

Stanisław WOLNY¹
Sławomir BADURA²

OCENA WPLYWU OBCIĄŻEŃ EKSPLOATACYJNYCH NA STAN NAPRĘŻENIA W ELEMENTACH NOŚNYCH KONSTRUKCJI BASZTOWEJ WIEŻY SZYBOWEJ W ŚWIETLE PRZEPROWADZONYCH EKSPERYMENTÓW

Wykorzystanie do analizy wytrzymałościowej konstrukcji wieży szybowej metody stanów granicznych wymagało określenie wielkości obliczeniowych tak obciążeń jak i wytrzymałości. Do określenia obliczeniowych wartości obciążenia, niezbędnym było wyznaczenie charakterystycznych wartości obciążeń elementów konstrukcyjnych wieży szybowej [1, 3, 4]. W celu potwierdzenia poprawności przeprowadzonych – w tym zakresie obliczeń – w oparciu o uzyskane rezultaty przeprowadzono numeryczną analizę naprężeń i odkształceń. Wyniki tych analiz zostały zweryfikowane pomiarami naprężeń (odkształceń) w najbardziej wyężonych obszarach konstrukcji, wytypowanych na podstawie mapy naprężeń stanowiącej wynik analizy numerycznej, co stanowi treść opracowania. Tensometryczne pomiary stanu odkształcenia (naprężenia) wykonano na belkach kondygnacji poziomu +65,00 m), na których posadowione są maszyny wyciągowe (łożyska wału napędowego, mocowania stojanów silników elektrycznych) co schematycznie pokazano na rys. 2. Przeprowadzono ponadto analizę wytrzymałościową (numeryczną), którą ograniczono do obszarów elementów nośnych kondygnacji (poziom +65,00) wieży szybowej, w której mierzono odkształcenia (naprężenia) oraz obciążeń, które wywołały maksymalne wartości zmienionych wartości naprężeń [4]. Wyniki dodatkowo wykonanej (numerycznej) analizy stanu naprężenia, ograniczonej do obszarów elementów nośnych konstrukcji basztowej wieży szybowej, w których stwierdzono maksymalne wyężenie materiału konstrukcji [4], w całej rozciągłości korespondują z wynikami eksperymentu przeprowadzonego na obiekcie rzeczywistym. Oznacza to, że wykonane (numeryczne) analizy stanu odkształcenia i naprężenia w elementach nośnych konstrukcji basztowych wież szybowych – aktualnie eksploatowanych w polskim górnictwie upoważniają do przyjęcia generalnego założenia, że w ramach analizy geometrii układu napędowego maszyn wyciągowych, konstrukcje na których posadowione są elementy tego układu można traktować ja-

¹ Autor do korespondencji/corresponding author: Stanisław Wolny, AGH University of Science and Technology, Faculty of Mechanical Engineering and Robotics, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland, e-mail: stwolny@agh.edu.pl

² Sławomir Badura, AGH University of Science and Technology, Faculty of Mechanical Engineering and Robotics, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland, e-mail: sbadura@agh.edu.pl

ko sztywne. Wniosek ten dodatkowo potwierdzają wyniki geodezyjnych pomiarów przemieszczeń wybranych punktów konstrukcji nośnej basztowej wieży szybowej. Wyniki te – co jest pewnego rodzaju ciekawostką – wskazują, że konstrukcja basztowej wieży szybowej, powyżej pierwszej kondygnacji, zachowuje się jak bryła sztywna.

Słowa kluczowe: wieża szybowa, stan naprężenia, obciążenia, pomiary tensometryczne

1. Wstęp

Wykorzystanie do analizy wytrzymałościowej konstrukcji wieży szybowej metody stanów granicznych, wymagało określenia wielkości obliczeniowych tak obciążeń jak i wytrzymałości. W tym celu niezbędnym było wyznaczenie charakterystycznych wartości obciążeń elementów konstrukcyjnych wieży szybowej [1, 3, 4] a ponadto przeprowadzenia analiz numerycznych w zakresie naprężeń i odkształceń. Wyniki tych analiz zostały zweryfikowane pomiarami naprężeń (odkształceń) w najbardziej wyciężonych obszarach konstrukcji, wytypowanych na podstawie mapy naprężeń stanowiącej wynik analizy numerycznej, co stanowi treść opracowania.

Wyniki analiz numerycznych w zakresie przemieszczeń, zostały zweryfikowane pomiarami poziomych przemieszczeń wybranych punktów konstrukcji wieży szybowej, podczas normalnego cyklu eksploatacji.

Wykonano również powtórny (numeryczny) analizę stanu naprężenia ograniczoną do obszarów elementów nośnych konstrukcji wieży szybowej, w których mierzono naprężenia (odkształcenia).

