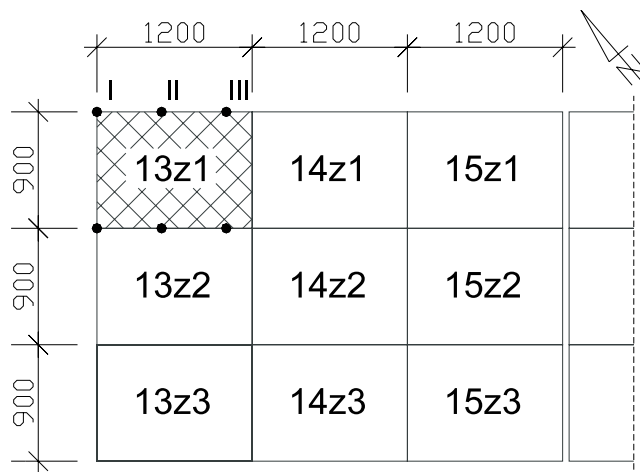


Stanisław Barycz\*, Rajmund Oruba\*, Marian Świerczek\*\*

## Przyczyny uszkodzeń i przyspieszonego zużycia żelbetowego zbiornika koncentratu rudy miedzi\*\*\*

### 1. Wprowadzenie

Żelbetowa konstrukcja nośna baterii dziewięciu zbiorników koncentratu rudy miedzi już od początku eksploatacji (lata 80. ubiegłego wieku) wykazywała wiele nieprawidłowości. Były to odspojenia powierzchniowych warstw betonu wraz ze zbrojeniem, po wewnętrznej i zewnętrznej stronie ukośnych ścian leja zsykowego, pęknięcia betonu prostopadłe do ścian leja oraz powierzchniowa korozja betonu i stali zbrojeniowej. Szczególne nasilenie procesów destrukcji występowało w narożnym zbiorniku (nr 13z1 – por. rys. 1). Z uwagi na zagrożenie bezpieczeństwa został on wyłączony z eksploatacji.



Rys. 1. Rzut poziomy zbiorników żelbetowych koncentratu rudy miedzi – schemat [1]

\* Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska

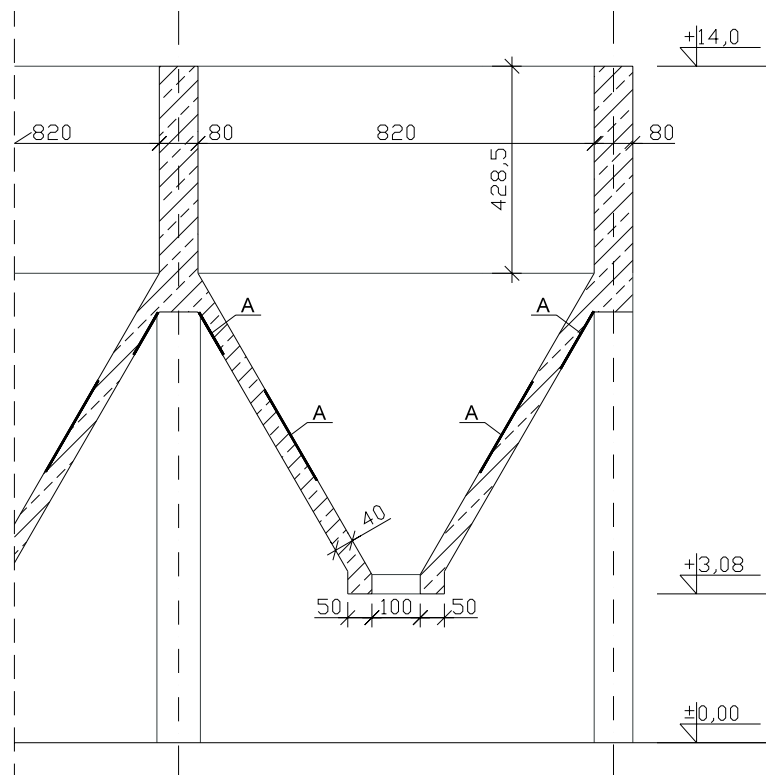
\*\* Politechnika Krakowska

\*\*\* Artykuł wykonano w ramach badań statutowych nr 11.11.150.312 na 2006 r.

