilibrium path of vertical displacement q of node 1 for case W9, b) dependence of CSP on vertical displacement of node 1 for case W9

 Rys. 5. a) Ścieżka równowagi przemieszczenia q węzła 1 dla przypadku W9, b) zależność CSP od przemieszczenia węzła 1 dla przypadku W9

Table 2. The results of the analysis of the cases Wn

Tabela 2. Wyniki analizy dla przypadków Wn

n	case	$h_2 + \Delta h_2$ [m]	$h_3 + \Delta h_3$ [m]	$h + \Delta h$ [m]	α_2 [°]	α_3 [°]	α [°]	μ_σ [-]	$\sigma \cdot P$ [kN]	S_σ [kN]	N_{Ed} [kN]	$N_{b,Rd}$ [kN]
0	W1	0.960	1.222	1.486	9.64	12.34	15.12	0.390	3.90	170.93	9.73	145.17
1	W2	1.020	1.292	1.5395	10.25	13.06	15.69	1.242	12.42	170.93	33.90	145.17
2	W3	1.080	1.362	1.593	10.87	13.79	16.26	2.612	26.12	170.93	82.30	145.17
3	W4	1.140	1.432	1.6465	11.49	14.53	16.84	2.689	26.89	170.93	121.50	145.17
4	W5	1.200	1.502	1.700	12.11	15.26	17.42	2.025	20.25	171.61	101.20	145.68
5	W6	1.260	1.572	1.7535	12.73	16.01	18.00	1.522	15.22	171.61	84.07	145.68
6	W7	1.320	1.642	1.807	13.36	16.76	18.58	1.127	11.27	171.61	68.76	145.68
7	W8	1.380	1.712	1.8605	13.99	17.51	19.17	0.815	8.15	171.61	50.10	145.68
8	W9	1.440	1.782	1.914	14.63	18.27	19.77	0.572	5.72	171.61	43.82	145.68

4.2. Example 2

In the second approach, the modification of the dome's geometry was by uniformly increasing slopes α_2 , α_3 and α by $\Delta\alpha = n \cdot 1^\circ$ (Fig. 4c). Three different initial heights were analyzed ($i = 1, 5, 9$), corresponding to W1, W5, W9 from Example 1. Five cases ($n = 0, 1 \dots 4$) were considered for each W: Wi, 1-Wi, 5. The total height of the dome varied from 1.486 m to 2.556 m for W1, n , 1.7 m to 2.777 m for W5, n and 1.914 m to 3.0 m for W9, n . The results are summarized in Tables 3, 4 and 5 and Figure 6.

4.2. Przykład 2

W drugim podejściu modyfikacja geometrii kopuły odbywała się poprzez równomierny przyrost kątów nachylenia α_2 , α_3 i α o $\Delta\alpha = n \cdot 1^\circ$ (rys. 4c). Rozpatrzono trzy różne wysokości początkowe ($i = 1, 5, 9$), odpowiadające przypadkom W1, W5, W9 z przykładu pierwszego. Dla każdego z nich rozpatrzono po pięć przypadków ($n = 0, 1 \dots 4$): Wi, 1-Wi, 5. Całkowita wysokość kopuły zmieniała się od 1,486 m do 2,556 m dla przypadków W1, n , od 1,7 m do 2,777 m dla przypadków W5, n oraz od 1,914 m do 3,0 m dla przypadków W9, n . Wyniki analiz przedstawiono w tabelach 3, 4 i 5 oraz na rysunku 6.

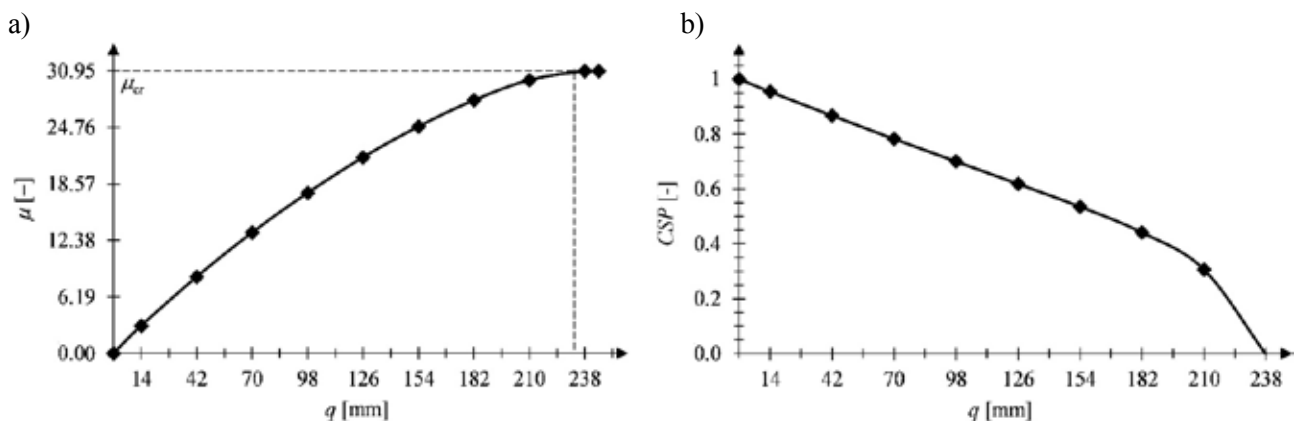


Fig. 6. a) Equilibrium path of vertical displacement q of node 1 for case W9,5, b) dependence of CSP on vertical displacement of node 1 for case W9,5

Rys. 6. a) Ścieżka równowagi przemieszczenia q węzła 1 dla przypadku W9,5, b) zależność CSP od przemieszczenia węzła 1 dla przypadku W9,5

Table 3. The results of the analysis for the cases W1, n

Tabela 3. Wyniki analizy dla przypadków W1, n

n	case	h_2 [m]	h_3 [m]	h [m]	$\alpha_2 + \Delta\alpha$ [°]	$\alpha_3 + \Delta\alpha$ [°]	$\alpha + \Delta\alpha$ [°]	μ_α [-]	$\mu_\alpha \cdot P$ [kN]	S_α [kN]	N_{Ed} [kN]	$N_{b,Rd}$ [kN]
0	W1,1	0.960	1.222	1.486	9.46	3.54	3.02	0.390	3.90	170.93	9.73	145.17
1	W1,2	1.064	1.400	1.752	10.46	4.54	4.02	0.478	4.78	170.93	9.06	145.17
2	W1,3	1.168	1.579	2.018	11.46	5.54	5.02	0.570	5.70	170.25	8.77	144.67
3	W1,4	1.273	1.759	2.286	12.46	6.54	6.02	0.665	6.65	169.57	8.63	144.17
4	W1,5	1.379	1.940	2.556	13.46	7.54	7.02	0.758	7.58	168.90	8.54	143.68

Table 4. The results of the analysis for the cases W5, n

Tabela 4. Wyniki analizy dla przypadków W5, n

n	case	h_2 [m]	h_3 [m]	h [m]	$\alpha_2 + \Delta\alpha$ [°]	$\alpha_3 + \Delta\alpha$ [°]	$\alpha + \Delta\alpha$ [°]	μ_α [-]	$\mu_\alpha \cdot P$ [kN]	S_α [kN]	N_{Ed} [kN]	$N_{b,Rd}$ [kN]
0	W5,1	1.200	1.500	1.700	11.77	4.05	2.29	2.025	20.25	171.61	101.20	145.68
1	W5,2	1.305	1.680	1.967	12.77	5.05	3.29	6.484	64.84	170.93	215.80	145.17
2	W5,3	1.411	1.861	2.236	13.77	6.05	4.29	10.560	105.60	170.93	204.80	145.17
3	W5,4	1.518	2.043	2.506	14.77	7.05	5.29	12.060	120.60	170.25	178.50	144.67
4	W5,5	1.627	2.226	2.777	15.77	8.05	6.29	12.980	129.80	169.57	157.50	144.17

Table 5. The results of the analysis for the cases W9, n

Tabela 5. Wyniki analizy dla przypadków W9, n

n	case	h_2 [m]	h_3 [m]	h [m]	$\alpha_2 + \Delta\alpha$ [°]	$\alpha_3 + \Delta\alpha$ [°]	$\alpha + \Delta\alpha$ [°]	μ_α [-]	$\mu_\alpha \cdot P$ [kN]	S_α [kN]	N_{Ed} [kN]	$N_{b,Rd}$ [kN]
0	W9,1	1.440	1.778	1.914	14.03	4.56	1.56	0.572	5.72	171.61	43.82	145.68
1	W9,2	1.547	1.960	2.183	15.03	5.56	2.56	2.664	26.64	170.93	121.90	145.17
2	W9,3	1.656	2.143	2.454	16.03	6.56	3.56	7.473	74.73	170.93	241.90	145.17
3	W9,4	1.765	2.328	2.726	17.03	7.56	4.56	16.341	163.41	170.25	404.70	144.67
4	W9,5	1.876	2.514	3.000	18.03	8.56	5.56	30.952	309.52	170.25	614.50	144.67

4.3. Example 3

In the last approach, the modification of the dome's geometry was made by increasing individual rises of the second ring $h_2 + \Delta h_2$ and the third ring $h_3 + \Delta h_3$ (Fig. 4d). The total height of the dome was constant, $h = 2$ m. The results for $\Delta h_2 = n \cdot 0.013$ m and $\Delta h_3 = n \cdot 0.01$ m are given. Eight cases were considered ($n = 0, 10, 20, 22, 23, 24, 25, 26$) for different heights of the second and third rings. These heights vary from 0.768 m to 1.106 m for the second ring and from 1.133 m to 1.593 m for the third ring. The results of the analyses are shown in Table 6 and Figure 7.

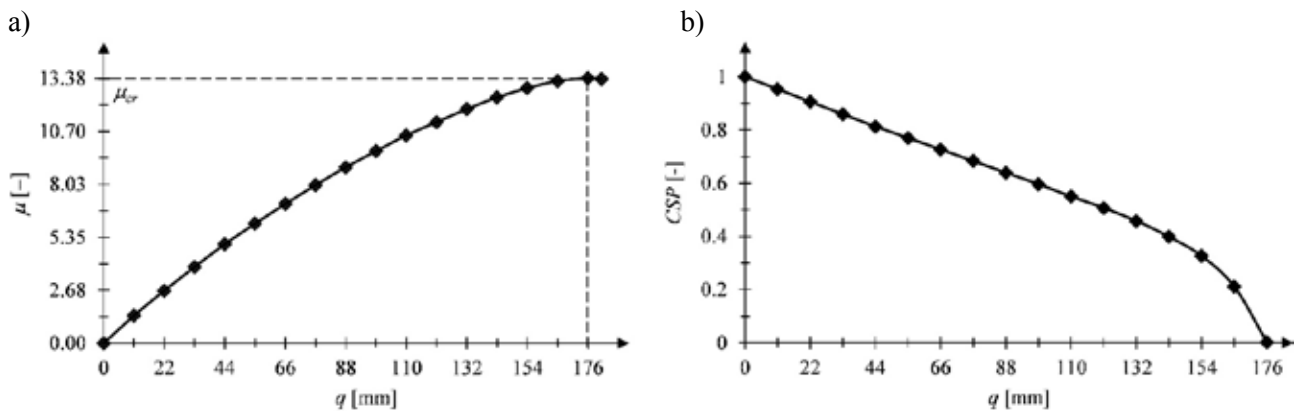
4.3. Przykład 3

W ostatnim podejściu modyfikacja geometrii kopuły odbywała się poprzez przyrost poszczególnych wyniosłości pierścienia drugiego $h_2 + \Delta h_2$ i trzeciego $h_3 + \Delta h_3$ (rys. 4d). Całkowita wysokość kopuły była stała i wynosiła $h = 2$ m. W pracy przedstawiono wyniki dla następujących wartości przyrostów: $\Delta h_2 = n \cdot 0,013$ m i $\Delta h_3 = n \cdot 0,01$ m. Rozpatrzono osiem przypadków ($n = 0, 10, 20, 22, 23, 24, 25, 26$) dla różnych wysokości pierścienia drugiego i trzeciego. Wysokości te zmieniają się od 0,768 m do 1,106 m dla pierścienia drugiego oraz od 1,133 m do 1,593 m dla pierścienia trzeciego. Wyniki analiz przedstawiono w tabeli 6 oraz na rysunku 7.

Table 6. The results of the analysis for the cases SWn

Tabela 6. Wyniki analizy dla przypadków SWn

n	case	$h_2 + \Delta h_2$ [m]	$h_3 + \Delta h_3$ [m]	h [m]	α_2 [°]	α_3 [°]	α [°]	μ_{cr} [-]	$\mu_{cr} \cdot P$ [kN]	S_{cr} [kN]	N_{Ed} [kN]	$N_{b,Rd}$ [kN]
0	SW1	0.768	1.333	2.000	7.68	7.68	7.69	0.0001	0.00	168.90	0.05	143.68
10	SW2	0.898	1.433	2.000	9.00	7.27	6.53	1.567	15.67	169.57	18.60	144.17
20	SW3	1.028	1.533	2.000	10.33	6.86	5.37	8.073	80.73	170.25	115.50	144.67
22	SW4	1.054	1.553	2.000	10.60	6.78	5.14	10.380	103.80	170.25	158.50	144.67
23	SW5	1.067	1.563	2.000	10.73	6.73	5.02	11.613	116.13	170.25	184.20	144.67
24	SW6	1.080	1.573	2.000	10.87	6.69	4.90	12.710	127.10	170.25	209.90	144.67
25	SW7	1.093	1.583	2.000	11.00	6.65	4.79	13.830	138.30	170.25	239.70	144.67
26	SW8	1.106	1.593	2.000	11.14	6.61	4.67	13.385	133.85	170.93	351.40	145.17

Fig. 7. a) Equilibrium path of vertical displacement q of node 1 for case SW8, b) dependence of CSP on vertical displacement of node 1 for case SW8Rys. 7. a) Ścieżka równowagi przemieszczenia q węzła 1 dla przypadku SW8, b) zależność CSP od przemieszczenia węzła 1 dla przypadku SW8

5. Summary

The effect of the geometry of a bar covering on the value of the critical load factor μ_{cr} is discussed. Analysis results indicate that shallow truss structures are extremely sensitive even to slight geometry changes. Three cases of modification of the dome's geometry were considered: constant change of nodes height in individual rings and in the keystone node (Example 1), constant increase in the inclination angle of the bars (Example 2) and change in the height of nodes in the rings at a constant height of the dome (Example 3). It was observed that in cases 1 and 3 there was a gradual increase in the critical load factor until the maximum was reached. Further height modifications resulted in a decrease in the critical load factor value. Monotonously increasing the inclination angle of all bars by a constant value of $\Delta\alpha$, led to the constant increase in the critical load factor/multiplier μ_{cr} . Maximum value of μ_{cr} , after which a

5. Podsumowanie

W pracy omówiono wpływ geometrii jednowarstwowego przekrycia prętowego na wartość mnożnika obciążenia krytycznego μ_{cr} . Przeprowadzona analiza pozwala na stwierdzenie, że słabo wyniosłe konstrukcje prętowe są niezwykle wrażliwe nawet na niewielkie zmiany geometrii. Rozpatrzono trzy przypadki modyfikacji geometrii kopuły: stała zmiana wysokości węzłów w poszczególnych pierścieniach i w węźle zwornikowym (przykład 1), stały przyrost kątów nachylenia prętów (przykład 2) oraz zmiana wysokości węzłów w pierścieniach przy stałej wysokości kopuły (przykład 3). Zauważono, że w przypadkach 1 i 3 występuje stopniowy wzrost wartości mnożnika obciążenia krytycznego, aż do osiągnięcia maksimum. Kolejne modyfikacje wysokości skutkują zmniejszaniem się wartości mnożnika obciążenia krytycznego. W przypadku monotonicznego wzrostu wartości wszystkich kątów nachylenia

decrease would start, was not observed. Changing the slope of all angles by 4° resulted in the μ_{cr} increase of more than 5300% (W3, n). The modification by increasing the heights of rings 2 and 3 and the keystone by $\Delta h_2 = 0.18$ m, $\Delta h_3 = 0.208$ m, $\Delta h = 0.161$ m, respectively, gave the μ_{cr} value increase of 589%. The analyses showed that for cases W5,2 through W5,5, W9,3 through KW9,5 and SW4 through SW8, the local buckling of the most stressed element (No. 7) precedes the snap-through. The results showed that it is possible to optimize the geometry of a single-layer bar coverings, which will be the next stage of the study.

prętów o stałą wartość $\Delta\alpha$ następuje stały przyrost mnożnika obciążenia krytycznego μ_{cr} . W tej analizie nie zaobserwowano osiągnięcia maksymalnej wartości μ_{cr} , po której by następował jej spadek. Zmiana nachylenia wszystkich kątów o 4° spowodowała wzrost wartości μ_{cr} o ponad 5300% (W9, n). W przypadku modyfikacji geometrii kopuły poprzez przyrost wyniosłości pierścieni 2 i 3 oraz zwornika o odpowiednio: $\Delta h_2 = 0,18$ m, $\Delta h_3 = 0,208$ m, $\Delta h = 0,161$ m, wartość μ_{cr} wzrosła o 589%. Dodatkowo przeprowadzone analizy wykazały, że dla przypadków od W5,2 do W5,5, W9,3 do KW9,5 oraz od SW4 do SW8 wybozczenie lokalne najbardziej wyężonego elementu (nr 7) poprzedza moment przeskoku. Przeprowadzone analizy wykazały możliwość optymalizacji geometrii jednowarstwowych przekryć prętowych, co może stanowić kolejny etap badań.

References

- [1] Zienkiewicz O.C.: *Metoda elementów skończonych*, Arkady, Warszawa 1972.
- [2] Waszczyszyn Z., Cichoń Cz., Radwańska M.: *Finite element method and stability of structures*, Arkady, Warszawa 1990.
- [3] Belytschko T., Liu W.K., Moran B.: *Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures*, Wiley, 1997.
- [4] Sokół T., Witkowski M.: *The equilibrium path determination in non-linear analysis of structures*, *Advancers in non-linear finite element methods*, [Ed.] by B.H.P. Topping and M. Papachakakis, Civil-Comp Press, Edinburg 1994, pp. 35-45.
- [5] Obara P., Gilewski W.: *Dynamic stability of moderately thick beams and frames with the use of harmonic balance and perturbation methods*, *Bulletin of The Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, Warsaw 2016, Vol. 64, No. 4, pp. 739-750.
- [6] Pawlak U.: *Energy Criterion in assessing the correctness of the matrix for non-standard finite elements*, *Structure and Environment*, Kielce 2017, pp. 42-55.
- [7] Pawlak U., Szczecina M.: *The eigenvalue problems in stability of industrial steel building with a handling system*, *Structure and Environment*, Kielce 2016, pp. 160-167.
- [8] Kleiber M.: *Some results in the numerical analysis of structural instabilities*. Part 1 Statics, *Eng. Trans.* 30, 1982, pp. 327-352.
- [9] Bergan P.G., Soreide T.H.: *Solution of large displacement and stability problem using the current stiffness parameter*, *Conf. "Finite elements in nonlinear mechanics"*, Geilo (1977), pp. 647-669.
- [10] Riks E.: *An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems*, *Int. J. Solids Struct.* 15, 1979, pp. 529-551.
- [11] Sokół T., Witkowski M.: *Numeryczne problemy sterowania procesem przyrostowym w zagadnieniach geometrycznie nieliniowych*, IX Konferencja Metody Komputerowe w Mechanice Kraków-Rytro 1989, pp. 1009-1016.
- [12] Radoń U.: *Probabilistic nonlinear analysis of truss structure*, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Wrocław 2011, Vol. 11, pp. 723-738.

MAŁGORZATA DOROZ-TUREK
Kielce University of Technology
e-mail: mdoroz@tu.kielce.pl

THE DETERMINANTS AFFECTING THE EXHIBITION OF ARCHITECTURAL RELICS IN A HISTORICAL BUILDINGS

“In situ”
“Do not interfere, preserve and observe”
“Exhibit and educate” [1, p. 51]

UWARUNKOWANIA PREZENTACJI RELIKTÓW ARCHITEKTONICZNYCH W ZABYTKOWYCH BUDOWLACH

„In situ”, łac. „w miejscu”
„Nie ingeruj, zachowaj i obserwuj”
„Ekspozuj i edukuj” [1, s. 51]

Abstract

Archaeological reserves and museums accessible to the public have become the mainstream means of exhibiting underground architectural and archaeological relics. The reserves protecting the most precious relics related to the earliest history of Poland are usually located under religious buildings, which in the Middle Ages replaced yet earlier structures. The heritage buildings in Kraków, Gniezno and Płock are just three examples used here in order to illustrate the restoration and technical determinants affecting the development and use of the exhibitions of architectural and archaeological relics in a historical object.

Keywords: architecture artifacts, preventive care, reserve, historical buildings, integrity

Streszczenie

Nurtem obecnej prezentacji podziemnych reliktyw architektoniczno-archeologicznych są rezerwaty archeologiczne lub muzea dostępne dla zwiedzających. Rezerwaty chroniące najcenniejsze relikty związane z najstarszą historią Polski znajdują się najczęściej pod obiektami sakralnymi, które w średniowieczu zastąpiły wcześniejsze budowle. W Krakowie, w Gnieźnie, czy w Płocku to tylko trzy przykłady na których autorka chciałaby zobrazować uwarunkowania konserwatorsko-techniczne na jakie się napotyka oraz jakie występują w trakcie tworzenia i użytkowania ekspozycji reliktyw architektonicznych i archeologicznych w zabytku.

Słowa kluczowe: relikty architektury, konserwacja zapobiegawcza, rezerwat, autentyzm, integralność, historyczne budynki

1. Introduction

The number of objects recognized as historical monuments has been increasing from year to year all over the world, including Poland. The creation of new entries in the register of objects of cultural heritage is facilitative in preserving the buildings of special historic, artistic, and even emotional significance. Although the cultural value frequently outruns the material value, mere preservation of architectural and archaeological relics in memory is not enough. It is essential to exhibit them so as to provide the opportunity to experience the relics of the past directly. This objective can be

1. Wprowadzenie

Na całym świecie, także w Polsce, z roku na rok przybywa obiektów uznanych za zabytki. Tworzenie nowych wpisów do rejestru zabytków jest pomocne w zachowaniu obiektów o szczególnym znaczeniu historycznym, artystycznym, a nawet emocjonalnym. Choć cenniejsza od wartości materialnej jest niejednokrotnie wartość kulturowa, samo zachowanie reliktyw architektonicznych i archeologicznych w pamięci nie wystarczy. Istotne jest, aby ekspozować je w taki sposób, aby możliwe było doświadczanie bezpośrednio reliktyw przeszłości. Historyczne

achieved by implementing special protection and restoration measures as well as exhibiting the historical architectural and archaeological relics, followed by a operation of engineering and technical.

Each architectural heritage object has its own history. Frequently, the buildings are not uniform, but bear signs of many architectural changes and transformations. The history of the alterations introduced in many heritage buildings can be traced and observed in the irregularities of the wall structure, the different shape and size of the openings or the change in their layout, i.e. their location. The emergence of *new* monuments is frequently connected with the discovery of unknown objects or heritage items considered non-existent for a long time, for instance, due to their redevelopment, replacement with new, larger architectural structures or destruction in war operations. Initially, the relics of the oldest objects were discovered during random ground penetration or construction and renovation works. Only later were the discoveries the result of purposive archaeological work. The value of the discovered monument lies in its authenticity, or the truth of the heritage item [2, p. 43], in its integrity, that is the uniformity of the heritage item [2, p. 49] and in the case of an architectural and archaeological relic, in its uniqueness. However, the final decision concerning the fate of the heritage object depends on the existing technical capabilities and financial resources. Once the examination and the inventory stages are over, the relics can either be re-buried in the ground or transferred to a museum, but their displaying *in situ* has become an optimum alternative. The exhibition at the site of the discovery of archaeological artefacts or architectural relics requires an appropriate and slightly different conservation of the object as well as the preparation of the site intended to be made open to the visitors. The accessibility, interesting content and safety as well as security of the presented relics [3] have become a priority of an exhibition organised in the form of an archaeological reserve (ang. *architectural reserve* [1, s. 109]).

The concept of *in-situ* exhibition is related to the idea of preventive conservation [4], which has been defined by Kobyliński as ‘a process leading to the prevention of threats to the substance of the heritage item.’ The idea ‘covers all the actions undertaken with a view to delaying or preventing the destruction of an object without leaving any physical imprint on it’ [5, pp. 139-143; 1, p. 50]. The main principles of preventive conservation are stated in the guidelines to the Burra Charter from 1999 [6], promoting leaving the items of cultural significance *in situ*, in their historical

relikty architektoniczno-archeologiczne potrzebują w tym celu specjalnej ochrony oraz konserwacji, a także prezentacji pociągającej za sobą działania inżynierskie i techniczne.

Każdy zabytek architektury posiada własną historię. Zazwyczaj nie są one obiektami jednofazowymi, lecz budynkami, w których dokonywane są architektoniczne zmiany i przekształcenia. W wielu zabytkowych obiektach można dostrzec tę historię w miejscach ukazujących zmianę wątku muru, innego kształtu i wielkości otworów, czy zmian ich miejsca rozplanowania, tj. lokalizacji. „Nowe” zabytki związane są często z odkrywaniem nieznanych dotąd obiektów lub od dawna nieistniejących, np. przebudowanych lub zastąpionych nowymi, większymi założeniami architektonicznymi bądź zniszczonych w trakcie działań wojennych. Początkowo relikty najstarszych obiektów odkrywano podczas przypadkowych penetracji terenu czy działań budowlanych i remontowych, następnie świadomych prac archeologicznych. Na wartość odkrytego zabytku składa się jego autentyczność, czyli prawda zabytku [2, s. 43], i integralność, czyli jednorodność zabytku [2, s. 49], oraz w przypadku reliktu architektoniczno-archeologicznego – unikatowość. Jednak ostateczna decyzja o dalszych jego losach uzależniona jest od istniejących możliwości technicznych i finansowych. Relikty mogą zostać po zbadaniu oraz zinventaryzowaniu ponownie zasypane ziemią bądź przeniesione do muzeum. Optymalną jednak alternatywą stało się prezentowanie *in situ*. Ekspozycja w miejscu znalezienia artefaktów archeologicznych lub odkrycia reliktyw architektonicznych wymaga odpowiedniej i nieco odmiennej konserwacji obiektu oraz przygotowania miejsca jego prezentacji dla zwiedzających. Priorytetem tworzonej ekspozycji w formie tak zwanego rezerwatu archeologicznego (ang. *architectural reserve* [3, s. 109]) jest dostępność, ale także interesująca dla zwiedzających oraz bezpieczna dla reliktyw ekspozycja [1, s. 109].

Z prezentacją *in situ* związana jest idea konserwacji zapobiegawczej (ang. *preventive conservation* [4]), którą definiuje Kobyliński jako „proces zmierzający do zapobiegania powstawaniu zagrożeń dla substancji zabytkowych. Obejmuje ona wszelkie działania podejmowane w celu opóźnienia lub zapobieżenia zniszczeniu obiektu bez oddziaływania fizycznego na ten obiekt” [5, s. 139-143; 1, s. 50]. Główne zasady konserwacji zapobiegawczej przedstawiono w zaleceniach Karty z Burra z 1999 roku [6], w której jest mowa o pozostawieniu reliktyw w miejscu odkrycia

location. The Charter emphasises the necessity of leaving the relics at the site of their discovery, their conservation as well as the monitoring of their state. Tomaszewski has further developed the principles set out in the Charter, focusing on the preventive conservation of historical objects. He suggests:

- not interfering with the historical substance of the objects,
- ensuring the optimum climate and microclimate for the objects,
- constant monitoring of their performance [1, p. 50].

Preventive conservation or preventive care concerns actions aimed at creating an appropriate environment around a heritage item that would have a profound impact on its lifespan, safety and security as well as functioning in the society [7, p. 220].

The preservation and the application of protective structures is a fundamental element of the restoration programme of architectural and archaeological relics exhibition. The *in-situ* preservation is primarily concerned with protecting the uncovered relics against the exposure to destructive factors in their new, changed natural environment, in which they resided until the moment of discovery. The destruction of sensitive material occurs very quickly. A swift response with a preservation activity as well as protection of the relics is indispensable. A protective structure which eliminates or significantly reduces the number of factors affecting the relic *in situ* is another form of preventive protection, along with the preservation works. In addition to its protective function, the structure enables restoration works. The conservation, protection and exhibition of relics as well as the preservation of the surrounding cultural environment need to be interrelated for two reasons, firstly, for the sake of the protection and the state of preservation of the historical object; and secondly, because of the aesthetic and visual functions of the surrounding environment for the exhibited item. The structure protecting the exhibition of the archaeological site, with all its structural and technical components, becomes its integral part.

2. The concepts of protective structures as well as restoration and technical operations

At present, the issue of restoration of historical objects in the form of architectural relics is widely debated due to the number of objects of that type, their diversity and the variety of preservation options as well as the scope of their use. The idea of preservation of buildings in the form of 'permanent ruins' [8, 9] as well as adaptation of historical objects into a new function [10, 11] has

oraz zabezpieczaniu i monitorowaniu ich stanu. Tomaszewski nieco rozwija zasady karty na rzecz konserwacji zapobiegawczej zabytków:

- nie ingerować w substancję zabytkową,
- zapewnić optymalny klimat i mikroklimat w miejscu ich egzystencji,
- stały monitoring ich zachowania [1, s. 50].

Konserwacja zapobiegawcza inaczej, opieka profilaktyczna, to działanie, którego celem jest stworzenie odpowiedniego środowiska wokół zabytku mającego ogromny wpływ na jego trwałość, bezpieczeństwo i funkcjonowanie w społeczeństwie [7, s. 220].

Zasadniczym elementem programu konserwatorskiego prezentacji reliktyw architektoniczno-archeologicznych jest konserwacja i zastosowanie konstrukcji zabezpieczających. Konserwacja *in situ* to przede wszystkim zabezpieczenie reliktyw przed wpływami czynników niszczących na jakie od początku narażony jest odsłonięty obiekt w nowym, zmienionym naturalnym dla niego dotąd środowisku. Destrukcja wrażliwego materiału zachodzi bardzo szybko. Konieczna jest niezwłoczna reakcja konserwatorska i zabezpieczenie reliktyw. Oprócz zabiegów konserwatorskich formą ochrony zapobiegawczej jest konstrukcja zabezpieczająca, która eliminuje bądź znacznie zmniejsza liczbę czynników mających zły wpływ na zachowanie reliktu *in situ*. Oprócz ochrony jednocześnie umożliwia ona prowadzenie zabiegów konserwatorskich. Konserwacja i zabezpieczenie oraz prezentacja musi być powiązana z ochroną otaczającego go środowiska kulturowego z dwóch powodów. Po pierwsze ze względu na ochronę i stan zachowania zabytku, po drugie z powodów estetycznej i wizualnej funkcji tła, jakie otaczające środowisko spełnia dla prezentowanego obiektu. Konstrukcja zabezpieczająca ekspozycję stanowiska archeologicznego, składające się na nią elementy konstrukcyjne i techniczne, stają się jego integralną częścią.

