

OCENA STANU ZBROJENIA WYBRANYCH ELEMENTÓW KONSTRUKCJI NOŚNEJ DWORCA AUTOBUSOWEGO W KIELCACH PO 34 LATACH UŻYTKOWANIA

Paweł Tworzewski✉, Wioletta Raczkiewicz

Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Kielce

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono wyniki badań, których celem była ocena stanu zbrojenia oraz pomiary grubości otuliny betonowej dla wybranych elementów konstrukcji jednego z najbardziej rozpoznawalnych obiektów w Kielcach, czyli dworca PKS, mieszczącego się przy ulicy Czarnowskiej. Budynek ten oddano do użytku 20 lipca 1984 roku. Aktualnie prowadzone są prace przygotowawcze do planowanej przebudowy, rozbudowy i modernizacji dworca autobusowego. Ocenę stanu zagrożenia korozyjnego zbrojenia w wybranych elementach konstrukcji przeprowadzono za pomocą półnieniszczącej elektrochemicznej polaryzacyjnej metody pomiaru impulsu galwanostycznego. Dzięki zastosowaniu tej metody możliwe było określenie na badanych obszarach wielkości prawdopodobieństwa występowania korozji zbrojenia oraz oszacowanie jej tempa. Wykorzystując urządzenie ferromagnetyczne, określono również średnicę i położenie zbrojenia oraz oszacowano grubości otuliny betonowej na obszarach odpowiadających wcześniej wspomnianym pomiarom.

Słowa kluczowe: dworzec PKS w Kielcach, otulina betonowa, detekcja zbrojenia, korozja zbrojenia

WSTĘP

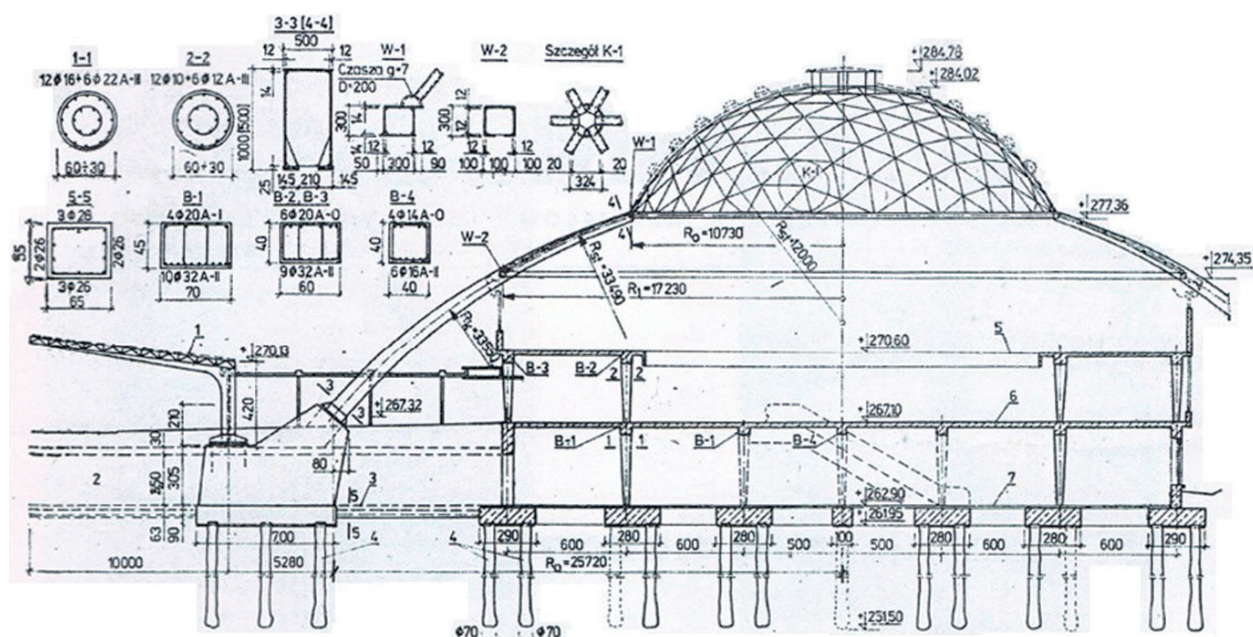
Projekt dworca autobusowego w Kielcach wykonany został przez biuro projektowe „Miastoprojekt” Kielce w I połowie lat 70. XX w. Jednym z podstawowych założeń podjętych przez głównego projektanta Mieczysława Kubalę było utworzenie ruchu bezkolizyjnego, co doprowadziło do zaprojektowania ruchu okrężnego i bezpośrednio wpłynęło na kształt bryły obiektu. W rezultacie powstał unikatowy w formie dworzec autobusowy, który stał się wizytówką miasta Kielce.

Główny budynek dworca ma kształt walca składającego się z trzech poziomów: kasowego, peronowego oraz antresoli. Przekrycie zaprojektowano w formie

dwóch przenikających się kopuł wspartych na 10 łukowych wspornikach rozmieszczonych równomiernie po obwodzie. Można więc wyróżnić dwa niezależne konstrukcje: żelbetową konstrukcję wewnętrzną oraz prętową konstrukcję kopuł stalowych (rys. 1). Powierzchnia zabudowy głównego budynku wynosi 1800 m², a powierzchnia użytkowa to 6100 m². Dokładne dane na temat obiektu, w tym opis konstrukcji wraz ze szczegółami dotyczącymi stalowej konstrukcji przekrycia, przedstawiono w pracach Modrzewskiego, Radkiewicza i Sieczkowskiego (1986) oraz Banachowskiej (2015).