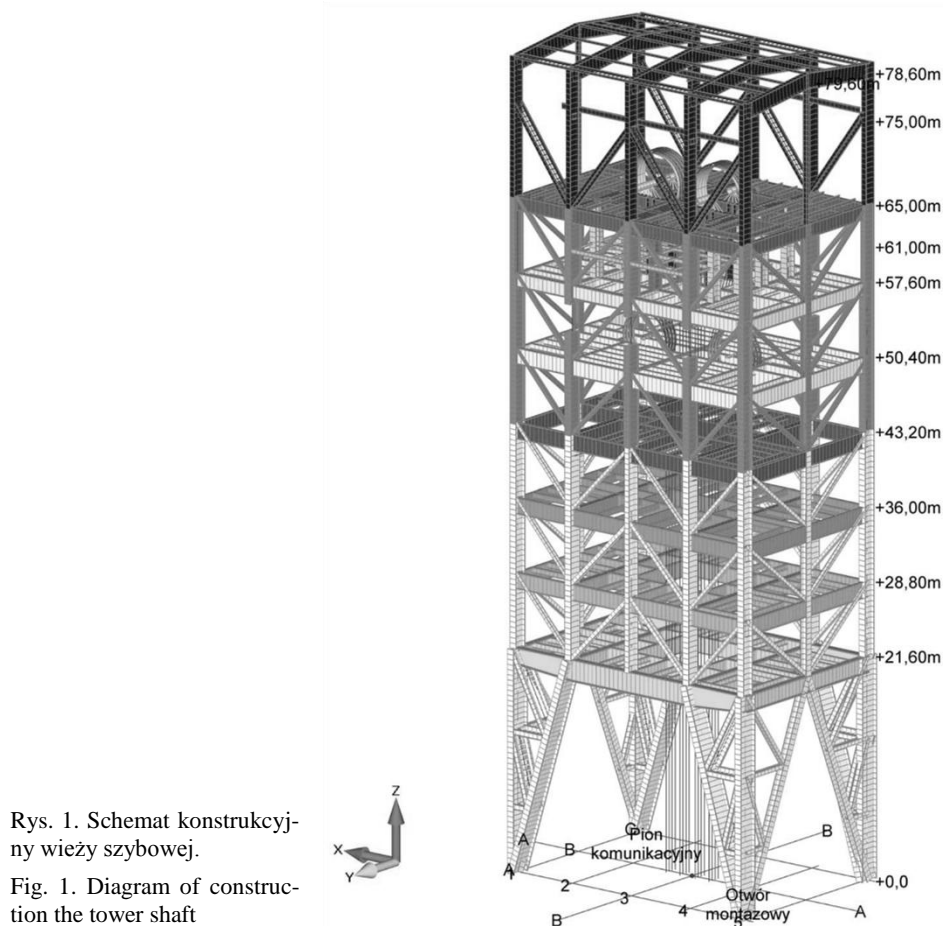
Wyniki przeprowadzonych analiz, pozwoliły na sformułowanie wniosków, dotyczących zachowania się elementów nośnych konstrukcji basztowej wieży szybowej, podczas normalnej eksploatacji wyciągu.

2. Pomiar naprężeń w elementach nośnych konstrukcji wieży szybowej

Uzyskane rezultaty analizy wytrzymałościowej (stan naprężenia) [4] w elementach nośnych konstrukcji wieży szybowej (rys. 1) zostały zweryfikowane pomiarami naprężeń (odkształceń) w najbardziej wyciężonych obszarach konstrukcji.

Odkształcenia (naprężenia) mierzono w punktach elementów nośnych konstrukcji wieży w których, bazując na wynikach numerycznej analizy wytrzymałościowej, stwierdzono maksymalne wyciężenie materiału konstrukcji [4]. Tensometryczne pomiary stanu odkształcenia, wykonano na belkach kondygnacji (poziom +65,00mm) na których posadowione są maszyny wyciągowe (łożyska

wału pędnego, mocowania stojanów silników elektrycznych) co schematycznie pokazano na rys. 2.

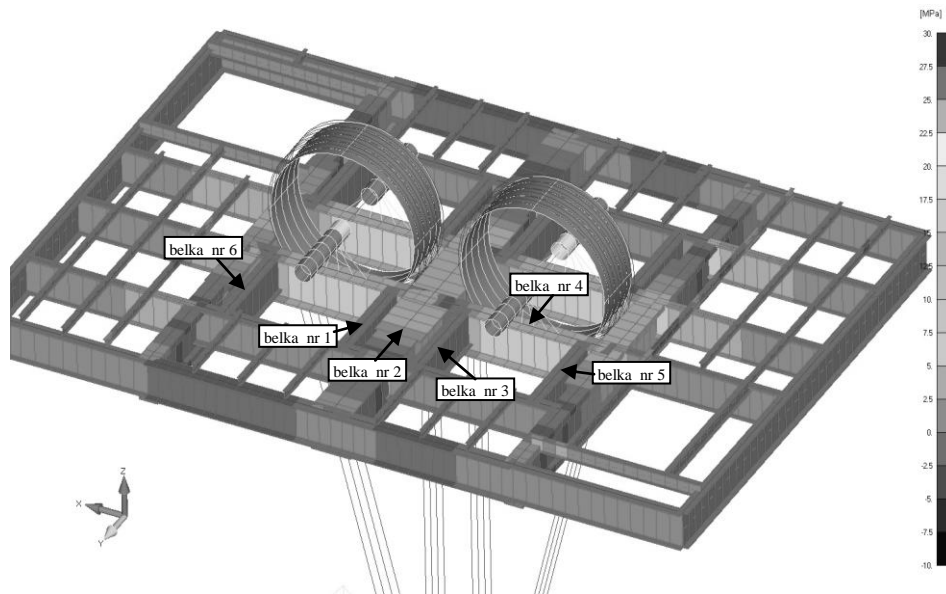


Rys. 1. Schemat konstrukcyjny wieży szybowej.

