

MARIUSZ JAŚNIOK  
TOMASZ JAŚNIOK

Katedra Konstrukcji Budowlanych, Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska  
Department of Building Structures, Faculty of Civil Engineering, Silesian University of Technology

DOI: 10.15199/40.2020.3.2

# Analiza przyczyn zarysowań i korozji płyt balkonowych oraz ścian żelbetonowych w nadbudowanym wielokondygnacyjnym budynku

## Analysis of causes of cracks and corrosion of reinforced concrete walls and balcony slabs in a multi-storey building with an upward extension

W artykule przedstawiono analizę przyczyn uszkodzeń płyt i ścian żelbetonowych dwóch najniższych, nieużytkowanych kondygnacji, wielorodzinnego budynku mieszkalnego, nadbudowanego niezgodnie z projektem o kilka pięter. Istniało podejrzenie, że znaczne zwiększenie obciążeń nadbudową jest przyczyną powstania rys na ścianach i stropach najniższych kondygnacji. Ponadto obawiano się, że penetrująca od 25-ciu lat przez rysy woda opadowa może być przyczyną korozji betonu i stali zbrojeniowej zmniejszającej nośność elementów konstrukcji. W ramach oceny stanu konstrukcji przeprowadzono badania wytrzymałościowe betonu, pomiary układu zbrojenia oraz badania właściwości ochronnych otulenia betonowego wobec stali zbrojeniowej. Wyniki badań uwzględnione w obliczeniach numerycznych modelu konstrukcji budynku pozwoliły jednoznacznie wskazać skurcz betonu jako przyczynę pęknięć płyt i ścian żelbetonowych. Wykonanie nadbudowy nie było więc przyczyną uszkodzeń konstrukcji, a beton pomimo długotrwałego oddziaływania wód opadowych nie stracił swoich właściwości mechanicznych ani ochronnych wobec zbrojenia.

**Słowa kluczowe:** żelbet, korozja, rysy, skurcz, metoda elementów skończonych (MES)

### 1. Wprowadzenie

Rysy w konstrukcjach żelbetonowych są zjawiskiem naturalnym, jednakże ich źródło pochodzenia, intensywność występowania, szerokość rozwarcia, a także kierunki przebiegu mogą być bardzo zróżnicowane [1]. Zasadniczo rysy w elementach żelbetonowych mogą pochodzić od oddziaływań bezpośrednich (np. obciążeń)

This article presents an analysis of damage to reinforced concrete slabs and walls in two unoccupied lowest stories of the multi-family building with a few-storey upward extension incompatible with the design. A significant increase in loading caused by that extension was supposed to cause cracks in walls and floors at the lowest stories. Moreover, rainwater penetrating cracks for 25 years was expected to induce corrosion of concrete and reinforcing steel reducing the load capacity of structural members. Strength tests, measurements of the reinforcement and tests on protective properties of concrete cover to reinforcing steel were performed as part of evaluating conditions of the structure. Test results included in numerical calculations of the structure model, provided the clear finding that concrete shrinkage was the reason for cracks in reinforced concrete slabs and walls. Thus, the upward extension did not cause damage to the structure, and concrete maintained its mechanical and protective properties to reinforcement despite the long-term effect of rainwater.

**Keywords:** reinforced concrete, corrosion, scratches, shrinkage, finite element method (FEM)

### 1. Introduction

The occurrence of cracks in reinforced concrete structures is natural. However, their origin, intensity, width and direction of propagation can differ [1]. Generally, cracks in reinforced concrete members are caused by direct (e.g. loads) or indirect (e.g. concrete shrinkage) impacts [2]. Regardless of their ori-

**Dr hab. inż. Mariusz Jaśniok**, profesor Politechniki Śląskiej, absolwent i pracownik Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej. Zajmuje się zaawansowaną diagnostyką korozyjną konstrukcji żelbetonowych metodami elektrochemicznymi, ochroną powłokową zbrojenia, a także elektrochemicznymi metodami regeneracji betonu.

**Dr hab. inż. Mariusz Jaśniok** – Associate Professor at the Silesian University of Technology, graduated from the Department of Building Structures at the Silesian University of Technology. The author specializes in advanced diagnostic techniques for reinforced concrete structures using electrochemical methods, coating protection for reinforcement, and electrochemical methods of concrete recovering.