Aktualnie na terenie obiektu prowadzone są prace przygotowawcze wynikające z planowanej przebudowy

✉ptworzewski@tu.kielce.pl



Rys. 1. Przekrój pionowy budynku dworca autobusowego PKS w Kielcach (Modrzewski i in., 1986)

Fig. 1. Vertical cross-section of PKS bus station in Kielce (Modrzewski et al., 1986)

wy, rozbudowy i modernizacji dworca autobusowego. Korzystając z możliwości dostępu do pomieszczeń, w których znajdują się elementy nośne, wykonano badania mające na celu ocenę stanu zbrojenia oraz pomiary grubości otuliny betonowej wybranych elementów konstrukcji żelbetowej.

MATERIAŁ I METODY

Ocenę stanu zagrożenia korozyjnego zbrojenia w badanych elementach konstrukcji przeprowadzono za pomocą elektrochemicznej polaryzacyjnej metody pomiaru impulsu galwanostycznego (Ahmad, 2003; Jaśniok i Jaśniok, 2007; Song i Saraswathy, 2007; Hoła i Schabowicz, 2012; Raczkiewicz i Wójcicki, 2018). Jest to metoda opracowana według założenia, że korozja zbrojenia w betonie jest procesem elektrochemicznym, w którym stalowy pręt zbrojeniowy pełni funkcję elektrody, a alkaliczna ciecz wypełniająca pory betonu to elektrolit. Powstałe na powierzchni pręta lokalne mikroogniwa anodowe i katodowe generują przepływ ładunków elektrycznych przez pręt, a ciecz wypełniająca pory betonu jest nośnikiem jonów. W takiej sytuacji pomiary pewnych wielkości

elektrycznych, których zmiany wartości wynikają z toczącej się korozji, umożliwiają w sposób pośredni (przez odniesienie uzyskanych wartości do wartości bazowych) ocenę stopnia zaawansowania tego procesu. Pomiary można wykonywać bezpośrednio na elemencie, ale warunkiem jest odpowiednie przygotowanie betonowej powierzchni oraz możliwość połączenia urządzenia pomiarowego z badanym prętem, co wymaga odkucia otuliny i odsłonięcia zbrojenia na kilkucentymetrowym odcinku. Badania te należą więc do tzw. badań semi-nieniszczącej, gdyż w niewielkim, ale łatwym do naprawienia stopniu uszkadzają badany element.

W opisywanych badaniach do pomiarów wykorzystane zostało urządzenie GP-5000 GalvaPulse™ przedstawione na rysunku 2a (Germann Instruments, 2009; Raczkiewicz i Wójcicki, 2017), które jako jedno z nielicznych dostępnych na rynku pozwala na wykonywanie badań metodą elektromagnetyczną. Dzięki niemu możliwy jest jednoczesny pomiar trzech wielkości elektrycznych: potencjału stacjonarnego zbrojenia (E_{st}), rezystywności otuliny betonowej (θ) oraz gęstości prądu korozyjnego (i_{cor}). Jest to dużym plusem w porównaniu do innych urządzeń działających

z zastosowaniem metody elektrochemicznej, w przypadku których najczęściej możliwe są pomiary tylko jednego lub maksymalnie dwóch parametrów (Zybyra, Jaśniok i Jaśniok, 2011; Koteš, Brodňan i Bahleda, 2016; Raczkiewicz i Wójcicki, 2017). Zaletą stosowania urządzenia GalvaPulse jest również dość krótki czas pomiaru – zwykle nie dłuższy niż kilkanaście sekund w jednym punkcie. Wyniki są automatycznie zapisywane w bazie danych urządzenia i dostępne do podglądu w każdej chwili prowadzenia badań. Zestaw GalvaPulse umożliwia prowadzenie dwóch rodzajów pomiarów: tzw. podstawowych, obejmujących pomiary potencjału stacjonarnego zbrojenia i rezystywności otuliny betonowej (co pozwala z pewnym prawdopodobieństwem ocenić, czy na badanym obszarze występują warunki sprzyjające korozji), jak również pomiarów zaawansowanych, w czasie których oprócz wymienionych wielkości mierzona jest gęstość prądu korozyjnego (na podstawie której można określić ak-

tywność korozyjną zbrojenia i prognozować jej tempo w czasie). Pomiary podstawowe nie są dość dokładne i tylko szacunkowe, dlatego w celu uzyskania miarodajnych wyników zaleca się wykonywanie pomiarów zaawansowanych. W opisywanych badaniach wykonano pomiary zaawansowane, a otrzymane wartości analizowano w odniesieniu do bazy wyników wzorcowych (tab. 1).

Lokalizację prętów zbrojeniowych w betonie oraz określenie grubości otuliny betonowej wykonano przy wykorzystaniu skanera PS200s firmy Hilti (rys. 2b). Urządzenie działa na zasadzie indukcji elektromagnetycznej i prądów wirowych (Urbanowicz i Warzocha, 2015). Pomiary te wykonano w celu weryfikacji poprawności wykonania elementów konstrukcyjnych. W wielu obiektach nawet nowopowstałych notuje się często przekroczenie dopuszczalnych odchylek, głównie w przypadku grubości otuliny betonowej i położenia prętów zbrojeniowych (Tworzewski, 2017).