W artykule przedstawiono przeprowadzone przez autorów badania, których celem było wyjaśnienie przyczyn wystąpienia uszkodzeń zbiornika. Obejmowały one szczegółową inwentaryzację uszkodzeń i nieprawidłowości żelbetowej konstrukcji nośnej, badania fizykochemiczne i wytrzymałościowe pobranych z żelbetowej konstrukcji obiektu rdzeni betonowych oraz ocenę stopnia korozji stali zbrojeniowej. Uzyskane wyniki były podstawą do przeprowadzenia statyczno-wytrzymałościowej analizy obliczeniowej, z zastosowaniem metody elementów skończonych MES, która pozwoliła na określenie przyczyn jego uszkodzeń.

## 2. Opis konstrukcji obiektu

Przedmiotem badań był narożny, północny zbiornik 13z1 baterii składającej się z dziewięciu zbiorników tworzących wspólną, monolityczną żelbetową konstrukcję. Jego usytuowanie pokazano na rysunku 1, a przekrój poprzeczny na rysunku 2.



Rys. 2. Przekrój poprzeczny zbiornika 13z1 oraz lokalizacja odspojeń otuliny betonowej wraz ze zbrojeniem (A)

Rzut poziomy zbiornika 13z1 ma wymiary  $12,0 \times 9,0$  m przy wysokości 14 m, licząc od poziomu posadzki hali do górnej krawędzi belek – ścian. Konstrukcja zbiornika składa się z leja zsykowego o grubości ścian 40 cm, podwieszono do znajdujących się w jego górnej części czterech pionowych belek – ścian o grubości 40 cm. Dwie podłużne belki – ściany spoczywają na sześciu słupach żelbetowych, opartych na żelbetowym ruszcie fundamentowym posadowionym na głębokości 4,3 m p.p.t.

Zbiorniki napełniane są od góry za pomocą przenośnika taśmowego. Opróżnianie odbywa się grawitacyjnie poprzez dolne otwory wysypowe, z których koncentrat dostaje się na dolne przenośniki taśmowe.

Otwory wylotowe o wymiarach w świetle  $7,20 \times 1,0$  m wzmocniono w kierunku podłużnym profilami stalowymi, które poprzecznie ściągnięto śrubami.

W 1996 roku wewnątrz zbiornika poddano częściowemu remontowi. Obejmował on reprofiliację ubytków betonu oraz wyłożenie lejów zsykowych płytami z polietylenu.

### 3. Opis stwierdzonych uszkodzeń

Jak wynikało z przeprowadzonej inwentaryzacji [3], żelbetowa konstrukcja nośna zbiornika charakteryzowała się wieloma uszkodzeniami:

- odspojeniami na dużych powierzchniach warstw otuliny betonowej wraz ze zbrojeniem, po wewnętrznej i zewnętrznej stronie ukośnych, podłużnych ścian leja zsykowego (rys. 2 i 3);
- lokalnymi ubytkami powierzchniowych warstw betonu ukośnych ścian leja zsykowego oraz belek – ścian;
- pęknięciami betonu prostopadłymi do ścian leja zsykowego;
- powierzchniową korozją betonu;
- miejscową korozją zbrojenia.

Stwierdzono również wiele nieprawidłowości wynikających z wadliwej technologii betonowania, na które składały się:

- niewłaściwe zagęszczenie (zawibrowanie) mieszanki betonowej,
- wadliwe styki pomiędzy kolejnymi cyklami betonowania,
- brak przyczepności betonu do zbrojenia,
- lokalnie mniejsza od projektowanej grubość ścian leja zsykowego,
- znaczne imperfekcje geometryczne.



