

Numeryczna weryfikacja skuteczności wzmocnienia żelbetowego zbiornika na węgiel brunatny



mgr inż.
OLEKSANDR LYTVYN
KNUBA, Kijowski Państwowy Uniwersytet
Budownictwa i Architektury
ORCID: 0000-0002-2818-3457



mgr inż.
BENIAMIN MİODOŃSKI
Labteche Sp. z o.o.
ORCID: 0000-0002-8815-0868



prof. dr. hab. inż.
JAKUB MARCINOWSKI
Uniwersytet Zielonogórski
Wydział Budownictwa, Architektury
i Inżynierii Środowiska
ORCID: 0000-0001-6834-0843



dr hab. inż.
VOLODYMYR SAKHAROV
Uniwersytet Zielonogórski
Wydział Budownictwa, Architektury
i Inżynierii Środowiska
ORCID: 0000-0002-9381-3283



mgr inż.
AGATA SZERSZEŃ-ZAMORSKA
Labteche Sp. z o.o.
ORCID: 0000-0002-9956-4927

Przedmiotem analiz numerycznych zamieszczonych w pracy jest żelbetowy zbiornik na węgiel brunatny. Pojemność całkowita zbiornika wynosi około 26 tys. ton. W początkowym okresie eksploatacji zasobnika w latach 60. pojawiły się liczne spękania i nadmierne deformacje wymuszające podjęcie pilnych działań naprawczych.

Opis analizowanego obiektu

Główna bryła analizowanego zbiornika na węgiel jest podzielona na długości dwoma dylatacjami na trzy segmenty (w osi 14 i 22, por. rys. 1.), odpowiednio o długości: +58,5 m +36,0 m +58,5 m. Wysokość zasobnika, w najwyższej części środkowej, wynosi +32,96 m, a poziom płyty fundamentowej w najniższych miejscach to -10,05 m (części przesypowe w środku i częściach końcowych). Na pozostałej części wschodniej i zachodniej zasobnika wysokość wynosi 19,90 m, a poziom płyty fundamentowej -6,40 m. Pod względem konstrukcyjnym zbiornik składa się z dwóch części: dolnej - monolitycznej, żelbetowej oraz górnej, głównie prefabrykowanej. W latach 60., po wystąpieniu uszkodzeń konstrukcji żelbetowych, w zasobniku zostały wykonane istotne wzmocnienia, w tym wprowadzono ściągi poprzeczne, ukośne i podłużne. Obciążenie od składowanego węgla jest przenoszone przez podłużne, ukośne płyty zsypane na 4-prześlówce podciągi poprzeczne, a stąd za pośrednictwem słupów i podłużnych ścian wewnętrznych na fundament.

Na płycie fundamentowej spoczywają żelbetowe, monolityczne ściany zewnętrzne oraz trzy podłużne rzędy żelbetowych słupów

wewnętrznych. Konstrukcją nośną obudowy części węglowej są trójprzegubowe, żelbetowe ramy prefabrykowane. Do ukośnych słupów ram przymocowano, przy zastosowaniu stalowych klamer, prefabrykowane żelbetowe płyty osłonowe. Jednoprzegubowe ramy obudowy taśmociągów górnych (dachowe) mają przeguby w środku ryglu (+19,90 m) i są utwierdzone dołem (+15,10 m) w ryglu ram trójprzegubowych (por. rys. 2.).