Tabela 1. Kryteria do oceny stopnia zagrożenia korozyjnego zbrojenia

Table 1. Criteria for assessing the degree of reinforcement corrosion risk

| | Aktywność korozyjna zbrojenia Reinforcement corrosion activity | Tempo korozji [mm·rok ⁻¹] Corrosion pace [mm·year ⁻¹] | |
|--|---|--|-------------|
| Na podstawie gęstości prądu korozyjnego On the basis of corrosion current density i_{cor} [μA·cm ⁻²] | < 0,5 | nieprognozowana aktywność korozji not forecasted corrosion activity | < 0,006 |
| | 0,5–2,0 | nieistotna aktywność korozyjna irrelevant activity corrosion | 0,006–0,023 |
| | 2,0–5,0 | mała aktywność korozyjna low corrosion activity | 0,023–0,058 |
| | 5,0–15,0 | umiarkowana aktywność korozyjna moderate corrosion activity | 0,058–0,174 |
| | > 15,0 | duża aktywność korozyjna high corrosion activity | > 0,174 |
| Na podstawie potencjału stacjonarnego On the basis of reinforcement stationary potential E_{st} [mV] | < -350 | 95% prawdopodobieństwo korozji 95% of corrosion probability | |
| | od -350 do -200 from -350 to -200 | 50% prawdopodobieństwo korozji 50% of corrosion probability | |
| | > -200 | 5% prawdopodobieństwo korozji 5% of corrosion probability | |
| Na podstawie rezystywności otuliny betonu On the basis of concrete cover resistivity Θ [kΩ·cm] | ≤ 10 | duże prawdopodobieństwo korozji high corrosion probability | |
| | 10–20 | średnie prawdopodobieństwo korozji medium corrosion probability | |
| | ≥ 20 | małe prawdopodobieństwo korozji small corrosion probability | |



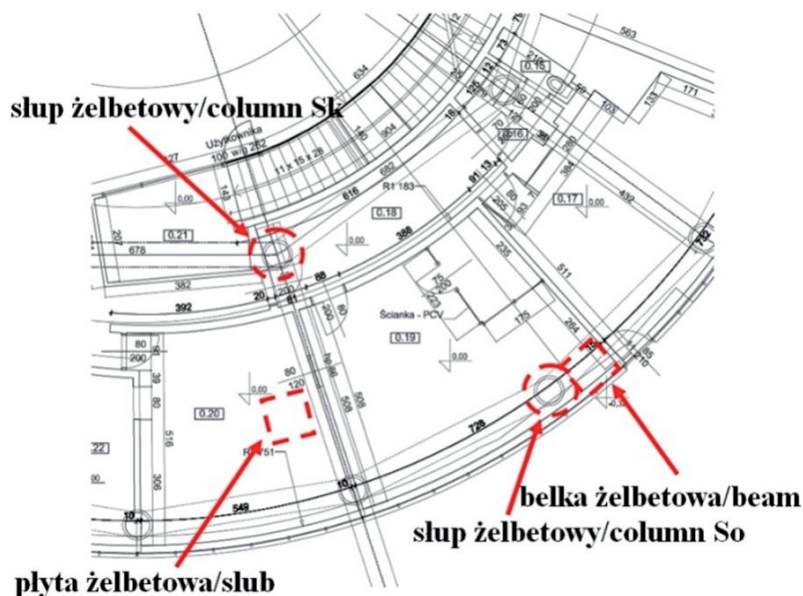
Rys. 2. Wykorzystane urządzenia pomiarowe: a – zestaw GP-5000 GalvaPulse™; b – skaner PS 200s Hilti

Fig. 2. Measuring devices: a – GP-5000 GalvaPulse™ kit; b – PS 200s Hilti scanner

Badaniom podlegały wybrane obszary elementów konstrukcji żelbetowej poziomu peronowego, tj.: płyty stropowej, belki obwodowej oraz dwóch słupów nośnych o przekroju kołowym ze zmienną średnicą (rys. 3).

Na badanym wycinku płyty o wymiarach $0,6 \times 0,6$ m usunięto warstwę izolacji bitumicznej, pozostawiając beton otuliny. Na tak oczyszczoną po-

wierzchnię betonu naniesiono siatkę 4×4 o wymiarach oczka $0,15 \times 0,15$ m. Według niej wykonano przejazdy za pomocą ferroskanu (funkcja „Imagescan”), czyli skanowanie wzdłuż wierszy i kolumn siatki. Po rozpoznaniu ułożenia zbrojenia na wybranym wycinku płyty na odcinku o szerokości średnio 7–10 cm, prostopadle do kierunku ułożenia zbrojenia głównego, odkuto otulinę, odsłaniając pięć prętów zbrojeniowych w celu



Rys. 3. Elementy konstrukcji żelbetowej poddane badaniu na poziomie peronowym dworca autobusowego PKS w Kielcach

Fig. 3. Elements of the reinforced concrete structure of the PKS bus station in Kielce subjected to examination

umożliwienia połączenia ich z zestawem pomiarowym (rys. 4a), a na pozostałej powierzchni przeznaczonej do badania wyznaczono po sześć punktów pomiarowych w rozstawie około 10 cm zlokalizowanych bezpośrednio pod każdym prętem, co dało w sumie 30 punktów pomiarowych. Niestety, w pięciu punktach [(1,4), (1,5), (5,4), (5,5), (5,6)] zbyt duże odsłonięcie betonu nie pozwoliło na wykonanie pomiarów, a w jednym punkcie (1, 1) pomiar rezystywności otuliny betonowej przekraczał wartość $50 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$, co według wytycznych producenta eliminowało uzyskane w tym punkcie wartości z dalszej analizy.