Fig. 1. Diagram of construction the tower shaft

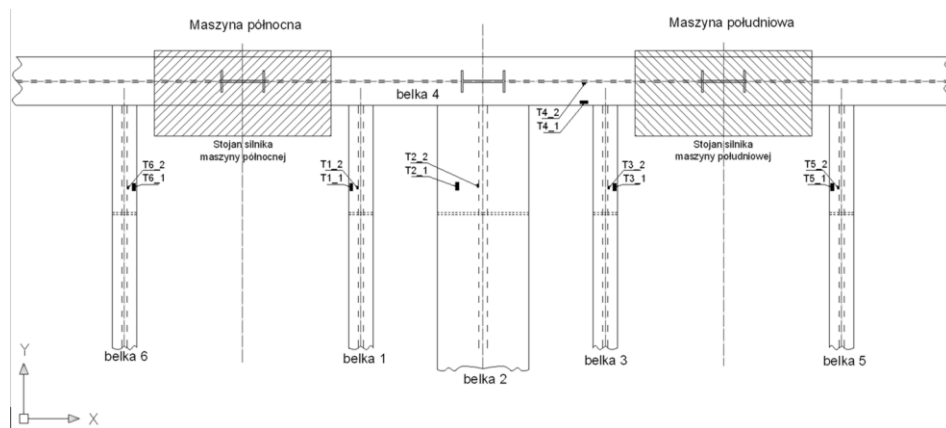
Odształcenia mierzono na sześciu belkach, a schemat rozmieszczenia czujników tensometrycznych pokazano na rys. 3. Belki tej kondygnacji to blachownice o przekrojach dwuteowych. Na każdej belce naklejono po dwa tensometry, jeden do pasa dolnego a drugi do środka.

Na belkach nr 3 i nr 5 na których posadowiony jest stojan silnika napędowego maszyny południowej (rys. 3), naklejone zostały tensometry T3_1 (pas dolny belki nr 3), T3_2 środek belki oraz T5_1 (pas dolny belki nr 5), T5_2 środek belki. Na belkę nr 1 i nr 6 na których posadowiony jest stojan silnika napędowego maszyny północnej (rys. 3) naklejone zostały tensometry T1_1 (pas dolny belki nr 1), T1_2 (środek belki) oraz T6_1 (pas dolny belki nr 6), T6_2 środek belki. Na rysunku 4 przykładowo pokazano czujnik tensometryczny T1_1 naklejony na pas dolny belki nr 1.



Rys. 2. Schemat belek kondygnacji (poziom +65,00 m)

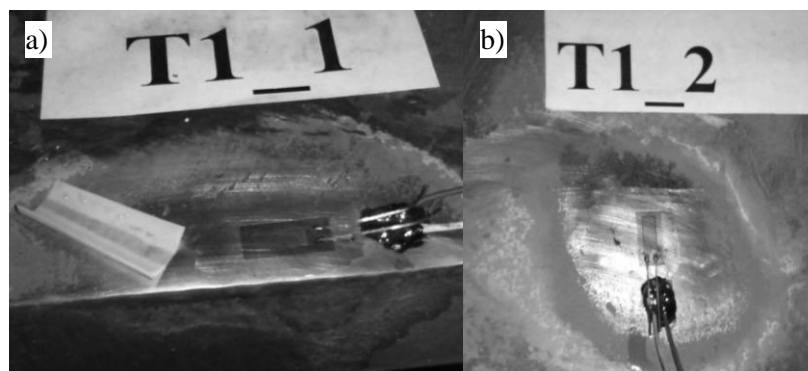
Fig. 2 Diagram of the floor beams (level +65,00 m)



Rys. 3. Schemat rozmieszczenia czujników tensometrycznych podczas prowadzonych badań.

Fig. 3. Strain gauge attachment points during the research

Ponadto na belce nr 2 rozdzielającej przedziały szybu (rys. 3), naklejono tensometry T2_1 (pas dolny belki) oraz T2_2 (środek belki). Na belce nr 4 prostopadłej do belek nr 1, nr 2, nr 3, nr 5, nr 6 na której posadowione są korpusy



Rys. 4. Zamontowane czujnik tensometryczny; a) T1_1 naklejony na pas dolny belki nr 1, b) T1_2 naklejony na środek belki nr 1.