Rys. 3. Odspojenie warstwy otuliny betonowej wraz ze zbrojeniem ukośnej północno-wschodniej ściany podłużnej leja zsykowego

#### 4. Wyniki badań własności fizycznych, chemicznych i wytrzymałościowych betonu

W celu określenia rzeczywistych cech fizykochemicznych i wytrzymałościowych betonu, z którego wzniesiono zbiornik, pobrano rdzenie betonowe (stosując wiertnicę Hilti DD-160E), które następnie poddano badaniom laboratoryjnym. Wyniki tych badań (por. tab. 1) pozwoliły stwierdzić, że nasiąkliwość betonu (od 8,9 do 12,5%) była znacznie większa od wartości dopuszczalnej wynoszącej 5% z uwagi na agresywne oddziaływania przemysłowej atmosfery, a gęstość pozorna betonu oscylowała wokół minimalnej dopuszczalnej wartości wynoszącej 2000 kg/m<sup>3</sup> [7]. Wytrzymałość gwarantowana betonu, wyznaczona na podstawie laboratoryjnych badań niszczących rdzeni pobranych z konstrukcji zbiornika wyniosła  $R = 14,8$  MPa i była nieco mniejsza od wytrzymałości projektowanej.

Badania chemiczne wykazały występowanie procesów korozyjnych w powierzchniowych warstwach betonu.

Wokół prętów zbrojeniowych, wyciętych wraz z rdzeniami betonowymi, zaobserwowano rozległe pory lub nawet szczeliny powietrzne świadczące o niskiej jakości robót betonowych. W kilku przypadkach otulina nie była związana z resztą betonu.

**Tabela 1.** Gęstość pozorna, nasiąkliwość i wytrzymałość miarodajna próbek betonu uzyskanych z rdzeni pobranych ze ścian zbiornika 13z1

Rdzeń	Oznaczenie próbki	Gęstość pozorna [kg/m <sup>3</sup> ]	Nasiąkliwość [%]		Wytrzymałość miarodajna [MPa]
			próbki	uśredniona dla rdzenia	
1	1b	2065	9,3	9,3	21,50
	1c	2048	9,2		17,58
2	2c	2030	10,1	9,8	20,80
	2d	2004	9,7		17,79
	2e	2019	9,8		–
	2f	brak danych	9,6		–
3	3a*	brak danych	8,8	9,1	–
	3b	2050	9,3		17,54
	3d	2042	9,3		19,54
4	4b	1928	12,5	12,5	11,53
	4c	1919	12,5		10,02
5	5b	2057	9,3	9,3	15,79
6	6b	2021	9,7	10,0	16,75
	6c	2001	10,2		17,33
7	7b	2075	9,0	8,9	15,50
	7d*	brak danych	8,8		–

\* Próbką zawiera pręt zbrojenia, co zostało uwzględnione w określeniu jej masy

## 5. Obliczenia statyczno-wytrzymałościowe

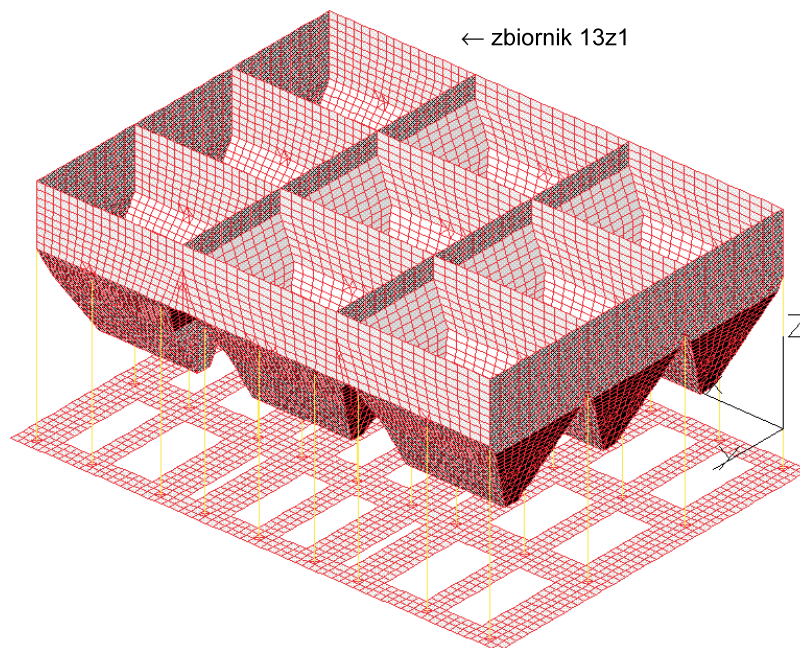
Przeprowadzone obliczenia statyczno-wytrzymałościowe miały wykazać, czy żelbetowa konstrukcja zbiornika była poprawnie zaprojektowana (właściwa powierzchnia zbrojenia) oraz jakie są przyczyny opisanych powyżej uszkodzeń [3].