Analogiczne prace pomiarowe wykonano na nośnej belce obwodowej. Na badanym wycinku o wymiarach średnio $0,45 \times 0,45 \text{ m}$, na dolnej powierzchni belki usunięto warstwę tynku, a następnie odkuto pasmo otuliny o szerokości około 5 cm, uzyskując w ten sposób dostęp do prętów zbrojenia dolnego. Na wybranej powierzchni betonu wyznaczono po sześć punktów pomiarowych w rozstawie około 10 cm zlokalizowanych bezpośrednio pod każdym prętem. Pomiarów wykonano dla sześciu (z 10) prętów głównych zbrojenia dolnego w sześciu punktach, co dało w sumie 36 punktów pomiarowych (rys. 4b). Nanieśiona została również siatka 3×3 o wymiarach oczka $0,15 \times 0,15 \text{ m}$, według której wykonano przejazd za pomocą ferroskanu.

W podobny sposób zbadane zostały dwa słupy żelbetowe o przekroju kołowym ze zmienną wzdłuż wysokości średnicą. W każdym ze słupów usunięto

warstwę tynku o wysokości około 0,80 m, a następnie około 1 m od poziomu posadzki odkuto wąskie pasmo otuliny o szerokości około 5 cm, odsłaniając w ten sposób osiem (z 12) prętów zbrojenia głównego rozmieszczonych po obwodzie słupa, co umożliwiło ich połączenie z zestawem pomiarowym. Wzdłuż linii przebiegu każdego z prętów wyznaczono po sześć punktów pomiarowych w rozstawie około 10 cm, co dało w sumie 48 punktów pomiarowych na każdym z badanych słupów (rys. 4c). Ze względu na zmienną średnicę słupa za pomocą ferroskanu wykonano jedynie szybką detekcję (funkcja „Quickscan”), czyli jeden przejazd po obwodzie przekroju słupa.

WYNIKI

Wyniki pomiarów wykonanych za pomocą urządzenia pomiarowego GP-5000 GalvaPulse™ na trzech żelbetowych elementach konstrukcji zestawione zostały w tabelach wygenerowanych dzięki oprogramowaniu GalvaPulse (rys. 5). W tabelach dla każdego punktu pomiarowego o określonych współrzędnych (X, Y) podano trzy wartości: potencjał stacjonarny zbrojenia – E_{st} [mV] (wartość górna), tempo korozji [$\mu\text{m} \cdot \text{rok}^{-1}$] (wartość środkowa; przeliczona automatycznie ze zmierzonej i z zarejestrowanej w programie gęstości prądu korozyjnego) oraz rezystywność otuliny betonowej – θ [$\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$] (wartość dolna). Powyższe wartości analizowane według kryteriów podanych w tabeli 1 pozwoliły na określenie prawdopodobieństwa wystę-



Rys. 4. Zdjęcia badanych elementów: płyty (A); belki (B), słupów S_o i S_k (C) na dworcu autobusowym PKS w Kielcach
Fig. 4. Photos of tested elements: of the slab (A); beam (B) and columns S_o and S_k (C) at PKS bus station in Kielce

powodzenia korozji zbrojenia na badanych obszarach oraz na ocenę stopnia aktywności korozyjnej i szacowanie tempa korozji poszczególnych badanych prętów.

Na podstawie analizy wyników pomiarów wykonanych w 24 punktach żelbetowej płyty stropowej (rys. 5a) ustalono, że potencjał stacjonarny zbrojenia w żadnym punkcie nie przekroczył wartości -200 mV, co wskazywało na nie więcej niż 5% prawdopodobieństwo korozji na badanym obszarze. Gęstość prądu korozyjnego w sześciu punktach osiągała wartość mniejszą od $0,5 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$, co wskazywało na „nieprognozowaną aktywność korozyjną zbrojenia”; w pozostałych 18 punktach zawierała się w przedziale $0,5\text{--}2,0 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$, oznaczającym

„nieistotną aktywność korozyjną”; jednocześnie uzyskane wartości pozwalają prognozować tempo korozji na poziomie $1,2\text{--}19,4 \mu\text{m}\cdot\text{rok}^{-1}$. Rezystywność otuliny betonowej w dziewięciu punktach osiągała wartości równą lub większą od $20 \text{k}\Omega\cdot\text{cm}$, czyli o małym prawdopodobieństwie korozji na badanym obszarze; w ośmiu punktach mieściła się w przedziale $10\text{--}20 \text{k}\Omega\cdot\text{cm}$, czyli o średnim prawdopodobieństwie korozji, ale w siedmiu punktach wartości były mniejsze od $10 \text{k}\Omega\cdot\text{cm}$, co wskazuje na duże prawdopodobieństwo korozji.

Na podstawie skanowania przeprowadzonego za pomocą ferroskanu oraz pomiarów przeprowadzonych dla odsłoniętych prętów stwierdzono, że jako

| Y\X | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----|----------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| 6 | 74 2,4 41,9 | 104 1,2 23,6 | 96 2,1 31,4 | 109 8,0 12,1 | EMPTY |
| 5 | EMPTY | 63 3,4 21,0 | 57 3,1 19,0 | 49 5,8 5,6 | EMPTY |
| 4 | EMPTY | 26 8,1 17,5 | 25 5,7 15,7 | -14 11,7 4,4 | EMPTY |
| 3 | -40 6,6 19,0 | 14 8,1 11,6 | 18 6,4 12,8 | -31 19,4 2,5 | -5 10,9 2,2 |
| 2 | 33 8,3 41,9 | 37 7,7 20,8 | 44 6,4 20,9 | 48 6,2 3,2 | 125 5,4 4,6 |
| 1 | 2 493 21,1 0,0 | 25 8,8 27,3 | 62 2,5 34,1 | 130 9,4 10,6 | 133 10,5 9,9 |