2. Koncepcje konstrukcji zabezpieczających i działań konserwatorsko-technicznych

Obecnie problematyka konserwacji zabytków w formie reliktyw architektury jest szeroko poruszana z uwagi na ilość tego typu obiektów, ich różnorodność a co za tym idzie również różną formę zachowania i możliwości wykorzystania. W licznych kręgach naukowych porusza się kwestię obiektów zachowanych w formie „trwałej ruiny” [8, 9] oraz adaptacji

become an objective of disputes in the scientific and academic circle. The issue is also within the scope of research interests of the author of this article [12, 13].

A relic or architectural artefact is an entirely different type of historical object. The issue of a good restoration approach in constructing an appropriate form of exhibition is one of the leading challenges of contemporary architectural design. However, the task is not always easy in terms of the technical and technological solutions provided to the problems. The architectural relics uncovered as archaeological finds or ruins, pose one of the most difficult problems in preservation and restoration. In our climatic conditions, with rainfalls, snowfalls and frost, the form of exhibition is not a simple undertaking. Even in much more favourable conditions, displaying the relics *in situ* is a job that requires a special approach. The architectural, construction and restoration determinants are the factors that greatly affect the form of the presentation of relics within a historical object. Constructing appropriate roofing or exhibition pavilions is a frequently adopted protective solution. The architectural and archaeological relics discovered underground and underneath the existing objects require other forms of protective structure.

New, interesting and unique architectural and archaeological relics are frequently discovered during research conducted in tenement house basements, church vaults and crypts or as a result of repair works performed on pavements and foundations. What follows are conservation and restoration problems as well as technological and technical difficulties concerning the preservation of the relics as well as the scope for exhibiting them. For this type of historical items underground protective structures are built. The design and construction of such structures are always complicated, and a variety of new difficulties, including construction problems, may arise at every stage. The design and the operations are developed for extreme conditions and various factors, such as ground waters, humidity, lack of daily light and ventilation or natural draught, which in turn might lead to the emergence of moisture and the growth of fungi.

3. The underground architectural and archaeological reserves. Presentation of relics

Underground archaeological and architectural reserves and museums accessible to the public have become the mainstream means of exhibiting the underground architectural and archaeological relics. The reserves protecting the most precious relics

zabytków na inną funkcję [10, 11]. Problematyką tą zajmuje się także autorka [12, 13].

Zdecydowanie odmiennym rodzajem zabytku jest relikw – artefakt architektoniczny. Kwestia dobrego konserwatorskiego podejścia, by zbudować właściwą formę prezentacyjną, jest jednym z czołowych wyzwań współczesnego projektowania architektonicznego. Okazuje się jednak, że nie zawsze jest to zadanie proste pod względem technicznego i technologicznego rozpracowania problemów. Relikty architektoniczne odsłonięte jako znaleziska archeologiczne, czy takie jak ruiny stanowią jeden z najbardziej trudnych problemów konserwatorskich. W naszych warunkach klimatycznych, gdzie oprócz opadów deszczu mamy także śnieg i mróz forma ekspozycji nie jest kwestią prostą. W nawet o wiele lepszych warunkach prezentacja *in situ* relikw jest rzeczą wymagającą specjalnego podejścia. Uwarunkowania architektoniczne, budowlane i konserwatorskie są czynnikami, które mają duży wpływ na kształt prezentacji relikw w zabytku. Wielokrotnie przyjmowanym rozwiązaniem konstrukcji zabezpieczającej jest wykonywanie jej w formie odpowiednich zasadań lub pawilonów ekspozycyjnych. Innej konstrukcji zabezpieczającej wymagają relikty architektoniczno-archeologiczne odkrywane pod ziemią i pod istniejącymi obiektami.

W wyniku badań piwnic kamienic, podziemi kościołów, np. krypt, czy podczas prac remontowych posadzek i fundamentów, często odkrywane są ciekawe, unikatowe relikty architektury oraz archeologiczne. W związku z tym pojawiają się problemy konserwatorskie, ale także technologiczne i techniczne ich utrzymania, i możliwości pokazania lub jej brak. Dla tego typu zabytków buduje się podziemne konstrukcje zabezpieczające. Projekt i budowa są bardzo skomplikowane, na każdym etapie pojawiają się problemy, także konstrukcyjne. Projekt i działania opracowywane są dla ekstremalnych warunków i różnych czynników, jak wody gruntowe, wilgotność, brak światła dziennego i wentylacji, czyli możliwości przewietrzania, a z tym związane zawilgoceń i możliwości rozwoju grzybów.

3. Podziemne rezerwy architektoniczno-archeologiczne. Prezentacja relikw

Nurtem obecnej prezentacji podziemnych relikw architektoniczno-archeologicznych są podziemne rezerwy archeologiczne lub muzea dostępne dla zwiedzających. Rezerwy chroniące najcenniejsze relikty związane z najstarszą historią Polski znajdu-

related to the earliest history of Poland are usually located under those religious buildings, which, in the Middle Ages, replaced yet earlier structures. The heritage buildings in Kraków, Gniezno and Płock are just three examples used here in order to illustrate the restoration and technical determinants affecting the development and use of the exhibitions of architectural and archaeological relics in a historical object.

3.1. Kraków, The Wawel

In Poland, one of the first archaeological and architectural reserves was established at the Wawel Hill. The subsequent creation of other reserves followed at the same site. The first scientific penetration of the Wawel Hill grounds was performed in 1874 by a geologist Alojzy Alth. In the 19th century (1881-1882), an architect Tomasz Pryliński conducted another research in the course of the restoration works taking place in the castle. At the turn of the 19th century, an architect Sławomir Odrzywolski examined the site during the renovation works in the cathedral. At the beginning of the 20th century (1905-1914), a great excavation campaign was initiated by an architect Zygmunt Hendel, and archaeological studies became a part of the Royal Castle renewal programme. After that, the archaeological works were continued by an architect Adolf Szyszko-Bohusz until the outbreak of WWII (1916-1939). The archaeological works at the Wawel Hill were resumed in 1948, and since that time research has been done by several archaeologists, namely Gabriel Leńczyk, Andrzej Żaki and Stanisław Kozieł, Piotr Stępień. Professor Zbigniew Pianowski is conducting a research now [14, 15].

All the research works revealed particularly important relics of Medieval monumental architecture (Fig. 1), but in particular, the most important discoveries were the relics of: the Pre-Romanesque rotunda of Sts. Felix and Adauctus (Object 1), the so-called St. Gereon's church (Object 2) and the remains of a Romanesque palatium, i.e. the 24-column hall (Object 3). These discoveries were later elaborated on, expanded and enriched with other significant findings concerning the original Romanesque cathedral buildings, i.e. the fragments of the walls of the Pre-Romanesque cathedral of Bolesław I the Brave (Object 4).

Making the relics of fragments of the buildings prior to the contemporary Wawel available to the public was a constructive idea. However, the implementation of the idea involved finding solutions to a series of problems. The most fundamental questions to be answered concerned the techniques of preservation

ją się najczęściej pod obiektami sakralnymi, które w średniowieczu zastąpiły wcześniejsze budowle. Kraków, Gniezno i w Płock to tylko trzy przykłady, na których autorka chciałaby zobrazować uwarunkowania konserwatorsko-techniczne, na jakie się napotyka oraz jakie występują w trakcie tworzenia i użytkowania ekspozycji reliktyw architektonicznych i archeologicznych w zabytku.

3.1. Kraków, Wawel

W Polsce jeden z pierwszych rezerwatów archeologicznych powstał na Wawelu i kolejne po nim w tym miejscu. Pierwszych naukowych penetracji terenu na Wawelu dokonał w roku 1874 geolog Alojzy Alth. Kolejne prace badawcze w wieku XIX, podczas działań restauracyjnych w pałacu, przeprowadził architekt Tomasz Pryliński (lata 1881-1882), zaś na przełomie XIX i XX wieku w trakcie odnawiania katedry architekt Sławomir Odrzywolski. Z początkiem XX wieku wielką akcją wykopaliskową rozpoczął architekt Zygmunt Hendel (lata 1905-1914), a badania archeologiczne stały się elementem programu odnowy Zamku Królewskiego. Po nim prace archeologiczne kontynuował architekt Adolf Szyszko-Bohusz (lata 1916-1939), aż do wybuchu drugiej wojny światowej. Do badań archeologicznych na Wzgórzu Wawelskim wrócono w 1948 roku, od tego czasu na Wawelu prace badawcze prowadziło kilku archeologów, kolejno: Gabriel Leńczyk, Andrzej Żaki, Stanisław Kozieł, Piotr Stępień, obecnie Zbigniew Pianowski [14, 15].

Wszystkie prace badawcze odsłoniły szczególnej wagi relikty średniowiecznej architektury monumentalnej (rys. 1), w szczególności relikty: przedromańskiej rotundy św.św. Feliksa i Adaukta (ob. 1), kościoła św. Gereona (ob. 2) oraz pozostałości po romańskim palatium książęcym, tj. sala 24-kolumnowa (ob. 3). Te odkrycia zostały później uszczegółowione, doszły do nich jeszcze inne ważne związane z pierwotnymi, romańskimi budowlami katedry, tj. fragmenty murów przedromańskiej katedry, tzw. chrobrowskiej (ob. 4).

Wiele przemawiało za udostępnieniem reliktyw fragmentów wcześniejszej architektury do zwiedzania na Wawelu. Wraz z tym pomysłem pojawiły się pierwsze problemy, jak tego dokonać, jak je eksponować i pokazać szerszemu odbiorcy? Większość reliktyw znajdowało się w murach późniejszych budowli, często mury nawarstwiały się wzajemnie. Odkrytym reliktom, które musiały pozostać *in situ* wewnątrz budynku, należało zapewnić odpowiednie warunki

and adaptation as well as the methods of exhibition to a wider audience. Most of the fragments were within the walls of the buildings constructed later. Frequently, the old walls were incorporated into the ones built later. The uncovered relics, which had to remain *in situ*, inside the buildings, required an appropriate microclimate and security system. Displaying the relics necessitated the introduction of a novel form of exhibition, which is now called the archaeological and architectural reserve [17, p. 39].

mikroklimatyczne oraz bezpieczeństwo. Prezentacja wymagała nowej formy ekspozycji, nazywanej obecnie rezerwatem archeologiczno-architektonicznym [17, s. 39].

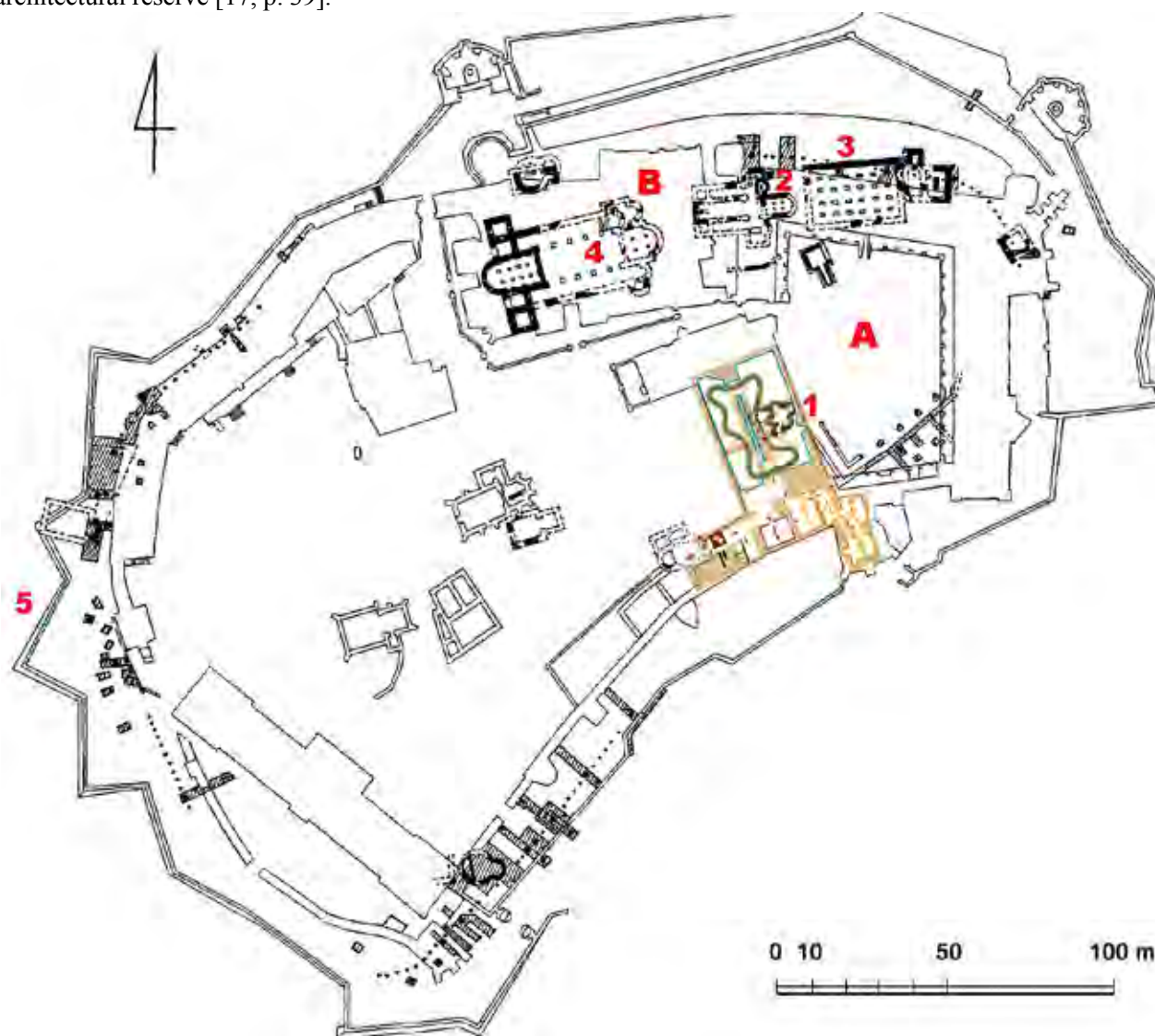


Fig. 1. The location of the archaeological and architectural reserves of the Wawel Royal Castle; a plan with marked masonry Pre-Romanesque and Romanesque buildings, as given by Andrzej Kukliński and Piotr Stępień [16, p. 278; 17, p. 39]; A – the castle, B – the cathedral; 1 – “The Lost Wawel”, the rotunda of Sts. Felix and Adauktus; 2 – reserve the church of St. Gereon; 3 – the Pre-Romanesque relics of a palatium; 4 – the fragments of the walls of the Pre-Romanesque Hermanian cathedral; 5 – the region of the Dragon’s Den

Rys. 1. Położenie rezerwatów archeologiczno-architektonicznych na Wawelu w Krakowie; plan z zaznaczonymi murami budowli przedromańskich i romańskich, podany przez Andrzeja Kuklińskiego i Piotra Stępnia [16, s. 278; 17, s. 39]; A – zamek, B – katedra; 1 – “Wawel Zaginiony”, rotunda św.św. Feliksa i Adaukta; 2 – rezerwat św. Gedeona; 3 – przedromańskie reliktury palatium; 4 – fragmenty murów przedromańskiej katedry hermanowskiej; 5 – rejon smoczej jamy

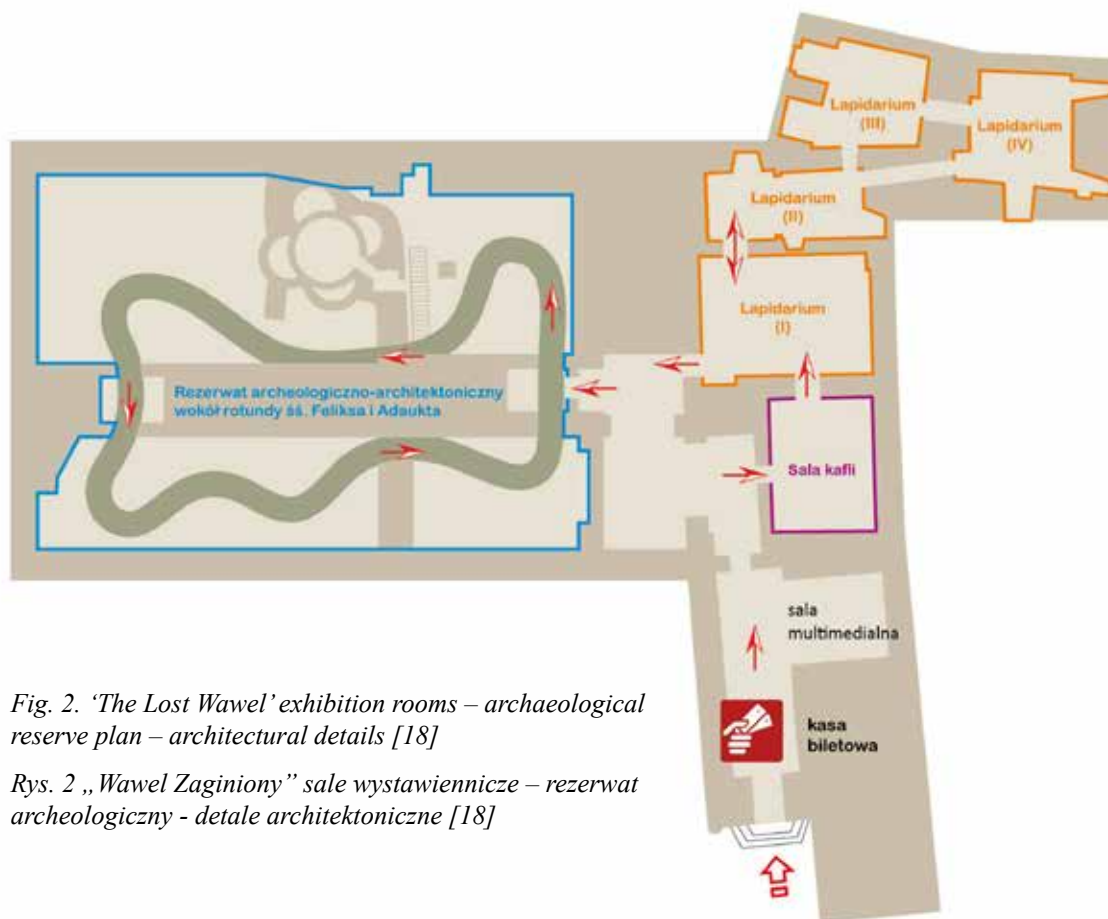


Fig. 2. 'The Lost Wawel' exhibition rooms – archaeological reserve plan – architectural details [18]

Rys. 2. „Wawel Zaginiony” sale wystawiennicze – rezerwat archeologiczny - detale architektoniczne [18]

Adolf Szyszko-Bohusz was the creator of the first reserves at the Wawel Hill. In 1917-1921, the first reserve exhibiting the rotunda of Sts. Felix and Adauctus was constructed. At around the same time (1918-1921), another reserve presenting the relics of the 11th-century church of St. Gereon and the 14th-century chapel of St. Mary of Egypt was created in the western wing of the castle. Other reserves were created after the Second World War, following new discoveries. First and foremost, in 1975, an exhibition called 'The Lost Wawel' was opened. Still open and almost unchanged in its form, the old exhibition is a continuation of the first two archaeological and architectural reserves around the rotunda of Sts. Felix and Adauctus (Figs. 2, 3), expanded to include a sepulchral annex (a term closely related to the cult of the dead), the vaults of the Kazimierzowski Castle (the Casimir Castle), a Renaissance kitchen chamber and a carriage house.

Some of the Wawel reserves have never been completed due to the difficulties encountered in the course of works. This fact was determinant for suspending the development and implementation of projects of further reserves. The projects were only resumed in the last decades of the previous century.

Autorem pierwszych rezerwatów na Wawelu był Adolf Szyszko-Bohusz. W latach 1917-1921 powstał pierwszy rezerwat w celu ekspozycji rotundy św.św. Feliksa i Adaukta, w tym samym czasie (1918-1921) urządzono drugi rezerwat prezentujący relikty XI-wiecznego kościoła św. Gereona i XIV-wiecznej kaplicy św. Marii Egipcjanki w zachodnim skrzydle zamku. Kolejne rezerваты powstawały po drugiej wojnie światowej wraz z nowymi odkryciami. Przede wszystkim w roku 1975 udostępniono wystawę „Wawel Zaginiony”. Istniejąca do dziś ekspozycja, w prawie niezmiennym kształcie, to kontynuacja dwóch pierwszych rezerwatów archeologiczno-architektonicznych wokół rotundy św.św. Feliksa i Adaukta (rys. 2, 3), powiększona o aneks sepulkralny (pojęcie powiązane ściśle z kultem zmarłych) oraz podziemia zamku Kazimierzowskiego, kuchnię renesansową i wozownię.

Realizacje niektórych wawelskich rezerwatów nie zostały ukończone z powodu trudności na jakie napotkano w trakcie prac. Przesądziły one także o wstrzymaniu prac przy planowanych dalszych rezerwach. Wznowiono je dopiero w ostatnich dziesięcioleciach poprzedniego stulecia.

The determinants

The creation of a reserve for the public is not an easy task. Its main objective is to exhibit the relics under conditions conducive to their preservation. Many factors, which can be difficult to counter, affect the accomplishment of the objective. The relics exhibited in a reserve are more susceptible to destruction than the relics left in the walls or in the ground and therefore require appropriate preservation and restoration procedures and strategies.

The reserve interiors have a unique microclimate, which is influenced by several factors. One of them is the location of the reserve with respect to the level of the ground and the body of the building as well as the type of the heating and ventilation systems, which have or have not installed [17, p. 40].

At Wawel there is a range of reserves created in different locations and under different conditions, each posing a number of restoration and technical problems. The reserves outside the buildings' walls, under a reinforced-concrete slab below the ground level, devoid of heating and proper ventilation have the least favourable microclimate parameters. These are the reserves in the area of the Dragon's Den (Fig. 1, Object 5). There are much better conditions in the reserves situated within the buildings, slightly below the ground level, namely in the reserve of St. Gereon's church (Fig. 1, Object 2). The thick walls and the heated rooms above the reserve provide it with an additional protection against freezing. Natural ventilation through the window and door openings helps maintain relatively stable thermal and humidity conditions.

'The Lost Wawel' reserve (Figs. 1, 2, 3) is located inside a building, at and below the ground level. It differs from the other reserves in the equipment (central heating and mechanical exhaust ventilation), installed there in the 1960s. As a result, the reserve has a microclimate characterised by big fluctuations in humidity, ranging from under 40% in the heating season to over 90% in the summer months. Further significant daily variations are caused by the mechanical ventilation.

In contrast with the other Wawel reserves, the reserve situated on the 1st floor of the gate wing has the most favourable and stable conditions. The lack of moisture and heating as well as the effect of natural ventilation through the window openings ensure an appropriate temperature, humidity and stable conditions in the reserve. Owing to all these, the reserve on the 1st floor of the gate wing holds the lowest level of destruction of the historical substance.

Uwarunkowania

Stworzenie rezerwatu dla zwiedzających nie jest łatwym zadaniem. Głównym jego założeniem jest prezentacja relikwii w warunkach sprzyjających ich zachowaniu. Na realizację tego celu ma wpływ wiele czynników, które nie łatwo opanować. Relikty w rezerwacie są bardziej narażone na destrukcję niż relikty pozostawione w murach lub w gruncie, dlatego wymagają odpowiedniego postępowania konserwatorskiego.

We wnętrzach rezerwatu panuje specyficzny mikroklimat, na który ma wpływ lokalizacja rezerwatu w stosunku do poziomu terenu i bryły budynku oraz rodzaj ogrzewania i wentylacji, które występuje bądź nie [17, s. 40].

Na Wawelu mamy przegląd rezerwatów zrealizowanych w różnej sytuacji i z różnymi uwarunkowaniami i wiążącymi się z tym wieloma problemami konserwatorsko-technicznymi. Najbardziej niekorzystny układ parametrów mikroklimatycznych mają rezerwaty poza obrysem budynków, poniżej poziomu terenu pod żelbetową płytą, bez ogrzewania i dobrej wentylacji, tj. rezerwaty w rejonie Smoczej Jamy (rys. 1, ob. 5). Lepsze warunki są w rezerwach w obrębie budynku, nieco poniżej poziomu terenu, tj. rezerwat kościoła św. Gereona (rys. 1, ob. 2). Grube mury i ogrzewane pomieszczenia nad nim dodatkowo zabezpieczają je przed przemarzaniem. Wentylacja przez otwory okienne i drzwiowe na przestrzał pozwala utrzymać w miarę stabilne warunki ciepłotylotnościowe.

Rezerwat „Wawel Zaginiony” (rys. 1, 2, 3) jest położony wewnątrz budynku, na i poniżej poziomu terenu. Różni się od innych wyposażeniem go w latach 60. XX wieku w centralne ogrzewanie i wentylację mechaniczną (wywiewną), w wyniku czego występuje mikroklimat o dużych wahanach wilgotności w okresie grzewczym nawet poniżej 40%, zaś w okresie letnim wilgotność przekracza nawet 90%, dodatkowo znaczne różnice w ciągu doby powoduje wentylacja mechaniczna.

W porównaniu do wszystkich najkorzystniejsze, stabilne warunki ma rezerwat zlokalizowany na pierwszym piętrze skrzydła bramnego. Brak wilgoci od gruntu i ogrzewania, naturalna wentylacja dzięki otworom okiennym pozwala utrzymać korzystną temperaturę i wilgotność oraz stabilne warunki rezerwatu. Dzięki temu w rezerwacie na pierwszym piętrze skrzydła bramnego stwierdza się najniższy stopień destrukcji substancji zabytkowej.

The above-mentioned unfavourable microclimate conditions can result in the following threats to the relics:

- dryness, the loss of cohesion of the material performing in the wet state, crystallisation of soluble salts, especially the subsurface one
- dampening and the development of microbiotic organisms, such as mould fungi, and less frequently, ‘dry rot’ fungi. The development of microbiota is also fostered by an organic substance present in the relic material itself. The substance serves as a growth medium and nutrient,
- mechanical damage resulting from both various technical works and the human factor (the visitors) [17, p. 41-42].

Conservation and modernisation works

Since all of the aforementioned problems have been found in the Wawel reserves, in 1986, preservation and restoration works were commenced under the supervision of Piotr Stępień in order to stop the deterioration processes and save the unique relics. The works were carried out in the ‘the Lost Wawel’ reserve and the reserve of St. Gereon’s church. The foundations were preserved and restored and the crumbling structure of their materials was strengthened. Preventive disinfection and the combating of microbiotic organisms in the infested areas by the application of non-toxic substances safe for people were introduced. Desalination of the architectural details was conducted. In the new interior design a series of operations was recommended. These were the decrease of the heating power, the introduction of stack ventilation and shielding the relics from the visitors [17].

Despite the suggested alterations in the arrangement of the interiors of ‘the Lost Wawel’ exhibition, the oldest museum in Poland, the interior design has retained the form of the redevelopment introduced in the years 1961-1979. The footbridges were introduced and a redesign of the museum tour route around the reserve exhibition was performed (Figs. 2, 4). The most recent modernisation of the interior was carried out in the years 2005-2006, and the original ventilation system was cleared of all blockages [19, p. 109]. These works were conducted as part of yet another restoration programme developed in 1990 [19]. In the 1990s, a new arrangement of the interiors of the archaeological and architectural reserve with the relics of the Romanesque St. Gereon’s church and the Gothic chapel of St. Mary of Egypt was implemented in the western wing of the castle. After the analysis of the latest research results,

Z wyżej wymienionymi niekorzystnymi parametrami mikroklimatu związane są zagrożenia dla reliktyw, czyli:

- przesuszenie, utrata spójności materiału pracującego w stanie wilgotnym, krystalizacja soli rozpuszczalnych, szczególnie podpowierzchniowej,
- zawilgocenie i rozwój mikroflory w postaci grzybów pleśniowych (pleśni), rzadziej grzyba domowego. Rozwojowi mikroflory sprzyja także występowanie substancji organicznej będącej jej pożywką, znajdujące się także w samym materiale reliktyw,
- uszkodzenia mechaniczne związane z pracami technicznymi i spowodowane przez zwiedzających [17, s. 41-42].

Prace konserwatorskie i modernizacja

W związku ze stwierdzeniem wystąpienia wszystkich przedstawionych problemów, w celu ich rozwiązania i ratowania unikalnych reliktyw, w roku 1986 podjęto prace konserwatorskie pod kierunkiem Piotra Stępnia. Prace przeprowadzono w rezerwach „Wawelu Zaginionego” i kościoła św. Gereona. Poddano konserwacji fundamenty i wzmocniono rozsypującą się strukturę materiałów. Istotnym zabiegiem było profilaktyczne odkażanie i zwalczanie mikroflory w miejscach zaatakowanych, środkami nietoksycznymi dla ludzi. Przeprowadzono odsalanie detali architektonicznych. W nowej aranżacji zalecono ograniczenie ogrzewania, wprowadzenie wentylacji grawitacyjnej i zabezpieczenie reliktyw przed bezpośrednim dostępem zwiedzających [17].

Mimo sugerowanych zmian aranżacji wnętrza wystawy „Wawel Zaginiony”, najstarszego w Polsce muzeum, mają one kształt pochodzący z przebudowy w latach 1961-1979. Wprowadzono wówczas kładki oraz układ trasy muzealnej po ekspozycji rezerwatu (rys. 2, 4). Ostatnie modernizacje wnętrza przeprowadzono w latach 2005-2006, udrażniając pierwotny system wentylacji [19, s. 109]. Odkryło się to już w ramach kolejnego programu konserwatorskiego opracowanego w 1990 roku [19]. W latach 90. XX wieku zrealizowano nową aranżację rezerwatu archeologiczno-architektonicznego z reliktywami kościoła romańskiego św. Gereona i gotyckiej kaplicy św. Marii Egipcjanki w skrzydle zachodnim zamku. Autor projektu Piotr Stępień, uznał na podstawie nowych wyników badań, że aranżacja winna odpowiadać aktualnemu stanowi wiedzy, a wyeksponować należy także relikty kaplicy gotyckiej [19, s. 109].



Fig. 3. 'The Lost Wawel', view of the rotunda of Sts. Felix and Adauctus (author's photo)

Rys. 3. „Wawel Zaginiony”, widok rotundy św.św. Feliksa i Adaukta (zdjęcie autorki)



Fig. 4. 'The Lost Wawel', exhibition room (author's photo)

Rys. 4. „Wawel Zaginiony”, sala wystawiennicza (zdjęcie autorki)

Piotr Stępień, the author of the design, decided that the new interior design should incorporate the current state of knowledge, and that the relics of the Gothic chapel should also be exhibited [19, p. 109].