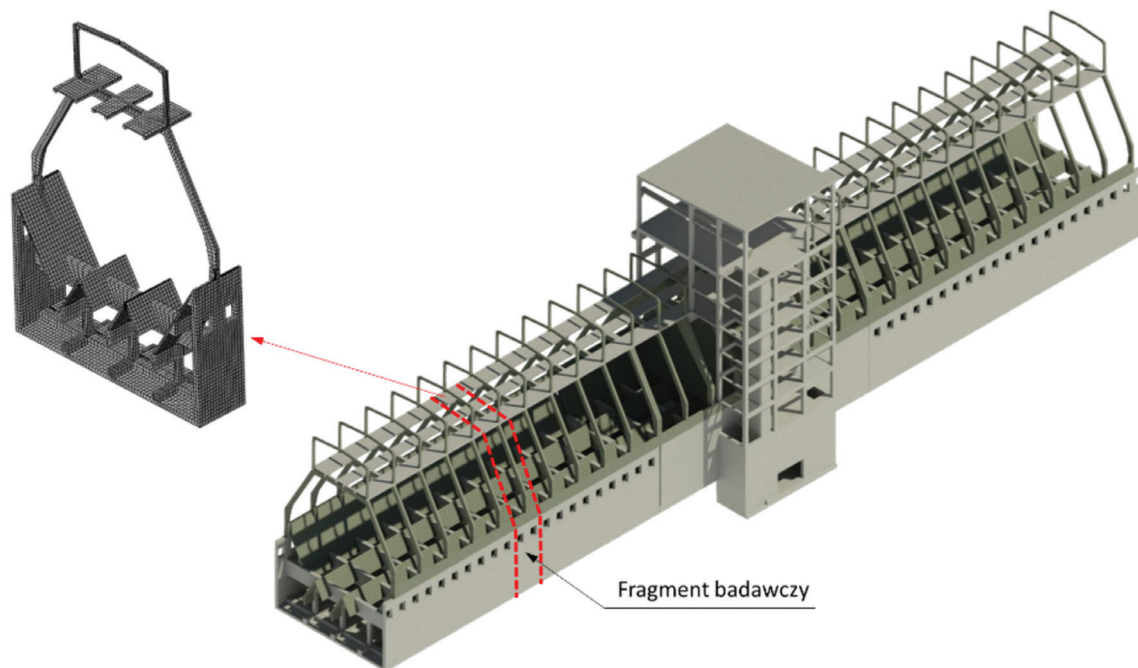
Przedmiotem szczegółowej analizy jest powtarzalny segment pokazany na rys. 3. Głównym celem wykonanych symulacji numerycznych było potwierdzenie skuteczności wzmocnień zbiornika wykonanych w latach siedemdziesiątych XX wieku.

Model numeryczny analizowanego segmentu zbiornika

Symulację komputerową wydzielonej części konstrukcyjnej zasobnika przeprowadzono w ramach zagadnienia przestrzennego teorii sprężystości (modelowanie 3D, elementami rodziny solid). Opracowany model obliczeniowy uwzględnił współdziałanie elementów systemu „podłoże gruntowe - fundament - budowla” z uwzględnieniem konstrukcji podziemnych i nadziemnych.

Symulacje numeryczne wykonano dla fragmentu części wschodniej (por. rys. 3.) w warunkach symetrii cyklicznej. Szerokość przekroju symetrycznego została przyjęta zgodnie z rozstawem ram trójprzegubowych i wynosi 4,5 m.

Warstwa nośna podłoża gruntowego zasobnika składa się z poduszki gruntowej o grubości 1,5 x 2 m. Ze względu na długi czas użytkowania obiektu oraz cykliczne obciążenia gruntu nośne podłoża w strefie ściskanej zostały skonsolidowane. W przeprowadzonych symulacjach numerycznych jako warunki gruntowe dla bryły podłoża były przyjęte parametry poduszki gruntowej. Pominięto parcie od gruntu zasypowego na pionowe ściany zewnętrzne w zakresie od -0,90 do -6,40 m.



Rys. 3. Wizualizacja części środkowej zbiornika z wyeksponowanym dyskretnym modelem segmentu powtarzalnego

Obciążenie zasobnika ciężarem własnym oraz obciążeniem węglem doprowadziło do osiadania konstrukcji o wartość 28...29 mm. Przekrój zasobnika nie jest symetryczny. Mniejszy rozstaw słupów w osiach A-B (rys. 2.) oraz nierównomierna sztywność przestrzenna utworzona z płyt ukośnych zszpowych, podciągów głównych oraz słupów spowodowały nierównomierny rozkład naprężeń w konstrukcjach nośnych. Jednak przez wysoką sztywność płyty oraz jednorodne warunki gruntowe osiadanie fundamentów było niemal równomierne. Największe osiadanie wystąpiło pod środkowym rzędem słupów (rys. 6a). Maksymalna różnica osiadań wyniosła 1 mm, a maksymalne przechylenie konstrukcji w połowie jej szerokości wyniosło $\beta = 1/9250 = 0,0001$ [rad], co jest mniejsze od wartości dopuszczalnej 1/500 zdefiniowanej w Załączniku H normy [3].