a) płyta / slab

| Y\X | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 6 | 49 3,3 14,6 | 19 5,6 16,0 | 37 5,9 17,0 | 19 4,3 14,2 | 4 5,8 29,4 | 36 4,4 37,5 | 69 3,1 44,7 | 66 3,4 41,0 |
| 5 | 18 6,3 21,2 | -27 5,8 18,8 | -13 5,4 19,6 | -43 4,7 16,4 | -24 5,4 26,7 | -15 5,8 35,6 | 18 4,0 33,4 | 18 2,6 65,5 |
| 4 | -76 10,2 24,8 | -132 9,6 19,6 | -112 17,3 22,4 | -151 12,1 12,8 | -115 6,6 20,0 | -53 7,4 31,0 | -73 3,6 26,8 | -63 3,9 53,1 |
| 3 | -92 4,4 31,5 | -99 5,0 17,7 | -45 6,2 18,0 | -64 7,3 8,9 | -80 7,7 14,9 | -95 7,6 10,1 | -106 2,7 5,9 | -20 3,5 60,5 |
| 2 | -6 3,0 47,7 | -5 7,7 19,6 | 45 10,2 25,1 | 21 5,2 13,7 | -18 5,9 12,9 | -27 6,2 10,5 | -59 5,1 19,7 | 12 3,3 68,1 |
| 1 | -1 3,0 56,2 | 33 6,9 25,6 | 72 7,2 37,7 | 38 4,5 17,8 | 7 4,2 19,8 | -12 1,8 5,4 | -19 2,0 17,0 | 19 3,2 90,7 |

c) słup So / So column

| Y\X | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 6 | 161 1,4 9,3 | 158 1,1 9,5 | 141 1,6 7,9 | 134 2,0 9,6 | 48 2,6 7,3 | 29 1,1 5,9 |
| 5 | 160 1,8 4,0 | 133 2,6 4,8 | 101 3,8 4,6 | 98 3,6 5,8 | 37 3,8 4,4 | -11 4,3 2,1 |
| 4 | 125 1,8 15,0 | 110 2,3 7,8 | 100 2,3 7,4 | 107 1,6 5,3 | 48 4,7 6,9 | 25 2,8 3,2 |
| 3 | 109 2,4 10,9 | 86 2,6 6,7 | 58 6,2 7,7 | 51 2,6 3,8 | 19 6,4 6,8 | 19 1,3 4,3 |
| 2 | 75 3,0 13,5 | 45 4,9 11,8 | 10 5,3 8,5 | 29 9,0 6,1 | -8 8,8 5,2 | 3 3,2 6,0 |
| 1 | 29 1,6 13,5 | -11 3,1 6,8 | -48 5,0 5,4 | -60 4,4 3,3 | -26 4,2 4,3 | -1 2,6 5,1 |

b) belka / beam

| Y\X | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| 6 | 13 2,6 5,0 | 14 8,2 12,0 | 17 7,9 11,3 | 15 6,7 14,1 | 22 1,3 35,3 | 59 6,5 25,0 | 59 8,6 25,0 | 33 12,0 27,6 |
| 5 | -26 4,5 8,3 | -22 4,3 6,5 | -17 8,6 10,9 | -1 3,5 7,8 | -28 1,4 31,4 | 43 5,1 18,5 | 46 9,5 20,7 | 15 10,3 24,4 |
| 4 | -84 6,0 6,7 | -79 10,5 8,8 | -62 5,6 5,5 | -35 6,7 11,5 | -131 1,5 29,1 | -41 10,0 12,9 | 25 10,9 18,1 | -4 12,9 23,8 |
| 3 | -57 7,7 10,0 | -11 7,7 11,7 | 68 8,5 14,1 | 102 6,0 19,1 | -26 1,4 31,9 | 143 8,1 22,3 | 161 8,9 27,4 | 87 11,7 22,2 |
| 2 | 63 3,6 16,2 | 84 3,9 15,6 | 107 5,0 15,5 | 131 5,3 18,5 | -19 1,8 32,7 | 162 7,0 22,4 | 171 8,9 26,8 | 121 8,7 27,4 |
| 1 | 86 2,7 24,2 | 121 2,9 20,5 | 123 4,1 18,4 | 143 4,2 21,9 | -72 1,7 34,8 | 170 5,7 25,2 | 182 7,8 31,5 | 114 6,9 37,1 |

d) słup Sk / Sk column

Rys. 5. Tabele wynikowe wygenerowane w programie GalvaPulse

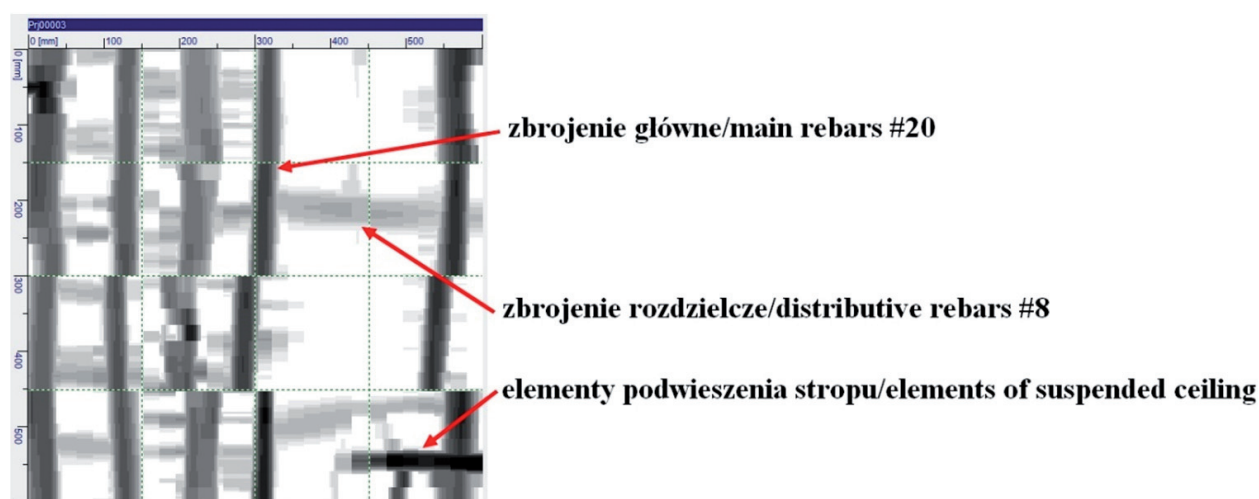
Fig. 5. Results tables generated by program GalvaPulse