Fig. 4. Installed strain gauge; a) T1_1 glued to the bottom of the beam belt No. 1 b) T1_2 glued on the Web of the beam No. 1

łożysk wału napędowego maszyn, naklejone zostały tensometry T4_1 (pas dolny belki) oraz T4_2 (środek belki).

Do pomiarów wykorzystano następującą aparaturę :

- wzmacniacz pomiarowy HBM MGCplus z możliwością pomiarów czujnikami rezystancyjnymi i indukcyjnymi, zasilany z akumulatorów żelowych 12V-12Ah,
- komputer przenośny laptop, wyposażony w profesjonalny program „Catman” firmy HBM który rejestrował przebieg pomiarów.

Pomiarów odkształceń dokonano przy użyciu czujników tensometrycznych TF-5/120.

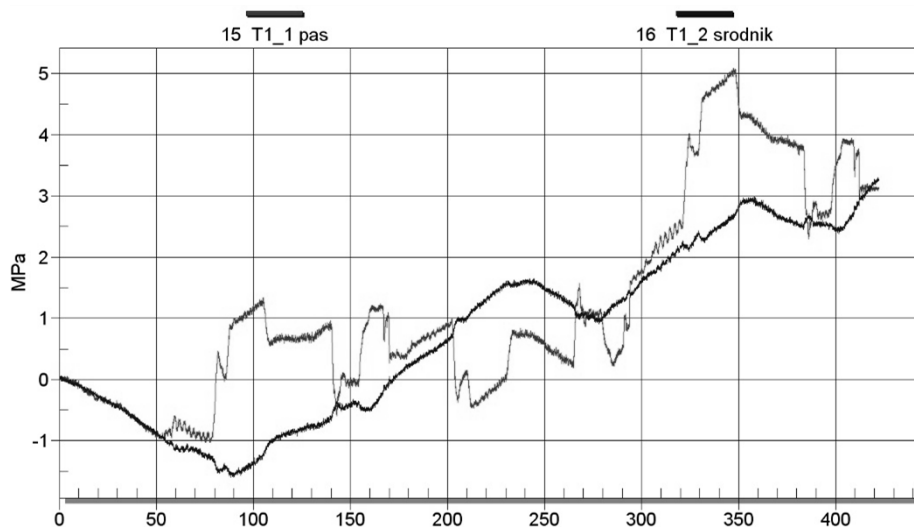
Rejestrowano zmianę stanu odkształcenia, w wyżej opisanych punktach pomiarowych, podczas następujących cykli pracy maszyn wyciągowych:

- a) pojedyncza praca maszyny północnej - 3 przejazdy (pierwszy cykl pomiarowy),
- b) równoczesna praca obu maszyn - 3 przejazdy (drugi cykl pomiarowy),
- c) pojedyncza praca maszyny południowej - 1 przejazd (trzeci cykl pomiarowy),
- d) pojedyncza praca maszyny północnej - 1 przejazd (trzeci cykl pomiarowy),
- e) równoczesna praca obu maszyn - 1 przejazd (trzeci cykl pomiarowy),
- f) hamowanie bezpieczeństwa maszyną południową (czwarty cykl pomiarowy).

W artykule ograniczono się tylko do przedstawienia wybranych wyników wykonanych pomiarów, natomiast wszystkie wyniki zostały zamieszczone w opracowaniu [2].

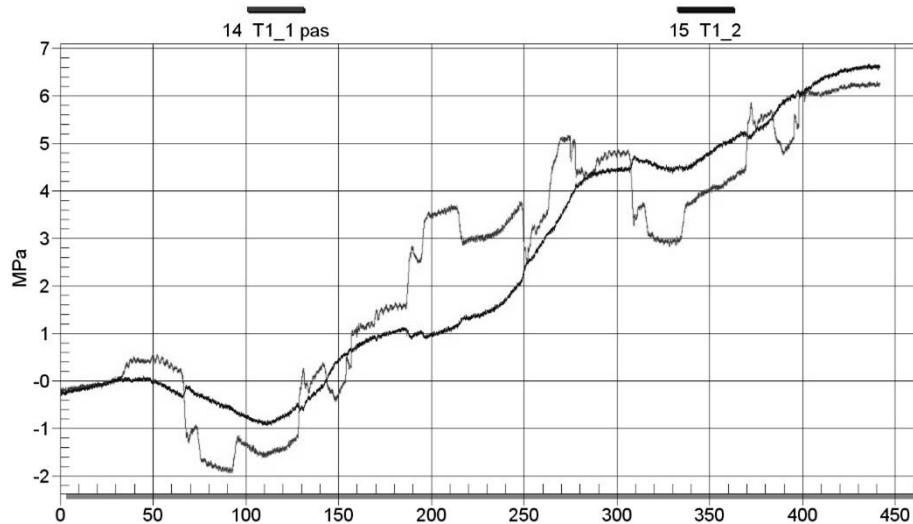
Przykładowo na rys. 5 przedstawiono zmianę naprężenia w belce nr 1 (rys. 2 i 3) podczas pojedynczej pracy maszyny północnej, w czasie trzech pełnych cykli wydobywczych. Kolorem czerwonym zaznaczono zmianę naprężenia w pasie dolnym tej belki, zarejestrowaną przez czujnik tensometryczny T1_1, natomiast kolorem niebieskim zmianę naprężenia w środku zarejestrowaną przez czujnik tensometryczny T1_2. Zmiana naprężenia w belce nr 1 dla analizowanego cyklu pracy urządzenia wyciągowego nie przekracza 7 MPa.