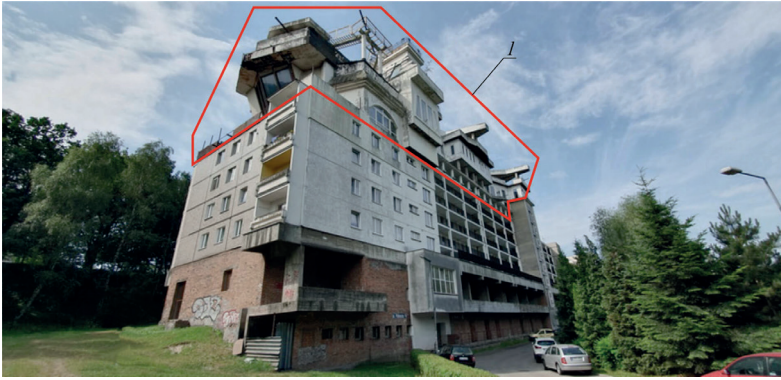
E-mail: mariusz.jasniok@polsl.pl.

**Dr inż. Tomasz Jaśniok** – adiunkt w Katedrze Konstrukcji Budowlanych Politechniki Śląskiej, absolwent i pracownik Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej. Specjalizuje się w diagnostyce i monitoringu korozyjnym konstrukcji żelbetonowych metodami elektrochemicznymi.

**Dr inż. Tomasz Jaśniok** – Assistant Professor in the Department of Building Structures at the Silesian University of Technology, a graduate and present employee at the Faculty of Civil Engineering. The author specializes in diagnosis and monitoring of corrosion of reinforced concrete structures by electrochemical methods.

E-mail: tomasz.jasniok@polsl.pl

■ Otrzymano / Received: 28.01.2020. Przyjęto / Accepted: 17.02.2020.



Rys. 1. Widok analizowanego budynku od strony wschodniej wraz z kuriozalną nadbudową 1, zrealizowaną niezgodnie z projektem i sztuką budowlaną

Fig. 1. East side of the analysed building with the peculiar extension 1 not performed in accordance with the design and professional standards



Rys. 2. Uszkodzenia żelbetonowych elementów konstrukcji budynku: a) ścian, b) c) płyt balkonowych; 1 – pionowa rysa na ścianie pod belką, 2 – rysa skośna na płycie, 3 – rysa z wykrystalizowanym w formie stalaktytów węglanem wapnia, 4 – miejsca wykonanych pomiarów sklerometrycznych w sąsiedztwie rys

Fig. 2. Damage to reinforced concrete members in the building: a) walls, b) c) balcony slabs; 1 – vertical crack in the wall under the beam, 2 – diagonal cracks in the slab, 3 – crack with calcium carbonate crystallized as stalactites, 4 – locations of sclerometric measurements near cracks

lub od oddziaływań pośrednich (np. skurczu betonu) [2]. Niezależnie od genezy powstania rysy w konstrukcji betonowej zawsze wywołują niepożądane efekty [3]. Z punktu widzenia mechaniki konstrukcji zarysowana konstrukcja, a zwłaszcza elementy stropowe, mają mniejszą sztywność, co w konsekwencji może prowadzić do znaczącego wzrostu ugięć lub deformacji. Pojawienie się rys w ścianach [4] lub słupach żelbetonowych jest zjawiskiem znacznie rzadszym i często świadczy o przeciążeniu tych elementów. Natomiast z punktu widzenia trwałości konstrukcji rysy w zbrojonym betonie mogą być przyczyną istotnego przyspieszenia procesów degradacyjnych. Powstanie rysy w sąsiedztwie stalowego pręta zbrojeniowego otwiera drogę do wnikania czynników agresywnych, inicjując w tym miejscu rozpoczęcie procesów korozyjnych stali [5], [6]. Ponieważ korozja w rysie ma charakter lokalny, istnieje poważne zagrożenie szybkiego i silnego zmniejszenia przekroju pręta, co w konsekwencji skutkuje obniżeniem nośności elementu żelbetonowego [7]. Rysy skośne w elementach żelbetonowych mogą być również przyczyną korozji betonu, ponieważ stają się naturalną drogą do wnikania i przepływu cieczy, np. wody opadowej. Woda może stopniowo łągować wodorotlenek wapnia, który jest najłatwiej rozpuszczalnym związkami matrycy cementowej betonu [8]. Zmiana stężenia  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  grozi rozkładem uwodnionych związków stanowiących szkielet kamienia cementowego i lokalnym obniżeniem właściwości mechanicznych betonu [9]. Wyługowany wodorotlenek wapnia tworzy na powierzchni betonu białe wykwity, które pod wpływem dwutlenku węgla zawartego w powietrzu stopniowo przechodzą w węglan wapnia.