główne zbrojenie płyty zastosowano pręty żebrowane o średnicy 20 mm, rozstawione średnio co 10 cm. W oprogramowaniu dołączonym do urządzenia, po wprowadzeniu danych dotyczących wstępnych pomiarów średnic prętów zbrojeniowych, w 15 punktach wykonano pomiary grubości otuliny zbrojenia głównego. Uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 2. Wynik detekcji zbrojenia w postaci graficznej przedstawiono na rysunku 6.

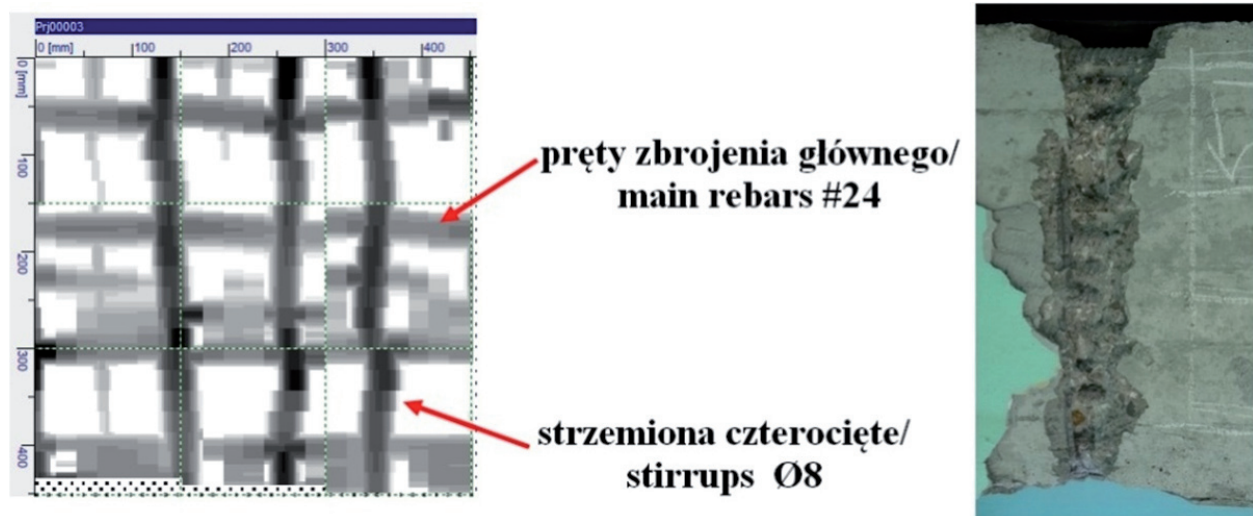
Badania wycinka belki na poziomie peronowym wykonane na podstawie pomiarów w 36 punktach (rys. 5b) i odniesione do wyników w tabeli 1 wykazały, że potencjał stacjonarny zbrojenia w żadnym punkcie nie przekroczył wartości -200 mV, co wskazywało na nie więcej niż 5% prawdopodobieństwo korozji na danym obszarze. Gęstość prądu korozyjnego w 32 punktach osiągała wartość mniejszą od $0,5 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$, co wskazywało na „nieprognozowaną aktywność korozyjną zbrojenia”; w czterech punktach zawierała się w przedziale $0,5\text{--}2,0 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$, oznaczającym „nieistotną aktywność korozyjną”; jednocześnie uzyskane wartości pozwalają prognozować tempo korozji na poziomie $1,1\text{--}9,0 \mu\text{m}\cdot\text{rok}^{-1}$. Rezystywność otuliny betonowej w pięciu punktach mieściła się w przedziale $10\text{--}20 \text{k}\Omega\cdot\text{cm}$, czyli o średnim prawdopodobieństwie korozji, ale aż w 31 punktach wartości były mniejsze od $10 \text{k}\Omega\cdot\text{cm}$, sugerując duże prawdopodobieństwo korozji.

Na podstawie pomiarów średnicy odsłoniętych prętów stwierdzono, że jako zbrojenie główne zastosowano 10 prętów żebrowanych o średnicy 24 mm. Wyniki te odbiegają od danych projektowych, według których belka powinna być zbrojona dziewięcioma prętami o średnicy 32 mm. Zmiana taka spowodowała, że w części środkowej cztery pręty stykają się ze sobą. Utrudniło to jednocześnie poprawną detekcję prętów zbrojeniowych przez ferroskan, co widoczne jest na rysunku 7. Wyniki pomiarów grubości otuliny betonowej przeprowadzonej w 15 punktach zestawiono w tabeli 2.