Podciąg główny przekazuje obciążenia pionowe od komór węglowych na słupy i ściany oraz przenosi siły rozporu. Powoduje to powstanie złożonego stanu naprężenia ze strefami rozciągania i ściskania zarówno w górnej, jak i w dolnej części podciągu (rys. 6b). Przy istniejącym (projektowanym) zbrojeniu oraz betonie B20 ($R_w=200$ kG/cm²)

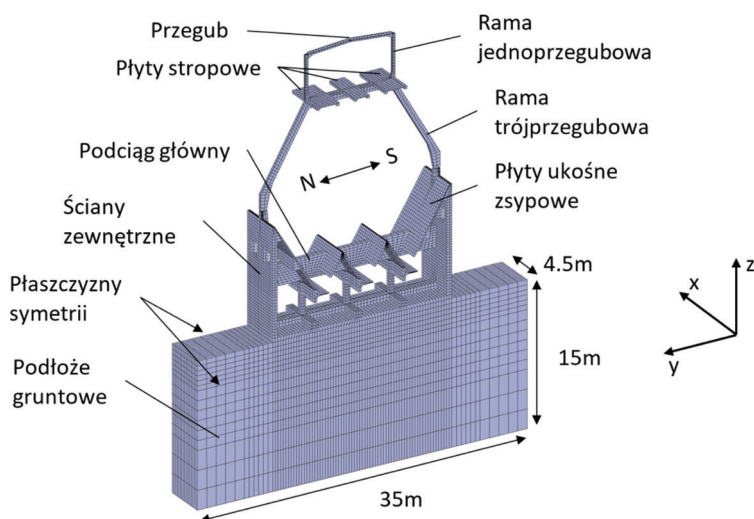
stopień wykorzystania nośności wynosi około 75%, sprawdzony zgodnie z EC2. Warto także przypomnieć, że podczas wykonanych analiz grunt otaczający, który również przejmuje pewną część rozporu, nie był brany pod uwagę, co oznacza, że faktyczny poziom wyężenia głównych elementów konstrukcyjnych przylegających do ściany może być niższy od podanej wartości.

Ze względu na sztywne łączenie, podciąg powoduje powstanie w ścianie momentu zginającego. W ścianach maksymalne siły wewnętrzne powstawały w filarach międzyokiennych ($M=180$ kNm, $N=-500$ kN) oraz w miejscu łączenia z podciągiem ($M=31$ kNm, $N=-625$ kN). Obciążenie to nie przekracza nośności projektowej (stopień wykorzystania nośności – 80%). Wobec niskiej jakości wykonania konstrukcji zasobnika siły te w początkowym okresie eksploatacji prawdopodobnie doprowadziły do spękań, co skutkowało ewentualną zmianą schematu statycznego podciągów z belek sztywno zamocowanych na końcach na wolnopodparte.

W płycie fundamentowej maksymalne naprężenia występują w strefie ścian oraz pomiędzy żebrami i powodują powstanie momentów w kierunku x około 24–34 kNm oraz w kierunku y 26–30 kNm. W słupach maksymalne siły wewnętrzne były odnotowane w części dolnej południowego słupa o wartościach $M=57$ kNm, $N=-3062$ kN. W elementach tych maksymalny stopień wykorzystania nośności wyniósł 81%.

W celu oszacowania zmiany rozkładu naprężeń w elementach nośnych zasobnika po wzmocnieniu model został uzupełniony o stalowe ściągi ukośne i poprzeczne pokazane na rys. 2b. Ściągi te były modelowane jako elementy liniowo-sprężyste sztywno łączone z elementami konstrukcyjnymi w miejscach zakotwienia. Obliczenia wykonano w dwóch etapach. W pierwszym konstrukcja była obciążona ciężarem własnym. Następnie zostały wprowadzone elementy wzmocnienia (bez napięcia wstępnego), a konstrukcja była obciążona ciężarem węgla.