Natomiast na rys. 6 przedstawiono zmianę naprężenia również w belce nr 1 tym razem podczas równoczesnej pracy obu maszyn, w czasie trzech cykli wydobywczych. Kolorem czerwonym przedstawiono zmianę naprężenia w pasie dolnym tej belki zarejestrowaną przez czujnik tensometryczny T1_2, natomiast kolorem niebieskim zmianę naprężenia w środku zarejestrowaną przez czujnik tensometryczny T2_2. Zmiana naprężenia w belce nr 1 dla analizowanego cyklu pracy urządzenia wyciągowego nie przekracza 9 MPa.



Rys. 5. Wykres przebiegu naprężeń w belce nr 1 podczas pojedynczej pracy maszyny północnej, w czasie trzech pełnych cykli wydobywczych.

Fig. 5 Graph of the course of stresses in the beam No. 1 during a single work machine northern, during three complete cycles of mining.

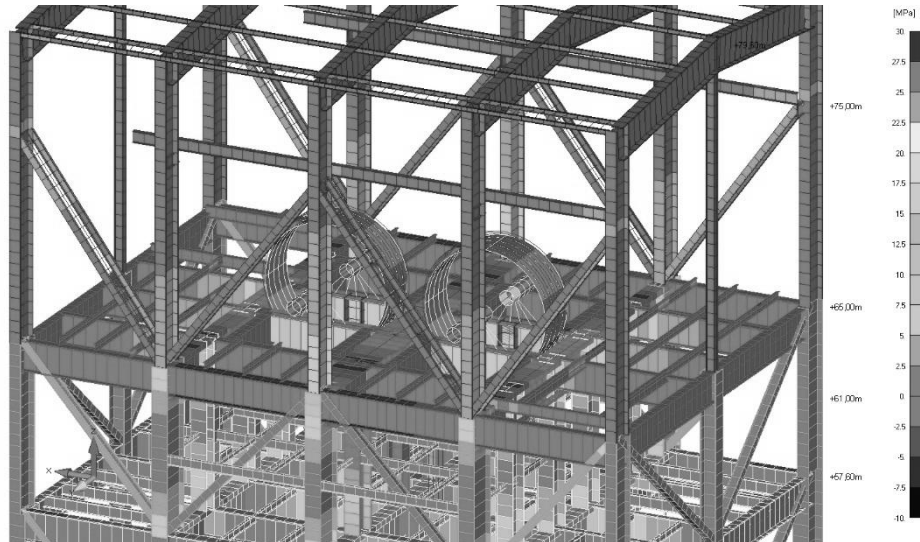


Rys. 6. Wykres przebiegu naprężeń w belce nr 1 podczas pracy obydwu maszyn, w czasie trzech pełnych cykli wydobywczych.

Fig. 6 Graph of the course of stresses in the beam No. 1 during a both machines work, during three complete cycles of mining.