Badania dwóch słupów na poziomie peronowym wykonane na podstawie pomiarów w 43 punktach w słupie So (rys. 5c) oraz w 48 punktach w słupie Sk (rys. 5d) były porównywalne i wykazały, że potencjał stacjonarny zbrojenia w żadnym punkcie w obu słupach nie przekroczył wartości -200 mV, co wskazywało na nie więcej niż 5% prawdopodobieństwo korozji na danym obszarze. Gęstość prądu korozyjnego w 19 punktach w słupie So oraz w 21 punktach w słupie Sk osiągała wartość mniejszą od $0,5 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$, co wskazywało na „nieprognozowaną aktywność korozyjną zbrojenia”; w pozostałych 24 punktach w słupie So oraz w 27 punktach w słupie Sk zawierała się w przedziale $0,5\text{--}2,0 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$, oznaczającym „nieistotną aktywność korozyjną”; jednocześnie



Rys. 6. Obraz lokalizacji prętów zbrojeniowych wykonana za pomocą ferroskanu przedstawiający układ zbrojenia w płycie
Fig. 6. The image of the reinforcing bars location in the slab, obtained with the use of ferroskan



Rys. 7. Obraz lokalizacji prętów zbrojeniowych wykonana za pomocą ferroskanu przedstawiający układ zbrojenia w belce żelbetowej

Fig. 7. The image of the reinforcing bars location in the beam, obtained with the use of ferroskan

Tabela 2. Wyniki analizy rozkładu grubości otuliny betonowej zbrojenia głównego na podstawie przeprowadzonych pomiarów dla płyty żelbetowej, belki oraz słupów

Table 2. The concrete cover thickness analysis results for the main reinforcement in the slab, beam and columns

| Wartość średnia Average value c [mm] | Wartość maksymalna Maximum value c_{max} [mm] | Wartość minimalna Minimum value c_{min} [mm] | Odchylenie standardowe Standard deviation s [mm] | Współczynnik zmienności Coefficient of variation V [%] |
|---|--|---|---|---|
| Płyta – Slab | | | | |
| 13,8 | 19 | 8 | 2,8 | 20 |
| Belka – Beam | | | | |
| 21,67 | 25 | 18 | 2,3 | 10 |
| Słup So – Column So | | | | |
| 15 | 30 | 7 | 7 | 46,67 |
| Słup Sk – Column Sk | | | | |
| 31 | 42 | 18 | 9 | 29,03 |

uzyskane wartości pozwalają prognozować tempo korozji na poziomie $1,3\text{--}17,3 \mu\text{m}\cdot\text{rok}^{-1}$ w obu słupach. Rezystywność otuliny betonowej w 18 punktach w słupie So oraz w 24 punktach w słupie Sk osiągała wartości równą lub większą od $20 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$, czyli o małym prawdopodobieństwie korozji zbrojenia; w 22 punktach w słupie So oraz w 16 punktach w słupie Sk mieściła się w przedziale $10\text{--}20 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$, czyli o średnim prawdopodobieństwie korozji, ale w trzech punktach w słu-

pie So oraz w ośmiu punktach w słupie Sk wartości były równe lub mniejsze od $10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$, czyli wskazujące na duże prawdopodobieństwo korozji.

Badane słupy zgodnie z projektem powinny być zbrojone dwoma rzędami zbrojenia. W części wewnętrznej zbrojenie powinno składać się z sześciu prętów o średnicy 12 mm , a zewnętrzną warstwę stanowiło 12 prętów o średnicy 10 mm rozmieszczonych na obwodzie słupa. Pomiar średnicy odkrytych prę-

tów warstwy zewnętrznej potwierdziły dane projektowe. Niestety ze względu na niewielki zasięg działania ferroskanu nie udało się wykryć zbrojenia stanowiącego warstwę wewnętrzną. Utrudniony dostęp do powierzchni bocznej słupów nie pozwolił na wykonanie skanowania na całym obwodzie. Wyniki pomiarów grubości otuliny betonowej dla wykrytych prętów w obu słupach przedstawiono w tabeli 2. Odchylenie zewnętrznej warstwy zbrojenia w obu słupach względem ich osi wiąże się ze znaczną różnicą między minimalnymi i maksymalnymi wartościami grubości otuliny, co wpływa na duże wartości współczynników zmienności.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Pomiary zaawansowane wykonane metodą pomiaru impulsu galwanostatycznego w wybranych żelbetowych elementach konstrukcji poziomego peronowego za pomocą zestawu GP-5000 GalvaPulse™ pozwoliły na ocenę stanu zagrożenia korozyjnego badanego zbrojenia. Na podstawie wyników pomiarów gęstości prądu korozyjnego zdiagnozowano nieprognozowaną bądź nieistotną aktywność korozyjną zbrojenia we wszystkich badanych elementach. Potwierdziły to pomiary potencjału stacjonarnego zbrojenia wskazujące na prawdopodobieństwo korozji na poziomie 5%. Wyniki pomiarów rezystywności otuliny betonowej wskazywały na zróżnicowaną odporność korozyjną otuliny betonowej zarówno płyty i belki stropu, jak i słupów nośnych. W niektórych badanych punktach zarejestrowano wartości świadczące o średnim, a nawet dużym prawdopodobieństwie korozji. Należy jednak pamiętać, że pomiar tego parametru daje tylko szacunkową informację o warunkach sprzyjających korozji na badanym obszarze. W rozpatrywanym przypadku uzyskanie takich wyników mogło być np. związane z prowadzonymi pracami rozbiórkowymi i możliwymi świeżymi uszkodzeniami betonu (w postaci rys i spękań), co zostało wychwycone przez urządzenie pomiarowe jako brak właściwej szczelności otuliny betonowej, a zatem „warunki sprzyjające korozji”. Z tego względu w celu weryfikacji wyników badań elektrochemicznych warto wykonywać również badania materiałowe (Rainbow test, rentgenowską analizę fazową czy ocenę mikrostruktury

pod mikroskopem skaningowym), co zostało wykonane również w przypadku opisywanych badań, ale ze względu na ograniczenia objętościowe publikacji ich analiza nie została tu zamieszczona.