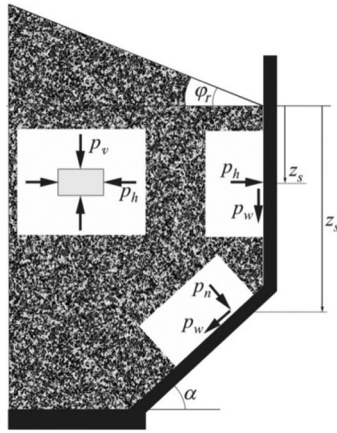
Wykonane obliczenia potwierdziły, że elementy wzmocniające doprowadziły do obniżenia naprężeń ekstremalnych. Rozkłady naprężeń w elementach podciągu oraz w ścianach prawie się nie zmieniły względem poprzedniego schematu obliczeniowego, z wyjątkiem pewnego zmniejszenia wartości ekstremalnych w strefach koncentracji w podciągu i ścianie zewnętrznej, gdzie naprężenia zmniejszyły się o około 18%. W ściągach ukośnych siły osiowe wyniosły odpowiednio (dla strony północnej i południowej) około 235 kN i 203 kN



Rys. 4. Podział analizowanego segmentu na elementy skończone

PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA

Lytvyn Oleksandr, Miodoński Benjamin, Marcinowski Jakub, Sakharov Volodymyr, Szerszeń-Zamorska Agata, 2022, Numeryczna weryfikacja skuteczności wzmocnienia żelbetowego zbiornika na węgiel brunatny, „Builder” 4 (297). DOI: 10.5604/01.3001.0015.7949



Rys. 5. Rozkład parć materiału sypanego (węgiła) na ściany zbiornika

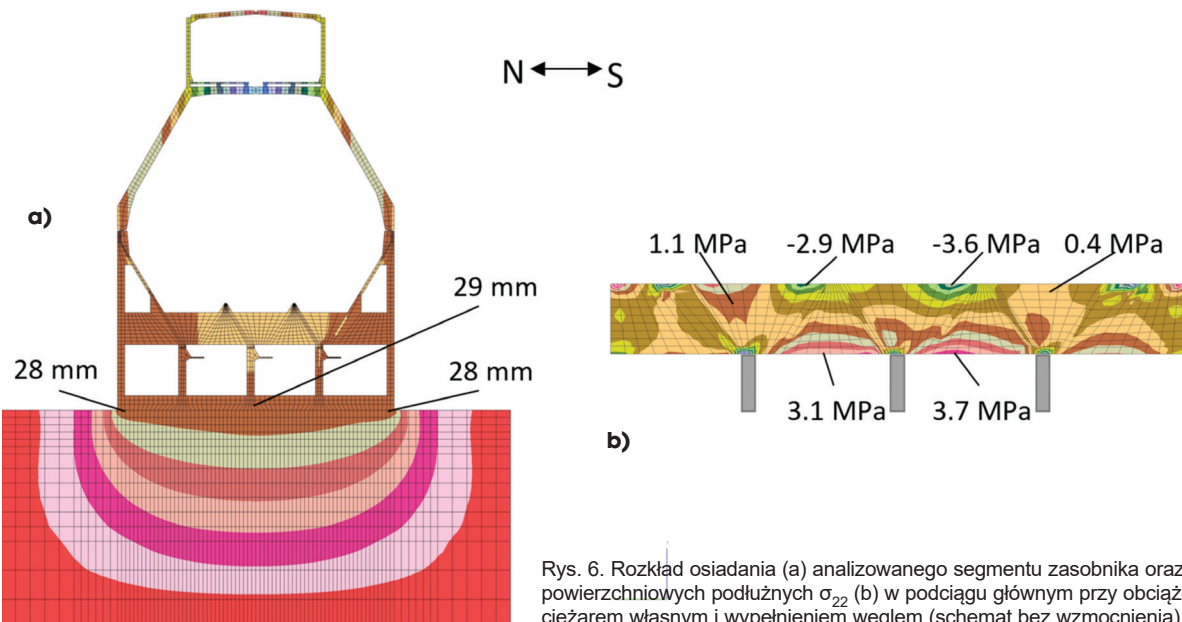
(40–47 MPa). W ściągach poprzecznych dolnych wystąpiły siły rzędu 8 kN. Odształcenie całkowite górnej części podciągu głównego po obciążeniu węglem przyjęło dodatnie wartości, co uniemożliwiło włączenie tych ściągów do współpracy.