Once the site got stabilised after the discovery of the relics and the all preservation and restoration works have been completed, the interiors of the reserve are dry and well-lit. However, the reserve lacks many of the state-of-the-art multimedia solutions, which the newly opened reserves and museums are equipped with, such as visualisations of the non-existent buildings or multimedia screens providing information concerning individual architectural elements and artefact exhibits.

The Wawel Hill is not the only architectural and archaeological reserve in Poland. The subsequent discoveries made in the 1960s and 1970s have been adapted into *in-situ* exhibitions to suit the visitors' needs. The unique value of the architectural and archaeological relics has validated the creation of a new reserve in each case. On the other hand, similar problems can be noticed in the ways the relics are preserved and displayed.

3.2. Gniezno

The archaeological research in the Gniezno Cathedral began in the 1950s. The research works within the chancel were conducted in the years 1957-58 under the supervision of Kazimierz Żurowski. In 1959 yet another research was commenced in the

Dzięki ustabilizowaniu się sytuacji po odkryciu reliktyw i pracom konserwatorskim, obecnie wnętrza rezerwatu są suche i dobrze oświetlone. Brakuje jednak wielu współczesnych rozwiązań multimedialnych, w które wyposażane są już nowo tworzone rezerwaty i muzea, jak np. wizualizacja nieistniejących budynków czy ekranów multimedialnych z informacjami o poszczególnych fragmentach architektonicznych i eksponatach artefaktów.

Wawel to nie jedyny rezerwat w Polsce. Kolejne odkrycia dokonywane w latach 60. i 70. XX wieku zaczęto także dostosowywać dla zwiedzających w formie prezentacji *in situ*. Za każdym razem przemawia za tym unikatowa wartość reliktyw architektoniczno-archeologicznych. W prezentacjach reliktyw dostrzegane są podobne problemy konserwatorskie i ekspozycyjne.

3.2. Gniezno

W gnieźnieńskiej katedrze badania archeologiczne rozpoczęto w latach 50. XX wieku. Prace badawcze w obrębie prezbiterium prowadzono w latach 1957-1958 pod kierunkiem Kazimierza Żurowskiego.

W roku 1959 rozpoczęto kolejne badania obiektu, który w latach 80. i 90. XX stulecia poddany został pracom konserwatorskim z okazji obchodów milenijnych w 1997 roku – śmierci św. Wojciecha, oraz w 2000 roku – Zjazdu Gnieźnieńskiego. Przy okazji

object, which in the 1980s and the 1990s underwent preservation and restoration works for the millennium anniversaries of the years 1997 (the death of St. Adalbert) and 2000 (the Congress of Gniezno). In addition, modernisation of the underground exhibition of the cathedral was carried out after many years.

In the 1960s, the archaeological research has resulted in the uncovering of preserved relics of an earlier Romanesque structure with graves under the floor of the Gothic cathedral. This discovery was followed by the creation of an underground reserve displaying the relics *in situ*. After a period of stabilization of the site and the completion of a series of preservation and restoration works, the exhibition was open to the public. In order to display the preserved relics, a room was created under the floor by constructing a reinforced-concrete structural ceiling supported on posts and load-bearing walls. Inside the room, a well-lit exhibition route was established among the fragments of the uncovered wall relics. In the course of time, all the degraded elements of the original architectural relics were strengthened or replaced as part of the preservation and conservation works. The installation of an appropriate stack ventilation through the holes in the ceiling provided the cathedral crypts with stable humidity conditions. Today, after the years, when the actual state of preservation of the relic is already known, the improvements of the archaeological exhibition were carried out. The transformation of the exhibition containing the priceless, 1,000-year-old relics of the Polish sovereignty, involved using very simple methods of graphic presentation of the successive stages of construction and evolution of the original church into the present-day cathedral (Fig. 5). The information about the historic building are put on the boards placed along the whole tour route, which makes individual sightseeing possible. The preservation and restoration works performed in the cathedral standing over the relics as well as the exhibition methods employed there are of a completely different preservation and restoration nature.

3.3. Płock

The complex of the historical former collegiate church of St. Michael Archangel and the building of a Jesuit college in Płock are another example of the new exhibitions of the discovered relics. This important monument of religious architecture of the Piast state is now a college building, and there is a school in the rebuilt Gothic church. The secondary school continues a centuries-old tradition of education, already known in

po wielu latach zmodernizowano również podziemną ekspozycję katedry.

W wyniku badań archeologicznych pod posadzką gotyckiej katedry w latach 60. XX wieku odsłonięto zachowane relikty starszego, romańskiego założenia wraz z grobami. Z tym odkryciem wiąże się wykonanie podziemnego rezerwatu z obiektami *in situ*. Po okresie stabilizacji warunków i przeprowadzeniu licznych działań konserwatorskich ekspozycja została udostępniona zwiedzającym. Do prezentacji zabezpieczonych relikwii stworzono wnętrze pod posadzką, budując żelbetową konstrukcję stropu opartą na słupach i ścianach nośnych. Wewnątrz wprowadzono dobrze doświetloną trasę wystawową pomiędzy fragmentami wyeksponowanych relikwii murów. Z czasem wszystkie elementy oryginalnych relikwii architektonicznych, które ulegały rozpadowi zostały konserwatorsko wzmocnione lub wymienione. Wykonanie odpowiedniej wentylacji krypt katedry oraz wentylacji grawitacyjnej przez otwory w stropie zapewniło stabilizację warunków wilgotnościowych. Dzisiaj, gdy znany jest już rzeczywisty stan zachowywania relikwii, przystąpiono do doskonalenia samej prezentacji archeologicznej. Wykonane przekształcenie tej ekspozycji bezcennych 1000-letnich relikwii, związanych z naszą państwowością, wykorzystuje bardzo proste metody graficznej prezentacji kolejnych faz budowy i przekształcania pierwotnego kościoła w dzisiejszą katedrę (rys. 5). Informacje o zabytku rozmieszczone są na tablicach wzdłuż trasy, które umożliwiają indywidualne zwiedzanie rezerwatu. Konserwacja i prezentacja samej katedry stojącej nad relikwiami posiada zupełnie inną specyfikę konserwatorską.

3.3. Płock

Kolejnym przykładem nowych prezentacji odkrytych relikwii jest zespół zabytkowej dawnej kolegiaty pw. św. Michała Archanioła i budynek kolegium jezuickiego w Płocku. Ten ważny zabytek sakralnej architektury państwa piastowskiego to obecnie budynek kolegium i przebudowany gotycki kościół pełniący funkcję szkoły. Liceum kontynuuje wielowiekową tradycję edukacyjną, znaną już z XIV wieku i rozwijaną przez jezuitów od XVII wieku. W związku z tą funkcją przez wieki zespół architektoniczny wraz z kościołem był często przebudowywany i rozbudowywany. Od drugiej połowy XX wieku w związku z pracami budowlanymi obiekt został szeroko przebadany i analizowany historycznie, a każde prace przynosiły nowe wyniki.

the 14th century and evolving under the Jesuits since the 17th century. Over the centuries, the function performed by the architectural ensemble and the church resulted in their frequent redevelopments and extensions. Since the second half of the 20th century, extensive research and historical analyses have accompanied the redevelopment works in the ensemble. Each research programme has brought new results.

In the 1960s and 1970s, extension works were conducted in the Płock school complex. They gave the buildings their present shape. In the course of the works, a large-scale architectural and archaeological research programme was carried out in the historical ensemble [20]. The idea of the first *in-situ* exhibitions of relics in this object emerged in 1968, following Andrzej Tomaszewski's discovery of the remains of a Romanesque chancel with decorative elements [21, 22]. The first exhibition comprised the preserved chancel as well as the relics of Romanesque vaults and windows. The design of the exhibition required the lowering of the room, and this in turn entailed the dismantling of the vaults of the Jesuit crypts built later. In the recent studies, the lower parts of crypts and some unidentified relics of a medieval church with numerous graves were found [23, p. 377].

The relics displayed at the exhibition created in the 1970s were available to the public till 2012. In November, 2012, a preservation and restoration project, conditioned by the new function, was introduced, and renewal works started as part of the redevelopment programme taking place in the ensemble. Owing to the redevelopment and research works conducted simultaneously, new discoveries were made, which influenced the existing *in-situ* exhibition. The renewal project introduced in 2012 put forward retaining the original exhibition room of the former college, now the Stanisław Małachowski Secondary School. It assumed carrying out simple preservation and restoration activities in order to display the precious relics in a more attractive way, improving the technical condition of the floor structure as well as laying damp proof courses. The construction works revealed that the underground part of the former collegiate church not examined so far held a big burial ground, which was located both inside the Medieval church and around it. The design drawn up under the supervision of an architect Małgorzata Pastewka on the basis of the previous research results had to be changed after the new facts had come out.

Despite the results of a debate on the scope of the future exhibition, emphasising the threats, the most extensive exhibition of the relics was decided upon (Fig.

W latach 60. i 70. XX wieku przeprowadzono rozbudowę zespołu płockiej szkoły do współczesnego kształtu. W trakcie tych działań na zabytkowym zespole (na budynkach) podjęto kompleksowe badania architektoniczne i archeologiczne [20]. Idea pierwszej prezentacji relikwii *in situ* w tym obiekcie pojawiła się w 1968 roku po odkryciu przez Andrzeja Tomaszewskiego pozostałości romańskiego prezbiterium z dekoracją [21, 22]. Pierwszą prezentację urządzono z ekspozycją zachowanego prezbiterium, pokazano także relikty romańskich sklepień i okien. Do projektu tej ekspozycji konieczne było obniżenie pomieszczenia, a to pociągnęło za sobą likwidację późniejszych sklepień jezuickich krypt. W trakcie ostatnich badań okazało się, że zachowały się dolne partie krypt oraz nierozpoznane relikty średniowiecznego kościoła, pomiędzy którymi znalezione zostały liczne pochówki [23, s. 377].

Wykonaną w latach 70. poprzedniego stulecia ekspozycję i prezentowane w niej relikty można było oglądać do 2012 roku. W listopadzie tego roku przystąpiono do prac rewitalizacyjnych wraz z projektem konserwatorskim w związku z nową funkcją i remontem zespołu. Dzięki działaniom budowlanym i prowadzonych w ich trakcie pracom badawczym dokonano nowych odkryć, mających także wpływ na istniejącą ekspozycję *in situ*. W ramach podjętego w 2012 roku projektu rewitalizacji tego zabytku, projektant zaproponował utrzymanie pierwotnej sali ekspozycyjnej dawnego kolegium, obecnie I Liceum im. Stanisława Małachowskiego. Jedynie przewidywano wykonanie prostych zabiegów konserwatorskich, mających lepiej ekspozować te cenne relikty, oraz poprawienie stanu technicznego konstrukcji posadzki i wykonanie izolacji przeciwwilgociowej. W trakcie prac budowlanych okazało się, że niebadana dotychczas podziemna część dawnej kolegiaty to jedno wielkie cmentarzysko znajdujące się we wnętrzu średniowiecznego kościoła, jak i dookoła niego. Sporządzony na podstawie dotychczasowych wyników badań projekt, opracowany pod kierunkiem architekt Małgorzaty Pastewki, musiał ulec zmianie.

Mimo dyskusji nad zakresem przyszłej ekspozycji, która wskazała zagrożenia, zdecydowano się na maksymalną prezentację relikwii (rys. 6). Relikty zostały zabezpieczone. Okazało się, iż ambicja lokalnych władz, by wykonana ekspozycja archeologiczna godnie prezentowała średniowieczne zabytki miasta, natrafiła na wiele przeciwności. Z jednej strony wymuszały one dodatkowe zakresy prac,

6). The relics were secured and preserved. It turned out that the ambitious target of the local authorities to host an archaeological exhibition displaying the Medieval heritage of the city with dignity encountered many contradictory problems. Solving the contradictions required a widening of the scope of works. This, however, meant an increase in costs, which, in turn, rendered an appropriate restoration approach impossible. The deadline for completing the project was an additional barrier that dictated the pace of the restoration works. The uncovering of the foundations of the Medieval church on both sides brought about hazard to the structure. This situation caused the top earth layer to get moist, which could significantly compromise the statics of the building. In order to strengthen the building, a special structure was prepared, which filled the church interiors with a concrete basin and covered some of its relics at the same time. The foundations of the building were insulated and a fragment of a feature exposure showing the original floor layer was preserved. A number of restoration works was conducted so as to strengthen the architectural relics. The exposition path received a new footbridge with railings. The specific width and length required by the regulations made the footbridge fill the church interiors almost completely. The provisions regulating access to an educational object for people with disabilities imposed formal conditions and responsibilities on the historical building. The sloping walkway winding in the church changed the character of its Medieval interiors entirely. There was no vision that would bring the architectural works down to a reasonable level. It turned out that the desire to exhibit the original relics transformed the historical building in a significant way [24].



Fig. 5. The exhibition in Gniezno [24]

Rys. 5. Wystawa w Gnieźnie [24]

z drugiej zaś zwiększające się koszty nie pozwalały na właściwe podejście konserwatorskie. Czas ukończenia projektu był dodatkową barierą narzucającą tempo pracom konserwatorskim. Obustronne odsłonięcie fundamentów średniowiecznego kościoła spowodowało stan konstrukcyjnego zagrożenia. Ta sytuacja wiązała się z zawilgoceniem górnej warstwy ziemnej, co w istotny sposób mogło zagrozić statyce budowli. W celu jej wzmocnienia wykonano specjalną konstrukcję, która wypełniła betonową niecką wewnątrz kościoła i tym samym zakryła część jego reliktyw. Fundamenty budynku zostały zaizolowane, zachowano fragment świadka ziemnego ukazującego warstwę pierwotnej posadzki. Przeprowadzono wiele prac konserwatorskich służących wzmocnieniu reliktyw architektonicznych. Zainstalowano nową kładkę z barierkami ścieżki ekspozycyjnej, która ze względu na swą wymaganą przepisami szerokość i długość wypełniła niemal całkowicie wewnątrz kościoła. Przepisy związane z dostępnością obiektu edukacyjnego przez osoby niepełnosprawne sprawiły, że przestrzeń ekspozycyjna musiała zostać podporządkowana formalnym uwarunkowaniom. Wijąca się w kościele wstęga nachylonego chodnika sprawiła, że średniowieczne wnętrze kościoła całkowicie zmieniło swój charakter. Zabrakło wizji, by działania architektoniczne ograniczyć do racjonalnego poziomu. Okazało się, że chęć eksponowania oryginalnych reliktyw zabytku zmieniła go w dość istotny sposób [24].



Fig. 6. The exhibition in Płock [20]

Rys. 6. Wystawa w Płocku [20]

4. The summary

Each of the examples presented above shows determining factors that can be encountered as well as construction and restoration problems that need to be solved. These are the dampening of the relics, salting out that devastates mortar and the construction material itself. The access of air and dampness level are excellent media for bacteria and algae, and their emergence can be called a biological attack. Applying appropriate biocides is not an easy task, as they have to be harmless both to the visitors and the historical architectural and archaeological relic. These restoration and construction issues are particularly evident in the case of archaeological heritage objects displayed on the ground floor or in the building basements, when both parts of a building need to interact with each other, and the exhibition of the relics enhances the attractiveness of the existing heritage item. Undermining the stability of the existing objects is another determinant. This frequently precludes displaying the relics *in situ* as an exhibition, because the weakened stability could compromise the safety of the public and might lead to the destruction of other objects.

4. Podsumowanie

Każdy z przedstawionych przykładów pokazuje uwarunkowania, na jakie można się napotkać, i problemy budowlano-konserwatorskie, które należy odpowiednio rozwiązać. Są to zawilgocenie reliktyw, wysolenia niszczące zaprawy i sam materiał budowlany. Dostęp powietrza i stan zawilgocenia to doskonała pożywka dla rozwoju bakterii i glonów, co można nazwać atakiem biologicznym. Stosowanie odpowiednich środków biobójczych, wcale nie jest rzeczą prostą, gdyż muszą być one nieszkodliwe dla zwiedzających i dla zabytku. Tego rodzaju problematyka konserwatorsko-budowlana jest szczególnie widoczna w przypadku zabytków archeologicznych prezentowanych w przyziemiu lub piwnicach budynków, kiedy to obie części budynku muszą ze sobą współgrać, a prezentacja reliktyw stanowi o dodatkowej atrakcyjności istniejącego zabytku. Dodatkowym problemem jest naruszenie stabilności istniejących obiektów. Uniemożliwia to często pokazanie reliktyw *in situ* w postaci ekspozycji, gdyż zagrażałoby to bezpieczeństwu zwiedzających oraz narażało na zniszczenie inne obiekty.

References

- [1] *Teoria i praktyka prezentacji reliktyw archeologiczno-architektonicznych*, Ed. Zb. Kobylński, E.M. Charowska i Ł. Kowalczyk, Archaeologica Hereditas, Warszawa – Zielona Góra 2016.
- [2] Rouba B.J.: *Autentyczność i integralność zabytków*. <<http://www.nid.pl/upload/iblock/19c/19cflf3005c3c71f2e0052ee43e22ffe.pdf>>
- [3] Kadłuczka A.: *Ochrona zabytków architektury. Zarys doktryny i teorii*, t. 1, Stowarzyszenie Konserwatorów Zabytków, Kraków 2000.
- [4] Terminology to characterize the conservation of tangible cultural heritage, 2008. Resolution adopted by the ICOM-CC membership at the 15th Triennial Conference, New Delhi, 22-26 September 2008.
- [5] Kobylński Z.: *Teoretyczne podstawy konserwacji dziedzictwa archeologicznego*, Warszawa 2001.
- [6] Karta ICOMOS-Australia w sprawie miejsc o znaczeniu kulturowym, 1999 r., poprawka Europejskiej Konwencji o ochronie Dziedzictwa Archeologicznego, La Valetta, 16.I.1992 r.
- [7] Wojdyła B., Winiarczyk M.: *Konserwacja zapobiegawcza – warsztaty toruńskie* (Toruń, 25-28 maja 2004 r.), pp. 219-224 [w:] *Trwałe zbiory – źródłem historii*, „Notes Konserwatorski” 9, Biblioteka narodowa Dział Warszawa 2005, (Trwałe zbiory – źródłem historii).
- [8] Chlebowska D., *Trwała ruina w Polsce koniecznym świadkiem historycznego krajobrazu*, pp. 76-83, [w:] „Wiadomości Konserwatorskie”, Stowarzyszenie Konsekratorów Zabytków, nr 16/2004.
- [9] *Konserwacja, wzmacnianie i modernizacja budowlanych obiektów historycznych i współczesnych*, Konferencja Naukowo-Techniczna, Politechnika Świętokrzyska, Wydział Budownictwo, Kielce, 22-23 luty 2001.
- [10] Kuśnierz-Krupa D., Krupa M.: *Współczesne sposoby rewitalizacji i adaptacji ruin obiektów sakralnych w Europie (na wybranych przykładach)*, pp. 48-52 [w:] „Wiadomości Konserwatorskie”, Stowarzyszenie Konsekratorów Zabytków, nr 20/2006.
- [11] Łużniecka E.: *Ochrona wartości zabytkowych w adaptacjach architektury sakralnej*, pp. 171-182 [w:] *Ochrona wartości w procesie adaptacji zabytków*, Polski Komitet Narodowy ICOMOS, Muzeum Pałac w Wilanowie, Politechnika Lubelska, Warszawa 2015.
- [12] Doroz-Turek M.: *Wartość SACRUM w wybranych adaptacjach zdesakralizowanych kościołów i założeń klasztornych*, pp. 84-103 [w:] *Ochrona wartości w procesie adaptacji zabytków*, Polski Komitet Narodowy ICOMOS, Muzeum Pałac w Wilanowie, Politechnika Lubelska, Warszawa 2015.

- [13] Doroz-Turek M.: *Post-War Restoration of Churches and Sacral Buildings in Poland*, pp. 72-82 [w:] Post-War restoration of monuments. Theory and practice of the 20th Century, Proc of Conf. Międzynarodowej Konferencji z 4-5 grudnia 2014 r. w St. Petersburgu, Rosja.
- [14] <<https://wawel.krakow.pl/pl/druk.php?op=25>>
- [15] <<http://wawel.krakow.pl/pl/op/25/Badania-archeologiczne-i-nbsp-architektoniczne>>
- [16] Kukliński A.: *Wczesnośredniowieczne warstwy osadnicze Krakowa-Wawelu (odkryte w wykopie 1C, rejon IX), a relikty jego wału obronnego datowanego dendrochronologicznie na okres po 1016 roku*, pp. 277-292 [w:] „Sprawozdania Archeologiczne”, t. 50, Kraków 1998.
- [17] Stępień P.: *Problemy konserwatorskie rezerwatów archeologiczno-architektonicznych Wawelu*, pp. 39-45 [w:] „Ochrona Zabytków” 48/1 (188), 1995.
- [18] <<http://wawel.krakow.pl/pl/op/49/Wawel-Zaginiony>>
- [19] Stępień P.M.: *Konserwacja zespołu zabudowy Wzgórza Wawelskiego po roku 1990*, pp. 105-119 [in:] PILIU RESTAURAVIMO PATIRTIS / PROBLEMOS IR SVARSTYMAI, Lietuvos Pilys 2007; <http://www.lad.lt/data/com_ladlibrary/824/105-119.pdf>
- [20] <http://www.plock.eu/pl/liceum_ogolnoksztalcace_im_marszalka_stanislaw_a_malachowskiego__dawna_kolegiata_sw_michala_archaniola.html>
- [21] Tomaszewski A.: *Dawna kolegiata św. Michała w Płocku. Studium konserwatorskie*, mps w archiwum Konserwatora Zabytków w Płocku, Płock 1968.
- [22] Tomaszewski A.: Romańskie kościoły z emporami zachodnimi na obszarze Polski, Czech i Węgier, Wrocław 1974; Tomaszewski Andrzej, *Pradzieje architektury płockiej*, pp. 75-88 [w:] „Małachowianki”, R. 6, nr 11, 1998.
- [23] Barański M.: *Nowe odkrycia w zabytkowej kolegiacie pw. św. Michała Archaniola w Płocku*, pp. 373-399 [w:] *Architektura sakralna w początkach państwa polskiego (X-XIII w.)*, Ed. Tomasz Janiak, Dariusz Stryniak, Gniezno 2016.
- [24] <<http://www.mops.gniezno.pl/strona/aktualnoci-othersmenu-49/177-zwiedzanie-katedry-przez-dzieci.html>>

PRZEMYSŁAW CZAPIK

Kielce University of Technology

e-mail: p.czapik@tu.kielce.pl

MACIEJ CZECHOWICZ

SPS Construction Sp. z o.o.

e-mail: m.czechowicz@spsconstruction.pl

EFFECTS OF NATURAL ZEOLITE PARTICLE SIZE ON THE CEMENT PASTE PROPERTIES

WPŁYW ROZDROBNIENIA ZEOLITU NATURALNEGO NA WŁAŚCIWOŚCI ZAPRAWY CEMENTOWEJ

Abstract

This paper reports the test results of the Transcarpathian zeolite grain size on the cement-zeolite pastes properties. Materials used in this study included CEM I 42.5R and the zeolite chiefly composed of clinoptilolite. Tests were performed to determine the setting times, hydration kinetics and phase composition of pastes, and the consistency and compressive strength of mortars. It was demonstrated that the degree of fineness of zeolite had a significant effect on its pozzolanic properties, thereby affecting the properties of mortars. Depending on the zeolite gradation, the compressive strength of mortars can increase or decrease. Likewise, the zeolite fineness can contribute to higher or lower flowability of mortars compared to the mortars without the mineral additive.

Keywords: Pozzolans, Zeolite, Mortar, Cement Paste

Streszczenie

W pracy zaprezentowano wyniki badań wpływu rozdrobnienia zeolitu zakarpaciego na właściwości zaprawy cementowo-zeolitowej. W badaniach użyto dostępnego na polskim rynku cementu CEM I 42,5R oraz zeolitu, który w głównej mierze składał się z klinoptilolitu. Przeprowadzono badania czasu wiązania, kinetyki hydratacji i składu fazowego w zaczynie oraz badania konsystencji i wytrzymałości na ściskanie zapraw. Stwierdzono, że rozdrobnienie zeolitu ma istotny wpływ na jego właściwości pucolanowe, a przez to i na właściwości zaprawy. W zależności od uziarnienia zeolitu wytrzymałość na ściskanie zapraw może rosnąć lub maleć. Podobnie z uwagi na rozdrobnienie zeolitu płynność zaprawy może być mniejsza lub większa od płynności zaprawy bez dodatku mineralnego.

Słowa kluczowe: pucolany, zeolity, zaprawa, zaczyn cementowy

1. Introduction

One of the key issues in cement-based composite technology is the use of additives [1, 5, 6, 13, 15, 21]. Mineral additives reduce the demand for costly clinker, while at the same time lowering CO₂ emissions, and improve the properties of concrete. Materials commonly used as mineral additions include pozzolanic additives, such as fly ash and silica fumes or naturally occurring products of geological processes, such as natural zeolites

1. Wprowadzenie

W technologii kompozytów cementowych jedną z istotnych kwestii jest stosowanie dodatków mineralnych [1, 5, 6, 13, 15, 21]. Pozwala to nie tylko ograniczyć zużycie drogiego klinkieru, którego produkcja wiąże się z emisją znacznych ilości CO₂ do atmosfery, ale również na uzyskanie betonu o korzystniejszych właściwościach. Szeroko wykorzystywaną grupę dodatków mineralnych stanowią pucolany. Zalicza się do nich popioły lotne czy pyły krzemionkowe, ale rów-

[1, 6, 13, 21]. All of them are capable of reacting with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ present in the cement paste to form, as in the cement hydration, silicate and aluminate compounds denoted as the C-A-S-H phase. The pozzolanic reaction contributes to the improvement of cement composites in terms of e.g. compressive strength and permeability. For the reaction to occur, the mineral additive has to contain a considerable amount of silica with adequate reactivity. Owing to their chemical and physical properties, the pozzolanic materials can have different chemical activity, which affects their suitability as mineral additives. In addition to the content of reactive silica, other factors instrumental for their use include particle size and specific surface area [4, 7, 9-12, 20].

Decreasing zeolite particle size increases the surface area available for potential chemical reactions [2]. Both a large quantity of defects on surface and the high surface energy of the finer material increase, thereby increasing its chemical reactivity. This explains why nonreactive β -quartz in a very fine crystalline form can act like a pozzolanic additive [3, 19]. The crushing and grinding of materials lead to various deformations of their surfaces, which also may result in enhanced reactivity of the surface zone. For example, crushing or polishing may produce an amorphous surface layer called the Beilby layer [3]. It can thus be stated that the use of mineral additives of increased fineness can contribute to the improvement of cement-based composite's properties [4, 7, 9-12, 19].

The focus of this paper is on how the increased fineness of the Transcarpathian natural zeolite, available on the Polish market as an addition to concrete, affects the properties of cement-zeolite pastes and mortars. The primary objective of this study was to demonstrate whether and to what extent the zeolite grinding fineness changes the mechanical properties of mortars. The effect of grinding fineness on pozzolanic properties and consistency of the zeolite was also checked.

2. Materials and methods

A clinoptilolite-rich (84%) natural zeolite from the Transcarpathian Region (Ukraine) was selected for this study. Table 1 compiles the chemical composition of the zeolite and cement CEM I 42.5R. The mortars were made with sand certified in accordance with PN EN 196-1 [23].

niez materiały naturalne powstałe na skutek procesów geologicznych, na przykład zeolity naturalne [1, 5, 6, 13, 21]. Ich wspólną cechą jest zdolność do wchodzenia, w środowisku zaczynu cementowego, w reakcje z obecnym w nim $\text{Ca}(\text{OH})_2$, w wyniku czego powstają, podobnie jak w reakcji hydratacji cementu, związki krzemianów i glinianów wapnia, określane mianem fazy C-A-S-H. Dzięki temu otrzymywane kompozyty cementowe mogą wykazywać lepsze właściwości, m.in. wysoką wytrzymałość na ściskanie czy szczelność. Aby reakcja ta mogła zajść, zastosowany dodatek mineralny musi zawierać znaczną ilość krzemionki o odpowiedniej aktywności chemicznej. Materiały pucolanowe, ze względu na swoje właściwości chemiczne i fizyczne, mogą wykazywać różną aktywność chemiczną, co rzutuje na ich przydatność jako dodatków mineralnych. Prócz zawartości reaktywnej krzemionki, za istotny czynnik uważa się uziarnienie i powierzchnię właściwą [4, 7, 9-12, 20].

Wraz ze wzrostem rozdrobnienia zwiększeniu ulega powierzchnia, na której może dochodzić do potencjalnych reakcji chemicznych [2]. Większe jest też jej zdefektowanie, a więc i energia powierzchniowa bardziej rozdrobnionego materiału, który łatwiej wchodzi w reakcje chemiczne. Tym też można tłumaczyć fakt, że normalnie niereaktywny β -kwarc w formie bardzo drobnokrystalicznej może w betonie działać jak dodatek pucolanowy [3, 19]. Podczas kruszenia i mielenia materiałów ich powierzchnia ulega różnym deformacjom, które również mogą skutkować zwiększeniem reaktywności strefy powierzchniowej. Przykładowo, podczas kruszenia lub polerowania może się wytwarzać warstwa zamorfizowanego materiału, zwana warstwą Beilby [3]. Tym samym można twierdzić, że stosowanie dodatków mineralnych o większym rozdrobnieniu może przyczynić się do uzyskania kompozytu cementowego o lepszych właściwościach [4, 7, 9-12, 19].

W pracy zbadano, w jaki sposób wzrost rozdrobnienia naturalnego zeolitu zakarpaciego, dostępnego na polskim rynku jako dodatku do betonu, wpływa na właściwości zaczynów i zapraw cementowo-zeolitowych, czy i w jakim stopniu rozdrobnienie zeolitu wpływa na właściwości mechaniczne zaprawy, zbadano również wpływ rozdrobnienia zeolitu na jego właściwości pucolanowe oraz na konsystencję.

2. Materiały i metody badań

W badaniach zastosowano naturalny zeolit, pochodzący z rejonu Zakarpacia na Ukrainie, który zawiera w swym składzie 84% klinoptilolitu. Skład chemiczny stosowanego zeolitu i cementu CEM I 42,5R

Table 1. Chemical compositions of cement and zeolite [%]

Tabela 1. Skład chemiczny cementu i zeolitu [%]

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅
Cement	18.66	5.43	2.96	62.00	1.46	3.21	0.95	0.20	0.07	–	–	–
Zeolite	67.07	12.40	0.90	2.09	0.72	–	2.80	2.05	–	0.19	0.04	0.014

Cement and zeolite particle size analysis was accomplished with the laser diffraction method (Fig. 1). The results indicated that the cement grains were in the range 0÷0.250 mm and the zeolite was in the range 0÷0.500 mm. It can thus be concluded that the zeolite provides the coarser fraction to the paste matrix. Its fractions are distributed in a more uniform manner. In the 0 to 0.125 mm range, zeolite has more finer fractions than cement.

przedstawiono w tabeli 1. Do sporządzenia zapraw wykorzystano piasek normowy posiadający certyfikat zgodności z normą PN EN 196-1 [22].