Biorąc pod uwagę dość niewielką grubość otuliny bądź lokalnie jej brak (szczególnie w przypadku płyty, gdzie średnia grubość otuliny to zaledwie 13,8 mm), stan elementów żelbetowych oraz samego zbrojenia można uznać za dobry. Gruba warstwa tynku na belkach i słupach (lokalnie przekraczająca nawet 5 cm) ograniczyła w pewnym stopniu tempo procesu niszczenia konstrukcji. Zarówno przeprowadzona detekcja prętów zbrojeniowych, jak i wykonane odkrywki wykazały wiele odchyłek w położeniu prętów zbrojeniowych. W przypadku belki wykazano odstępstwo od projektu w postaci zmiany ilości i średnicy prętów. Niestety ze względu na brak dokumentacji projektowej dla części żelbetowej obiektu, poza zamieszczonymi w publikacji Modrzewskiego i innych (1986), szersze porównanie przedstawionych wyników z założeniami projektowymi nie było możliwe.

Podsumowując, stwierdzono, że stan zbrojenia oraz betonu w badanych elementach po 34 latach użytkowania był dobry, właściwy okresowi eksploatacji konstrukcji.

PIŚMIENNICTWO

- Ahmad, S. (2003). Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction – a review. *Cement and Concrete Composites*, 25, 459–473. doi: 10.1016/S0958-9465(02)00086-0
- Banachowska, E. (2015). Dworzec PKS w Kielcach jako przykład polskiej myśli modernistycznej. *Środowisko Mieszkaniowe*, 14, 106–117.
- Germann Instruments (2009). GalvaPulse. Pobrano z lokalizacji: <http://www.germann.org/TestSystems/GalvaPulse/GalvaPulse.pdf>.
- Hoła, J. i Schabowicz, K. (2012). Przegląd metod badawczych w zastosowaniu do diagnostyki i monitoringu obiektów budowlanych. W *XII Konferencja Naukowo-Techniczna „Warsztaty Pracy Rzeczoznawcy Budowlanego”* (strony 60–80). Kielce Cedzyna 16–18 maja 2012 r.
- Jaśniok, M. i Jaśniok, T. (2007). Metody diagnostyki zagrożenia korozyjnego zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych. Podstawowe badania elektrochemiczne. Cz. III. *Przegląd Budowlany*, 6, 30–36.

- Koteš, P., Brodňan, M. i Bahleda, F. (2016). Diagnostics of Corrosion on a Real Bridge Structure. *Advances in Materials Science and Engineering*, 1, 1–10. doi: 10.1155/2016/2125604
- Modrzewski, E., Radkiewicz, J. i Sieczkowski, M. (1986). Realizacja dworca autobusowego w Kielcach. *Inżynieria i Budownictwo*, 3, 89–94.
- Raczkiewicz, W. i Wójcicki, A. (2017). Wybrane aspekty prognozowania poziomu korozji stali zbrojeniowej w betonie metodą elektrochemiczną. *Przegląd Spawalnictwa*, 11, 28–33. doi: 10.26628/ps.v89i11.830
- Raczkiewicz, W. i Wójcicki, A. (2018). Evaluation of effectiveness of concrete coat as a steel bars protection in the structure – galvanostatic pulse method. W 26th *International Conference “Metallurgy and Materials”* (strony 1425–1432). Ostrava, Tanger.
- Song, H.W. i Saraswathy, V. (2007). Corrosion monitoring of reinforced concrete structures – A review. *International Journal of Electrochemical Science*, 2, 1–28.
- Tworzewski, P. (2017). Wpływ odchyłek grubości otuliny betonowej na przewidywaną trwałość konstrukcji żelbetowych. *Przegląd Budowlany*, 11, 52–55.
- Urbanowicz, D. i Warzocha, M. (2015). Wykorzystanie urządzeń ferromagnetycznych w diagnostyce konstrukcji budowlanych. *Przegląd Budowlany*, 5, 32–35.
- Zybura, A., Jaśniok, M. i Jaśniok, T. (2011). *Diagnostyka konstrukcji żelbetowych. Badania korozji zbrojenia i właściwości ochronnych betonu*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.

CONDITION ASSESSMENT OF THE REINFORCING BARS FOR SELECTED ELEMENTS OF THE BUS STATION STRUCTURE IN KIELCE AFTER 34 YEARS OF USE

ABSTRACT

The paper presents the results of the research, which aimed at assessing the condition of reinforcement and measuring the concrete cover thickness for selected elements of the structure of the most recognizable object in Kielce, i.e. PKS station, located at Czarnowska Street. Currently, preparatory works are underway resulting from the planned modernization of the bus station. The assessment of the corrosive risk of the reinforcement in the construction elements was carried out with the use of a semi-nondestructive electrochemical polarization galvanic impulse measurement method. The use of this method has made it possible to determine the probability of reinforcement corrosion in the selected areas and to estimate its rate. In order to determine the diameter and position of the reinforcement and to estimate the concrete cover thickness in the areas corresponding to the aforementioned measurements, ferromagnetic detection system was used.

Key words: bus station in Kielce, concrete cover, detection of reinforcing bars, corrosion of reinforcement