Opisany wyżej problem miał miejsce w budynku przedstawionym na rys. 1, gdzie stwierdzono pęknięcia i zarysowania ścian (rys. 2a) oraz płyt stropowych wraz wykwitami na ich dolnych powierzchniach (rys. 2b i c). Dodatkowo płyty w części balkonowej na poziomie dwóch dolnych kondygnacji budynku od momentu wzniesienia konstrukcji były

gin, cracks in structures always bring undesirable effects [3]. Considering structure mechanics, cracked structure, and particularly floor members are characterized by lower stiffness, which can lead to a considerable increase in deflections or deformations. The formation of cracks in reinforced concrete walls [4] or columns is not so common and often indicates overloading of those members. Taking into account the structure durability, cracks in reinforced concrete can significantly accelerate degradation processes. Cracks developed near the steel rebar pave the way for ingress of aggressive chemicals, which initiate there the corrosion of steel [5], [6]. As corrosion in the crack is local, there is a serious risk of fast and intensive reduction of the rebar cross-section, and consequently the load capacity of reinforced concrete member is lower [7]. Diagonal cracks in reinforced concrete members can also cause corrosion of concrete as they become a natural path for penetration and flow of liquids, e.g. rainwater. Water can gradually leach calcium hydroxide which is the most easily soluble compound in cement matrix of concrete [8]. A change in  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  concentration can lead to decomposition of compounds forming the base of cement stone and local reduction of mechanical properties of concrete [9]. Leached calcium hydroxide forms white blooms on the concrete surface, which are gradually transformed into calcium carbonate under the impact of carbon dioxide from the air.

The above problem was diagnosed in the building shown in Figure 1, where cracks and scratches in walls (Fig. 2a) and floor slabs with blooms on bottom surfaces (Figs. 2b and c) were observed. Additionally, balcony slabs at two lower stories were permanently exposed to atmospheric conditions (rain, snow, temperature changes) for 25 years since the erection of the structure. Those types of damage caused the supervisor worries,

przez blisko 25 lat narażone na stałe oddziaływanie czynników atmosferycznych (deszcz, śnieg, zmiany temperatury). Powyższe uszkodzenia spowodowały zaniepokojenie u zarządcy budynku, szczególnie z powodu nadbudowy niezgodnej z projektem i sztuką budowlaną (rys. 1), która bardzo znacząco zwiększyła obciążenia budynku i wyłączenie jego elementów konstrukcyjnych. Autorzy mniejszego artykułu podjęli się próby wyjaśnienia przyczyn obserwowanych uszkodzeń, oceny możliwości dalszego bezpiecznego użytkowania obiektu, a także podania sposobu ich naprawy. Prace badawcze i analityczne zrealizowano w kilku etapach. W pierwszej kolejności określono metodami niszczącymi i nieniszczącymi wytrzymałość oraz jednorodność betonu ścian i płyt. W drugim przeprowadzono badania betonu ukierunkowane na ocenę właściwości ochronnych wobec stalowego zbrojenia. W ostatnim etapie analizy przeprowadzono obliczenia numeryczne uwzględniające wcześniej wykonane badania, które umożliwiły określenie przyczyn degradacji przedmiotowych ścian i płyt żelbetowych.

## 2. Identyfikacja układu zbrojenia i klasy betonu

W pierwszym etapie badań określono układ zbrojenia i klasę betonu. Układ zbrojenia płyt i ścian przedmiotowego budynku realizowano w sposób niszczący za pomocą skanera magnetycznego. Metoda elektromagnetyczna polega na analizie zmiany wieloczęstotliwościowego strumienia magnetycznego emitowanego w głąb konstrukcji. Za jej pomocą można lokalizować zbrojenie w elementach żelbetowych i szacować jego średnicę oraz grubości otulenia. Skanowanie zbrojenia przeprowadzono w przekrojach miarodajnych płyt i ścian oraz w miejscach pęknięć elementów. Wyniki badań uwzględniono w obliczeniach numerycznych modelu konstrukcji budynku.

Klasę betonu określono zgodnie z normą [10]. W tym celu wykorzystano metodę bezpośrednią badając na ściskanie rdzenie wycięte ze ścian i płyt żelbetowych oraz pośrednią metodę sklerometryczną z wykorzystaniem młotka Schmidta typu N. Miejsca odwiertów rdzeni wybierano między widocznymi rysami oraz w miarę możliwości między krzyżującymi się prętami zbrojeniowymi. Na podstawie metody bezpośredniej określono klasę betonu jako C30/37, czyli wysokość jak na okres realizacji budynku w latach 90-tych XX wieku.