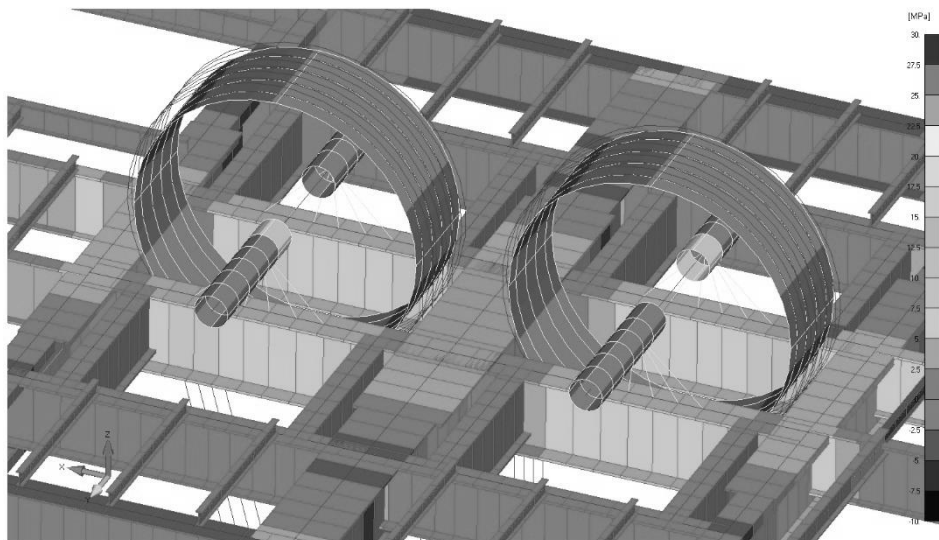
3. Analiza wytrzymałościowa

Analizę wytrzymałościową (numeryczną) ograniczono do obszarów elementów nośnych kondygnacji (poziom +65,00 m) wieży szybowej, w których mierzono odkształcenia (naprężenia) oraz obciążeń, które wywołały maksymalne wartości zmierzonych naprężeń (drugi cykl pomiarowy – równoczesna praca obu maszyn). Obliczenie wykonano bazując na opracowanym modelu numerycznym konstrukcji wieży szybowej [4], który pokazano również na rys. 1. Wyniki analizy wytrzymałościowej – stan naprężenia w elementach nośnych konstrukcji wieży szybowej – przedstawione w formie graficznej zestawiono w opracowaniu [2] Natomiast w artykule ograniczono się do przedstawienia rozkładu naprężeń zredukowanych σ_z , wyliczonych z wykorzystaniem hipotezy Hubera-Misesa w elementach nośnych konstrukcji wieży szybowej od poziomu +57,60 m do poziomu +75,00 (rys. 7). Największe naprężenia zredukowane obserwujemy w belkach nośnych kondygnacji (poziom +65,00) w okolicach zabudowy maszyn wyciągowych. W celu dokładnego określenia stanu naprężenia w belkach poziomu (+65,00 m), na rys. 8 pokazano ten fragment elementów nośnych konstrukcji wieży, z naniesionymi warstwicami określającymi poziom naprężeń. Największą wartość naprężeń zredukowanych (około 22 MPa) obserwujemy w miejscach połączenia belek podtrzymujących łożysko wału i stojanu. Przedstawione wykresy dotyczą maksymalnego obciążenia elementów nośnych



Rys. 7. Rozkład naprężeń zredukowanych σ_z w elementach nośnych basztowej konstrukcji wieży od poziomu +57,60 m do poziomu +75,00 m dla przypadku rozpoczęcia procesu podnoszenia pełnego naczynia z podszybia z przyspieszeniem a_I .

Fig. 7. Reduced stress distribution σ_z in the load-bearing elements of a tower-type headgear structure from level +57,60 m to level +75,00 m for the initiation of the process picking up the full conveyance with acceleration a_I .

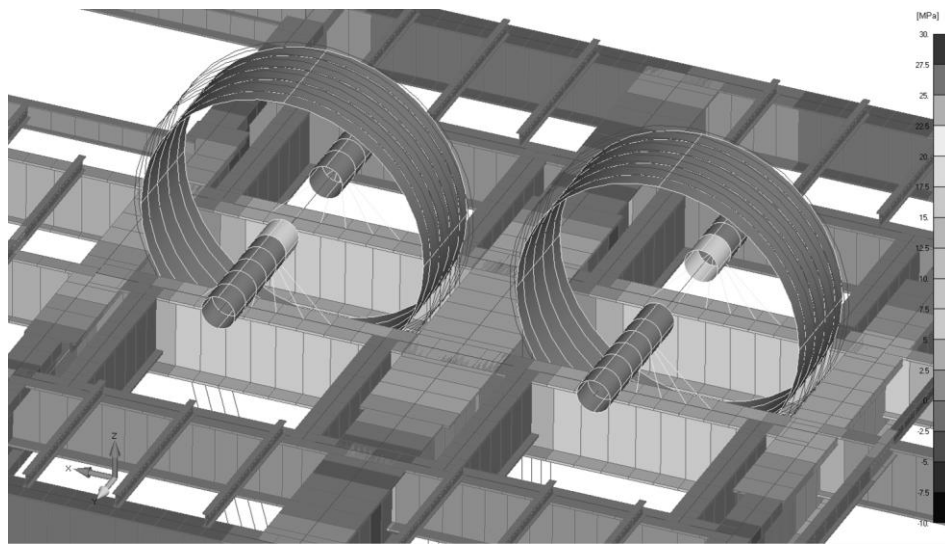


Rys. 8. Koncentracja naprężeń w obszarach zabudowy maszyn wyciągowych w belkach poziomu +65,00 m dla przypadku rozpoczęcia procesu podnoszenia pełnego naczynia z podszybia z przyspieszeniem a_I .

Fig. 8. Stress concentration in the areas of hoisting installation in the beams for level +65,00 m for the initiation of the process picking up the full conveyance with acceleration a_I .

układu, a więc chwili rozpoczęcia procesu podnoszenia pełnego naczynia z przyspieszeniem a_I .

Natomiast na rys. 9 przedstawiono stan naprężenia również w belkach poziomym (+65,00 m), ale dla przypadku minimalnego obciążenia elementów nośnych układu, tj. chwili rozpoczęcia hamowania pełnego naczynia dojeżdżającego do nadszybia w normalnym cyklu eksploatacyjnym. Największą wartość naprężeń zredukowanych (12 MPa) – dla tego przypadku obciążenia – obserwujemy również w miejscach połączenia belek podtrzymujących łożysko wału napędowego i stojanu silnika.