Uziarnienie cementu i zeolitu zostało określone metodą dyfrakcji laserowej (rys. 1). W wyniku tych analiz stwierdzono, że użyty cement składał się z ziaren frakcji 0÷0,250 mm, a zeolit z frakcji 0÷0,500 mm. Tym samym można stwierdzić, że zeolit dostarcza frakcji „grubszej” do matrycy zaczynu. W przypadku zeolitu,

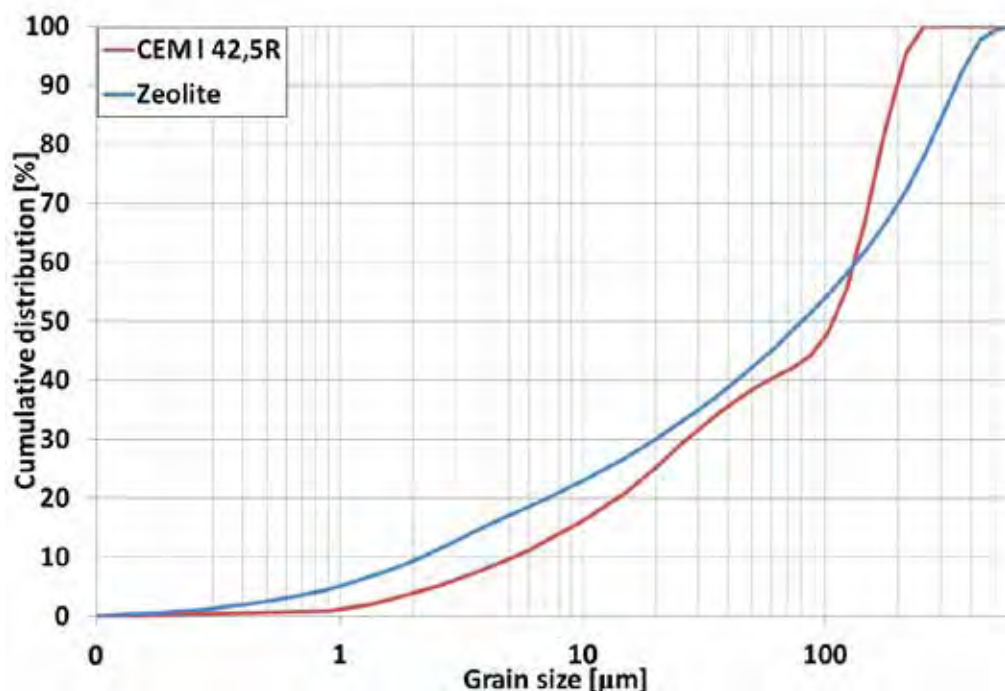


Fig. 1. Cement and zeolite grain size distribution

Rys. 1. Rozkład uziarnienia cementu i zeolitu

Three aliquots of zeolite were used to make the binders for pastes and mortars. The first of them was used in an unchanged form. The other two were ground to the size passing 0.125 mm and 0.063 mm sieves, respectively. In this way three zeolite fractions were obtained: 0÷0.500; 0÷0.125 and 0÷0.063 mm. Four binders (Table 2) were made with these zeolites. Further in the article, the denotation of the pastes and mortars is the same as that used for the binders in their composition.

rozkład jego poszczególnych frakcji jest bardziej równomierny. W przedziale od 0 mm do 0,125 mm, zeolit posiada więcej frakcji drobniejszych niż cement.

W celu sporządzenia spoiw przeznaczonych do wykonania zaczynów i zapraw pobrano trzy naważki zeolitu. Pierwszą z nich stosowano w postaci niezmięnionej. Kolejne dwie poddano procesowi miedlenia, tak by w całości dało się je przesiać odpowiednio przez sito 0,125 i 0,063 mm. Tym samym uzyskano trzy frakcje zeolitu: 0÷0,500; 0÷0,125 i 0÷0,063 mm.

The pastes with water-binder ratio $w/b = 0.5$ produced from the binders described in Table 2 were used to determine the effect of zeolite on the cement setting process. To do this, cement setting times were tested in accordance with PN-EN 196-3 [24]. The hydration kinetics information was obtained with the use of a microcalorimetry method and the paste phase changes were assessed using X-ray diffraction. The microcalorimetric and phase composition studies also were conducted on the pastes with $w/b = 0.5$. To stop the hydration reaction, the paste was mixed with acetone during the grinding process that causes the excess acetone to evaporate. The phase composition tests were performed at 3, 14 and 28 days of curing.

Wykorzystując je, wykonano cztery spoiwa, których receptury przedstawiono w tabeli 2. W dalszej części pracy obejmującej wyniki badań, oznaczenia zaczynów i zapraw były tożsame z oznaczeniami spoiw wykorzystanych do ich sporządzenia.

Zaczyny o $w/s = 0,5$, wykonane z opisanych spoiw, posłużyły do określenia wpływu zeolitu na proces wiązania cementu. W tym celu przeprowadzono badanie czasu wiązania zgodnie z normą PN-EN 196-3 [24], a ponadto prześledzono kinetykę hydratacji metodą mikrokalorymetryczną oraz dokonujące się przemiany fazowe zaczynu metodą dyfraktometrii rentgenowskiej. Badanie mikrokalorymetryczne i składu fazowego przeprowadzono na zaczynach o $w/s = 0,5$. Hydratację zatrzymywano, rozcierając zaczyn z acetonem i odparowując nadmiar acetonu podczas mielenia. Badania składu fazowego wykonano po 3, 14 i 28 dniach dojrzewania.

Table 2. Composition of binders in pastes and mortars [% by mass]

Tabela 2. Skład spoiw w zaczynach i zaprawach [% masowy]

Binder	Cement	Zeolite 0÷0.500 mm	Zeolite 0÷0.125 mm	Zeolite 0÷0.063 mm
I	100	0	0	0
II	80	20	0	0
III	80	0	20	0
IV	80	0	0	20

The effect of zeolite on the consistency and bending and compressive strengths was determined on mortars with a $w/b = 0.5$. The consistency test was performed in compliance with the requirements of PN-EN 12350-5 [25], and the strength parameters were determined to PN-EN 196-1 [23]. The compressive strength was determined on $4 \times 4 \times 16$ cm bars stored in water at 20°C until testing.

Wpływ dodatku zeolitu na konsystencję oraz na wytrzymałości na zginanie i ściskanie określono na zaprawach o $w/s = 0,5$. Badanie konsystencji przeprowadzono zgodnie z wytycznymi normy PN-EN 12350-5 [25], a badania parametrów wytrzymałościowych zgodnie z PN-EN 196-1 [23]. Wytrzymałość na ściskanie określono na beleczkach $4 \times 4 \times 16$ cm, które od rozformowania do chwili badania przechowywano w wodzie o temperaturze 20°C.

3. Test results

3.1. Paste properties tests

Analysis of the setting times of each paste (Table 3) indicates that cement replacement with natural zeolite extends the period after which the paste starts to set. This difference decreases with increasing fineness of the zeolite.

The results for the kinetics of hydration studied by the microcalorimetric method (Fig. 2) indicate that, in contrast to the previous test results, the addition of zeolite may accelerate cement hydration. This inference from the fact that zeolite added to the cement shortens the period of induction during which

3. Wyniki badań

3.1. Badania właściwości zaczynów

Analizując wyniki czasu wiązania zaczynów (tab. 3) stwierdzono, że zastępowanie cementu dodatkiem zeolitu naturalnego powoduje wydłużenie okresu, po którym zaczyn zaczyna wiązać. Jednakże wraz z wzrostem rozdrobnienia zeolitu różnica ta zmniejsza się.

Na podstawie wyników badań kinetyki hydratacji metodą mikrokalorymetryczną (rys. 2) można stwierdzić, w przeciwieństwie do poprzedniego badania, że dodatek zeolitu może przyspieszyć hydratację cementu. Powoduje on bowiem skrócenie czasu, po którym kończy się etap indukcji, w którym reakcje

Table 3. Comparison of change times [min] in pastes (notation as in Table 2)

Tabela 3. Porównanie czasów zachodzenie przemian w zaczynach [min] (oznaczenia próbek jak w tabeli 2)

Paste	I	II	III	IV
Initial setting time	246	264	257	251
End of induction period	270	220	185	185
Maximum heat release during the reaction acceleration period	775	780	720	720
Maximum additional peak of heat release in time period between the initial and final set	–	2265	2000	1800

hydration reactions are slower [6, 14]. Also, in this period more heat is released in cement-zeolite pastes compared to cement pastes without mineral additives. This indicates higher intensity of chemical reactions during the induction period in cement-zeolite pastes, which may be due to the fact that cement hydration products can be adsorbed or can form on the surface of mineral additive particles (nucleation effect) [14]. In the zeolite case, this is facilitated by their large specific surface resulting from the loose, nanoporous structure [1].

With zeolite added, the main heat release peak is lower in the hydration acceleration period. However, similarly to the onset of setting time, this difference is smaller for cement pastes made with finer zeolite grains. At this stage, it is impossible to tell the difference between the calorimetry curve for $0 \div 0.125$ zeolite fraction and that for $0 \div 0.063$ mm fraction. Both fractions have the same effect on the kinetics of heat release.

In contrast to the cement paste curves, the microcalorimetry curves of cement-zeolite pastes show a third peak between 20 and 55 hydration hours (the distinguishing hump). The finer the zeolite, the earlier the peak occurs and the shorter it lasts. Only due to the presence of this effect, a significant hydration kinetics difference between zeolite fractions $0 \div 0.125$ and $0 \div 0.063$ mm can be identified on the calorimetry curves. The extra peak (hump) is attributed to the formation of aluminate products as a result of the hydration of aluminium from zeolite [6]. This phenomenon corresponds with that observed during the hydration of cement-based pastes containing ground granulated blast furnace slag [22].

Figures 3, 4 and 5 show diffractograms of the pastes at 3, 14 and 28 days of hydration. The range of 2θ values shown includes pronounced peaks characteristic of the cement phases, non-hydrated clinker phases and minerals contained in the additive used: clinoptilolite and quartz [17, 18].

hydratacji są spowolnione [6, 14]. Ponadto w przypadku stosowania dodatku zeolitu w etapie indukcji odnotowuje się większe wydzielanie ciepła niż w przypadku zaczynu cementowego bez dodatku mineralnego. Świadczy to o tym, że w zaczynach cementowo-zeolitowych reakcje chemiczne zachodzą na tym etapie z większą intensywnością. Tłumaczyć to można tym, że produkty hydratacji cementu mogą być adsorbowane i/lub powstawać na powierzchni ziaren dodatku mineralnego (efekt nukleacji) [14]. W przypadku zeolitów jest to szczególnie ułatwione, ze względu na ich dużą powierzchnię właściwą wynikającą z luźnej, nanoporowatej struktury [1].

W okresie przyspieszenia reakcji hydratacji główny pik wydzielania ciepła, w przypadku zastosowania dodatku zeolitu, jest niższy. Jednakże, podobnie jak w przypadku początku czasu wiązania, różnica ta jest mniejsza dla zaczynów sporządzanych z zeolitu o drobniejszym uziarnieniu. Nie da się w tym etapie rozróżnić od siebie krzywe kalorymetryczne uzyskiwane dla frakcji $0 \div 0,125$ i $0 \div 0,063$ mm. Obydwie wymienione frakcje zeolitu wpływają w taki sam sposób na kinetykę wydzielania ciepła.

Na krzywych mikrokalorymetrycznych zaczynów z dodatkiem zeolitu, w przeciwieństwie do zaczynu cementowego obserwowany jest trzeci pik pomiędzy 20 a 55 godziną hydratacji (ma on kształt wyróżniającego garbu). Występuje on tym wcześniej i trwa tym krócej, im zeolit jest bardziej rozdrobniony. Tylko ze względu na obecność tego efektu, na krzywych kalorymetrycznych można stwierdzić istotną różnicę kinetyki hydratacji pomiędzy zeolitem frakcji $0 \div 0,125$ i $0 \div 0,063$ mm. Ten dodatkowy pik (garb) wynika z reakcji powstawania produktów glinianowych wskutek uwadniania glinu z zeolitu [6]. Jest to zjawisko analogiczne z obserwowanym podczas hydratacji zaczynów na bazie cementów zawierających granulowany żużel wielkopiecowy [22].

Na rysunkach 3, 4 i 5 przedstawiono dyfraktogramy uzyskane dla zaczynów badanych po 3, 14 i 28 dniach hydratacji. W przedstawionym zakresie kątów 2θ wi-

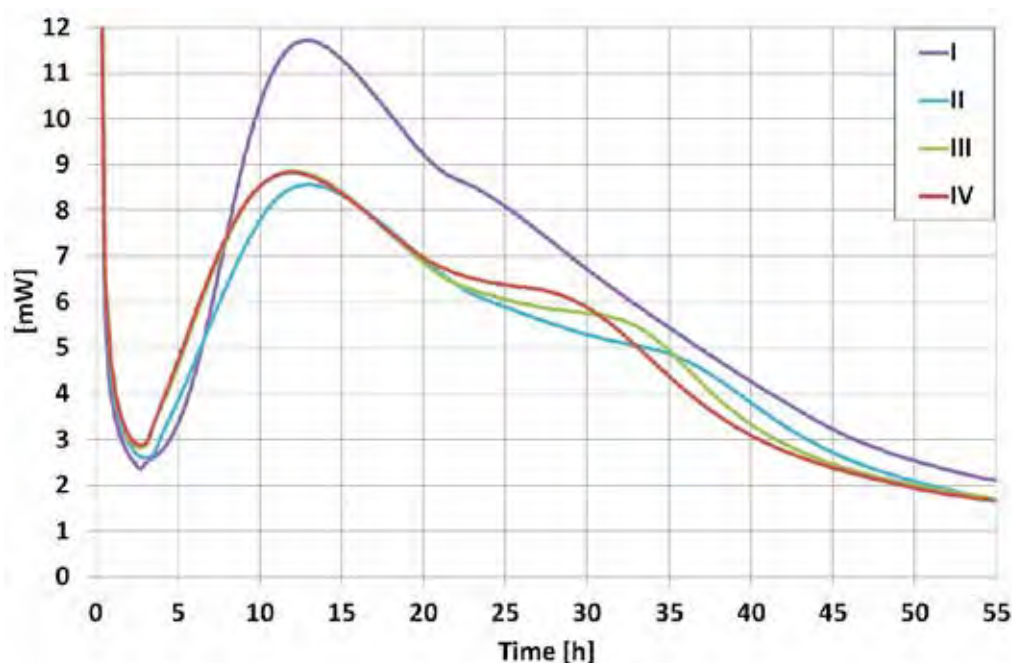


Fig. 2. The heat evolution curves of cement-zeolite mixtures (notation as in Table 2)

Rys. 2. Krzywe wydzielania ciepła zaczynów cementowo-zeolitowych (oznaczenia próbek jak w tabeli 2)

In all cases, the most intense peaks were recorded for portlandite ($2\theta = 18.089^\circ$ and 34.089°). Their intensity was rising from day 14 of hydration, followed by a decrease. This would be explained by the fact that the portlandite forming from the hydration of alite and belite transforms through carbonation into calcite and, if the paste contains a pozzolanic additive, into the C-S-H phase through the pozzolanic reaction [1, 6, 13, 16]. Hydration of calcium silicates is confirmed by the disappearance of their peaks over time. This is seen particularly for alite peaks ($2\theta = 34.377^\circ$) and for the peaks common to alite and belite ($2\theta = 32\div 33^\circ$). With other alite peaks fading, the one for $2\theta = 29.400^\circ$ remains nearly unchanged, which can be attributed to the formation of calcite, which at this point has the most pronounced peak.

Less pronounced portlandite peaks observed in the cement-zeolite pastes are the result of the pozzolanic reaction and lower content of clinker containing alite and belite. The lower clinker content can also explain less intense peaks of ettringite in pastes III and IV.

doczne są refleksy charakterystyczne dla faz cementowych, niezhydratyzowanych faz klinkierowych oraz minerałów wchodzących w skład stosowanego dodatku mineralnego: klinoptylolitu i kwarcu [17, 18]. We wszystkich przypadkach najintensywniejsze refleksy wykazał portlandyt (o kącie $2\theta = 18,089^\circ$ i $34,089^\circ$). Jego intensywność zwiększała się do 14 dnia hydratacji, po czym nastąpił jej spadek. Tłumaczyć to można tym, że z czasem portlandyt, powstający w wyniku hydratacji alitu i belitu, przeobraża się w procesie karbonatyzacji w kalcyt, a gdy w zaczynie obecny jest dodatek pucolanowy, w fazę C-S-H w wyniku reakcji pucolanowej [1, 6, 13, 16]. O hydratacji krzemianów wapnia świadczy to, że ich refleksy na dyfraktogramach z czasem zanikają, co jest widoczne szczególnie dla refleksu od alitu ($2\theta = 34,377^\circ$) i w obszarze refleksów wspólnych dla alitu i belitu ($2\theta = 32\div 33^\circ$). Przy zaniku innych refleksów od alitu, prawie niezmienny pozostaje refleks dla kąta $2\theta = 29,400^\circ$, co tłumaczyć można powstawaniem w wyniku karbonatyzacji kalcytu, który w tym miejscu ma najintensywniejszy refleks.

Reakcją pucolanową portlandytu oraz mniejszą zawartością klinkieru, w którym zawarte są alit i belit, można tłumaczyć fakt, że w zaczynach z dodatkiem zeolitu stwierdzono mniej intensywne refleksy portlandytu niż w zaczynie na bazie cementu portlandzkiego bez tego dodatku. Mniejszą zawartością klinkieru można też tłumaczyć mniej intensywne refleksy ettringitu w zaczynach III i IV.

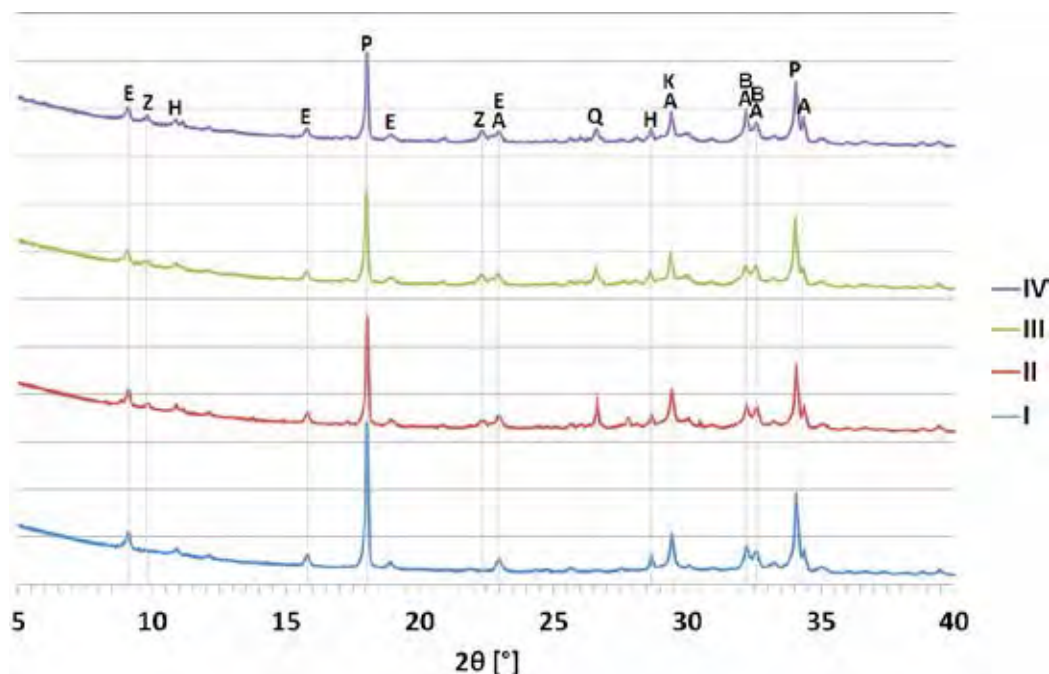


Fig. 3. XRD patterns of pastes after 3 days of hydration: A – alite, B – belite, E – ettringite, H – hydrated calcium silicates and aluminosilicates, K – calcite, P – portlandite, Q – quartz, Z – clinoptilolite (notation as in Table 2)

Rys. 3. Dyfraktogramy zaczynów po 3 dniach hydratacji: A – alit, B – belit, E – ettringit, H – uwodnione krzemiany, i glinokrzemiany wapnia, K – kalcyt, P – portlandyt, Q – kwarc, Z – klinoptilolit (oznaczenia próbek jak w tabeli 2)

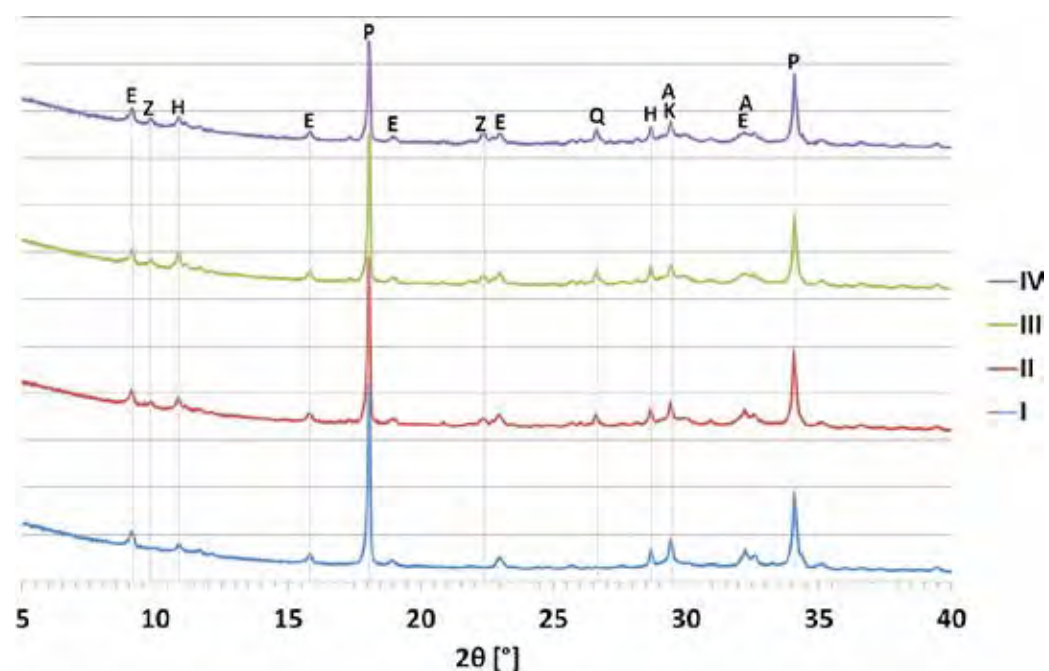


Fig. 4. XRD patterns of pastes after 14 days of hydration: A – alite, E – ettringite, H – hydrated calcium silicates and aluminosilicates, K – calcite, P – portlandite, Q – quartz, Z – clinoptilolite (notation as in Table 2)

Rys. 4. Dyfraktogramy zaczynów po 14 dniach hydratacji: A – alit, E – ettringit, H – uwodnione krzemiany, i glinokrzemiany wapnia, K – kalcyt, P – portlandyt, Q – kwarc, Z – klinoptilolit (oznaczenia próbek jak w tabeli 2)

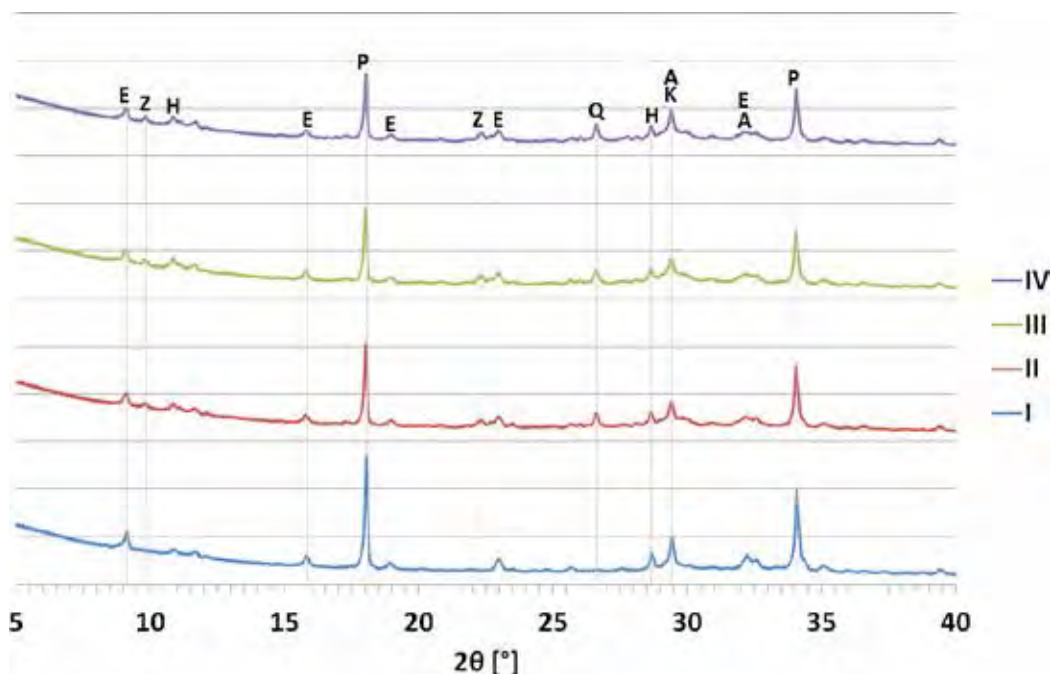


Fig. 5. XRD patterns of pastes after 28 days of hydration: A – alite, E – ettringite, H – hydrated silicates and aluminates of calcium, K – calcite, P – portlandite, Q – quartz, Z – clinoptilolite (notation as in Table 2)

Rys. 5. Dyfraktogramy zaczynów po 28 dniach hydratacji: A – alit, E – ettringit, H – uwodnione krzemiany i glinokrzemiany wapnia, K – kalcyt, P – portlandyt, Q – kwarc, Z – klinoptilolit (oznaczenia próbek jak w tabeli 2)

The intensity of portlandite peaks also varied with zeolite fineness in the cement-zeolite pastes. It decreased with decreasing size of zeolite grain. This was due to the fact that with finer zeolite, the pozzolanic reaction is more intense and does not allow the formation of larger amount of portlandite.

3.2. Tests of mortar properties

The results of the tests to determine the effect of zeolite on the consistency of mortars are illustrated in Figure 6. Zeolite addition to mortars II and III noticeably reduces fluidity by lowering the flow by 12 and 5%, respectively, due to high porosity-related water demand of zeolites [1, 8, 21]. When the finest zeolite powders were used, $0 \div 0.063$, the flow increased by 1%. This could be explained by the occurrence of a “ball-bearing effect” [4, 20], when small zeolite particles reduce internal friction in fresh mortars. It is important to remember that high fineness of zeolite contributes to the exposure of surfaces closed within the coarser grains, the surfaces that were already partially accessible and affected water demand. Thus the fineness-related water demand change may turn out to be less significant.

Figure 7 illustrates the results of the tests to determine the effect of zeolite addition on the compressive strength of mortars at 28 days. It follows

Pomiędzy zaczynami, w których zastosowano zeolit o różnym uziarnieniu, również stwierdzono różnice w intensywności refleksów pochodzących od portlandytu. Były one tym mniejsze, im zeolit posiadał drobniejsze uziarnienie. Fakt ten może być tłumaczony tym, że przy zastosowaniu bardziej rozdrobnionego zeolitu, reakcja pucolanowa zachodzi intensywniej i nie pozwala na wytworzenie się w zaczynie większych ilości portlandytu.

3.2. Badania właściwości zapraw

Wyniki badań wpływu dodatku zeolitu na konsystencję zapraw przedstawiono na rysunku 6. W przypadku zastosowania dodatku zeolitu do zaprawy II i III, zmniejsza się wyraźnie płynność, ograniczając rozływ o odpowiednio 12% i 5%, co spowodowane jest znaczną wodożądnością zeolitu, wynikającą z porowatości [1, 8, 21]. W przypadku zastosowania zeolitu o najdrobniejszym uziarnieniu $0 \div 0,063$, rozływ zaprawy uległ ok. 1% zwiększeniu. Tłumaczyć to można wystąpieniem efektu „łożyska” [4, 20], w którym małe ziarna zeolitu zmniejszają tarcie wewnętrzne w świeżej zaprawie. Należy pamiętać, że rozdrobnienie zeolitu przyczynia się do odsłonięcia powierzchni zamkniętej w obrębie większych ziarn, która i tak była częściowo dostępna „z zewnątrz”, i wpływała na wodożądność. Tak więc zmiana wodo-

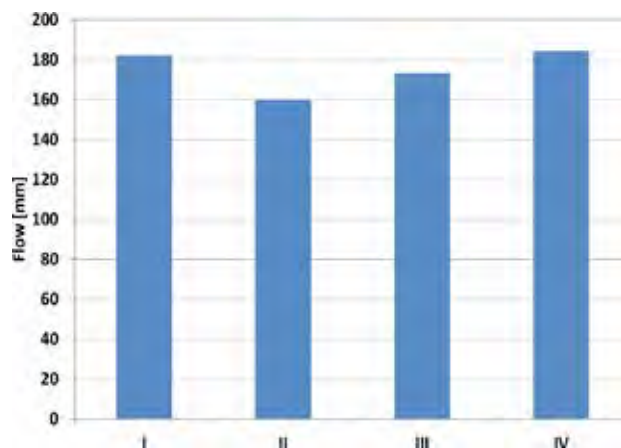


Fig. 6. Consistency of cement-zeolite mortars (notation as in Table 2)

Rys. 6. Konsystencja zapraw cementowo-zeolitowych (oznaczenia próbek jak w tabeli 2)

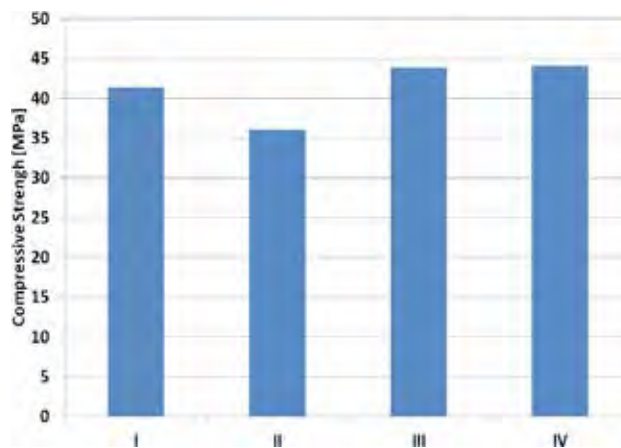


Fig. 7. Compressive strength of cement-zeolite mortars (notation as in Table 2)

Rys. 7. Wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowo-zeolitowych (oznaczenia próbek jak w tabeli 2)

from the diagram that the 20% replacement of cement by $0\div 0.500$ mm zeolite can noticeably lower the compressive strength, by 13%. However, the use of finer zeolite, $0\div 0.125$ or $0\div 0.063$ mm, will improve the compressive strength of the mortar by 5% and 6% respectively. This strength increase can be explained in several ways. Finer zeolite, as is the case with silica fume, fills the voids between cement and aggregate grains, thereby making the mortar tighter [6]. Higher specific surface area and smaller volume of the grains facilitate the pozzolanic reaction, as confirmed by the tests on pastes. As a result, a larger amount of C-S-H can form and reduce the likelihood of leaving unreacted zeolite cores in the mortar. This is how compressive strength is increased. In addition, the mortars containing $0\div 0.063$ mm zeolite are easier to compact due to more fluid consistency, which may also be a factor in the strength increase as during this process air voids are removed [13].