Metodę sklerometryczną wykorzystano do określenia zmian wytrzymałości betonu bezpośrednio przy rysach, głównie w miejscach widocznych wykwitów wodorotlenku i węgla wapnia. Metoda ta wykorzystuje związki między lokalną powierzchnią wytrzymałością betonu na działanie skupionego obciążenia a jego wytrzymałością na ściskanie. Sklerometr w postaci młotka Schmidta uderza za pomocą bijaka w trzpień zakończony kulką wgniataną w powierzchnię betonu, a następnie odbija się na pewien odcinek, który określany jest jako liczba odbicia. Aby skorelować wartości liczby odbicia z wytrzymałością betonu na ściskanie posłużono się metodą wzorcowania według [10], polegającej na przesunięciu podstawowej krzywej regresji zawartej w normie [10]. Przesunięcia krzywej dokonuje się na podstawie minimum 9 par wyników składających się z wytrzymałości betonu na ściskanie rdzenia pobranego z konstrukcji oraz średniej liczby odbicia na powierzchni betonu, gdzie wycinano rdzenie.

Na rys. 2b i c przedstawiono płyty balkonowe od spodu gdzie widoczne są rysy z wykwitami oraz miejsca wykonywania badań sklerometrycznych (miejsca zaznaczono elipsami). Wyniki badań pozwoliły stwierdzić, że wytrzymałość betonu nawet w bezpośrednim sąsiedztwie rys i miejsc ługowania wodorotlenku wapnia nie zmieniła się i odpowiadała klasie betonu określonej w metodzie bezpośredniej.

## 3. Badania właściwości ochronnych betonu wobec zbrojenia

W drugim etapie przeprowadzono badania właściwości ochronnych betonu względem zbrojenia, które polegały na określeniu stopnia zobojętnienia otuliny betonowej (wartości pH cieczy porowej betonu) i zawartości chlorków w pobliżu zbrojenia. Wymienio-

particularly over the upward extension incompatible with the design and professional standards (Fig. 1), which significantly increased the load applied on the building and the effort of its structural members. The authors tried to explain in this paper the reasons standing behind observed damage, to evaluate opportunities for its further use, and to present methods of their repair. Tests and analyses were performed at a few stages. At first, strength and homogeneity of walls and slabs were determined by destructive and non-destructive testing. The second stage involved tests on concrete to evaluate its protective properties to steel reinforcement. And at the final stage, numerical analyses were performed taking into account previous tests to determine causes of degradation of analysed reinforced concrete walls and slabs.

## 2. Identification of reinforcement arrangement and concrete class

At first, arrangement of the reinforcement and concrete class were determined. The reinforcement arrangement in walls and slabs in the tested building was analysed with the non-destructive method using the electromagnetic scanner. The electromagnetic method consists in analysing changes in multi-frequency magnetic current emitted deep inside a structure. This method is used to locate reinforcement in reinforced concrete members, and to determine its diameter and the cover thickness. Reinforcement scanning was performed over cracks in members and sections of slabs. Test results were included in numerical calculations for the structure model.

The class of concrete was determined in accordance with the standard [10]. That procedure involved the direct technique of testing compressive strength of cores drilled from reinforced concrete walls and slabs and the indirect technique of sclerometric method using the Schmidt hammer N type. The location of drilled spots was selected between visible cracks and crossing rebars, if possible. The direct technique was used to determine concrete class. It was C30/37 - relatively high strength class considering the building was built in the 1990s.

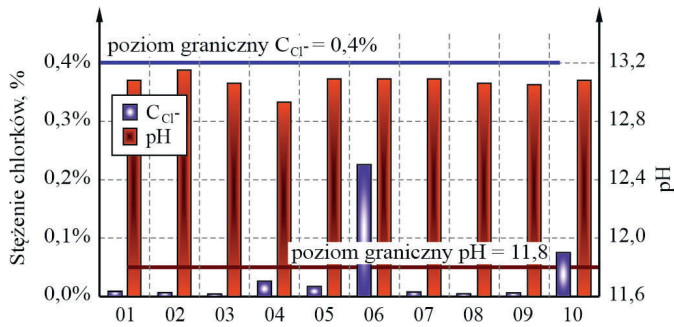
Changes in the strength of concrete in the close vicinity of cracks, mainly in places where blooms of calcium hydroxide and carbonate occurred, were determined on the basis of the sclerometric method. This method is based on interactions between the local surface strength of concrete against concentrated loads and its compressive strength. A sclerometer in the form of the Schmidt hammer impacts the plunger on the concrete surface, and then the spring rebounds back. The extent of rebound is called the rebound number. The calibration method according to [10], based on shifting the regression curve specified in the standard [10], was used to correlate rebound values with compressive strength of concrete. The curve was shifted on the basis of at least 9 pairs or results for compressive strength of the concrete core drilled from the structure and the average rebound number for the surface, from which cores were drilled.

Figs. 2b and c present the bottom surface of balcony slabs with visible cracks and blooms, and places where sclerometric measurements were performed (marked with ellipses). Test results indicated the strength of concrete in the close vicinity of cracks and leaching site of calcium hydroxide did not change and corresponded to concrete class determined with the indirect method.