Rys. 9. Koncentracja naprężeń w obszarach zabudowy maszyn wyciągowych w belkach poziomym +65,00 m dla przypadku obciążenia odpowiadającemu momentowi rozpoczęcia procesu hamowania pełnego naczynia dojeżdżającego do nadszybia.

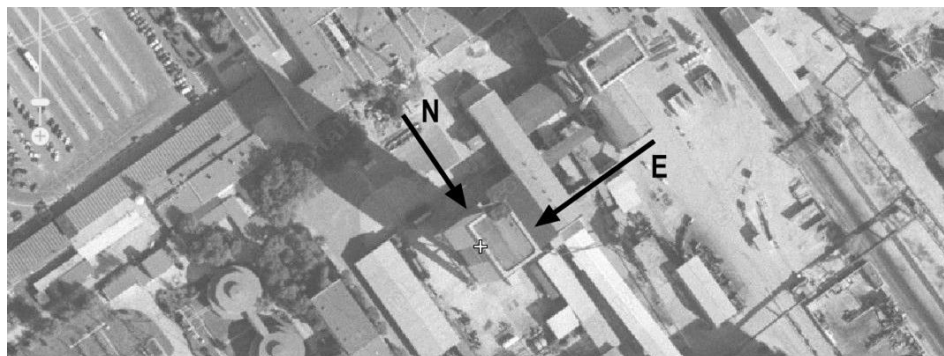
Fig. 9. Stress concentration in the areas of hoisting installation in the beams for level +65,00 m for a start the braking process a full of conveyance reaching to the tower shaft top.

Oznacza to, że amplituda zmiany naprężenia w najbardziej wyężonych obszarach konstrukcji wieży szybowej, wygenerowana eksploatacją, waha się w granicach 10 MPa i odpowiada wartościom zmiany naprężenia w tych obszarach pomierzonych na obiekcie rzeczywistym (rozd. II).

4. Pomiary poziomych przemieszczeń wybranych punktów konstrukcji wieży szybowej

Równoległe z pomiarami odkształceń (naprężeń) w elementach nośnych konstrukcji wieży szybowej, wykonano pomiary poziomych przemieszczeń wybranych punktów konstrukcji, naziemnym radarem interferometrycznym IBIS-S

[2]. Mierzono składowe przemieszczeń, w dwóch prostopadłych kierunkach, równoległych do ściany północnej (N) oraz wschodniej (E) wieży szybowej (rys. 10).



Rys. 10. Lokalizacja stanowisk do obserwacji: N – ściany północnej, E – ściany wschodniej.

Fig. 10. Location positions for observation: N – the northern wall, E – the eastern wall.

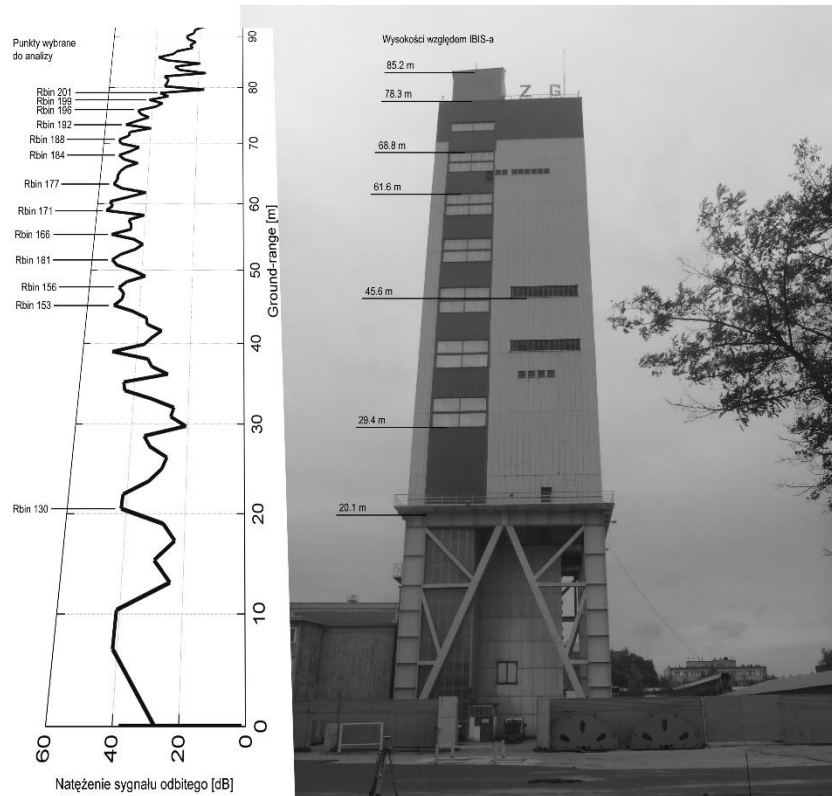
Wybór punktów obserwowanych przeprowadzono na podstawie profilu radarowego. Na rys. 11 przykładowo zaprezentowano profil radarowy przedstawiający natężenie odbicia sygnału radarowego do powierzchni ściany północnej (N) w relacji do jej wysokości.