4. Conclusions

The tests results reveal that zeolite gradation has a noticeable effect on the properties of mortars. This effect results from both geometrical and physico-chemical properties of zeolite.

Owing to the specific surface area and nanoporosity, the zeolite used as a mineral additive to a mortar can reduce its fluidity [1, 8, 20, 21]. However, limiting the size of zeolite grains to 0.063 mm prevents the consistency change and may contribute to improved fluidity due to a ball-bearing effect.

żądności, wynikająca z rozdrobnienia, może okazać się nie tak istotna.

Wyniki z badania wpływu dodatku zeolitu na wytrzymałość na ściskanie zapraw po 28 dniach przedstawiono na rysunku 7. Wynika z niego, że zastąpienie 20% cementu przez frakcję $0\div 0,500$ mm zeolitu może znacząco pogorszyć wytrzymałość zaprawy na ściskanie – o 13%. Jednakże stosowanie zeolitu o drobniejszym uziarnieniu, frakcji $0\div 0,125$ czy $0\div 0,063$ mm może poprawić wytrzymałość na ściskanie zaprawy o odpowiednio 5% i 6%. Ten wzrost wytrzymałości tłumaczyć można na kilka sposobów. Drobniejszy zeolit, podobnie jak pył krzemionkowy, może lepiej uszczelnić zaprawę, wypełniając pustki pomiędzy ziarnami cementu i kruszywa [6]. Posiadając większą powierzchnię właściwą oraz ziarna o mniejszej objętości łatwiej i szybciej wchodzi on w reakcję pucolanową, co potwierdziły badania na zaczynach. W wyniku tego może powstać większa ilość fazy C-S-H i jest mniejsza szansa na to, że po zeolicie pozostaną w zaprawie nieprzereagowane rdzenie. Tym samym zwiększeniu ulega wytrzymałość na ściskanie. Dodatkowo zaprawy z zeolitem $0\div 0,063$ mm, wykazując bardziej płynną konsystencję, łatwiej ulegają zagęszczaniu, co również może sprzyjać wzrostowi wytrzymałości, gdyż w tym procesie usuwane są pory powietrzne [13].

4. Wnioski

Na podstawie wyników badań można stwierdzić, że uziarnienie zeolitu ma istotny wpływ na właściwości zaprawy. Wpływ ten wynika zarówno z geometrycznych, jak i fizykochemicznych właściwości zeolitu.

The use of zeolite with finer grains reduces the delay in the initial setting time of cement. This is due to the chemical activity of the additive, and the resultant mortar shows better compressive strength at 28 days of hardening.

It is therefore recommended to use the finest zeolite as a mineral additive to mortars. In the case of the Transcarpatian zeolite, used in this study, its grinding fineness below 0.063 mm eliminates significant problems related to compressive strength loss, worse consistency and considerably reduces the setting time.

Ze względu na powierzchnię właściwą i nanoporowatość zeolit zastosowany jako dodatek mineralny do zaprawy może zmniejszyć jej płynność [1, 8, 20, 21]. Jednakże ograniczenie wielkości ziarna zeolitu, by nie było ono większe od 0,063 mm, może zapobiec takiej zmianie konsystencji, a nawet przyczynić się do upłynnienia mieszanki dzięki wystąpieniu efektu „łożyska”.

Zastosowanie zeolitu o drobniejszym uziarnieniu niweluje opóźnienie rozpoczęcia wiązania cementu. Dzieje się tak dzięki aktywności chemicznej dodatku, a uzyskana zaprawa cechuje się większą wytrzymałością na ściskanie po 28 dniach twardnienia.

Reasumując, zaleca się stosowanie w charakterze dodatku mineralnego zeolitu o możliwie najmniejszym rozdrobnieniu. W przypadku zeolitu zakarpackiego, będącego obiektem badań, jego rozdrobnienie poniżej 0,063 mm niweluje istotne problemy spadku wytrzymałości na ściskanie oraz pogorszenia konsystencji i znacznie ogranicza wydłużenie czasu wiązania.

References

- [1] Ahmadi B., Shekarchi M.: *Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material*, Cement and Concrete Composition 32/2 (2010), pp. 134-141.
- [2] Atkins P.W.: *Podstawy chemii fizycznej*. PWN, Warszawa 2001.
- [3] Broekmans M.A.T.M.: *Structural properties of quartz and their potential role for ASR*. Materials Characterization. 53 (2004), pp. 129-140.
- [4] Czechowicz M.: *Effect of Zeolite fineness on the concrete properties*. Not-published, Kielce University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Architecture.
- [5] Kotwa A., Spychał E.: *Influence of mineral additives properties of concrete*. Structure and Environment 8/2 (2016), pp. 15-20.
- [6] Kurodowski W.: *Chemia cementu i betonu*. SPC, Kraków 2010.
- [7] Łowińska-Kluge A., Kropiwnicki J., Tomanek G.: *Aktywacja popiołów lotnych przez ich mikronizację*. Przemysł Chemiczny 91 (2012), pp. 1000-1006.
- [8] Małolepszy J., Grabowska E.: *Wpływ zeolitów na proces hydratacji spoiw mineralnych*, Budownictwo i Architektura 12 (2013), pp. 185-192.
- [9] Martinez-Ramírez S., Blanco-Varela M.T., Ereña I., Gener M.: *Pozzolanic reactivity of zeolitic rocks from two different Cuban deposits: characterisation of reaction products*. Applied Clay Science 32 (2006), pp. 40-52.
- [10] Mertens G., Snellings R., Van Balen K., Bicer-Simsir B., Verlooy P., Elsen J.: *Pozzolanic reactions of common natural zeolites with lime and parameters affecting their reactivity*. Cement and Concrete Research 39 (2009), pp. 233-240.
- [11] Multon S., Cyr M., Sellier A., Diederich P., Petit L.: *Effect of aggregate size and alkali content on ASR expansion*. Cement and Concrete Research 40 (2010), pp. 508-516.
- [12] Multon S., Cyr M., Sellier A., Leclou N., Petit L.: *Couple effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion*. Cement and Concrete Research 38 (2008), pp. 350-359.
- [13] Neville A.M.: *Właściwości betonu*. SPC, Kraków 2012.
- [14] Nocuń-Wczelik W. et al.: *Cement. Metody badań. Wybrane kierunki stosowania*. AGH, Kraków 2010.
- [15] Owsiak Z., Wójcik A.: *The influence of co-combusted biomass-coal fly ash on limiting alkali-silica reaction*. Structure and Environment 6/2 (2014), pp. 26-31.
- [16] Owsiak Z.: *The hydration of Portland cement with fly ash*, Cement Wapno Beton 5 (2000), pp. 29-31.
- [17] Radeka M., Milović T., Malešev M., Radonjanin V., Laban M.: (2016) *Hydration process and compressive strength of cement pastes containing natural zeolite*. Građevinski materijali i konstrukcije 59 (2016), pp. 29-45.
- [18] Rahhal V. F., Pavlík Z., Tironi A., Castellano C.C.: Trezza M.A., Černý R., Irassar E.F.: *Effect of cement composition on the early hydration of blended cements with natural zeolite*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry (2016), pp. 1-13.
- [19] Ramachandran V.S.: *Alkali-aggregate expansion inhibiting admixtures*. Cement and Concrete Composites 20 (1998), pp. 149-161.

- [20] Seraj S., Ferron R., Juenger M.: *Calcining natural zeolites to improve their effect on cementitious mixture workability*. Cement and Concrete Research 85 (2016), pp. 102-110.
- [21] Siemaszko-Lotkowska D., Gajewski R.: *Właściwości zeolitu w aspekcie zastosowania w betonie*, Ceramika 103 (2008), pp. 1101-1108.
- [22] Usherov-Marshak A.V.V., Ciak M.J.: *Isothermal calorimetry in the standard ASTM C1679-08*. Cemen Wapno Beton 15 (2010), pp. 108-110.
- [23] PN-EN 196-1 *Methods of testing cement. Determination of strength*.
- [24] PN-EN 196-3 *Methods of testing cement. Determination of setting times and soundness*.
- [25] PN-EN 1015-3 *Methods of test for mortar for masonry. Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*.

WIKTOR WCIŚLIK¹

PAWEŁ KOSSAKOWSKI²

PIOTR SOKOŁOWSKI³

Kielce University of Technology

¹ e-mail: wwcislik@tu.kielce.pl

² e-mail: kossak@tu.kielce.pl

³ e-mail: psokol@wp.pl

STAINLESS STEEL IN BUILDING STRUCTURES – ADVANTAGES AND EXAMPLES OF APPLICATION

STAL NIERDZEWNA W BUDOWNICTWIE – ZALETY I PRZYKŁADY ZASTOSOWAŃ

Abstract

The paper discusses the problem of using stainless steels in construction. Characteristics of steel marking systems in the European standards have been characterized. Basic types of steel are presented together with their short characteristics. Examples of use of stainless steels in construction are discussed, both in terms of construction elements and equipment.

Keywords: hard-working steel, building structures, European standards.

Streszczenie

W pracy poruszono problematykę zastosowania stali nierdzewnych w budownictwie. Scharakteryzowano systemy oznaczeń stali trudnordziewiejących w normach europejskich. Przedstawiono podstawowe rodzaje stali wraz z ich krótką charakterystyką. Omówiono przykłady zastosowania stali nierdzewnych w budownictwie, zarówno w odniesieniu do elementów konstrukcyjnych, jak i wyposażenia obiektów.

Słowa kluczowe: stal trudnordziewiejąca, konstrukcje budowlane, normy europejskie

1. Introduction

Stainless steel was invented in the early 20th century. In 1913, Englishman Harry Brearley first used the term “stainless steel” for alloys composed of iron, carbon (0.24%) and chromium (12.8%) [1]. The material was patented in 1924 in Great Britain. From then on, stainless steel is constantly present in the building industry, architecture and everyday objects. What emphasizes its attractiveness among others are: aesthetics, strength, corrosion resistance, while excellent anticorrosive properties determine the use of this type of steel.

2. The advantages of stainless steel used in construction

Stainless steel is perceived as a modern material, a symbol of wealth and luxury. Its use in construction often allows significant improvement of the aesthetics of the object. Therefore, it is used not only for the

1. Wstęp

Stal nierdzewna, zwana stalą trudnordziewiejącą, została wynaleziona na początku XX wieku. W 1913 roku Anglik Harry Brearley po raz pierwszy użył terminu „stal nierdzewna” w odniesieniu do stopu złożonego z żelaza, węgla (0,24%) oraz chromu (12,8%) [1]. Materiał opatentowano w 1924 roku w Wielkiej Brytanii. Od tego momentu stal nierdzewna jest nieprzerwanie obecna w budownictwie, architekturze i przedmiotach codziennego użytku. O jej atrakcyjności decydują między innymi: estetyka, wytrzymałość, odporność na korozję, przy czym właśnie znakomite właściwości antykorozyjne decydują o zastosowaniu tego typu stali.

2. Zalety stali nierdzewnej stosowanej w budownictwie

Stal nierdzewna jest postrzegana jako materiał nowoczesny, symbol bogactwa oraz luksusu. Jej zasto-

implementation of large and prestigious investments, but also more and more often to make equipment and fittings in the general construction.

In addition to the high corrosion resistance, ecological considerations are an important factor influencing the popularity of hard-working steels. According to the European Association for the Development of Stainless Steel Market EURO-INOX, 60% of stainless steel comes from scrap melting [2].

The aesthetic appearance of stainless steel is an advantage especially appreciated by architects. It gives the opportunity to use steel with other building materials, such as glass. New architectural trends have contributed to the fact that architects have begun to use stainless steel in shopping mall projects, art galleries, museums, and office buildings.

The use of stainless steel not only emphasizes prestige, elegance, luxury, but also practical value, because stainless steel, unlike other types of steel, is hygienic, easy to maintain and clean.

Plasticity, strength, resistance to extreme temperatures (up to 1000°C) make stainless steel a material more and more commonly used in many fields of technology, including construction. The use of stainless steels also limits the need for corrosion protection and paint, reducing maintenance and maintenance costs. Like any other metal stainless steel is not devoid of defects. These include, among others, welding difficulties (and associated flooding and welding spatter). There is also a high cost of polishing steel and the cost of its production (about 5 times the normal steel).

3. Basic types and grades of stainless steel

The most important criterion determining the classification of a given steel as corrosion resistant is the chromium content. According to PN-EN 10088-1 [3] the chromium content of corrosion resistant steels should not be lower than 10.5%, but the carbon fraction should not exceed 1.2%. Other alloying elements: nickel, molybdenum, titanium, niobium, manganese, nitrogen, copper, silicon, aluminum and vanadium increase corrosion resistance [3].

Principles of determination of stainless steel are included in standards [4, 5]. There are two types of markings. Digital signatures [5] consist of 5 digits. The first digit (separated from the remaining by a period) is the type of material where the steel is denoted by 1. The two consecutive digits define the group to which the types of steel is to be considered,

sowanie w budownictwie niejednokrotnie umożliwia znaczącą poprawę estetyki obiektu. W związku z tym wykorzystywana jest nie tylko do realizacji dużych i prestiżowych inwestycji, ale także coraz częściej do wykonawstwa elementów wyposażenia i wykończenia w budownictwie powszechnym.

Oprócz wysokiej odporności korozyjnej istotnym czynnikiem wpływającym na popularność stali trudnordzewiejących są względy ekologiczne. Według danych Europejskiego Stowarzyszenia Rozwoju Rynku Stali Nierdzewnej EURO-INOX 60% stali nierdzewnej pochodzi z przetopienia złomu [2].

Estetyczny wygląd stali nierdzewnych to zaleta szczególnie ceniona przez architektów. Daje ona możliwość komponowania stali z innymi materiałami budowlanymi, na przykład szkłem. Nowe trendy w architekturze przyczyniły się do tego, iż architekci zaczęli stosować stal nierdzewną w projektach centrów handlowych, galerii sztuki, muzeów czy też budynków biurowych.

Użycie stali nierdzewnej to nie tylko podkreślenie prestiżu, elegancji, symbol luksusu, ale przede wszystkim walory praktyczne, bo stal nierdzewna, w odróżnieniu od innych rodzajów stali, jest higieniczna, łatwa w konserwacji i utrzymaniu w czystości.

Plastyczność, wytrzymałość, odporność na skrajne temperatury (do 1000°C) powodują, że stal nierdzewna jest materiałem coraz częściej stosowanym w wielu dziedzinach techniki, także w budownictwie. Wykorzystanie stali nierdzewnych ogranicza też konieczność stosowania zabezpieczeń antykorozyjnych i farb, redukując koszty utrzymania i konserwacji obiektu.

Jak każdy metal, tak i stal nierdzewna nie jest pozbawiona wad. Należą do nich między innymi trudności w spawaniu (oraz związane z tym podtopienia i rozpryski spawalnicze). Wysoki jest też koszt polerowania stali oraz koszt jej produkcji (około 5 razy większy niż zwykłej stali).

3. Podstawowe rodzaje i gatunki stali nierdzewnej

Najistotniejszym kryterium, decydującym o zaklasyfikowaniu danej stali jako odpornej na korozję, jest zawartość chromu. Zgodnie z PN-EN 10088-1 [3] udział chromu w stalach odpornych na korozję nie powinien być niższy od 10,5%, natomiast udział węgla nie może przekraczać 1,2%. Inne składniki stopowe: nikiel, molibden, tytan, niob, mangan, azot, miedź, krzem, glin i wanad dodatkowo podwyższają odporność na korozję [3].

Zasady oznaczania stali nierdzewnych zawarto w normach [4, 5]. Rozróżnia się przy tym dwa rodzaje oznaczeń. Oznaczenia cyfrowe [5] składają się z 5 cyfr. Cyfra pierwsza (oddzielona od pozostałych kropką)

as shown in Table 1. The last two digits indicate the next types within the group. For example: 1.4436 designates a corrosion resistant steel containing more than 2.5% nickel, molybdenum but no niobium and titanium.

Group	Description of the steel grades belonging to the group
40	Corrosion resistant steel with a content below 2.5% Ni, without Mo, Nb and Ti
41	Corrosion resistant steel with a content below 2.5% Ni, with Mo, without Nb and Ti
42	Backup location
43	Corrosion resistant steel with a content above 2.5% Ni, without Mo, Nb and Ti
44	Corrosion resistant steel containing above 2.5% Ni, with Mo, without Nb and Ti
45	Corrosion resistant steels with special additives
46	Ni alloys chemically resistant and heat resistant
47	Heat-resistant steels containing below 2.5% Ni
48	Heat-resistant steels containing above 2.5% Ni
49	Materials for work at elevated temperatures

The alphanumeric system [4] in the name of the steel grade mentions the alloying elements and gives their percentages. For stainless steel, the name starts with the letter X (meaning that the content of at least one element exceeds 5%). The digits behind the letter X give the carbon content of a given steel multiplied by 100. In subsequent positions, the name of the types is the denotation of the chemical symbols of the alloying elements and their content in %. According to the principles set forth above, X17CrNi16-2 should be read as: steel in which the content of at least one element exceeds 5% (X) with a carbon content of 0.17% (17), containing 16% chromium and 2% nickel.

High corrosion resistance is associated with the formation of a thin layer of oxidized material on the surface (so-called passivation). High chromium permeability is shown to be a particularly desirable element in corrosion resistant steels. Taking into account the chemical composition, the following are distinguished: high chrome, chromium-nickel, chromium-nickel-manganese.

The standard PN-EN 10088-3 [6] distinguishes four types of steel: austenitic, ferritic, martensitic and ferritic-austenitic (duplex). According to this standard, austenitic steel is divided into 1.4301, 1.4305, 1.4306, 1.4307, 1.4310, 1.4401, 1.4435, 1.4436, 1.4438, 1.4439, 1.4529, 1.4539, 1.4541,

oznacza rodzaj materiału, gdzie stal oznaczona jest numerem 1. Dwie kolejne cyfry definiują grupę, do jakiej należy rozpatrywany gatunek, zgodnie z tabelą 1. Dwie ostatnie cyfry określają kolejny gatunek w obrębie danej grupy. Przykładowo: oznaczenie 1.4436 określa stal odporną na korozję zawierającą powyżej 2,5% niklu, molibden, ale niezawierającą niobu i tytanu.

Table 1. Groups of grades of corrosion resistant steels according [5]

Tabela 1. Grupy gatunków stali odpornych na korozję [5]

System oznaczeń literowo-cyfrowych [4] w nazwie gatunku stali wymienia pierwiastki stopowe i podaje ich procentową zawartość. W przypadku stali nierdzewnych nazwa zaczyna się od litery X (oznacza, że zawartość przynajmniej jednego pierwiastka przekracza 5%). Cyfry znajdujące się za literą X podają zawartość węgla w danej stali pomnożoną przez 100. Na kolejnych pozycjach nazwy gatunku znajdują się oznaczenia symboli chemicznych pierwiastków stopowych, a następnie ich zawartość wyrażona w %. Zgodnie z podanymi powyżej zasadami, oznaczenie X17CrNi16-2 należy odczytywać jako: stal, w której zawartość przynajmniej jednego pierwiastka przekracza 5 % (X), o zawartości węgla 0,17% (17), zawierająca 16% chromu i 2% niklu.

Wysoka odporność korozyjna jest związana z tworzeniem się cienkiej warstwy utlenionego materiału na powierzchni (tzw. pasywacja). Wysoką zdolność do pasywacji wykazuje chrom, dzięki czemu jest pierwiastkiem szczególnie pożądanym w stalach odpornych na korozję. Przyjmując za kryterium skład chemiczny, rozróżnia się stale: wysokochromowe, chromowo-niklowe, chromowo-niklowo-manganowe.

Norma PN-EN 10088-3 [6] wyróżnia cztery rodzaje stali: austenityczna, ferrytyczna, martenzytyczna i ferrytyczno-austenityczna (duplex). Według tej normy stal austenityczna dzieli się na gatunki: 1.4301,

1.4547, 1.4550, 1.4571. Due to the addition of 8% nickel and 18% chromium, austenitic steels are most commonly used. They are characterized by the highest resistance to corrosion, high ductility and weldability.

Ferritic steel is divided into 1.4000, 1.4003, 1.4016, 1.4510 and three groups depending on chromium content (13%, 17% and 25%). The carbon content is in the range 0% to 1%. Ferritic steels are characterized by good strength properties, higher than austenitic steels, and high corrosion resistance. The main alloying additive is chrome and minor admixtures of molybdenum, titanium, niobium and other components.

Martensitic steel is divided into grades: 1.4006, 1.4021, 1.4028, 1.4031, 1.4034, 1.4057, 1.4122. It is characterized by similar content of chromium as ferritic steels, while the content of carbon is slightly higher. The martensite structure gives these steels high strength properties (tensile strength up to about 1100 MPa). The resistance of martensitic steel to corrosion is low and decreases with the increase of temperature, the weather corrosion resistance is sufficient only in very clean air.

Ferritic-austenitic steel is classified into 1.4362, 1.4410, 1.4460, 1.4462. These steels are high alloyed steels resistant to corrosion, in terms of strength considerably outperform the austenitic steels. They are also often used in structures exposed to strong acids.

4. Application of stainless steel in construction

4.1. Stainless steel in public buildings

One of the first buildings constructed with stainless steel is Chrysler Building, built in 1930 (Fig. 1). Krupp KA2 "Enduro" steel was used for its construction.

Today, stainless steel is widely used in the production of glazed roofs and facades, such as the Walt Disney Concert Hall in Los Angeles (Fig. 2), for the construction of elevators and escalators. An example of the application of stainless steel in pedestrian walkways is Cheung Kong Center, Hong Kong (Fig. 3).

There have appeared also new construction sectors, where stainless steel proves to be the perfect replacement for other materials. These are, for example, pools for swimming pools or archaeological sites. An example might be Terrace House 2 in Ephesus, where an arched structure above the archaeological site was built to protect it from the weather (Fig. 4).

1.4305, 1.4306, 1.4307, 1.4310, 1.4401, 1.4435, 1.4436, 1.4438, 1.4439, 1.4529, 1.4539, 1.4541, 1.4547, 1.4550, 1.4571. Z uwagi na dodatek 8% niklu i 18% chromu, stale austenityczne są stosowane najczęściej. Charakteryzują się największą odpornością na korozję, wysoką ciągliwością i spawalnością.

Stal ferrytyczna dzieli się na gatunki: 1.4000, 1.4003, 1.4016, 1.4510 i na trzy grupy w zależności od zawartości chromu (13%, 17% i 25%). Zawartość węgla zawiera się w przedziale od 0% do 1%. Stale ferrytyczne charakteryzują się dobrymi właściwościami wytrzymałościowymi, wyższymi niż stal austenityczna, oraz wysoką odpornością na korozję. Głównym dodatkiem stopowym jest chrom oraz niewielkie domieszki molibdenu, tytanu, niobu oraz innych składników.

Stal martenzytyczna dzieli się na gatunki: 1.4006, 1.4021, 1.4028, 1.4031, 1.4034, 1.4057, 1.4122. Charakteryzuje się podobną zawartością chromu jak stale ferrytyczne, nieco wyższa jest natomiast zawartość węgla. Struktura martenzytu zapewnia tym stalom wysokie własności wytrzymałościowe (wytrzymałość na rozciąganie nawet do około 1100 MPa). Odporność stali martenzytycznych na korozję jest niska i spada wraz ze wzrostem temperatury, odporność na korozję atmosferyczną jest dostateczna jedynie przy bardzo czystym powietrzu.

Stal ferrytyczno-austenityczna dzieli się na gatunki: 1.4362, 1.4410, 1.4460, 1.4462. Stale te są wysokostopowymi stalami odpornymi na korozję, pod względem wytrzymałości znacznie przewyższają stale austenityczne. Są też często używane w konstrukcjach narażonych na działanie silnych kwasów.

4. Zastosowanie stali nierdzewnej w budownictwie

4.1. Stal nierdzewna w budynkach użyteczności publicznej

Jednym z pierwszych obiektów budowlanych wzniesionych z wykorzystaniem stali nierdzewnej był zbudowany w 1930 roku Chrysler Building (rys. 1). Do budowy użyto stali o nazwie Krupp KA2 „Enduro”.

Obecnie szeroko stosuje się stal nierdzewną w produkcji oszklonych dachów i elewacji jak np. w Walt Disney Concert Hall w Los Angeles (rys. 2), do budowy wind i ruchomych schodów. Przykładem zastosowania stali nierdzewnej w konstrukcji kładki dla pieszych jest Cheung Kong Center, Hong Kong (rys. 3).

Pojawiły się też zupełnie nowe sektory budownictwa, gdzie stal nierdzewna doskonale się sprawdziła, wypierając tym samym inne materiały. Są to np. zbiorniki basenów kąpielowych czy konstrukcje zabezpieczające tereny wykopaliisk archeologicznych. Przykładem może być Terrace House 2 w Efezie,



Fig. 1. Chrysler Building [7]

Rys. 1. Chrysler Building [7]



Fig. 2. Walt Disney Concert Hall [8]

Rys. 2. Walt Disney Concert Hall [8]



Fig. 3. Footbridge in Cheung Kong Center, Hong Kong [9]

Rys. 3. Kładka dla pieszych w Cheung Kong Center, Hong Kong [9]



Fig. 4. Terrace House 2 in Ephesus [10]

Rys. 4. Terrace House 2 w Efezie [10]



Fig. 5. Dome covered with stainless steel sheet [11]

Rys. 5. Kopuła pokryta blachą ze stali nierdzewnej [11]

It is worth mentioning that there is a possibility of using stainless steel for roofing (Fig. 5). This guarantees not only attractive appearance, but also high resistance to corrosion, and consequently significant durability and associated reduction in maintenance costs.

4.2. Stainless steel in single family housing

In single family housing stainless steel is used for the construction of fences (Fig. 6), barriers and balustrades, roofing, gutters and drainage. It is also used in modern chimney systems, in heating systems where aggressive chemicals are condensed.

gdzie nad stanowiskiem archeologicznym wybudowano konstrukcję mającą je chronić przed warunkami atmosferycznymi (rys. 4).

Warto wspomnieć o możliwości użycia stali nierdzewnej do pokrycia dachów (rys. 5). Gwarantuje to nie tylko atrakcyjny wygląd, ale przede wszystkim odporność na korozję, a co za tym idzie znaczną trwałość i związaną z tym redukcję kosztów konserwacji.

4.2. Stal nierdzewna w budownictwie jednorodzinny

W budownictwie jednorodzinny stal nierdzewną wykorzystuje się do budowy ogrodzeń (rys. 6), barier i balustrad, wykonawstwa pokryć dachowych, rynien i rur spustowych. Jest ona także stosowana w nowoczesnych systemach kominowych, w instalacjach grzewczych, w których kondensowane są agresywne związki chemiczne.



Fig. 6. Fence made of stainless steel [12]

Rys. 6. Ogrózenie wykonane ze stali nierdzewnej [12]

4.3. Stainless steel construction in industrial buildings

Stainless steel is also used in industrial applications: for the construction of pipelines, heating systems, air conditioning components, fittings, as well as for the production of profiles used in metalwork, truss bars, lashing or reinforcement (Fig. 7). Durable steel is used for the production of cables and nets [13], bolts, and anchors.

4.3. Stal nierdzewna w budownictwie przemysłowy

Stal nierdzewna jest też używana w obiektach przemysłowych: do budowy rurociągów, systemów grzewczych, elementów klimatyzacji, armatury, jak również do produkcji profili stosowanych w metaloplastyce, prętów kratownic, odcągów lub zbrojenia żelbetu (rys. 7). Stal trudnordzewiejącą wykorzystuje się do produkcji kabli i siatek [13], śrub, sworzni i kotew.



Fig. 7. Reinforcement made of stainless steel [14]

Rys. 7. Siatka zbrojeniowa wykonana ze stali nierdzewnej [14]

4.4. Technological issues related to the use of stainless steel

The use of traditional methods such as shaping, rolling, cutting, drilling, stamping on stainless steel is relatively easy, but the tools used must be designed exclusively for stainless steel [15]. This is to help avoid contamination with iron compounds that can contribute to corrosion. Stainless steel can be joined or attached to other materials by welding, soldering, riveting or gluing. However, the choice of the appropriate technique should be made according to the application and mechanical strength required. The mechanical assembly of stainless steel is done with threaded bolts, screws, bolts, washers, rivets, and dowels. However, in most cases two-sided screws, pins or rivets are used. For moisture-laden joints it is recommended that the grade of the fastener is at least the same as the grade of the combined stainless steel. If other connecting materials are used, they should be separated from stainless steel by non-metallic washers and sleeves. Stainless steel can also be seamlessly combined with any type of wood and all types of particleboard. Contact with masonry, cement, lime or plaster does not affect stainless steel.

5. Summary

Constantly evolving construction still needs new solutions and modern materials that will provide long life, durability, reliability and aesthetics. Meeting these conditions has always been a problem. The search for new construction materials that would withstand corrosion but at the same time provide durability and aesthetics resulted in the emergence of stainless steel, which has been more and more commonly used in the construction industry since its invention. This has led to an increase in world investment, where stainless steel is used.

4.4. Technologiczne aspekty związane z zastosowaniem stali nierdzewnych

Użycie tradycyjnych metod, takich jak kształtowanie, walcowanie, skrawanie, wiercenie, stemplowanie, przy obróbce stali nierdzewnej jest stosunkowo łatwe, jednak użyte narzędzia muszą być przeznaczone wyłącznie do pracy ze stalą nierdzewną [15]. Ma to pomóc, uniknąć zanieczyszczenia związkami żelaza, które mogą przyczynić się do powstawania korozji. Stal nierdzewna może być łączona lub mocowana do innych materiałów przy użyciu spawania, lutowania, nitowania bądź klejenia. Jednakże wybór odpowiedniej techniki powinien być dokonany zgodnie z zastosowaniem oraz wymaganą wytrzymałością mechaniczną. Montaż mechaniczny stali nierdzewnej odbywa się za pomocą kołków gwintowanych, wkrętów, śrub, podkładek, nitów i dybli. Jednak w większości przypadków używa się śrub dwustronnych, sworzni lub nitów. W przypadku połączeń działających w wilgotnej atmosferze zaleca się, aby gatunek stali łącznika był co najmniej taki sam jak gatunek łączonej stali nierdzewnej. Jeżeli są zastosowane inne materiały łączące, to powinny być odseparowane od stali nierdzewnej poprzez niemetalowe podkładki i tuleje. Stal nierdzewną można również bezproblemowo łączyć z każdym typem drewna oraz ze wszystkimi rodzajami płyt wiórowych. Kontakt z zaprawą murarską, cementem, wapnem lub tynkiem nie wywiera korozyjnego wpływu na stal nierdzewną.