## 3. Testing protective properties of concrete to reinforcement

The second stage consisted in testing protective properties of concrete to reinforcement. They included the determination of neutralization level of concrete cover (pH of concrete pore solution) and chloride content near the reinforcement. The above fac-





Rys. 3. Zestawienie wyników pomiarów pH i stężenia chlorków w modelowych roztworach cieczy porowej betonu w wyciętych rdzeniach – opis w tekście

Fig. 3. Measured pH and concentration of chlorides in model pore solutions in drilled cores - description in the text

ne czynniki są najczęstszymi przyczynami korozji zbrojenia wskazanymi przez normy [11] i [12].

Badania trwałościowe realizowano wykorzystując odcięte przed badaniami wytrzymałościowymi zewnętrzne fragmenty walcowych rdzeni betonowych, stanowiące otulenie betonowego zbrojenia. Z każdego rdzenia odcięto dwa lub trzy walcowe krążki grubości ok. 1 cm, które rozdrobniono w kruszarce. Rozdrobniony beton (po wybraniu grubszych okruszków) mieszano z wodą destylowaną w stosunku 1:1.

W uzyskanych roztworach traktowanych jako roztwory modelujące ciecz w porach betonu wykonywano pomiary odczynu za pomocą elektrody pH-metrycznej, a stężenia jonów chlorkowych za pomocą elektrody jonoselektywnej chlorkowej. Zestawienie zmierzonych wartości pH i koncentracji chlorków w warstwie znajdującej się na głębokości usytuowania prętów zbrojeniowych przedstawiono na rys. 3.

Analizując otrzymane wykresy można stwierdzić, że żadna warstwa betonu bezpośrednio otaczającego pręty zbrojeniowe nie charakteryzowała się odczynem mniejszym niż 11,8, co wg [1] i [5] zapewnia właściwości ochronne wobec zbrojenia ze względu na karbonatyzację. W przypadku pomierzonych koncentracji jonów chlorkowych w żadnej próbce stężenie chlorków w warstwie otaczającej pręty nie przekroczyło wartości granicznej, którą zgodnie z normą [11] przyjmuje się jako 0,4% masy cementu w betonie. Zawartość cementu w betonie określono laboratoryjnie, rozpuszczając w kwasie HCl rozdrobniony beton.

Wnioski z powyższych badań potwierdziły obserwacje powierzchni fragmentów prętów zbrojeniowych wyjętych z betonu walcowych rdzeni, na których nie były widoczne żadne produkty korozji (rys. 4).

#### 4. Analiza numeryczna modelu konstrukcji budynku

Omówione wyżej badania wytrzymałościowe i chemiczne betonu pozwoliły wykluczyć zjawiska korozyjne betonu i stali zbrojeniowej jako przyczynę silnych zarysowań. Aby odpowiedzieć na pytanie, które z oddziaływań bezpośrednich lub pośrednich jest powodem pojawienia się rys w programie komputerowym [14] zbudowano model powłokowo-prętowy jednego z powtarzalnych segmentów analizowanego budynku wielokondygnacyjnego (rys. 5).

Najważniejszym parametrem materiałowym modelu była wytrzymałość betonu na ściskanie, określona na wyciętych rdzeniach. Symulując numerycznie oddziaływania bezpośrednie na konstrukcję zastosowano typową kombinację ciężaru własnego konstrukcji wraz z oszacowanym ciężarem nadbudowy konstrukcji oraz obciążeniem użytkowym i oddziaływaniami środowiskowymi od śniegu i wiatru. Analizę obliczeniową prowadzono metodą elementów skończonych (MES) w stanie granicznym użyteczności (SGU) zgodnie z normą [15] i [12]. W przypadku opisanej wyżej kombina-



Rys. 4. Widok powierzchni wybranych prętów zbrojeniowych wyjętych z rdzeni betonowych, po ich zmiążdżeniu w maszynie wytrzymałościowej

Fig. 4. Surfaces of selected rebars taken out of concrete cores crushed in a testing machine

tors are the most common causes of the reinforcement corrosion, specified in the standards [11] and [12].

Strength tests were conducted on previously drilled external parts of cylindrical concrete cores which had formed concrete cover of the reinforcement. From two to three cylindrical discs with the thickness of ca. 1 cm were cut from each core, and then crushed in a grinder. Crushed concrete (with removed larger parts) was mixed with distilled water in 1:1 ratio.

Such solutions were considered as model pore solutions in concrete. Their pH was measured with a pH electrode, and a chloride ion-selective electrode measured the concentration of chloride ions. Measured values of pH and concentration of chlorides in the layer at the depth of rebars location are shown in Fig. 3.