Wnioski z przeprowadzonych analiz

Wykonane symulacje numeryczne wykazały, że stan wyężenia konstrukcji nośnych zasobnika po wzmocnieniu w znacznym stopniu zależy od stanu technicznego konstrukcji po naprawach (skuteczności zespolenia materiałów naprawczych z materiałem rodzimym) oraz sposobu montażu ściągów. Ściąg wzmacniający modelowane bez wstępnej naprężenia (zachowawczo) nie zmieniają ogólnej pracy konstrukcji. Podczas ich montażu niewątpliwie wprowadzono wstępne naprężenia i tym samym zwiększono skuteczność zastosowanego sposobu wzmocnienia zbiornika. Wzmocnienie to okazało się efektywne, a świadczy o tym brak nowych uszkodzeń konstrukcyjnych mimo intensywnej, cyklicznej, wieloletniej eksploatacji przedmiotowego zbiornika. Potwierdzenie tego wniosku wymagałoby przeprowadzenia dodatkowych analiz parametrycznych, które będą przedmiotem odrębnej opracowania.

Literatura

- [1] Kobiak J., Stachurski W., Konstrukcje żelbetowe. Wydanie drugie, Arkady, Warszawa 1960.
 [2] PN-EN 1991-4:2008: Eurokod 1 – Oddziaływania na konstrukcje. Część 4. Silosy i zbiorniki, PKN, Warszawa 2008.
 [3] PN-EN 1997-1: Eurokod 7 – Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne, PKN, Warszawa 2008.



Rys. 6. Rozkład osiadania (a) analizowanego segmentu zasobnika oraz naprężeń powierzchniowych podłużnych σ_{22} (b) w podciągu głównym przy obciążeniu ciężarem własnym i wypełnieniem węglem (schemat bez wzmocnienia)

Streszczenie: Przedmiotem analiz numerycznych zamieszczonych w pracy jest żelbetowy zbiornik na węgiel brunatny. Pojemność całkowita zbiornika wynosi około 26 tys. ton. W początkowym okresie eksploatacji zasobnika w latach 60. pojawiły się liczne spękania oraz nadmierne deformacje wymuszające podjęcie pilnych działań naprawczych. Wprowadzono wtedy stalowe ściąg podłużne, poprzeczne i ukośne. Skuteczność tych wzmocnień nie była weryfikowana w przeszłości. Inwentaryzacja oraz wykonane w ostatnim czasie badania materiałowe dostarczyły danych użytych w analizach numerycznych, których celem była ocena aktualnego stanu technicznego analizowanego obiektu. Model numeryczny samej konstrukcji został uzupełniony o grunt, na którym zasobnik został posadowiony. Analizy numeryczne zostały wykonane autorskim programem weryfikowanym wcześniej za pomocą innych programów komercyjnych.

Słowa kluczowe: zbiornik żelbetowy, badania materiałowe, wzmocnienie ściągami, symulacje numeryczne, model 3D

Abstract: NUMERICAL VERIFICATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE REINFORCEMENT OF A REINFORCED CONCRETE LIGNITE BUNKER. The subject of numerical analyzes included in the paper is a reinforced concrete lignite bunker. The total capacity is about 26 thousand tone. In the initial period of the bunker's operation, disturbing symptoms (cracks, excessive deformations) appeared, necessitating taking urgent corrective actions. Then, longitudinal, transverse and diagonal steel ties were introduced. The effectiveness of these reinforcements has not been verified in the past. Their careful inventory and material tests performed recently provided the necessary data to perform numerical analyzes, the purpose of which was to assess the current technical condition of the analyzed object. The numerical model of the structure itself was supplemented with the ground on which the bunker was placed. Numerical analyzes were performed with author's program that was previously verified with other commercial programs.

Keywords: reinforced concrete bunker, material examinations, reinforcement with ties numerical simulations, model 3D