Wyniki przeprowadzonych pomiarów – w czasie normalnej eksploatacji urządzeń wyciągowych – zainstalowanych w basztowej wieży szybowej – wykazały, że maksymalna amplituda poziomych przemieszczeń wahała się w granicach 1mm. Natomiast w warunkach hamowania bezpieczeństwa, była tylko nieznacznie wyższa i wahała się w granicach $\pm 1,5$ mm [2].

Ciekawostką jest fakt, że konstrukcja basztowej wieży szybowej, powyżej poziomu +20,11 m (poziom pierwszej kondygnacji) – w warunkach normalnej pracy urządzenia – zachowuje się jak bryła sztywne.

5. Podsumowanie

Wyniki dodatkowo wykonanej (numerycznej) analizy stanu naprężenia, ograniczonej do obszarów elementów nośnych konstrukcji basztowej wieży w których stwierdzono maksymalne wyężenie materiału konstrukcji [2], w całej rozciągłości korespondują z wynikami eksperymentu przeprowadzonego na obiekcie rzeczywistym. Oznacza to, że wykonane (numeryczne) analizy stanu naprężenia w elementach nośnych konstrukcji basztowych wież szybowych [4] – aktualnie eksploatowanych w polskim górnictwie – upoważniają do przyjęcia generalnego założenia, że w ramach analizy geometrii układu napędowego maszyn wyciągowych, konstrukcje na których posadowione są elementy tego



Rys. 11. Profil radarowy i widok obserwowanej ściany północnej (N) wieży szybu.

Fig. 11. Radar profile and view of the northern wall (N) the tower shaft which was observed.

układu można traktować jako sztywne. Wniosek ten, dodatkowo potwierdzają wyniki geodezyjnych pomiarów przemieszczeń, wybranych punktów konstrukcji nośnej basztowej wieży szybowej. Wyniki te – co jest pewnego rodzaju ciekawostką – wskazują że konstrukcja basztowej wieży szybowej, powyżej pierwszej kondygnacji, zachowuje się jak bryła sztywna.

Literatura

- [1] Wolny S., 2009. Dynamic loading of the pulley block in a hoisting installation in normal operating conditions. Archive of Mining Sciences, Kraków, Vol. 54, No2, 0. 261-284.
- [2] Wolny S., Badura S. i inni, 2011. Opracowanie metody kontroli fundamentów maszyn wyciągowych zainstalowanych na wieżach basztowych. Praca naukowo – badawcza. Katedra Wytrzymałości, Zmęczenia Materiałów i Konstrukcji. AGH. Kraków.

- [3] Wolny S, 2011. Dynamic loading of Conveyances in Normal Operating Conditions. Archive of Mining Sciences. Vol. 56 (2011). No 4, p. 665-682.
- [4] Wolny S., 2012. Wpływ obciążeń eksploatacyjnych na stan naprężenia oraz przemieszczenia wybranych elementów nośnych konstrukcji basztowej wieży szybowej. (Zgłoszono do druku w Archiwum Górnictwa).

THE ASSESSMENT OF THE IMPACT OF OPERATING LOADS ON THE STATE OF STRESS AND STRAIN IN SELECTED LOAD-BEARING ELEMENTS OF A TOWER-TYPE HEADGEAR STRUCTURE

S u m m a r y

The headgear structure allows the conveyance to be moved over the shaft top to the loading (unloading) point, at the same time it keeps in place the rope pulleys while tower-type headgear structures also accommodate the entire winder installations.

The headgear is where the final stage of the hoisting installation is located and where the surface transport systems begin. These aspects strongly impact the actual shape of the tower, its height and in some cases determine the design of the entire winding gear.

In order that all the headgear functions should be provided, it is required that the ultimate state conditions should be maintained throughout its entire service life. In order to assess the critical service conditions, the computation procedure should be applied based on design loads and fatigue endurance parameters.

The computations of characteristic loads acting on the headgear structure use the developed model of the system based on the dynamic analysis carried out for a specific case: a hoisting installation operated in one of the underground collieries in Poland. The maximal and minimal loads acting on a Koepe pulley and those required for the system operation are determined accordingly.

The laws of dynamics provide a background for finding the forces and moments of forces acting in the components of the driving system (including the electric motors and pulley blocks) for the specified loading of the Koepe pulley.

Underlying the numerical FEM model of the tower-type headgear structure are the technical specifications of the analysed object and FEM calculations followed by endurance analysis to find the state of stress in structural elements of the headgear under the typical service conditions.

The results help in assessing how the design of the hoisting installation should impact on safety features of load-bearing elements in the headgear structure.

Keywords: tower-type headgear, state of stress, loading, strain gauge measurements

DOI:10.7862/rb.2014.42

Przesłano do redakcji: 29.05.2014 r.

Przyjęto do druku: 04.09.2014 r.