5. Podsumowanie

Stale rozwijające się budownictwo wciąż potrzebuje nowych rozwiązań i nowoczesnych materiałów, które zapewniłyby długą trwałość, wytrzymałość, niezawodność i estetykę. Spełnienie tych warunków od zawsze stanowiło problem. Poszukiwanie nowych materiałów konstrukcyjnych, które byłyby odporne na korozję, a jednocześnie odpowiednio wytrzymałe i estetyczne, doprowadziło do powstania stali nierdzewnej, która od czasu jej wynalezienia jest coraz częściej używana w branży budowlanej. Zaowocowało to wzrostem inwestycji na świecie, w których czynny udział bierze stal nierdzewna.

References

- [1] <http://www.nierdzewka.com/page/24/historia-stali-nierdzewnej>.
- [2] <http://www.nierdzewka.com/page/36/stal-nierdzewna-material-przyszlosci-dla-budownictwa>.
- [3] PN-EN 10088-1, *Constant corrosion resistant. Part 1: Corrosion resistant steel grades*.
- [4] PN-EN 10027-1:2007, *Steel Marking Systems - Part 1: Steel Signs*.
- [5] PN-EN 10027-2:2015-07, *Steel Identification Systems - Part 2: Digital System*.
- [6] PN-EN 10088-3, *Constant corrosion resistant. Part 3: Technical conditions for the delivery of semi-finished products, rods, rods, wire, sections and articles of general purpose stainless steel bright surfaces*.
- [7] https://en.wikipedia.org/wiki/Chrysler_Building#/media/File:Chrysler_Building_by_David_Shankbone_Retouched.jpg.

- [8] https://pl.wikipedia.org/wiki/Walt_Disney_Concert_Hall#/media/File:Walt_Disney_Concert_Hall,_LA,_CA,_jjron_22.03.2012.jpg.
- [9] <http://imagennix.com/portfolio/architecture/cheung-kong/#main>.
- [10] Helzel M.: *Combination of classics with modern - stainless steel in reconstruction and renovation of buildings (Polish version)*. Construction Series, Book 12, Euro Inox 2008.
- [11] <http://new.dachy.org/InfinityCMS/files/news/2934.jpg>.
- [12] <http://www.ogrodzenia.co.pl/ogrodzenia-nierdzewne-opole.php>.
- [13] McCormick C.: *The greening of a convention centre*. Nickel, 23, 3 (2008), pp. 6-9.
- [14] <http://www.outokumpu.com/en/forms/reinforcement-bar/pages/default.aspx>.
- [15] Dusart A., El-Deeb H., Jaouhari N., Ka D., Ruf L.: *Final Report ISSF Workshop*. Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 2011.
- [16] Kossakowski P.: *Stainless steel bridges*. Structure and Environment, 1, 8 (2016), pp. 37-44.

LESŁAW HEBDA
Firma „Doradca Techniczny Dorota Hebda”
e-mail: leslaw.hebda@gmail.com
ZDZISŁAWA OWSIAK
Kielce University of Technology
e-mail: owsiak@tu.kielce.pl

CEILING DAMAGE DUE TO SWELLING OF SLAG AGGREGATE IN TERIVA CONCRETE FILLER BLOCKS

USZKODZENIA STROPU SPOWODOWANE PĘCZNINIEM KRUSZYWA ŻUŻLOWEGO W PUSTAKACH TERIVA

Abstract

The paper reports an example of damage to a Teriva floor slab system. The bottom section of the concrete filling block and the ceiling plasterwork broke away. No symptoms were observed to indicate excessive deformation and/or displacements in the structure of the building. Laboratory tests revealed that the damage occurred on account of internal corrosion of concrete due to periclase swelling. The mineral was a component of the slag aggregates used for the production of the floor blocks. The factor initiating the corrosion process was most probably an increase in relative humidity in the rooms covered with the floor system, resulting from a change in the intended use. The damage occurred after over 10 years' damage-free service period. Swelling of periclase led to the failure of the concrete filler blocks in the Teriva beam-and-block floor system.

Keywords: beam-and-block floor system, slag concrete filler block, internal corrosion of concrete

Streszczenie

W referacie przedstawiono przykład awarii stropu teriva w budynku mieszkalnym wielorodzinnym, polegającej na odpadaniu dolnych ścianek pustaków oraz wystąpieniu odspojień tynku na suficie. Awarii tej nie towarzyszyły żadne objawy wskazujące na nadmierne odkształcenia lub/i przemieszczenia konstrukcji budynku. Z przeprowadzonych badań laboratoryjnych wynika, że awaria ta powstała w wyniku korozji wewnętrznej betonu, spowodowanej pęcznieniem peryklazu. Mineral ten znalazł się w kruszywie żużlowym zastosowanym do produkcji pustaków stropowych. Czynnikiem inicjującym proces korozyjny był najprawdopodobniej wzrost wilgotności względnej w pomieszczeniach przekrytych stropem w wyniku częściowej zmiany sposobu użytkowania. Zjawisko ujawniło się po przeszło 10 latach bezawaryjnej eksploatacji budynku. Pęcznienie peryklazu spowodowało destrukcję pustaków w stropie gęstożebrowym teriva.

Słowa kluczowe: strop gęstożebrowy, pustak żużlobetonowy, korozja wnętrza betonu

1. Introduction

The detachment of bottom surfaces of the filler blocks in the ceiling (Fig. 1) was reported in an apartment at the ground floor of a multi-family building situated in one of Warsaw suburban locations.

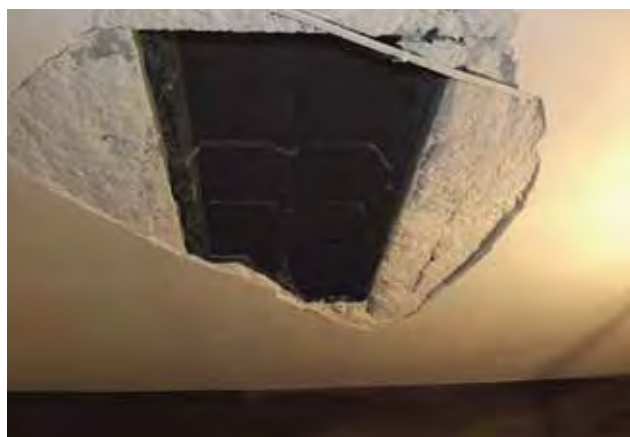
Some of the construction documents and as-built documentation of that 10-year-old building are missing. It follows from the materials available that the building has been designed in a traditional masonry style, with walls made of silicate blocks and with beam-and-block floors. It has four storeys above grade and a partial basement. The walls of the

1. Wprowadzenie

W mieszkaniu usytuowanym na parterze murowanego budynku mieszkalnego wielorodzinnego, zlokalizowanego w jednej z podwarszawskich miejscowości, nastąpiło odspojenie dolnych ścianek pustaków stropowych na fragmencie sufitu (rys. 1).

Budynek, ten był eksploatowany od ponad 10 lat. Administrator budynku nie posiadał pełnej dokumentacji projektowej ani powykonawczej obiektu. Z dostępnych materiałów ustalono, że budynek został zaprojektowany w technologii tradycyjnej, ze ścianami z bloków silikatowych i stropami gęstożebrowymi. Budynek o czterech

building are insulated with polystyrene and covered with texture plaster. The apartment in which the ceiling degradation has been discovered is located in the basementless part section of the house, with its flooring laid directly on dirt-base.



kondygnacjach naziemnych jest częściowo podpiwniczony i ocieplony styropianem z tynkiem fakturowym. Mieszkanie, w którym ujawniła się awaria stropu, znajdowało się w części niepodpiwniczonej, a podłoga została ułożona bezpośrednio na gruncie.

Fig. 1. Bottom section of the filler block fallen away

Rys. 1. Fragment sufitu z odspojoną dolną ścianką pustaka stropowego

The condition of the building was investigated to assess floor joist deflections, quality of the bond beams, floor bearing capacity, the support depth of ceiling joists on bearing walls, quality of the bearing wall and floor materials, condition of the foundations and floor load [1].

2. Description of ceiling damage in the apartments analyzed

Two apartments denoted as A and B are accommodated on the ground floor of the part section without a basement. Apartment A is a single-span apartment without internal load-bearing walls, covered with the floor with a nominal span of 6.30 m, that consists of two rooms, a kitchen and a bathroom. Cracks corresponding to the filler block arrangement occurred on the ceilings in all the rooms (Fig. 2). The plaster detached from the joists, but no cracks perpendicular to their axes were observed on the joist surface.

One vertical crack with a span of 0.2-0.15 mm developed on the bearing wall plaster. Vertical cracks were also seen on the partition wall between the rooms. No diagonal cracks occurred on the walls or under the floor at joist supports.

On the ceiling, in addition to linear cracks, circular cracks were observed, indicative of popouts. The removal of the cracked fragment left a shallow conical depression (Fig. 3) and at the bottom of the void, fragments of brownish aggregate grains were exposed, components of the floor concrete block wall. The brownish inclusion was also observed

W związku z awarią stropu przeprowadzono ocenę stanu technicznego budynku. W ramach ekspertyzy oceniono: ugięcia belek stropowych i jakość wykonanych wieńców, nośność stropów, głębokość podparcia belek stropowych na ścianach nośnych, jakość użytych materiałów ścian nośnych i stropu, stan techniczny fundamentów oraz obciążenie stropu [1].

2. Opis uszkodzeń sufitu w analizowanych mieszkaniach

Na parterze, w części niepodpiwniczonej budynku, znajdowały się dwa lokale mieszkalne, które zostały oznaczone jako A i B. Mieszkanie A jest jednonawowe, bez ścian konstrukcyjnych wewnątrz, przekryte stropem o nominalnej rozpiętości 6,30 m i składa się z dwóch pokoi, kuchni oraz łazienki. We wszystkich pomieszczeniach wystąpiły zarysowania na suficie, odwzorowujące układ pustaków w stropie (rys. 2). Wystąpiło także odspojenie tynku od belek stropowych, a na odsłoniętej ich powierzchni nie zaobserwowano rys prostopadłych do ich osi.

Na tynku ścian nośnych zaobserwowano tylko jedną rysę pionową o rozwarości 0,2-0,15 mm. Występuje też pionowe zarysowanie na ścianie działowej pomiędzy pokojami. Na ścianach nie zaobserwowano natomiast żadnych rys ukośnych oraz zarysowań pod stropem w miejscach oparcia belek na ścianach.

Na suficie, oprócz zarysowań liniowych, występują zarysowania koliste, wskazujące na uszkodzenia typu pop-out. Po usunięciu zarysowanego fragmentu tynku, kształt powstałego ubytku przypomina stożek (rys. 3), a na dnie powstałego krateru widoczne były fragmenty brunatnego ziarna kruszywa, pochodzące-



Fig. 2. Cracks perpendicular to the ceiling joist

Rys. 2. Rysy na suficie przebiegają prostopadłe do belki stropowej

at the point of the popout cone. Similar pop-outs occurred at other sites of the ceiling. In this case, the detachment of the plaster resulted from the swelling of the material incorporated in the floor concrete filler blocks.

Concrete mass was visible inside the blocks and between them, which confirmed good quality concreteness. The ceiling plaster detached together with the bottom parts of the concrete block walls. No damage was observed on the joist elements.

Apartment B is double-span. The internal bearing wall, which extends the stairwell wall, separates one room from the rest of the apartment, covered by a single span ceiling. Numerous plasterwork cracks are visible on the ceiling, as is its detachment from the ceiling joists.

The cracks on the ceiling reflected the shape of the filler blocks. Circular cracks and popouts were observed. At the bottom of the resulting void, a grey substrate of the filler block wall was seen with a distinct brownish inclusion. Lack of cracks on the walls indicates correct building statics [2].

Visual inspection of the hallway and staircase along its full height did not show any cracks that might indicate excessive deformation or displacements. On the external walls of the building, no serious damage to plaster texture was found. Measurement of deflection of floor beams in apartment A showed no excessive deflections and the serviceability limit state was not exceeded [3].

Observations made during the survey indicate that the failure of the ceiling did not result from structural problems of the building. Apart from the ceilings above apartments A and B, no other cracks caused by excessive deflection and/or displacements were



Fig. 3. Detachment of a circular section of ceiling plaster

Rys. 3. Widok odspojenia zarysowanego koła fragmentu tynku na suficie

go ze ścianki pustaka stropowego. Obecność wtrącenia brunatnego była też widoczna na wierzchołku odspojonego stożka. Podobne odspojenia, typu pop-out, wystąpiły w innych miejscach na suficie. Odsparowanie tynku nastąpiło na skutek pęcznienia materiału wchodzącego w skład pustaków wbudowanych w strop.

Wewnątrz pustaków oraz na stykach między nimi występują wycieki zaprawy, wskazując na dobre ich obetonowanie. Na stropie występuje odsparowanie tynku wraz z dolnymi ściankami pustaków. Nie zaobserwowano natomiast uszkodzeń na elementach belek stropowych.

Mieszkanie B jest dwunawowe. Ściana wewnętrzna nośna, będąca przedłużeniem ściany klatki schodowej, oddziela jeden pokój od pozostałej części mieszkania, przekrytej jedną nawą stropu. W przypadku tego mieszkania zaobserwowano również liczne zarysowania tynku na stropie i jego odsparowanie od belek stropowych.

Zarysowania na stropie obrazowały kształt pustaków stropowych i widoczne były też zarysowania koliste oraz odsparowanie tynku typu pop-out. Na dnie powstałego krateru widoczne jest szare podłoże ścianki pustaka z wyraźnym brunatnym wtrąceniem. Natomiast brak zarysowań na ścianach wskazuje na prawidłową statykę budynku [2].

Oględziny korytarza i klatki schodowej na całej wysokości również nie wykazały obecności zarysowań wskazujących na nadmierne odkształcenia lub przemieszczenia konstrukcji. Na powierzchni tynku fakturowego, na zewnątrz budynku, też nie ujawniono żadnych niepokojących uszkodzeń. Przeprowadzony pomiar ugięć belek stropowych w mieszkaniu A wykazał brak nadmiernych ugięć i brak przekroczenia stanu granicznego użyteczności [3].

Obserwacje wskazują, że awaria stropu nie nastąpiła w wyniku problemów konstrukcyjnych budynków.

found. Materials testing was undertaken to clarify the cause of the ceiling failure.

3. Test results

Observations of the filler blocks showing damage type illustrated in Figure 1 revealed distinctive horizontal cracks that indicated delaminations of the bottom faces of the blocks (Fig. 4).



Fig. 4. Floor filler blocks with visible cracks indicative of disintegration of their bottom faces

Rys. 4. Pustaki stropowe z widocznymi zarysowaniami wskazującymi na odspajanie się dolnych ścianek

The observation of conical delaminations of the plaster (Fig. 4), detached fragments of the filler blocks and cracks on the filler block walls gave rise to an assumption that the damage to the ceiling may result from internal corrosion of the concrete caused by the presence of swelling minerals [2, 3].

In order to verify the above thesis, material samples were taken for testing: a fragment of the freshly delaminated bottom wall of the filler block, the material taken from the depression left by the popout and brown mineral dust scraped from the bottom of the conical void.

Mineral composition of the aggregate was determined by X-ray diffraction of its grains and fragments taken from the bottom of the delaminations. The results are shown in Figures 5 and 6, respectively.

The phases identified in the aggregates were mainly quartz, augite and anorthite.

Analysis of the mineral composition of the aggregate fragments responsible for the ceiling delaminations revealed the presence of significant amounts of periclase, as well as quartz, brownmillerite and calcite. Gypsum and portlandite found came from exterior plaster.

Nie stwierdzono, poza sufitami nad mieszkaniami A i B, żadnych innych zarysowań spowodowanych nadmiernymi ugięciami lub/i przemieszczeniami konstrukcji. Dla wyjaśnienia przyczyny awarii stropu podjęto przeprowadzenie badań materiałowych.

3. Wyniki badań

Obserwacje pustaków stropowych, wykazujących uszkodzenie zobrazowane na rysunku 1, wykazały w pustakach widoczne poziome zarysowania, wskazujące na odspajanie się ich dolnych ścianek (rys. 4).



W związku z wystąpieniem na suficie uszkodzeń w formie odspajających się stożków tynku (rys. 4) wraz z fragmentami ścianek pustaków oraz zarysowaniami na ścianach pustaków stropowych postawiono tezę, że uszkodzenia stropu mogą być następstwem korozji wewnętrznej betonu spowodowanej obecnością pęczniejących minerałów [4, 5].

W celu weryfikacji powyżej określonej tezy, pobrano próbki materiałowe w postaci: fragmentu świeżo odspojonej dolnej ścianki pustaka stropowego, materiału pobranego z odspojenia typu pop-out oraz pyłu mineralnego koloru brunatnego, zeskrobanego z dna krateru, powstałego po stożkowym odspojeniu tynku.

W celu określenia składu mineralnego kruszywa przeprowadzono analizę jego ziaren oraz fragmentów pobranych z dna odspojenia metodą dyfrakcji rentgenowskiej. Wyniki badań przedstawiono odpowiednio na rysunkach 5 i 6.

Zidentyfikowanymi fazami w kruszywie jest głównie kwarc, augit oraz skalenie typu anortyt.

Analiza składu mineralnego fragmentów kruszywa, odpowiedzialnych za odspojenie pustaka stropowego, wykazała obecność znacznych ilości peryklazu, a także kwarcu, braunmillerytu oraz kalcytu (rys.

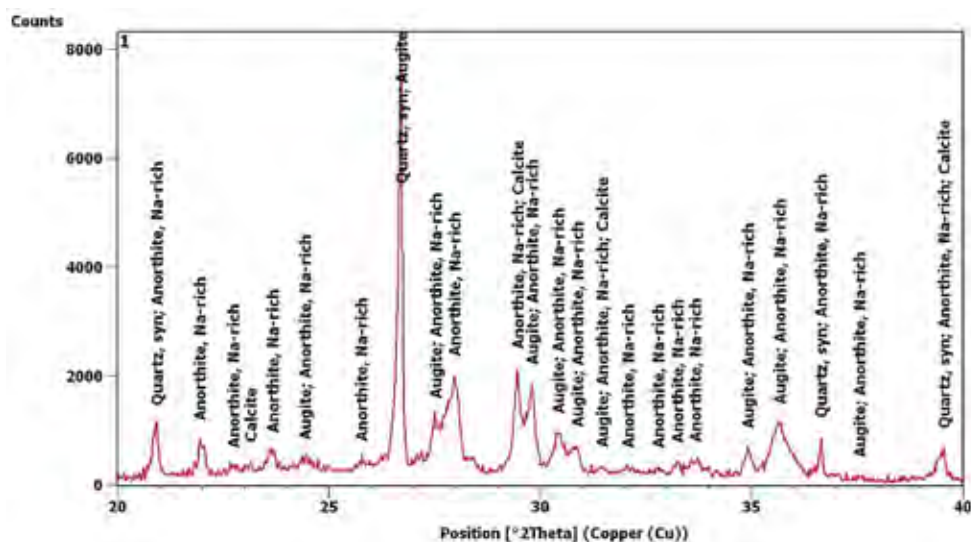


Fig. 5. X-ray diffraction pattern of aggregate from the disintegrated section
Rys. 5. Dyfraktogram kruszywa pobranego z odspojenia

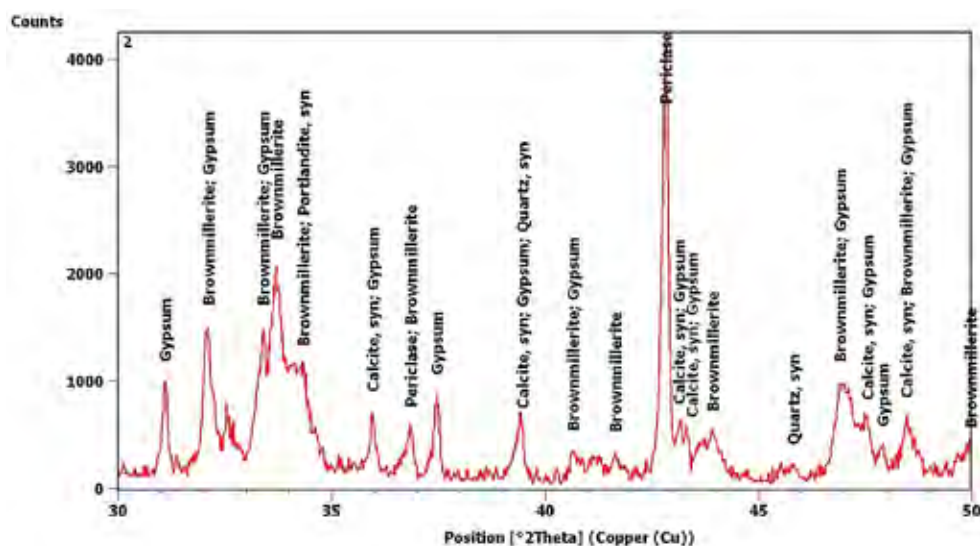


Fig. 6. X-ray diffraction pattern of aggregate grain from the detachment area
Rys. 6. Dyfraktogram ziarna kruszywa z obszaru odspojenia

The mineral composition of aggregate grains (Fig. 6), shows that periclase increased in volume due to slow hydration processes, causing the stresses responsible for the delaminations of slag concrete blocks.

Slowly progressing hydration of periclase leads to the formation of brucite, $\text{Mg}(\text{OH})_2$, whose molar volume is far higher than that of MgO . This process is long lasting and occurs in the hardened material, leading to a reduction in its strength and even to the detachment of filler block fragments [6].

Of all metallurgical slags, the steel slag can sometimes cause problems in ensuring proper durability of concrete made with this type of aggregate. Significant technological changes in steelmaking processes have stabilized the

6). Zidentyfikowany gips oraz portlandyt pochodzą z tynku zewnętrznego.

Skład mineralny ziaren kruszywa przedstawiony na rysunku 6 świadczy o tym, że obecny peryklaz, ulegając powolnym procesom uwodnienia, zwiększył objętość, powodując powstawanie naprężeń odpowiedzialnych za odspojenia fragmentów pustaka żużlobetonowego.

Powoli postępująca hydratacja peryklazu prowadzi do powstania brucytu $\text{Mg}(\text{OH})_2$, którego objętość molowa jest dużo większa niż objętość molowa MgO . Proces ten jest długotrwały i zachodzi w stwardniałym materiale, prowadząc do obniżenia jego wytrzymałości, a nawet do odspojień fragmentów pustaka [6].

Spośród żużli metalurgicznych, żużel stalowniczy może stwarzać niekiedy problemy w zapewnieniu

composition of steel slags, which can be recycled into the production process thereby reducing their supply. However, in certain cases, the steel slags available on the market may contain significant amounts of unbound magnesium oxide – periclase. During the steelmaking process, this oxide is strongly sintered and reacts with water very slowly. Its hydration product, magnesium hydroxide, has a volume larger than the volume originally occupied by MgO. As a result, there is a slow but continuous increase in the volume of the material, which can lead to the destruction of the concrete element (popouts from the surface layer or delamination in the concrete block). Apart from MgO, unbound calcium oxide in slags poses similar risk. In order to avoid undesirable changes in the volume of concrete elements, steel slags need sufficiently long ageing period before being used, to ensure the conversion of MgO and CaO into hydroxides – $Mg(OH)_2$ and $Ca(OH)_2$. It is essential to maintain a constant quality control of the slags, and in particular to systematically make determinations of their volume under hydrothermal conditions.

In the analyzed sections of the Teriva slag blocks, light aggregate derived from blast furnace slag is the predominant aggregate, but grains of steel slag are also present in it.

4. Summary

Observations made in apartments A and B showed the presence of cracks on the ceiling plaster in all rooms, delaminations, and detachment of the bottom surfaces of concrete filler blocks. This poses a direct safety risk to the occupants.

Popouts were another type of damage observed. The fragments of plaster broke away leaving a cone-like void with filler block concrete visible at its point. All popout voids revealed a brownish mineral material. Such damage in concrete is usually associated with internal corrosion in concrete caused by the presence of swelling minerals. The popouts and horizontal cracks in the filler blocks indicate internal corrosion as an evident cause of the damage. Swelling minerals cause the deterioration of the concrete structure and lead to ceiling delaminations.

At the same time, no signs of static problems were observed during the examination. There were no visible cracks on the structural and partition walls, which might indicate excessive deformation of the structure. No transverse cracks on the ceiling beams

odpowiedniej trwałości betonu z tego rodzaju kruszywem. Znaczące zmiany technologiczne w procesach wytwarzania stali ustabilizowały skład żużli stalowniczych, które mogą być zawracane do procesu produkcyjnego, i ograniczyły ich podaż. W określonych jednak przypadkach mogą pojawić się na rynku żużle stalownicze, również takie, które będą zawierać znaczne ilości niezwiązanego tlenu magnezu – peryklazu. W warunkach procesu stalowniczego tlenek ten jest silnie spieczony i bardzo powoli reaguje z wodą. Produktem reakcji jest wodorotlenek magnezu, którego objętość jest znacznie większa niż objętość zajmowana pierwotnie przez MgO. W wyniku hydratacji peryklazu następuje powolny, lecz narastający w sposób ciągły, przyrost objętości materiału, który może doprowadzić do destrukcji elementu betonowego (odpryski z warstwy wierzchniej czy odkruszenie fragmentów pustaka). Podobne zagrożenie jak obecność MgO, stwarza występowanie w żużlach niezwiązanego tlenu wapnia. Aby uniknąć niepożądanych zmian objętości elementów betonowych, należy stosować żużle stalownicze po dostatecznie długim okresie sezonowania, zapewniającym przekształcenie się MgO i CaO w odpowiednie wodorotlenki – $Mg(OH)_2$ i $Ca(OH)_2$. Niezbędna jest stała kontrola jakości żużli, a zwłaszcza systematyczne wykonywanie oznaczeń stałości ich objętości w warunkach hydrotermalnych.

W analizowanych fragmentach pustaków żużlobetonowych Teriva główne kruszywo stanowi kruszywo lekkie z żużla wielkopiecowego, występują w nim jednak ziarna kruszywa z żużla stalowniczego.

4. Podsumowanie

Przeprowadzone obserwacje w lokalach mieszkalnych A i B wykazały występowanie rysowania się tynku na sufitach we wszystkich pomieszczeniach, odpajanie tynku, odpadanie dolnych ścianek pustaków stropowych. Zjawisko to stanowi bezpośrednie zagrożenie dla bezpieczeństwa ludzi przebywających w tych mieszkaniach.

Zaobserwowano też uszkodzenia tynku na suficie typu pop-out. W miejscach tych odspojeniu ulegał fragment tynku w kształcie zbliżonym do stożka. Wierzchołek stożka stanowił beton ścianki pustaka stropowego. W każdym przypadku na dnie powstałego krateru widoczne było wtrącenie materiału mineralnego o brunatnym zabarwieniu. Tego typu uszkodzenia w betonie zwykle związane są z jego korozją wewnętrzną spowodowaną obecnością pęczniących minerałów. Uszkodzenia typu pop-out oraz

or signs of excessive deflection of the ceilings were observed, as confirmed by the initial measurements. No cracks were found on the walls and ceilings in either of the two staircases. No subsidence or concrete apron displacement were detected, which could indicate problems with the subsoil.

Laboratory tests carried out on concrete samples extracted from the filler blocks revealed the presence of periclase in artificial slag aggregate.

Concrete filler blocks can be produced with blast-furnace slag, but steel slag is not allowed. The periclase may have come from a steel slag.

Periclase is a mineral that swells in the presence of moisture. The process of volume growth, in its case, is very slow, measured in months and years.

For the analyzed apartments, there were factors which, several years after construction, triggered internal corrosion in concrete. Both apartments are located in the slab-on-grade section of the building and have floors laid directly on the ground. This can cause increased diffusion of moisture from the ground into the apartments.

In the case of apartment A, the fact that a small child is one of the occupants causes occasional increases in dampness (more laundry, cooking). Apartment B is left unoccupied in the period from spring to autumn.

Both of these factors caused a temporary increase in relative humidity in the apartments. The accumulated amount of water-vapour diffusing towards the ceiling blocks was sufficient to trigger the internal corrosion process in the ceiling concrete blocks. The rate of corrosion processes was dependent on the amount of water vapour. The concentration of periclase grains affected the magnitude of resulting defects: from single popouts to detachment of entire walls of concrete blocks, falling across entire lower walls of hollow blocks.

Observed damage is caused by a hidden defect of the material – the concrete of filler blocks – that appeared after several years of apartments' reliable service life.

widoczne zarysowania poziome w zabudowanych w stropie pustakach wskazują na taką właśnie przyczynę obserwowanych uszkodzeń sufitu.

Równocześnie podczas oględzin nie zaobserwowano żadnych objawów wskazujących na problemy ze statyką budynku. Nie było widocznych rys na ścianach konstrukcyjnych i działowych, wskazujących na nadmierne odkształcenia konstrukcji. Również nie zaobserwowano zarysowań poprzecznych na belkach stropowych ani objawów nadmiernego ugięcia stropów, co potwierdziły wstępne pomiary. Nie zaobserwowano też zarysowań na ścianach i stropach w żadnej z dwóch klatek schodowych. Nie było też widocznych zapadłisk i odsunięć opaski od budynku, które mogły by wskazywać na problemy z podłożem gruntowym.

Badania laboratoryjne, przeprowadzone na pobranych próbkach betonu z pustaków, wykazały jednoznacznie występowanie peryklazu w sztucznym kruszywie żużlowym.

Pustaki stropowe mogą być wykonane z betonu z żużlem wielkopiecowym, lecz nie dopuszcza się stosowania żużla stalowniczego. Zaobserwowany peryklaz mógł pochodzić właśnie z żużla stalowniczego.

Peryklaz jest minerałem wykazującym pęcznienie w obecności wilgoci. Proces przyrostu objętości, w jego przypadku, następuje bardzo powoli i czas ten jest mierzony w miesiącach i latach.

W przypadku analizowanych lokali mieszkalnych wystąpiły czynniki, które po kilku latach od wybudowania uruchomiły proces korozji wewnętrznej w betonie. Obydwa mieszkania są usytuowane w części niepodpiwniczonej i mają posadzki ułożone bezpośrednio na gruncie. To może powodować zwiększoną dyfuzję wilgoci z gruntu do wnętrza mieszkań.

W przypadku mieszkania A obecność małego dziecka spowodowała okresowe zwiększenia zawilgocenia (więcej prania, gotowania). Natomiast mieszkanie B w czasie od wiosny do jesieni jest zamknięte i nieużytkowane, gdyż jego właściciele przebywają poza nim.