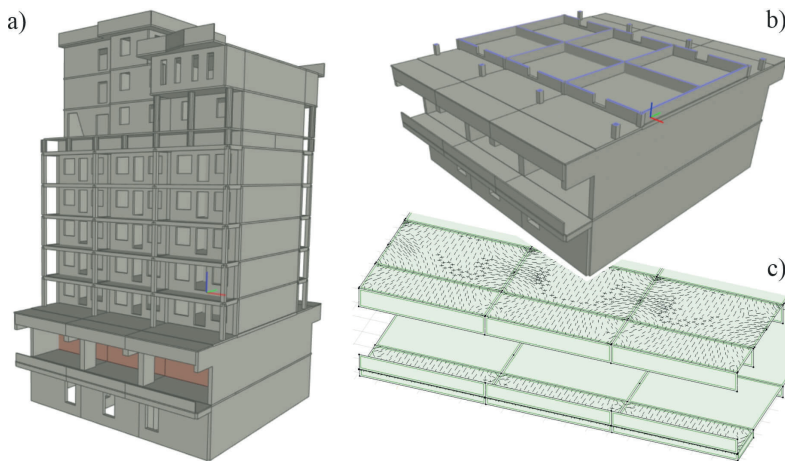
The analysis of those diagrams indicates that none of concrete layer surrounding rebars had pH lower than 11.8, which according to [1] i [5] provided protective properties for reinforcement against carbonation. And none of specimens demonstrated the concentration of chlorides in layers surrounding rebars higher than the limit value equal to 0.4% of cement mass in concrete according to the standard [11]. Cement content in concrete was determined with laboratory methods, by dissolving crushed concrete in HCl.

Conclusions drawn from the above tests confirmed observations of surfaces of rebars removed from concrete of cylindrical cores, with no signs of corrosion products (Fig. 4).

#### 4. Numerical analysis of models of building structures

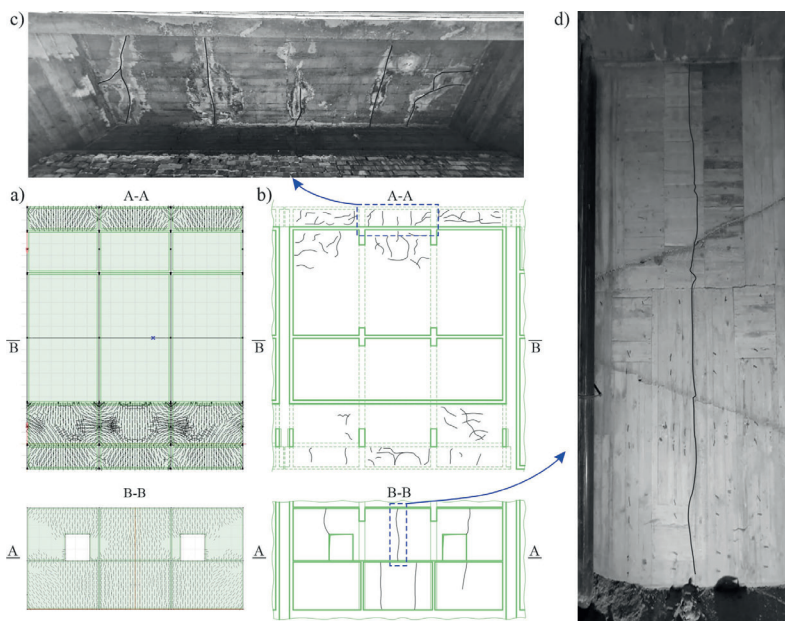
Strength and chemical testing of concrete, presented above, excluded corrosion of concrete and reinforcing steel as the cause of serious cracks. To answer the question about the type of direct or indirect effect responsible for cracks, a shell-and-member model representing one of repeatable segments of the analysed multi-storey building was designed with the [14] software (Fig. 5).

Compressive strength of concrete, determined from drilled cores, was the most important material parameter of the model. Numerical modelling of direct impacts on the structure included a standard combination of its self weight and the estimated weight of the upward extension, the variable load and environmental effects of snow and wind. Computational analysis was performed using the finite element method (FEM) under the serviceability limit state (SLS) in accordance with standards [15] and [12]. Theoretical cracks under the above combination of loads did



Rys. 5. Symulacja numeryczna skurczu betonu oraz nagrzania górnych powierzchni żelbetonowych płyt balkonowych budynku mieszkalnego: a) model powłokowo-prętowy powtarzalnego segmentu budynku, b) dolne dwie kondygnacje z analizowanymi płytami balkonowymi, c) obliczone teoretyczne kierunki rys skurczowych na dolnych powierzchniach płyty