W pierwszym etapie obliczeń dokonano analizy całej baterii zbiorników wspartych na fundamencie rusztowym. Przeprowadzono ją w dwóch wariantach napełnienia baterii [4]:

- 1) napełnienie wszystkich zbiorników,
- 2) napełnienie w tzw. szachownicę.

Obliczenia wykonano metodą elementów skończonych (MES). Jako model obliczeniowy konstrukcji przyjęto przestrzenny układ płytowo-tarczowo-słupowy, spoczywający na ruszcie fundamentowym, leżącym na sprężystym podłożu (rys. 4).

Obciążenia zbiorników wyznaczono zgodnie z normą [8]. Ze względu na usytuowanie obiektu (wewnątrz hali przemysłowej), sposób napełniania (z taśmociągu) i temperaturę koncentratu równą temperaturze otoczenia pominięto wpływy atmosferyczne, dynamiczne i termiczne.



Rys. 4. Model obliczeniowy baterii dziewięciu zbiorników

Obciążenie stanowiło:

- parcie materiału sypkiego na ściany zbiorników,
- ciężar własny konstrukcji.

Przyjęto: ciężar objętościowy koncentratu miedzi ( $\gamma = 18,0 \text{ kN/m}^3$ , współczynnik obciążenia  $\gamma_f = 1,3$  oraz kąt tarcia wewnętrznego koncentratu  $\phi_k = 42^\circ$ ).

Napór pionowy i poziomy wyznaczono ze wzorów:

$$p_v = (\gamma \cdot z) \tag{1}$$

$$p_h = \lambda_a p_v = \lambda_a \gamma \cdot z, \tag{2}$$

gdzie:

$$\lambda_a = \operatorname{tg}^2(45^\circ - 0,5\phi_k),$$

a składową normalną i styczną do ściany leja według wzorów:

$$p_n = \gamma \cdot z (\cos^2\alpha + \lambda_a \sin^2\alpha) \quad (3)$$

$$p_t = \gamma \cdot z (1 - \lambda_a) \sin\alpha \cos\alpha \quad (4)$$

Do obliczeń przyjęto:

- kąt nachylenia ścian leja zsypanego  $\alpha = 60^\circ$ ,
- $\lambda_a = \operatorname{tg}^2(45^\circ - 0,5 \cdot 42^\circ) = \operatorname{tg}^2(24^\circ) = 0,198 \approx 0,2$ ,
- $\gamma_{\text{obl.}} = \gamma \cdot \gamma_f = 18 \text{ kN/m}^3 \cdot 1,3 = 23,4 \text{ kN/m}^3$ .

Na ściany pionowe działa tylko parcie  $p_h$ , natomiast na ściany leja – składowe  $p_n$  i  $p_t$ .