Obydwa te czynniki spowodowały okresowe zwiększenie wilgotności względnej w mieszkaniach. Dyfundująca do pustaków w stropie para wodna i zgromadzona jej ilość okazała się wystarczająca do uruchomienia procesu korozji wewnętrznej betonu pustaków stropowych. W zależności od ilości pary wodnej tempo procesów korozyjnych było zmienne. Z kolei koncentracja ziaren peryklazu wpływała na wielkość pojawiających się uszkodzeń: od pojedynczych pop-outów do odpadania całych dolnych ścianek pustaków.

Zaobserwowane uszkodzenia są spowodowane wadą ukrytą pustaków stropowych, która ujawniła się po kilku latach eksploatacji mieszkań.

References

- [1] Hebda L.: *Ekspertyza techniczna stropu nad parterem w mieszkaniach A i B w budynku mieszkalnym w Piasecznie*, 2016.
- [2] Praca zbiorowa, *Poradnik. Remonty i modernizacja budynków mieszkalnych*. Arkady, Warszawa 1987.
- [3] Masłowski F., Spiżewska D.: *Wzmocnienie konstrukcji budowlanych*, Arkady, Warszawa 2000.
- [4] Owsiak Z. *Analiza przyczyn awarii stropu betonowego*. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej, Awarie Budowlane, Międzyzdroje, 1994, s. 735-741.
- [5] Żaboklicki A., Owsiak Z.: *Uszkodzenia żelbetowych płyt dachowych przyczyną stanu awaryjnego dachu hali przemysłowej*. Materiały XXVI Konferencji Naukowo-Technicznej, Awarie Budowlane, Międzyzdroje, 2013, s. 897-904.
- [6] Gawlicki M., Małolepszy J.: *Wykorzystanie odpadów przemysłowych w drogownictwie – zagrożenia*, Materiały XXVI Konferencji Naukowo-Technicznej, Awarie Budowlane, Międzyzdroje, 2013, s. 23-38.



environment
environment

THE USE OF THE FRACTAL GEOMETRY TO DESCRIBE THE PORE SPACE IN WET SOURCE CLAYS

ZASTOSOWANIE GEOMETRII FRAKTALNEJ DO OPISU PRZESTRZENI POROWEJ W WILGOTNYCH IŁACH

Abstract

In this paper the authors attempted to use the fractal geometry to describe the pore space of the water-clay systems. The analysis was carried out on the source clays STx-1b and SWy-2. The values of the constant parameter k and fractal dimension D was determined by means of statistic. On this basis of the analysis, it was found that the description of the pore space using fractal geometry is possible.

Keywords: fractal geometry, pore distribution, bentonite, montmorillonite, STx-1b, SWy-2

Streszczenie

W niniejszym artykule podjęto próbę zastosowania geometrii fraktalnej do opisu przestrzeni porowej systemów woda-ił. Analiza została przeprowadzona na iłach modelowych STx-1b, SWy-2. Statystycznie wyznaczono wartości parametrów stałej k i wymiaru fraktalnego D . Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że opis przestrzeni porowej przy użyciu geometrii fraktalnej jest możliwy.

Słowa kluczowe: geometria fraktalna, dystrybucja porów, bentonit, Montmoryllonit, STx-1b, SWy-2

1. Introduction

Determining the pore space in wet cohesive soils is very difficult. Because of this it was decided to try to use the statistical description of this space by fractal geometry. The tests were made on unmodified clay materials:

- bentonite STx-1b from Texas (USA),
- bentonite SWy-2 from Wyoming (USA).

These soils are considered as source model clays [1]. The soils were purchased in the Source Clays Repository of The Clay Minerals Society, Chantilly, Virginia, USA. They were well characterized in the paper [2].

There are many examples of the fractal objects in mathematics, such as the Sierpinski pyramid with a fractal dimension $D = 2$, which is presented in Figure 1. The objects with fractal structure are also common

1. Wprowadzenie

Ze względu na bardzo trudne określenie przestrzeni porowej w wilgotnych gruntach spoistych postanowiono podjąć próbę statystycznego opisu tej przestrzeni za pomocą geometrii fraktalnej. Badania zostały przeprowadzone na niemodyfikowanych materiałach ilastych:

- bentonit STx-1b z Teksasu (USA),
- bentonit SWy-2 z Wyoming (USA).

Grunty te są uznawane za iły modelowe [1]. Grunty zostały zakupione w Source Clays Repository przy The Clay Minerals Society, Chantilly, Virginia, USA. Zostały bliżej scharakteryzowane w pracy [2].

W matematyce istnieje wiele przykładów obiektów fraktalnych, takich jak np. piramida Sierpińskiego o wymiarze fraktalnym $D = 2$ pokazana na rysunku 1. Struktury o budowie fraktalnej są powszechnie spo-

in nature. Examples include crystalline dendrites (e.g. snowflakes), coastlines, Norwegian fjords, blood vessels, river systems or lightning. However, the fractal structure of natural objects may only have statistical character.

tykane również w przyrodzie. Przykładem mogą być krystaliczne dendryty (np. płatki śniegu), linie wybrzeży, system fiordów norweskich, system naczyń krwionośnych, systemy wodne rzek lub błyskawica. Jednakże natura fraktalna obiektów naturalnych może posiadać charakter jedynie statystyczny.



Fig. 1. Example of a fractal object $D = 2$ (Sierpinski pyramid)

Rys. 1. Przykład obiektu o wymiarze fraktalnym $D = 2$ (piramida Sierpińskiego)

2. Fractal geometry theory

The concept of a fractal (Latin fractus - broken, partial, fractional) was first introduced into mathematics by French mathematician and computer scientist Benoît Mandelbrot (1924-2010). It concerns the mathematical description of certain specific repeatedly shaped objects regardless of the scale of observation and possible to describe by recursive formula. We can say, that fractal objects are self-similar at each level of observation

The fractal dimension D is one of the key concept of fractal description of reality. It was introduced by German mathematician Feliks Hausdorff (1868-1942) and, based on other grounds, by Russian mathematician Andrei Kolmogorov (1903-1987) independently. Although, strictly speaking, the dimensions of Hausdorff and Kolmogorov differ, it was assumed to be identified because, in one version, Hausdorff's complex definition is reduced to Kolmogorov's definition and as such was used in Mandelbrot's papers.

The idea of the Kolmogorov dimension is as follows [3]: let the geometric object F contained in the n -dimensional Euclidean space be covered with a set of cubes (i.e., squares or cubes respectively for $n = 2$ or $n = 3$) with sides equal h . Let $N(h)$ be the minimum number of cubes needed to cover the whole object.

2. Teoria geometrii fraktalnej

Pojęcie fraktalu (łac. fractus – złamany, cząstkowy, ułamkowy) zostało wprowadzone do matematyki przez francuskiego matematyka i informatyka Benoît Mandelbrota (1924-2010). Dotyczy ono opisu matematycznego pewnych specyficznych obiektów o kształcie powtarzalnym, niezależnie od przyjętej skali obserwacji i możliwym do opisu wzorem rekurencyjnym. Innymi słowy, obiekty fraktalne są samopodobne na każdym poziomie obserwacji.

Jednym z kluczowych pojęć fraktalnego opisu rzeczywistości jest pojęcie tzw. wymiaru fraktalnego D . Został on wprowadzony przez niemieckiego matematyka Feliksa Hausdorfa (1868-1942) i niezależnie, na podstawie innych przesłanek, przez rosyjskiego matematyka Andrieja Kołmogorowa (1903-1987). Choć wymiary Hausdorfa i Kołmogorowa różnią się między sobą, jednak przyjęło się je utożsamiać, ponieważ w pewnej wersji skomplikowana definicja Hausdorfa sprowadza się do definicji Kołmogorowa i jako taka była używana w pracach Mandelbrota.

Idea wymiaru Kołmogorowa jest następująca [3]: niech obiekt geometryczny F zawarty w n -wymiarowej przestrzeni euklidesowej będzie pokryty zbiorem kostek (tj. kwadratów lub sześciątów odpowiednio dla $n = 2$ lub $n = 3$) o bokach równych h . Niech $N(h)$ oznacza minimalną liczbę kostek potrzebnych do pokrycia całego obiektu.

It is known that the following proportions occur for sufficiently small h (Fig. 2):

- for a smooth line: $N(h) \sim (1/h)$,
- for a smooth surface: $N(h) \sim (1/h)^2$,
- for space in R^3 : $N(h) \sim (1/h)^3$,
- for a certain geometric object (fractals): $N(h) \sim (1/h)^D$, where D is not the integer.

Wiadomo, że gdy h jest dostatecznie małe, to zachodzą następujące proporcjonalności (rys. 2):

- dla odcinka gładkiej linii: $N(h) \sim (1/h)$,
- dla płata gładkiej powierzchni: $N(h) \sim (1/h)^2$,
- dla obszaru w R^3 : $N(h) \sim (1/h)^3$,
- dla pewnych obiektów geometrycznych (fraktali): $N(h) \sim (1/h)^D$, gdzie D nie jest liczbą całkowitą.

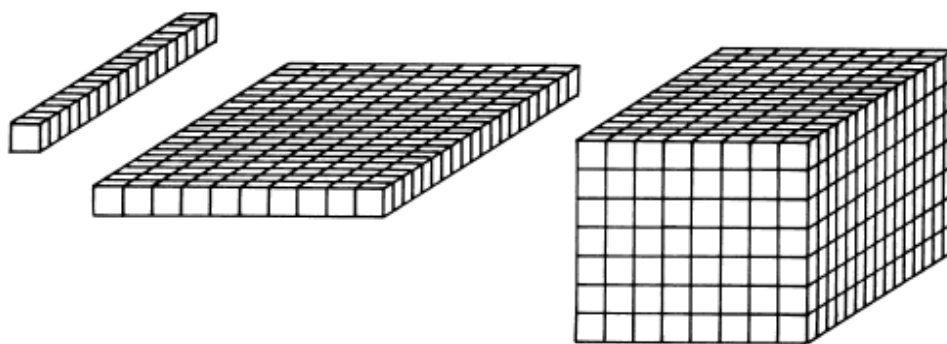


Fig. 2. Different methods of covering objects by one-, two- and three-dimensional set of cubes

Rys. 2. Sposoby pokrycia obiektów: jedno-, dwu- i trójwymiarowego zbiorami kostek

For dimension D there is following equality:

$$D = \log_{1/h} N(h) = \frac{\log N(h)}{\log(\frac{1}{h})} \quad (1)$$

The fractal dimension is defined as the limit value:

$$D = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\log N(h)}{\log(\frac{1}{h})} \quad (2)$$

Tak więc dla wymiaru D zachodzi równość:

$$D = \log_{1/h} N(h) = \frac{\log N(h)}{\log(\frac{1}{h})} \quad (1)$$

Wymiar fraktalny jest zdefiniowany jako wartość graniczna:

$$D = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\log N(h)}{\log(\frac{1}{h})} \quad (2)$$

3. Analysis and discussion

This section presents an attempt to use fractal geometry to describe the pore space of water-montmorillonite systems. These are systems in which pores satisfy the basic, but not the only one, postulate of fractal geometry: the dimensions of each object include a plurality of observation levels, starting with macropores of more than 10000 nm to micropores smaller than 1 nm. Particularly interesting is the question of the value of the fractal dimension and its possible dependence on the humidity.

The starting point of analysis was the equation presented in [4], describing the theoretical dependence of the volume derivative value of the radius PSD from the radius value:

$$\frac{dV}{dr} = kr^{(2-D)} \quad (3)$$

3. Omówienie i analiza

W niniejszej sekcji podjęto próbę zastosowania geometrii fraktalnej do opisu przestrzeni porowej systemów woda-montmorillonit. Są to układy, których pory spełniają podstawowy, jednak nie jedyny, postulat geometrii fraktalnej: wymiary poszczególnych obiektów obejmują wiele poziomów obserwacji, od makroporów o wymiarach ponad 10000 nm do mikroporów o wymiarach poniżej 1 nm. Szczególnie interesujące wydaje się pytanie o wartość wymiaru fraktalnego oraz jego ewentualną zależność od wilgotności.

Za punkt wyjścia przyjęto równanie, podane w pracy [4], opisujące teoretyczną zależność wartości pochodnej objętości po promieniu PSD od wartości promienia:

$$\frac{dV}{dr} = kr^{(2-D)} \quad (3)$$

where: V – the volume, r – the radius, k – a constant, D – fractal dimension.

Using differential distributions in the form $\Delta V/\Delta r = f(r)$, statistical matching of parameters of function given by equation (3) to empirical data on natural clays SWy2 and STx-1b was performed. The results are presented in Table 1.

SWy-2		
$w, \%$	k	D
34.01	0.005608	1.379527
72.46	0.018004	2.054189
85.82	0.015450	1.687320
86.38	0.013669	1.641999
88.41	0.016309	1.897470
98.11	0.020690	1.976451
117.51	0.044929	2.241638
STx-1b		
41.83	0.023559	1.904771
50.70	0.029647	2.122536
63.74	0.039284	2.320344
64.86	0.043647	2.323363
70.06	0.029297	2.060203
70.08	0.058824	2.209054
70.51	0.026927	2.074151
73.39	0.030209	2.082203
81.72	0.048018	2.303491

Using the analysis of variance, the significance of the influence of the ‘clay’ (soil type) and the ‘ w ’ (humidity) on the values of parameters k and D was evaluated. The results are shown in Tables 2 and 3.

The results of the analysis of variance confirm the statistically significant influence (significance level $p < 0.05$) of soil type and humidity on the values of the fractal dimension D .

Table 2. The significance of the influence of the ‘clay’ (soil type) and ‘ w ’ (moisture) on the values of the parameter k
Tabela 2. Istotność wpływu czynników ‘clay’ (rodzaj gruntu) i ‘ w ’ (wilgotność) na otrzymane wartości parametru k

	SS	Degr. of - Freedom	MS	F	p
Intercept	0.008156	1	0.008156	77.79746	0.000005
Clay	0.000997	1	0.000997	9.51438	0.011551
w	0.000794	2	0.000397	3.78606	0.059687
Clay* w	0.000025	2	0.000013	0.12103	0.887287
Error	0.001048	10	0.000105		

gdzie: V – objętość, r – promień, k – pewna stała, D – wymiar fraktalny.

Wykorzystując rozkłady różnicowe o postaci $\Delta V/\Delta r = f(r)$, przeprowadzono statystyczne dopasowanie parametrów funkcji danej równaniem (3) do danych empirycznych dotyczących naturalnych iłów SWy2 i STx-1b. Wyniki przedstawia tabela 1.

Table 1. Empirical values of the constant k and the fractal dimension D obtained by the equation (3)

Tabela 1. Otrzymane empirycznie wartości stałej k i wymiaru fraktalnego D z równania (3)

Teraz stosując analizę wariancji, oceniono istotność wpływu czynnika ‘clay’ (rodzaj gruntu) i ‘ w ’ (wilgotność) na otrzymane wartości parametrów k i D . Wyniki przedstawiono w tabelach 2 i 3.

Wyniki analizy wariancji potwierdzają istotny statystycznie (na poziomie istotności $p < 0,05$) wpływ rodzaju gruntu i wilgotności na wartości wymiaru fraktalnego D .

Table 3. The significance of the influence of the 'clay' (soil type) and 'w' (moisture) on the values of the parameter D
Tabela 3. Istotność wpływu czynników 'clay' (rodzaj gruntu) i 'w' (wilgotność) na otrzymane wartości parametru D

	SS	Degr. of - Freedom	MS	F	p
Intercept	40.78205	1	40.78205	1663.208	0.000000
Clay	0.41207	1	0.41207	16.805	0.002147
w	0.35420	2	0.17710	7.223	0.011456
Clay*w	0.06716	2	0.03358	1.369	0.298089
Error	0.24520	10	0.02452		

The influence of the 'clay' on the value of constant k is statistically significant (significance level $p < 0.05$); the influence of 'w' seems to be slightly less important, but still significant at the significance level $p < 0.1$.

Considering this, the function form was adjusted separately for each soil:

$$k = a \cdot w + b \quad (4)$$

$$D = a \cdot w + b \quad (5)$$

Matching results are shown in Table 4 and in Figures 3 and 4.

Wpływ czynnika 'clay' na wartość stałej k jest istotny statystycznie (na poziomie istotności $p < 0,05$); wpływ czynnika 'w' okazuje się nieco mniej istotny, choć nadal istotny na poziomie $p < 0,1$.

Biorąc powyższe pod uwagę, osobno dla każdego gruntu przeprowadzono dopasowanie funkcji postaci:

$$k = a \cdot w + b \quad (4)$$

$$D = a \cdot w + b \quad (5)$$

Wyniki dopasowania przedstawiono w tabeli 4 oraz na rysunkach 3 i 4.

Table 4. The results of fitting the functions given by equations (4) and (5)
Tabela 4. Wyniki dopasowania funkcji danych równaniami (4) i (5)

	SWy2				STx-1b			
	k		D		k		D	
	Estimate	p	Estimate	p	Estimate	p	Estimate	p
a	0.00038	0.0256	0.00891	0.0339	0.00047	0.1774	0.00617	0.1506
b	-0.0131	0.2753	1.0975	0.0092	0.005661	0.7947	1.7529	0.0002
R	0.81465		0.79154		0.49308		0.52066	

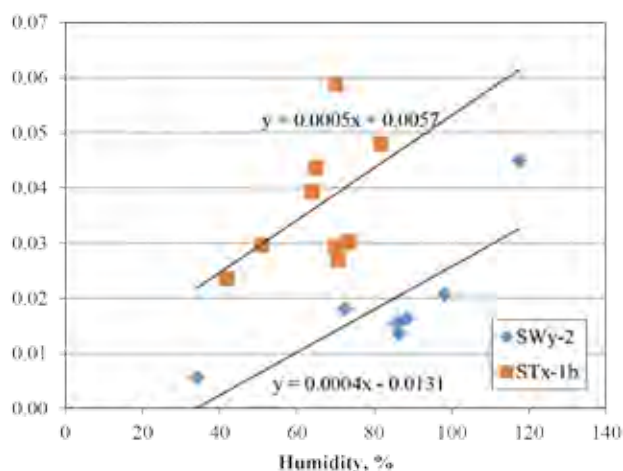


Fig. 3. The dependence of the constant k in equation (3) on the humidity

Rys. 3. Zależność stałej k w równaniu (3) od wilgotności

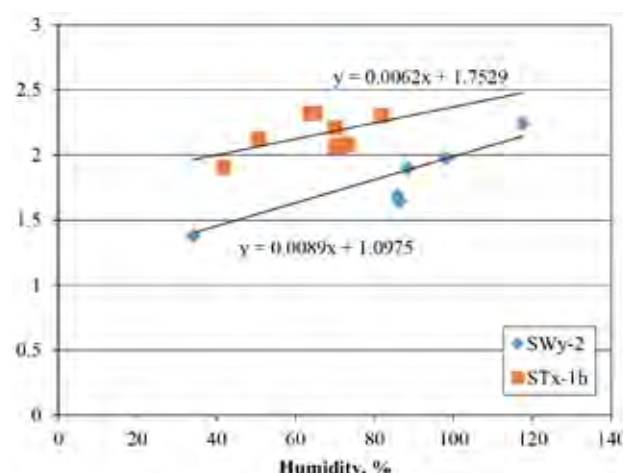


Fig. 4. The dependence of the fractal dimension D on the humidity

Rys. 4. Zależność wymiaru fraktalnego D od wilgotności

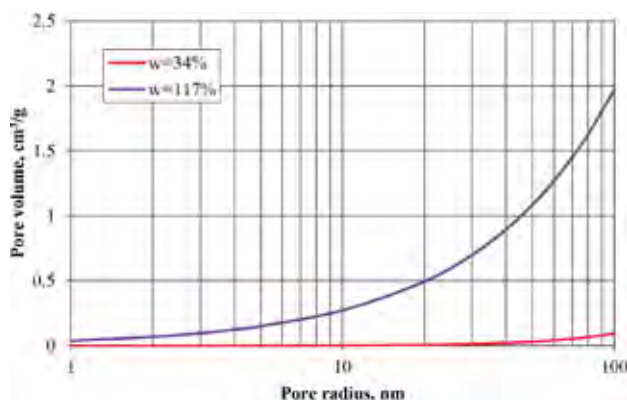


Fig. 5. The dependence of the cumulative pore volume on the pore radius obtained for two extreme humidities using fractal geometry (bentonite SWy2)

Rys. 5. Zależność kumulacyjnej objętości porów od promienia otrzymana dla dwóch skrajnych wilgotności przy zastosowaniu geometrii fraktalnej (bentonit SWy2)

Transforming the equation (3) and integrating both sides, we obtain an equation describing the volume of all pores with radii $\leq r$:

$$V = \frac{k}{3-D} r^{3-D} \quad (6)$$

Using the linear relationships described by equations (4) and (5) and the estimators of parameters a and b described in Table 4, the values of the constant k and the fractal dimension D for two extremes of humidity (a minimum and a maximum humidity in the population of the soil samples) were calculated. The obtained values of k and D were used in Equation (6). Received “fractal” volume dependence from the pore dimension is shown in Figures 5 and 6.

4. Conclusions

- The fractal description of the pore space of expansive soils is possible and its parameters, including the fractal dimension D , depend in a statistically significant way from the origin of bentonite and humidity.
- The fractal dimension D for both bentonites increases with increasing humidity, which can be explained as an increase in the degree of system differentiation.
- The obtained dependencies, describing the cumulative pore volume as a function of the radius, show two different effects for the two analyzed clays: in sodium SWy-2 a very pronounced influence of humidity is observed; the effect of humidity in the calcium STx-1b is not very significant.

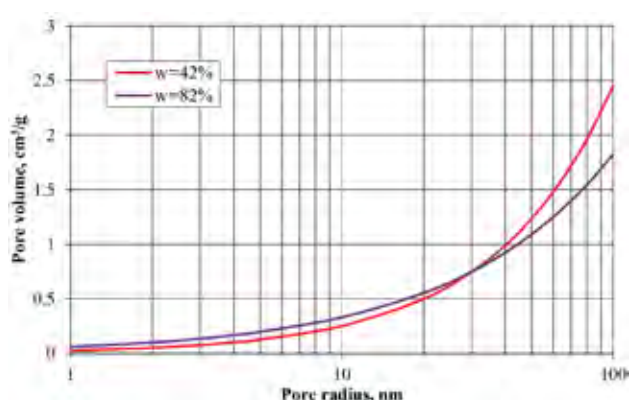


Fig. 6. The dependence of the cumulative pore volume on the pore radius obtained for two extreme humidities using fractal geometry (bentonite STx-1b)

Rys. 6. Zależność kumulacyjnej objętości porów od promienia otrzymana dla dwóch skrajnych wilgotności przy zastosowaniu geometrii fraktalnej (bentonit STx-1b)

Przekształcając równanie (3) i całkując jego obie strony, otrzymujemy równanie opisujące objętość wszystkich porów o promieniach $\leq r$:

$$V = \frac{k}{3-D} r^{3-D} \quad (6)$$

Wykorzystując zależności liniowe opisane równaniami (4) i (5) i estymatory parametrów a i b opisane w tabeli 4, obliczano wartości stałej k i wymiaru fraktalnego D dla dwóch skrajnych wilgotności (tzn. najmniejszej i największej wilgotności w populacji próbek danego gruntu). Tak otrzymane wartości k i D użyto w równaniu (6), otrzymując „fraktalne” zależności objętości od wymiaru poru, pokazane na rysunkach 5 i 6.

4. Wnioski

- Opis fraktalny przestrzeni porowej gruntów ekspansyjnych jest możliwy, a jego parametry, w tym wymiar fraktalny D , zależą w sposób istotny statystycznie od pochodzenia bentonitu i wilgotności.
- Wymiar fraktalny D w przypadku obydwu analizowanych bentonitów rośnie wraz ze wzrostem wilgotności, co można tłumaczyć jako wzrost stopnia zróżnicowania układu.
- Otrzymane zależności, opisujące skumulowaną objętość porów w funkcji promienia, pokazują dla dwóch analizowanych ilów dwa odmienne typy zachowania: w sodowym SWy2 obserwuje się bardzo wyraźny wpływ wilgotności, w wapniowym STx-1b wpływ wilgotności okazuje się mało istotny.

- The fact that the two different types of $V = f(r, w)$ observed in Na and Ca clay are consistent with the generally accepted theory is an indirect positive validation of the fractal description of the pore space of expansive soils.
- Fakt, że opisane powyżej dwa różne typy zależności $V = f(r, w)$ obserwowane w ilach typu Na i Ca pozostają w zgodzie z ogólnie przyjętą teorią, stanowi pośrednią pozytywną walidację fraktalnego opisu przestrzeni porowej gruntów ekspansywnych.

References

- [1] Bergaya F., Lagaly G.: *Surface modification of clay minerals*, Applied Clay Science 19 (2001), pp. 1-30.
- [2] Kozłowski T., Walaszczyk Ł.: *Analyzing expanding clays by thermoporometry using a stochastic deconvolution of the DSC signal*, Clays and Clay Minerals, Vol. 62, No. 5 (2014), pp. 386-402.
- [3] Kudrewicz J.: *Fraktale i chaos*. Wyd. II. WNT, Warszawa 1993, pp. 89-101.
- [4] Rouquerol J., Avnir D., Fairbridge C.W., Everett D.H., Haynes J.M., Pernicone N., Ramsay J.D.F., Sing K.S.W., Unger K.K.: *Recommendations for the characterization of porous solids (Technical Report)*, Pure and Applied Chemistry, Vol. 66, No. 8 (1994), pp. 1739-1758.

RYSZARD DACHOWSKI¹
PAULINA KOSTRZEWA²

Kielce University of Technology

¹ e-mail: tobrd@tu.kielce.pl

² e-mail: pkostrzewa@tu.kielce.pl

REALIZATION OF UNDERGROUND OBJECTS BY THE OPEN CAISSON METHOD IN CONDITIONS OF BUILT-UP AREAS

REALIZACJA OBIEKTÓW PODZIEMNYCH METODĄ STUDNI OPUSZCZANYCH W WARUNKACH SĄSIEDZTWA ISTNIEJĄCYCH BUDOWLI

Abstract

The article presents the construction of underground objects by open caisson method, under conditions of built-up areas. The technological stages of the open caisson sinking have been separated. The work identified the main causes affecting the deformation of the soil mass surrounding the open caisson. On this basis, the most important construction and technological projects were devoted to the reduction of deformation of the ground surrounding the open caisson during sinking. The ultimate goal of the article is to determine the optimal way to reduce the frictional forces on the outer surface of the reinforced concrete coat of the open caisson. This has been achieved through the implementation of multidimensional technical and economic analysis as the main components in the form of biplots.

Keywords: open caisson method, sinking, land settlement, criterion analysis

Streszczenie

Artykuł przedstawia realizację obiektów podziemnych w technologii studni opuszczanych, w warunkach ścisłej zabudowy urbanistycznej. Wydzielone zostały możliwe stadia technologiczne pogrążania studni. W pracy określono główne przyczyny mające wpływ na deformacje masywu gruntu otaczającego studnię. Na tej podstawie wydzielono najważniejsze przedsięwzięcia konstrukcyjno-technologiczne dotyczące zmniejszania deformacji ośrodka gruntowego wokół pogrążanej studni opuszczanej. Celem ostatecznym artykułu jest wyznaczenie optymalnego sposobu zmniejszania sił tarcia po zewnętrznej powierzchni płaszcza żelbetowego studni opuszczanej. Osiągnięto to poprzez wykonanie wielowymiarowej analizy techniczno-ekonomicznej jako analizy głównych składowych w postaci biplotów.

Słowa kluczowe: studnia opuszczana, pogrążanie, osiadanie gruntu, analiza kryterialna

1. Introduction

The realization of underground industrial, municipal, transport, urban, hydrotechnical or specialized industrial facilities is becoming increasingly important. Often the problem of implementing underground objects is the neighborhood of existing buildings. An important feature of building in conditions of „infill” is to preserve the existing state of nearby objects (preventing the appearance of significant soil deformation). The high responsibility

1. Wprowadzenie

Realizacja podziemnych obiektów przemysłowych, komunalnych, transportowych, urbanistycznych, hydrotechnicznych czy też specjalistycznych nabiera coraz większego znaczenia. Częstym problemem realizacji obiektów podziemnych są warunki sąsiedztwa istniejących budowli. Istotną cechą budowy w warunkach „plombowych” jest zachowanie stanu istniejącego usytuowanych w pobliżu obiektów (zapobieganie pojawieniu się znacznych deformacji gruntu).

for the performance of underground facilities under such conditions and the considerable amount of involved resources, increased the design and implementation requirements.

Existing technologies and constructions allow to build tall buildings up to almost 1000 m, even buildings up to about 4000 m high are planned. With such constructions, the foundations are always complicated because the dimensions of the foundation plate and piles are significant. Therefore, it is rational to realize a foundation plate with underground rooms.

During the implementation of objects in the vicinity of existing buildings, the appearance of significant subsidence of the substrate must be eliminated (to ensure the integrity of the existing buildings and their equipment, as well as to reduce the labor intensity). In this case, the following technological and constructional solutions may be used:

- slurry wall, made by piling overlap;
- excavation using the open-pit method with a temporary excavation casing, eg Larssen sheet piling;
- open caisson method.

The first technology, it is most friendly in the conditions of dense urban development, when there can be no deformation of the land near the existing buildings. This technology requires a high performing culture, otherwise there is often a violation of the structure of the concreted sections of the wall, which results in lower quality concrete works.

The second technology – excavation with temporary casing (Larssen sheet piling), is not always acceptable under „infill” conditions, because rammers or vibratory technology are used to sink them into the ground.

Third technology is most commonly used to implement underground objects. In this case, the object is completely executed on the surface of the ground, which allows for constant control of the quality of the sinking down underground structure. However, the deformation of the surrounding ground masses occurs in the sinking down process.

In the implementation of large-scale underground facilities using the open caisson, methods are used to reduce the zones of violation of the structure of the ground. It gives the opportunity to work near the existing foundations of the building.

Duża odpowiedzialność za wykonawstwo obiektów podziemnych w takich warunkach oraz znaczna ilość zaangażowanych środków spowodowały podwyższenie wymogów w projektowaniu i realizacji.

Istniejące technologie i konstrukcje pozwalają budować wysokościowe budynki do prawie 1000 m, planuje się nawet budynki o wysokości około 4000 m. Przy takich budowlach zawsze komplikuje się wykonawstwo fundamentów, ponieważ wymiary płyty fundamentowej i pali są znaczne. W związku z tym racjonalnym staje się realizacja płyty fundamentowej z podziemnymi pomieszczeniami.

W trakcie realizacji obiektów w warunkach sąsiedztwa istniejących budowli trzeba wyeliminować pojawianie się znacznych osiadań podłoża (dla zapewnienia stanu nienaruszonego istniejących budowli i ich urządzeń, a także obniżenia pracochłonności). W tym przypadku mogą być wykorzystane następujące rozwiązania technologiczno-konstrukcyjne:

- ściana szczelinowa, wykonywana metodą pali zachodzących na siebie;
- wykop realizowany metodą odkrywkową z obudową tymczasową wykopu np. ścianka Larsena;
- studnia opuszczana.