Fig. 5. Numerical modelling of concrete shrinkage and heating of top surfaces of reinforced concrete balcony slabs: a) shell-and-member model of repeatable segment of the building, b) two floors with analysed balcony slabs, c) calculated theoretical directions of shrinkage cracks on bottom surfaces of slabs



Rys. 6. Porównanie zarysowań teoretycznych z rysami rzeczywistymi: a) obliczone teoretyczne kierunki rys skurczowych na ścianie podłużnej oraz na dolnych powierzchniach płyt, b) zinventaryzowane zarysowania w budynku odpowiadające zakresowi obliczeń, c) widok zarysowań płyty balkonowej od spodu, d) widok rysy na ścianie podłużnej

Fig. 6. Compared theoretical and real cracks: a) calculated theoretical directions of shrinkage cracks in the longitudinal wall and at bottom surfaces of slabs, b) inspected cracks in the building, corresponding to the scope of calculations, c) cracks at the bottom surface of the balcony slab, d) cracks in the longitudinal wall

cji obciążeń teoretyczne zarysowania nie ujawniły się na zamodelowanych ścianach i stropach, tak więc dodatkowy ciężar nadbudową nie mógł być powodem pojawienia się rys w konstrukcji.

W kolejnym podejściu oprócz wyżej wymienionych oddziaływań do normowej kombinacji obciążeń wprowadzono wpływ nagrzania konstrukcji przez promienie słoneczne oraz wpływ naprężeń skurczowych betonu. Naprężenia skurczowe powstają w wyniku nieprawidłowej pielęgnacji betonu w pierwszych dniach po jego ułożeniu w deskowaniu. W wyniku zjawisk fizyko-chemicznych dochodzi wówczas do rozwoju skurczu autogenicznego w czasie twardnienia betonu oraz skurczu spowodowanego wysychaniem betonu. Obliczenia numeryczne pokazały, że w kombinacji obciążeń uwzględniającej dodatkowo wpływ skurczu i temperatury uzyskane teoretyczne obrazy zarysowań, zarówno balkonowych płyt stropowych jak i ścian żelbetonowych, były bardzo podobne do zarysowań zinventaryzowanych w obiekcie (rys. 6b, c i d). W wielu miejscach obliczone przebiegi zarysowań (pokazane z czarnymi kreseczkami na rys. 5c i 6a) wręcz pokrywały się z obserwowanymi w rzeczywistości zarysowaniami. Oddziaływaniem decydującym o teoretycznym przebiegu zarysowań był przede wszystkim skurcz betonu oraz w bardzo niewielkim stopniu nagrzanie przez promienie słoneczne górnych powierzchni fragmentów płyt.

not develop on modelled walls and floors. Thus, the additional weight of the extension was eliminated as the reason for cracks in the structure.

Another method used, in addition to the discussed loads, implemented the following into the standard combination of loads: the effect of the structure heating due to sunlight and the effect of shrinkage stress of concrete. Shrinkage stress is caused by improper curing condition for concrete during first days after placing concrete into forms. Physical and chemical processes lead to autogenous shrinkage during curing and shrinkage during drying. Numerical calculations demonstrated that theoretical images of cracks in reinforced concrete floor slabs and walls, obtained from the combination of loads and additionally included effects of shrinkage and temperature, were very similar to cracks found in the structure (Figs. 6b, c and d). Calculated cracking schemes (black lines in Fig. 5c and 6a) were the same in many cases as inspected cracks. Theoretical scheme of cracking was mainly influenced by concrete shrinkage, and slightly by heated top surfaces of slab parts exposed to sunlight.

## 5. Podsumowanie

Oględziny konstrukcji dwóch dolnych kondygnacji nadbudowanego nie zgodnie z projektem budynku mieszkalnego ujawniły bardzo silne zarysowania fragmentów balkonowych płyt stropowych oraz ścian żelbetowych. Płyty balkonowe przez blisko 25 lat były narażone na bezpośrednie oddziaływania czynników atmosferycznych (deszcz, śnieg, zmienna temperatura). Badania wytrzymałościowe betonu wykazały jego wysoką klasę (C30/37), także w strefach zarysowanych, gdzie widoczne były wykwyty spowodowane ługowaniem wodorotlenku wapnia.

Badania właściwości ochronnych betonu wobec zbrojenia wykazały brak warunków sprzyjających rozwojowi procesów korozyjnych stali. Wnioski te dodatkowo potwierdziły oględziny fragmentów prętów wyciętych razem z rdzeniami betonowymi.

Przeprowadzona analiza obliczeniowa modelu konstrukcji nośnej jednego z segmentów budynku wykazała, że głównymi przyczynami obserwowanych zarysowań płyt stropowych w strefach balkonów był głównie skurcz betonu oraz niewielki udział wpływów termicznych od nagrzewania słonecznego. Należy podkreślić, że wykonanie nadbudowy nie zgodnie z projektem nie miało wpływu na propagację rys.