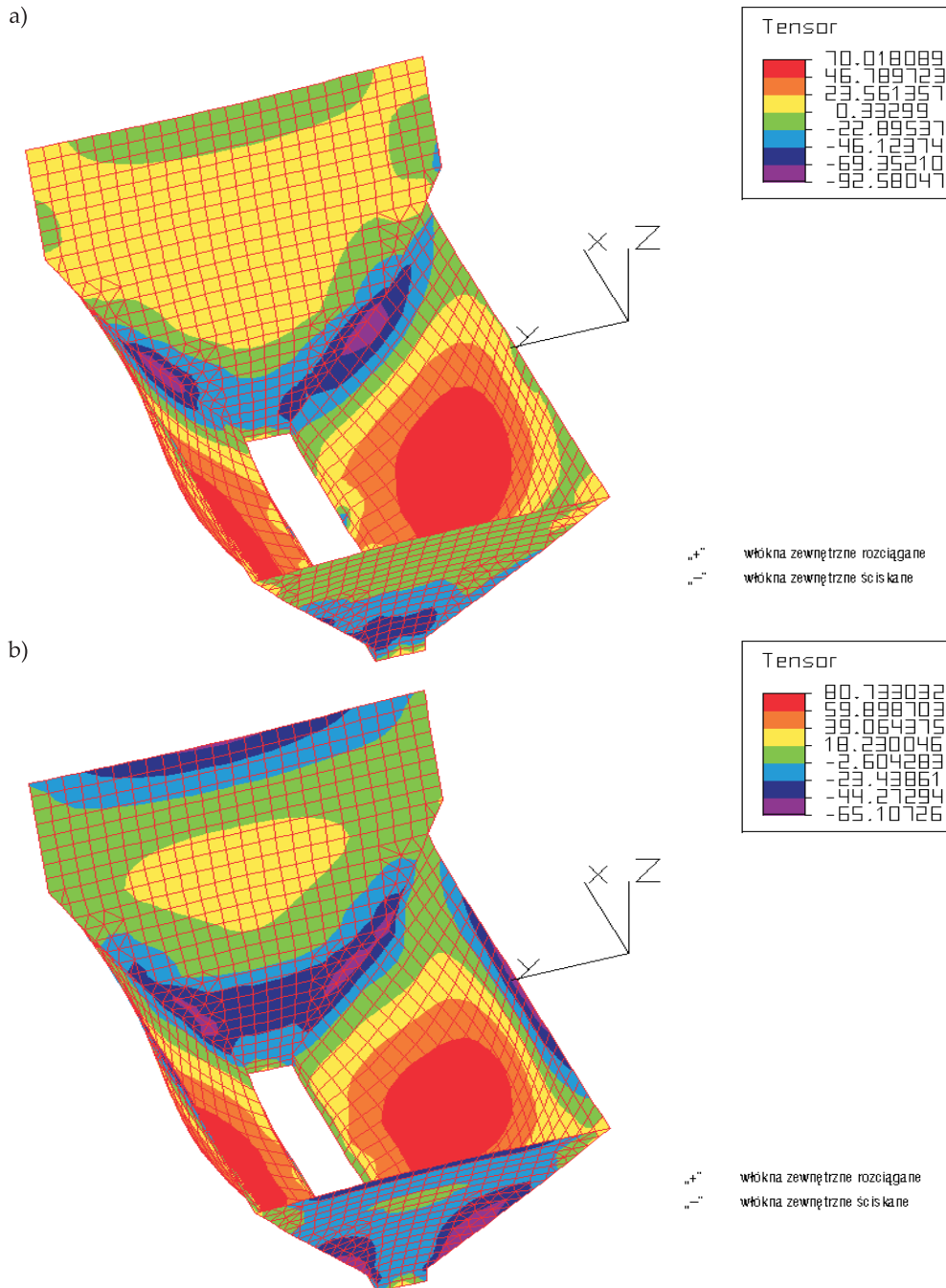
Symetria układu i uzyskane wyniki wstępnych obliczeń modelu całej baterii zbiorników pozwoliły na zredukowanie modelu obliczeniowego do jednego zbiornika narożnego (13z1). Na płaszczyznach podziału przyjęto kinematyczne warunki brzegowe wynikające z symetrii układu.

Obliczenia sił wewnętrznych przeprowadzono, przyjmując całkowite napełnienie zbiornika i puste zbiorniki sąsiednie.

Dysponując wynikami obliczeń w postaci rozkładu momentów i sił podłużnych w ścianach zbiornika, wyznaczono potrzebną powierzchnię zbrojenia. W obliczeniach założono zbrojenie siatkami po stronie wewnętrznej i zewnętrznej. Po porównaniu z rysunkami zbrojeniowymi projektu technicznego [1 i 2] stwierdzono, że przewidziano wymaganą powierzchnię zbrojenia.