Pierwsza technologia jest najbardziej przyjazna w warunkach gęstej zabudowy miejskiej, kiedy niedopuszczalne są żadne deformacje gruntu w pobliżu istniejących budowli; wymaga ona wysokiej kultury wykonawstwa, w przeciwnym razie często pojawia się naruszenie struktury zabetonowanych odcinków ścian, co doprowadza do obniżenia jakości robót betonowych.

Druga technologia – wykop z obudową tymczasową (ścianka szczelna) – nie zawsze jest do przyjęcia w warunkach „plombowych”, ponieważ do pogrążania ich w grunt stosuje się urządzenia do wbijania albo technikę wibracyjną.

Trzecia technologia jest najczęściej stosowana do realizacji obiektów podziemnych. W tym przypadku obiekt wykonywany jest całkowicie na powierzchni gruntu, co pozwala prowadzić stałą kontrolę jakości pogrążanej podziemnej budowli. Jednakże w procesie pogrążania studni pojawiają się deformacje otaczającego masywu gruntu.

Przy realizacji obiektów podziemnych o dużych wymiarach metodą studni opuszczanej stosuje się sposoby pozwalające zmniejszać strefy naruszenia struktury gruntu. Daje to możliwość prowadzenia prac w pobliżu istniejących fundamentów budowli.

2. Analysis of the influence of factors that occur as a result of sinking the caisson to land deformation

As a result of a comparative analysis of the various technological developments in sinking walls, a significant technogenic impact of the descent process on existing buildings has been determined. This effect is expressed in the form of settling of the surrounding ground base [1-6].

When determining the width of the soil deformation zone, it is recommended to adopt a soil shear plane at an angle of 45° to $\phi/2$ to a level. Where ϕ is the design value of the internal friction angle of the soil [7]. The open caisson sinking is possible in the neighborhood of existing buildings, if existing buildings and equipment are not within the boundaries of the structure of the soil, the width of which is determined in accordance with formula:

$$B = H_k \cdot \operatorname{tg} (45^\circ - \phi/2) \quad (1)$$

where: B – width of soil deformation zone, H_k – design depth of caisson sinking, ϕ – angle of friction.

Based on the analysis of literature as well as own research, the main causes that influence the deformation of the surrounding ground base are shown in Figure 1 [38].

2. Analiza wpływu na deformację gruntu czynników, pojawiających się w wyniku pograżania studni opuszczanej

W wyniku analizy porównawczej różnorodnych przedsięwzięć technologiczno-konstrukcyjnych studni opuszczanych ustalono znaczny technogeniczny wpływ procesu opuszczania na istniejące budowle. Wpływ ten wyraża się w postaci osiadania otaczającego ośrodka gruntowego [1-6].

Przy określeniu wymiarów strefy naruszenia struktury gruntu zalecane jest przyjęcie płaszczyzny ścinania gruntu pod kątem od 45° do $\phi/2$ do poziomu, gdzie ϕ to wartość obliczeniowa kąta tarcia wewnętrznego gruntu [7]. Pograżanie studni opuszczanych jest możliwe w warunkach sąsiedztwa istniejących budowli, jeśli istniejące budynki i urządzenia nie znajdują się w granicach strefy naruszenia struktury gruntu, szerokość której określa się wg wzoru:

$$B = H_k \cdot \operatorname{tg} (45^\circ - \phi/2) \quad (1)$$

gdzie: B – szerokość strefy deformacji gruntu, H_k – głębokość projektowa pograżenia studni, ϕ – kąt tarcia wewnętrznego gruntu.

Na podstawie analizy literatury, a także badań własnych, wydzieliła się główne przyczyny, wpływające na deformację otaczającego ośrodka gruntowego, przedstawione na rysunku 1 [8].

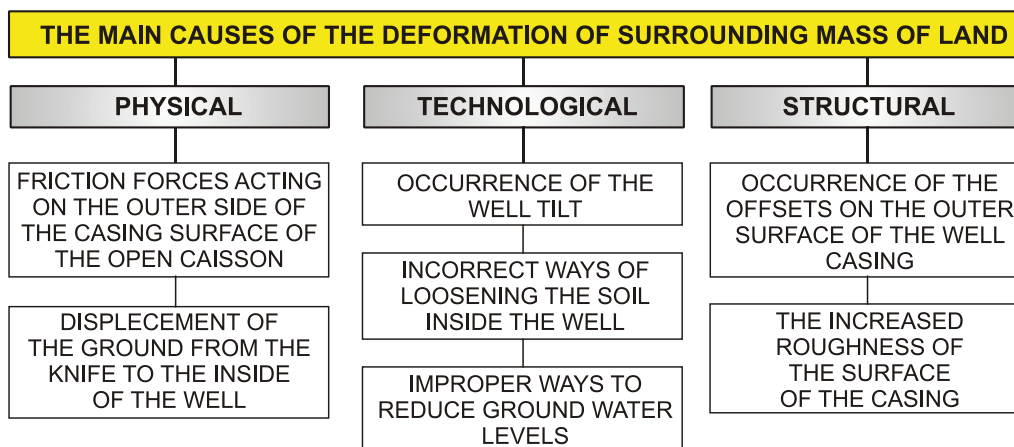


Fig. 1. Main causes affecting the deformation of the ground base that surrounds the caisson sinking

Rys. 1. Główne przyczyny wpływające na deformację ośrodka gruntowego otaczającego pograżane studnie

Based on the analysis of Figure 1 and the generalization of bibliographic data, a classification of technological and construction projects has been developed, to improve the way the caisson is sinking during the implementation of the existing buildings and foundations (Fig. 2) [9-15].

Na podstawie analizy rysunku 1 oraz uogólnienia danych literaturowych opracowano klasyfikację przedsięwzięć technologiczno-konstrukcyjnych w celu doskonalenia sposobu studni opuszczanej podczas realizacji w warunkach sąsiedztwa istniejących budowli i fundamentów (rys. 2) [9-15].

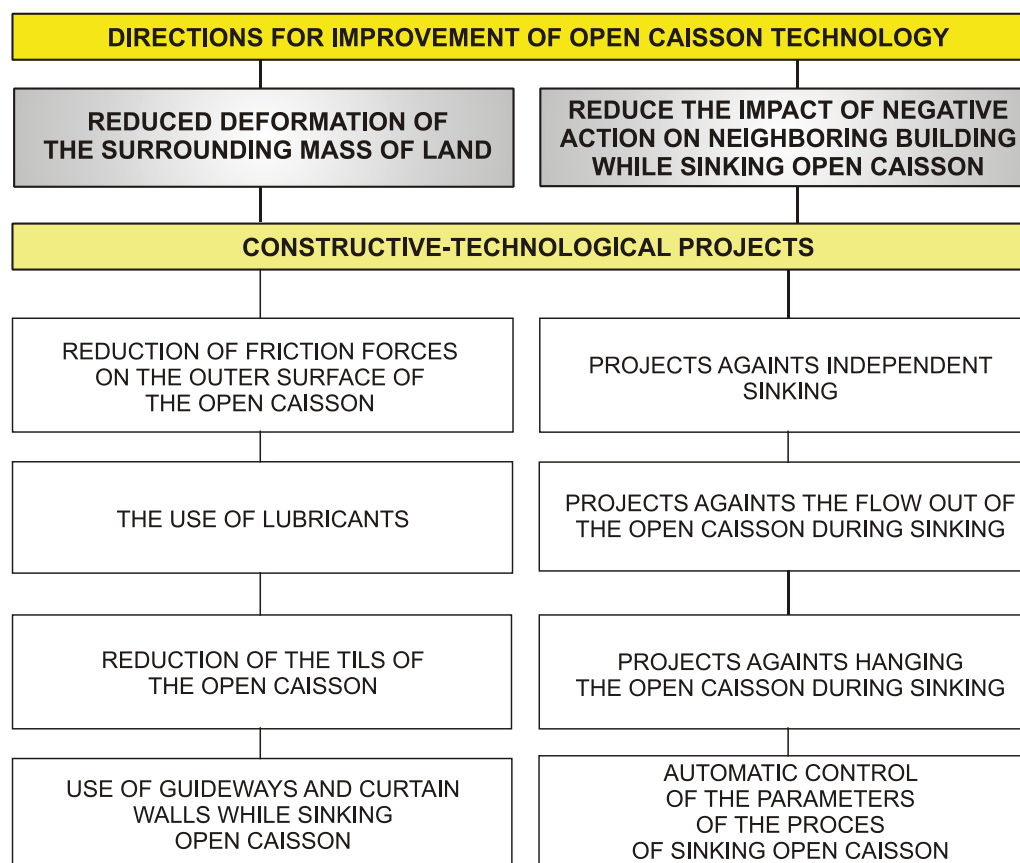


Fig. 2. Classification of structure and technological projects for the construction of underground building in conditions of built-up areas using open caisson method

Rys. 2. Klasyfikacja konstrukcyjno-technologicznych przedsięwzięć realizacji budowli podziemnych w warunkach zabudowy „plombowej”, sposobem studni opuszczanych

3. Multidimensional technical and economical analysis of ways to reduce ground frictional forces on the outer side of the cover of caisson sinking

Technological and economic analyzes of construction-technology-material projects can be made through a variety of mathematical tools. The most familiar measurement tool is the SERVQAL scale used to measure the perceived quality of the projects. The second type of scale for qualitative measurement is the SIMALTO scale, which is the scale of simultaneous multi-parameter compromises. Decisions are made by participants in the investment process on the basis of various combinations of variable ventures. The third direction of assessment is comparative scales, where relative scales are used, eg importance scales. The methods presented above are the most commonly used combinations of mean values of evaluated criteria, which are classified on the axes of the coordinate system. The advantage of this method is the simplicity of the graphic interpretation, but at the same time the main disadvantage is subjectivism when assessing critical scale values, or

3. Wielowymiarowa analiza techniczno-ekonomiczna sposobów zmniejszających siły tarcia gruntu po zewnętrznej stronie ściany płaszcza studni opuszczanej

Analizy techniczno-ekonomicznej przedsięwzięć konstrukcyjno-technologiczno-materiałowych można dokonać, opierając się na różnorodnych narzędziach matematycznych. Najbardziej znanym z nich narzędziem pomiaru jest skala SERVQAL, używana w pomiarze postrzegawczej jakości przedsięwzięć. Drugim typem skali do pomiarów jakościowych jest skala SIMALTO, która jest skalą jednoczesnych kompromisów wieloparametrowych. Decyzje podejmowane są przez uczestników procesu inwestycyjnego na podstawie różnych kombinacji zmiennych przedsięwzięć. Trzeci kierunek oceny to skale porównawcze, w których stosuje się względne skale oceny, np. skale wag. Przedstawione powyżej metody są najczęściej zestawieniami wartości średnich ocenianych kryteriów, sklasyfikowanymi na osiach układu współrzędnych. Zaletą tej metody jest prostota interpretacji graficznej, ale jed-

lack of interdependence between criteria and hidden attribute systems [16].

The tools of multivariate analysis are more comprehensive methods of recognizing factors influencing the evaluation of construction projects. They allow an in-depth understanding of the dependencies. These maps (called biplots) provide an opportunity to determine the relationships that occur between comparable cases (construction and technology and materials) and their characteristics (criteria, variables) at the same time. This is a graphical representation of both line items and columns on the same graph. This facilitates the interpretation of the analyzed relationships [16].

The article uses the method of analysis of main components and classification analysis included in the module „Multidimensional Exploratory Techniques”, STATISTICA v.10.

The choice of projects reducing the negative impact of the surrounding environment is based on the analysis of various criteria. Characterizing the quality of the criteria quality assessment of projects improving the way of sinking the open caisson is based on the most important technological criteria.

Main criteria for improvement projects of sinking open caisson:

- K1 – Efficiency.
- K2 – Reduction of soil deformation.
- K3 – Ability to adjust friction forces.
- K4 – Economic efficiency of the process (costs).
- K5 – Ecological security.
- K6 – Reliability of the works.

The quality criteria of the projects were determined on the basis of the analysis of the open caisson sinking technology as well as the experimental data and expressed in points from 1.0 to 5.0. The highest point value of 5.0 expresses full compliance with the presented quality criteria; the other points indicate partial compliance. The greater the value of criterion K, the more effective the technological project. The qualitative comparison of the criteria presented for the methods of reducing the friction forces of the ground on the outer surface of the coat of open caisson is shown in Table 1. As a technology and material venture, prior to the analysis, the following were selected:

- Concrete surface – i.e. reinforced concrete open caisson coat without any cover,
- Polymer coatings – monolithic coatings, eg epoxy resins with various additives, as lubricants,
- Polymer plates – eg plates PE, PP,
- Thixotropic shirts – based on bentonite slurry.

nocześnie główną wadą jest subiektywizm przy ocenie krytycznych wartości skali, czy też brak współzależności pomiędzy kryteriami i ukrytych układów cech [16].

Pełniejszymi metodami rozpoznawania czynników wpływających na ocenę przedsięwzięć budowlanych są narzędzia analizy wielowymiarowej. Pozwalają na dogłębne zrozumienie występujących zależności. Mapy te (nazywane biplotami) dają możliwość określania zależności zachodzących jednocześnie między porównywalnymi przypadkami (przedsięwzięciami konstrukcyjno-technologiczno-materiałowymi) i ich cechami (kryteriami, zmiennymi). Jest to odwzorowanie graficzne zarówno elementów wierszy, jak i kolumn na tym samym wykresie. Ułatwia się przez to interpretację analizowanych zależności [16].

W artykule wykorzystano metodę analizy składowych głównych i analizy klasyfikacyjnej zawartej w module „Wielowymiarowe techniki eksploracyjne” programu STATISTICA v.10.

Wybór przedsięwzięć zmniejszających negatywne oddziaływanie procesu pograżania obiektu na otaczające środowisko odbywa się na podstawie wyniku analizy różnych kryteriów charakteryzujących jakość przedsięwzięcia. Kryterialna ocena jakości przedsięwzięć doskonalących sposób opuszczania studni dokonana jest na podstawie najważniejszych kryteriów technologiczności.

Główne kryteria przedsięwzięć doskonalących sposób opuszczania studni:

- K1 – Wydajność.
- K2 – Zmniejszenie deformacji gruntu.
- K3 – Możliwość regulowania sił tarcia.
- K4 – Efektywność ekonomiczna sposobu (koszty).
- K5 – Bezpieczeństwo ekologiczne.
- K6 – Niezawodność wykonawstwa robót.

Kryteria cząstkowe jakości przedsięwzięć określono na podstawie analizy technologii opuszczania studni, a także danych eksperymentalnych i wyrażono w punktach od 1,0 do 5,0. Największa wartość punktowa 5,0 wyraża pełną zgodność z przedstawionymi kryteriami jakości, a pozostałe wskazują na częściową zgodność. Im większa wartość kryterium K, tym bardziej efektywne jest przedsięwzięcie technologiczne. Jakościowe porównanie przedstawionych kryteriów dla sposobów zmniejszenia sił tarcia gruntu po powierzchni zewnętrznej płaszcza studni opuszczanej (przypadki) przedstawiono w tabeli 1. W charakterze przedsięwzięć technologiczno-materiałowych na podstawie wcześniejszej analizy wybrano:

- powierzchnię betonową, tj. płaszcza studni opuszczanej żelbetowej bez jakiegokolwiek pokrycia,

Table 1. Qualitative comparison of criteria for methods of reducing friction forces of the ground on the outer surface of a open caisson

Tabela 1. Porównanie jakościowe kryteriów dla sposobów zmniejszenia sił tarcia gruntu po powierzchni zewnętrznej płaszcza studni opuszczanej

Number	Ways to reduce the friction between the ground and the wall of the open caisson	Technology indicators					
		K1	K2	K3	K4	K5	K6
1	Concrete surface	5.0	1.0	1.0	1,0	5.0	5.0
2	Polymer coatings	4.0	5.0	5.0	5,0	5.0	5.0
3	Polymer plates	3.0	4.0	5.0	4,0	5.0	5.0
4	Thixotropic shirts	2.0	5.0	5.0	3,0	4.0	2.0

Table 1 presents 4 technological and material solutions for methods of reducing friction forces of the ground on the wall of the open caisson coat and 6 variables as technological criteria. Active variables are the criteria associated with rational parameters, the additional variable (passive) is a descriptive element. Biplot was constructed on the basis of the covariance matrix.

During the development of biplot, a graphic interpretation was interesting. The main coordinates represent almost 98% of the total variance of the 5 active variables involved in the analysis. The ecology variable, due to the unreliable nature and similar medians, found itself passive (additional), did not participate in the interpretation. 2W charts are shown for the variables and technology and material projects. To get the correct interpretation, one graph was applied to the other. On the common coordinate system there are active vectors (blue circles) and passive variable (red square), as well as points representing technological and material projects (green circles).

- powłoki polimerowe – powłoki monolityczne, np. z żywic epoksydowych z różnorodnymi dodatkami stanowiącymi materiały poślizgowe,
- płyty polimerowe, np. płyty z PE, PP,
- koszulki tiksotropowe na bazie zawiesiny bentonitowej.

W tabeli 1 przedstawiono 4 rozwiązania technologiczno-materiałowe dla sposobów zmniejszenia sił tarcia gruntu po ścianie płaszcza studni opuszczanej i 6 zmiennych jako kryteria technologiczne. Zmienne aktywne są kryteria związane z parametrami wymiennymi, zmienna dodatkowa (pasywna) stanowi element opisowy. Biplot został skonstruowany na bazie macierzy kowariancji.

Opracowując biplot, interesującym faktem była interpretacja graficzna. Główne współrzędne przedstawiają prawie 98% całkowitej wariancji 5 zmiennych aktywnych, które biorą udział w analizie. Zmienna ekologii, w związku z niewymiernym charakterem i podobnymi medianami, znalazła się jako pasywna (dodatkowa), bez udziału w interpretacji. Dla zobrażenia zmiennych (kryteriów) i przedsięwzięć technologiczno-materiałowych przedstawiono wykresy 2W. Aby uzyskać poprawną interpretację nałożono jeden wykres na drugi. Na wspólnym układzie współrzędnych usytuowane są zmienne-kryteria (wektory) aktywne (strzałki-kółka niebieskie) i pasywna zmienna (strzałka-kwadrat czerwony), a także punkty przedstawiające przedsięwzięcia technologiczno-materiałowe (kółka zielone).

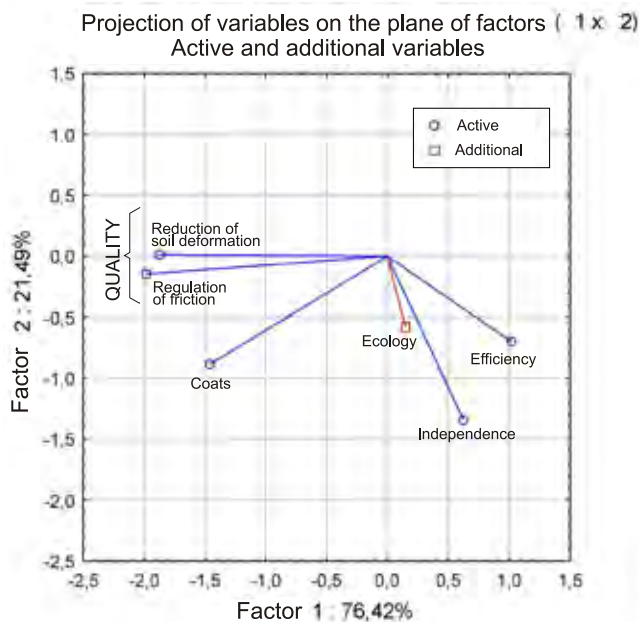


Fig. 3. Chart 2w co-factors for criteria

Rys. 3. Wykres 2W współrzędnych czynnikowych kryteriów

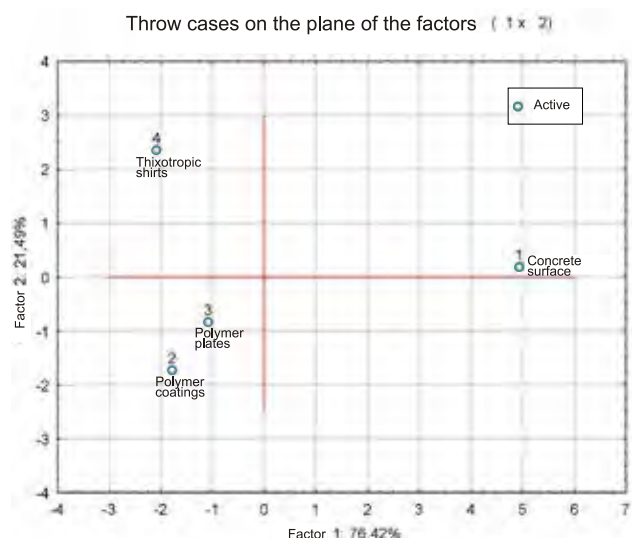


Fig. 4. Graph 2W of coordinates of technological and material projects.

Rys. 4. Wykres 2W współrzędnych czynnikowych przedsięwzięć technologiczno-materiałowych.

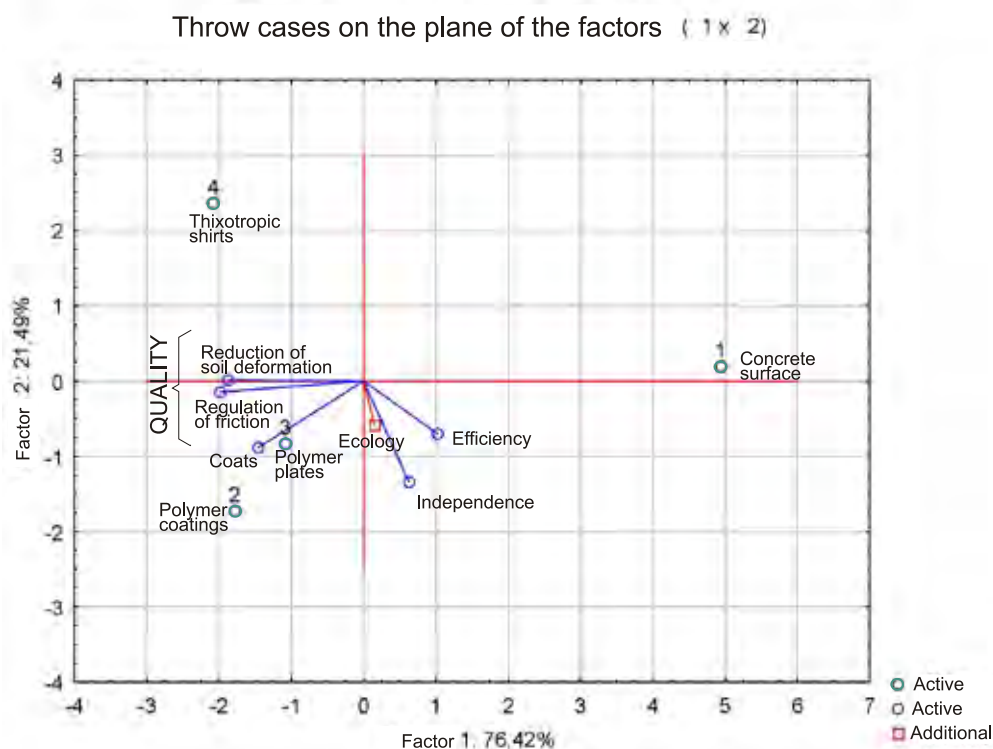


Fig. 5. Common coordinate diagram of criteria co-factors and technology and material co-factors

Rys. 5. Wspólny wykres 2W współrzędnych czynnikowych kryteriów oraz czynnikowych przedsięwzięć technologiczno-materiałowych

The graphic interpretation of the map shows that two variables (reduction of soil deformation and friction regulation) are strongly correlated. Consequently, they were merged into a qualitative group. Other variables are more distant (no correlation). Quality vectors are strongly inclined to the horizontal main axis. Also worth noting is the cost vector. Since quality

Z graficznej interpretacji mapy wynika, że dwie zmienne (zmniejszenie deformacji gruntu i regulacja tarcia) są silnie skorelowane. W związku z tym połączono je w grupę jakościową. Pozostałe zmienne są bardziej oddalone od siebie (brak korelacji). Wektory jakościowe są silnie nachylone do osi głównej poziomej. Warto zwrócić uwagę również na wektor

and cost vectors explain more than half of the total variance (76%) of data sets, they are very important criteria. The efficiency and reliability dimension is responsible for 21% of the variance. The vector of ecology that does not participate in the analysis, that is, unreliable and having close-to-medium medians is short and irrelevant.

In total, three vectors are characterized by variable quality and cost. From this point of view, these vectors most accurately evaluate technology and material projects: reducing soil deformation and adjusting friction. Vectors of efficiency and reliability are correlated with the traditional technology of open caisson sinking method, without projects reducing friction.

4. Conclusions

Based on the analysis following conclusions can be drawn:

- The construction of subterranean spaces in the neighborhood of existing buildings requires the removal of significant subsoil occurring during construction works. Existing technological and constructional solutions that are appropriate in this situation are: slurry wall, excavation using the open-pit method with a temporary excavation casing and open caisson method. The last (most commonly used) carries with it the risk of significant deformation of the surrounding mass of land.
- On the basis of literature analysis and their own experimental research, the main causes of these deformations have been identified: the mass friction of the soil on the outer surface of the open caisson.
- Multi-criteria analysis using biplots was used for the evaluation. The analysis of the charts allowed us to identify the optimal projects: plates and polymeric coatings for the most important criteria: reduction of soil deformation, ability to regulate friction and cost.

References

- [1] Алмазов А.Н., Гарибина Т.А., Зерцалова Р.Х.: *Разработка алгоритмов расчета и выбора оптимальных конструктивно-технологических решений опускных колодцев*. - В кн.: Производство специальных строительных работ: Сб. науч. тр. / ВНИИГС. Л., 1987, с. 28-33.
- [2] Алмазов А.Х., Ветров Б.Д., Гоникман И.Ш.: *Исследования характеристик преобразователей условий трения грунта на контакте движущаяся стена - грунт*. - В кн.: Специальные строительные давления и сил: Сб. тр./ ВНИИГС. Л., 1981, с. 40-46.
- [3] Березницкий Ю.А.: *Опыт применения опускных колодцев при строительстве зданий в местах плотной застройки Москвы*. - Основания, фундаменты и механика грунтов, 1977, № 2, с. 41-43.
- [4] Векслер А.Б., Ивашинов Д.А., Стефанишин Д.В.: *Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений*. СПб.: Изд-во ОАО ВНИИГ, 2002, 589 с.

kosztów. W związku z tym, że wektory jakości i kosztów wyjaśniają ponad połowę całkowitej wariancji (76%) zbioru danych są kryteriami bardzo istotnymi. Wymiar wydajności i niezawodności odpowiada za 21% wariancji. Wektor ekologii nie biorący udziału w analizie, tj. niewymierny i posiadający zbliżone do siebie mediany, jest krótki i nieistotny.

W sumie trzy wektory charakteryzują zmienne jakości i kosztów. Z tego punktu widzenia wektory te najwyżej oceniają przedsięwzięcia technologiczno-materiałowe: zmniejszanie deformacji gruntu i regulacja tarcia. Wektory wydajności i niezawodności są skorelowane z tradycyjną technologią studni opuszczanej bez przedsięwzięć zmniejszających siły tarcia.

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonej analizy można sformułować następujące wnioski:

- Budowa podziemnych pomieszczeń w warunkach sąsiedztwa istniejących budowli wymaga wyeliminowania pojawiających się podczas robót budowlanych znacznych osiadań podłoża. Z istniejących rozwiązań technologiczno-konstrukcyjnych właściwymi w tej sytuacji są: ściana szczelinowa, wykop otwarty z obudową tymczasową i studnia opuszczana. Ta ostatnia (najczęściej stosowana) niesie za sobą ryzyko znacznych deformacji otaczającego masywu gruntu.
- Na podstawie analizy literaturowej i własnych badań eksperymentalnych wydzielono główne przyczyny mające wpływ na te deformacje, tj. siły tarcia masywu gruntu po zewnętrznej powierzchni ścian studni opuszczanej.
- Do oceny przyjęto analizę wielokryterialną z zastosowaniem biplotów. Analiza wykresów pozwoliła wytypować optymalne przedsięwzięcia – płyty i powłoki polimerowe dla najważniejszych kryteriów: zmniejszenie deformacji gruntu, możliwość regulowania sił tarcia oraz kosztów, tj. najsilniej skorelowanych.

- [5] Верстов В.В., Перлей Е.М.: *Эффективные технологии и оборудование для производства специальных строительных работ*. - Монтажные и специальные работы в строительстве, 1998, № 4, с. 23-25.
- [6] Patent № 63-004119, класс E02 (Япония). Метод разрыхления грунта под ножом, 1988.
- [7] Алмазов А.Н., Перминов Н.А., Ольшевский Г.Ф., Феоктистова Н.В.: *Пути снижения сил трения при погружении опускных колодцев* - В кн.: Технология и оборудование для специальных строительных работ: Сб. науч. тр. / ВНИИГС. Л., 1982, с. 109-116.
- [8] ВНИИГС \ \ Сборник научных трудов, под ред. Верстов В.В. *Рациональная технология производства специальных строительных работ*. Л., 1991, 112 с.
- [9] ВНИИГС \ \ Сборник научных трудов, под ред. Верстов В.В. *Технология и оборудование для гидромеханизированных работ и устройства подземных сооружений*. Л., 1989, 132 с.
- [10] Заявка на изобретение № 19867119/24-19 (СССР). Способ погружения опускного колодца в грунт/Серегин Б.М., 1976.
- [11] Даховски Р.: *Совершенствование технологии сооружения опускных колодцев в стесненных условиях. Монтажные и специальные работы в строительстве*. 2004. № 8. С.8-11.
- [12] Даховски Р.: *Совершенствование механизации погружения опускных колодцев в условиях городской застройки*. Механизация строительства. 2004. № 10. С.14-17.
- [13] Даховски Р.: *Строительство подземного объекта способом опускного колодца в стесненных условиях*. VIII Internationaler Kongress Industrielles Bauen (IKIB 88). Leipzig, 1988. s.127-131.
- [14] Dachowski R.: *The influence of sinking underground structures or foundations by the caisson method on the surrounding ground mass and neighbouring buildings*. The Ninth Danube-European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Budapest, 1990. S. 313-318.
- [15] Dachowski R.: *Analiza techniczno-ekonomiczna studni opuszczanych w warunkach sąsiedztwa istniejących budowli*. VI Vedecka Konferencia Technologia v stavebnictve. Košice, 06-08.05.1997. S.242-245.
- [16] Sagan A.: *Jeden obraz ukazuje więcej niż 10 liczb, czyli jak budować mapy zadowolenia klienta z wykorzystaniem programu STATISTICA*. StatSoft Polska. 2004.