W zaleceniach naprawczych wskazano na konieczność iniekcji ciśnieniowej wszystkich widocznych rys, przy czym w przypadku silnego zagęszczenia zarysowań zalecono lokalne usunięcie i reprofiliację betonu płyty systemami PCC (Polymer Cement Concrete), z pozostawieniem istniejącego zbrojenia.

## 5. Conclusions

Inspections of two lower floors of the structure with the upward extension incompatible with the design, demonstrated serious cracks in parts of balcony slabs and walls made of reinforced concrete. Balcony slabs have been exposed to direct impact of atmospheric conditions (rain, snow, temperature changes) for 25 years. Strength tests on concrete determined its class as C30/37, even in the cracked areas, where blooms caused by calcium hydroxide leaching were observed.

Testing protective properties of concrete to reinforcement indicated no favourable conditions for the development of steel corrosion. Those results were also verified by inspecting fragments of rebars drilled with concrete cores.

The computational analysis of the load-bearing structure model of one of segments indicated the main reason for detected cracks in floor slabs of balconies was concrete shrinkage. Thermal effects of sunlight had a minor impact. It should be emphasized that the upward extension incompatible with the design did not cause the propagation of cracks.

Recommendations concerning repair measures suggest performing pressurized injection to all visible cracks. For intensely concentrated cracks, local elimination and reprofiling of slabs with PCC (Polymer Cement Concrete) system, while keeping the existence reinforcement, are required.

## BIBLIOGRAPHY

- [1] I. Maruyama and P. Lura. 2019. 'Properties of early-age concrete relevant to cracking in massive concrete', *Cement and Concrete Research*, vol. 123, no. May, p. 105770.
- [2] T. De Larrard, F. Benboudjema, J. B. Colliat, J. M. Torrenti, and F. Deleruyelle. 2010. 'Concrete calcium leaching at variable temperature: Experimental data and numerical model inverse identification', *Computational Materials Science*, vol. 49, no. 1, pp. 35–45.
- [3] L. N. Ma, Y. H. Zhao, and J. X. Gong. 2019. 'Chloride Diffusivity of High-Performance Concrete due to Early-Age Shrinkage Cracking', *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 23, pp. 5173–5182.
- [4] B. Klemczak and A. Żmij. 2019. 'Reliability of standard methods for evaluating the early-age cracking risk of thermal-shrinkage origin in concrete walls', *Construction and Building Materials*, vol. 226, pp. 651–661.
- [5] I. Khan, R. François, and A. Castel. 2014. 'Prediction of reinforcement corrosion using corrosion induced cracks width in corroded reinforced concrete beams', *Cement and Concrete Research*, vol. 56, pp. 84–96.
- [6] J. Wang, P. A. M. Basheer, S. V. Nanukuttan, A. E. Long, and Y. Bai. 2016. 'Influence of service loading and the resulting micro-cracks on chloride resistance of concrete', *Construction and Building Materials*, vol. 108, no. APRIL, pp. 56–66.
- [7] C. Lu, W. Jin, and R. Liu. 2011. 'Reinforcement corrosion-induced cover cracking and its time prediction for reinforced concrete structures', *Corrosion Science*, vol. 53, no. 4, pp. 1337–1347.
- [8] D. Jacques, L. Wang, E. Martens, and D. Mallants. 2010. 'Modelling chemical degradation of concrete during leaching with rain and soil water types', *Cement and Concrete Research*, vol. 40, no. 8, pp. 1306–1313.
- [9] Z. Ścisławski. 1999. *Ochrona konstrukcji żelbetowych*. Warszawa: Wydawnictwo 'Arkady'.
- [10] PN-EN 13791:2019, *Assessment of in-situ compressive strength in structures and precast concrete components*. PKN/KT 274.
- [11] PN-EN 206+A1:2016-12, *Concrete Specification, performance, production and conformity*. Warszawa: PKN/KT 274.
- [12] PN-EN 1992-1-1:2008, *Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Warszawa: PKN/KT 274.
- [13] A. Zybura, M. Jaśniok, and T. Jaśniok. 2011. *Diagnostyka konstrukcji żelbetowych. T. 2. Badania korozji zbrojenia i właściwości ochronnych betonu*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- [14] InterCAD Kft., 'AxisVM'. Budapeszt, 2019.
- [15] PN-EN 1990:2004, *Eurocode Basis of structural design*. PKN/KT 274.



We protect and  
beautify the world™

**Oil, Gas & Chemical**

ul. Łużycka 8A  
81-537 Gdynia  
tel. 58 774 99 00  
fax 58 774 99 01  
customers@ppg.com