W celu wyjaśnienia przyczyny obserwowanych uszkodzeń w ścianach leja zsypanego porównano mapy bitowe momentów zginających poziomych i pionowych (rys. 5) z odpowiednimi rysunkami lokalizacji uszkodzeń tych elementów (rys. 2). Na ich podstawie stwierdzono następującą prawidłowość. Uszkodzenia w postaci odspojen warstwy otuliny betonowej łącznie ze zbrojeniem pojawiają się w miejscach, które są ściskane przy zginaniu. I tak, tam gdzie momenty są dodatnie (ściskane włókna wewnętrzne), uszkodzenia pojawiają się na wewnętrznej stronie ukośnych ścian podłużnych. Tam zaś, gdzie momenty są ujemne (ściskane włókna zewnętrzne), uszkodzenia pojawiają się na zewnętrznej stronie ukośnych ścian podłużnych (pod belkami – ścianami) oraz na zewnętrznej stronie naroży.

Ta zbieżność dowodzi, że przyczyną odspojenia otuliny betonowej wraz ze zbrojeniem jest zjawisko wyboczenia prętów zbrojeniowych znajdujących się w strefie ściskanej momentem poziomym lub pionowym.



Rys. 5. Wyjaśnienie mechanizmu powstania odspojień otuliny betonowej (por. rys. 2):  
 a) momenty pionowe [kNm/m]; b) momenty poziome [kNm/m]



Wiąże się to ze: słabą współpracą betonu ze stalą zbrojeniową (niska jakość betonu i mała przyczepność betonu do zbrojenia) oraz całkowitym brakiem połączeń (strzemion-łączników) siatek zbrojenia wewnętrznego i zewnętrznego ścian lejów zsypanych, które skracałyby długości wyboczeniowe prętów.

## 6. Wnioski

Przeprowadzone badania żelbetowej konstrukcji zbiornika koncentratu rudy miedzi wykazały występowanie znacznych uszkodzeń spowodowanych głównie nieprawidłowościami projektowymi oraz niską jakością robót budowlanych.

Nieprawidłowości i uszkodzenia wraz z korozyjnym oddziaływaniem agresywnego środowiska przemysłowego spowodowały ponadto przyspieszone zużycie techniczne konstrukcji.

Obliczeniowa analiza statyczno-wytrzymałościowa, z zastosowaniem metody elementów skończonych MES, pozwoliła stwierdzić, że główną przyczyną największych uszkodzeń ścian podłużnych leja zsypanego żelbetowego zbiornika koncentratu rudy miedzi były ściskania związane z momentami zginającymi (poziomymi i pionowymi) spowodowanymi parciem składowanego materiału. Brak połączenia konstrukcyjnego pomiędzy przypowierzchniowymi siatkami zbrojenio- wymi, przy niskiej jakości betonu i jego słabej przyczepności do zbrojenia, spowodowały, że w strefach ściskanych pręty uległy wyboczeniu. To z kolei było przyczyną odpajania się znacznych fragmentów siatek zbrojeniowych wraz z otuliną betonową. Uszkodzonych w ten sposób partii ścian nie można traktować jako konstrukcji żelbetowych. Stal zbrojeniowa i beton pracują bowiem niezależnie.

## Literatura

- [1] *Projekt techniczny nr 12495/X zasobników żelbetowych w Magazynie Uśredniania Huty Miedzi*. Zabrze, lipiec 1975
- [2] *Projekt techniczny nr 13495/II Magazynu Uśredniania Huty Miedzi*. Katowice, sierpień 1975
- [3] *Ekspertyza dotycząca stanu technicznego zbiornika żelbetowego 13z1 w Magazynie Uśredniania Huty Miedzi*. Kraków, AGH, lipiec 2000
- [4] Kobiak J., Stachurski W.: *Konstrukcje żelbetowe, t. 1, 2*. Warszawa, Arkady 1973, 1979
- [5] Starosolski W.: *Konstrukcje żelbetowe, t. 1 i 2*. Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN 1986

- 
- [6] Grabiec K.: *Żelbetowe konstrukcje cienkościennie*. Warszawa – Poznań, Wydawnictwo Naukowe PWN 1999
  - [7] PN-88/B-06250: *Beton zwykły*
  - [8] PN-89/B-03262: *Zbiorniki żelbetowe na materiały sypkie i kieszonki. Obliczenia statyczne i projektowanie*
  - [9] PN-B-03264, 1999: *Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie*