MARIUSZ WOSZCZYŃSKI
JAROSŁAW TOKARCZYK
KRZYSZTOF MAZUREK
ANDRZEJ PYTLIK

Monitoring of loads in arch support with wire strain gauge

A concept of measuring the load and geometry of a roadway support with the use of vibrating wire strain gauges and draw-wire sensors is presented. Laboratory and in-situ tests of complete frames of arch supports under load were carried out within the INESI project. The deformations recorded by the vibrating wire strain gauges are similar to those recorded by the strain gauges. FEM strength calculations (which were similar to the results from the stand tests) were also presented.

Key words: transducers with vibrating wire strain gauge, strain measurements, geometry of arch support, testing, FEM analysis

1. INTRODUCTION

Increasing the speed and improving the safety of underground auxiliary mine transportation systems are the main objectives of INESI project (Increased efficiency and safety improvement in underground mining transportation routes) coordinated by the KOMAG Institute of Mining Technology and realized within the Research Fund for Coal and Steel (RFCS). Increasing suspended monorail speeds requires the monitoring of transportation routes. For this purpose, a measuring system that collects information about the loads of a roadway support and the changes in its geometry was suggested.

The structure of the measuring system is presented in Figure 1. All of the electronic components will be designed as intrinsically safe as possible to enable their operation in areas threatened by methane and/or coal dust explosion hazards. It is assumed that the monitoring system consists of measuring modules and data-collecting modules that are connected in series in groups whose numbers will be associated with limits in the power supply. The collected information will be transferred to the next modules and will be read out by an external computer system in the end.

The recording of measuring data and its analysis as well as the generation of warning signals about the hazards associated with deformation of a monorail route are based on the developed expert system (i.e., the software) that can draw conclusions and make decisions acting as human reasoning by using detailed knowledge is the main task of the software cooperating with the hardware module.

Within the initial research work, changes in the design of the side wall arches of the support were suggested for installing the measuring system between the cut elements near the floor. This would require us to cut out a section of a few centimeters from the side wall arch to install the strain gauge. Besides the force transducer, a wire displacement sensor and electronic measuring system will be installed. Measuring the wires of the draw-wire displacement sensor will be led in such a way as to minimize collisions with other roadway components. Here are the functions of the measuring system:

- strain gauge force measurements,
- displacement measurements,
- measurements analyses,
- displaying warning and alarm signals,
- sending information to collecting module.

Fig. 1. Structure of measuring system

Fig. 2. Concept of installation measuring modules: 1 – upper part of wall-side segment, 2 – lower part of wall-side segment, 3 – data-processing module with sensors and data-transferring components, 4 – distance sensor cord, 5 – measuring module

2. VIBRATING WIRE STRAIN GAUGES

Problems with installing force transducers in underground conditions and the high cost of such transducers were the reasons for a market analysis to select another measuring method. Commonly used in the construction industry, vibrating wire strain gauges were selected [1]. These strain gauges are much cheaper (costing about 10% of the force transducer price) and they offer a simpler assembly method that can be applied in mine undergrounds on existing sup-

port frames (e.g., by sticking them to the assembly handles). Strain gauges of such a type can be easily adapted for the requirements of the ATEX Directive by placing them in special encapsulation and connecting them to the intrinsically safe measuring system. The linear characteristics of wire vibrations depending on deformations is an important advantage of such strain gauges. The design of such strain gauges provides the possibility of using them under difficult atmospheric conditions. The manufacturer informs us that they maintain their operational parameters

for up to 25 years in the construction industry [2]. However, the lifetimes of these strain gauges can be shortened due to the corrosive conditions in underground mines.

Fig. 3. Sample vibrating wire strain gauges [2]

The strain gauges have a steel wire stretched between two assembly points (Fig. 3). Changes in the distance between these points causes changes in the wire vibration's frequency, which is read by a periodically operating electromagnet (excitation – reading). The electromagnet is controlled by a dedicated reader, for example; in the discussed case, it is controlled by the intrinsically safe measuring system.

3. TESTS WITH USE OF WIRE STRAIN GAUGES

3.1. Stand tests

As part of the project, initial tests were carried out to investigate the applicability of a vibrating wire strain gauge for the strain measurements (loads) of an arch support. The strain gauge (mounted on a 30 cm section of the V29 profile) was loaded on a testing facility at KOMAG (Fig. 4). The strain gauge was mounted by welding the handles on the side of the profile. When choosing the mounting location, the available space and safety aspects of the strain gauge itself were considered, as the device would be exposed to damage in a mine.

During the test, the vibration frequency of the wire was recorded when the profile was loaded with a force of between 0 kN to 400 kN (the maximum force possible to exert). The test confirmed the linear characteristics of the vibrating wire strain gauge. Figure 5 presents a diagram of the proportional dependence of frequency versus the applied force.

Fig. 4. Testing facility at KOMAG

Fig. 5. Diagram of relationship between wire frequency and force

After transforming the results according to relationship (1), one can obtain the strain value given in the literature as a microstrain, which is a dimensionless quantity often expressed in $\mu\text{m}/\text{m}$ or $\mu\text{inch}/\text{inch}$ [2]:

$$\mu\epsilon = (f^2 \cdot 10^{-3}) \cdot G \quad (1)$$

where:

f – vibration frequency of wire [Hz],

G – measuring constant, provided by manufacturer in wire strain gauge's certificate [$1/\text{Hz}^2$].

Stand tests of the ŁPP10/V29/4/A/I arch support frame (carried out according to the diagram shown in Figure 6 in the testing facility (Fig. 7) of the Central Mining Institute) was the next step for collecting data from the wire strain gauges [3].

The wire strain gauges and additional film strain gauges (for comparison) were mounted on both sides of the support frame on one side of the V profile in the lower part of the side wall arch (Fig. 7).

The arch support frame is loaded from the roof side by three hydraulic cylinders: F4, F5, and F6. The response from the side wall was mapped using six hydraulic cylinders according to the diagram shown in Figure 6. Additionally, the slides were recorded in the joints between the roof arch and the side wall arch during the measurement using two draw-wire displacement sensors. During the test, the lowered height of support frame ΔW was also recorded in an indirect way by measuring the extension of the actuator F5 loading the support frame in its axis of symmetry.

The time process of the forces is presented in Figures 8–10.

Fig. 6. Diagram of loading ŁPP10/V29/4/A/I arch support frame during stand tests: $F4, F5, F6$ – active forces; $F1, F2, F3, F7, F8, F9$ – reaction forces (so-called passive resistance forces) [3]

Fig. 7. View of testing facility

Figure 8 shows the time process of the applied force determined arithmetically by measuring the pressure in the F4, F5, and F6 cylinders in the hydraulic system after loading the tested object. The periodic increases in force and subsequent sudden drops were caused by sliding occurring on the joints of the roof support.

Figure 9 shows the time process of the deformation obtained from the film strain gauges. The re-

corded values are negative because the strain gauges were compressed. The right strain gauge worked properly, perfectly reflecting the dependence of the strain on the applied force. The increase in force caused an increase in the deformation, while the slide and the associated drop in force caused a sudden reduction in deformation. Halfway through the test, the left strain gauge indication was close to 0; then, the indicated values suggest roof support compression.

Fig. 8. Test procedure – force determined from pressure in hydraulic system

Fig. 9. Time process – deformations from film strain gauges

Fig. 10. Time process – deformation from wire strain gauges

Figure 10 shows the results obtained from the vibrating wire strain gauge. The reader dedicated to the purchased wire strain gauges was used to enable the direct reading of the deformation [mm/m]. As in the case of the strain gauges, the right wire strain gauge mapped the force indications (as well as the negative values related to wire contraction). In the case of the left strain gauge, the results suggested that the arch support was stretched at the point of the wire strain gauge installation.

The data from the wire strain gauges recorded during the tests are compared and presented in Figures 11 and 12.

Figure 11 shows that the recorded deformation and slide values are very similar on the joints of the support (both from the right wire strain and right film strain gauges).

From the comparison of the left side (Fig. 12), it appears that the measurements from both film strain gauges differed from the expected values. The film strain gauge operated within the region of a zero value, whereas the wire strain gauge showed a significant stretching of the string. This condition changed at one point, and both the film strain and wire strain gauges began to indicate values suggesting support compression.

Fig. 11. List of results – right side

Fig. 12. List of results – left side

The conclusions that have been drawn from the conducted tests are based mainly on the fact that the support on which the tests were carried out was already loaded (as a part of other tests). In addition, the loading cylinders slightly deformed the right side of the roof support, and the component transferring the main load was twisted during the test (Fig. 13). This could have increased the pressure on the right side of the roof support.

Also, the straight sections of the wall arches were bent inwards, which could also have an impact on the uneven load distribution in the tested object.

Fig. 13. Visible rotation of component transferring main load

Fig. 14. View of plates under arch support: a) left side; b) right side

This also suggests a displacement of the steel plate located under the left side of the sidewall part of the frame, which was in line with the bottom plate before the test (Fig. 14a).

All of these factors could have caused a bending moment on the left side of the tested object (in the place where the sensors were installed). The readout of the wire strain gauge subjected to bending indicated the suggested stretching. The film strain gauge generated results close to zero, as it could compensate itself if it were bent in the measuring axis (a part of the strain gauge was stretched, and a part of it was compressed).

On one hand, the test results give us hope for the positive use of wire strain gauges to measure the deformation of a support and indicate the need to analyze the locations of the sensors' installation. As a result, further tests are planned in which the sensors will be installed on top of the bottom of the V-profile (on the side facing the roadway). The profile here has the thickest cross-section, and the bending impact on the test result will be smaller. Repeated tests should be carried out on a new roof support that will allow us to minimize the possibility of ambiguous results.

At this stage, it should be emphasized that the results obtained from the stand tests make a valuable contribution to the expert system, whose task will be to assess the operating conditions of the support in terms of increasing the speeds of suspended mono-rails. Thanks to the collected data, it will be possible to analyze the possibility of installing sensors with a vibrating wire on a roadway support that shows signs of deformation.

3.2. Numerical strength calculations

Numerical strength calculations were used to determine the impact of the boundary conditions as well as the position of the strain gauges on the results. The conditions of the testing facility were recreated in the computational model and developed in the software environment using the FEM method [4]. There is also a possibility for recreating a complete support arch and apply an impact load to it [5]. However, for the purpose of the current task, the computational model included a section of the roadway support's side wall arch of a size of ŁP10 and a profile of V29. The geometrical model was discretized and a finite element grid was created; this consisted of spatial elements of the HEX8 type with an average square side dimension equal to 3 mm (Fig. 16).

At that point, the boundary conditions were entered. The computational model was fixed to the bottom surface (marked in blue in Fig. 16). To eliminate the friction resistances, each nod laying on two parallel planes (upper and bottom) had the possibility of moving along these planes. Compressing force F was equal to 400 kN (Fig. 16). Besides, the nod on which the compressing force was exerted could only move along the OZ axis to eliminate model buckling.

Based on the strength calculations in the linear range, the results of the FEM numerical calculations were obtained (Fig. 17).

The calculation results show a high compliance with the stand test results. They present a linear increase of the displacements as well as the same reduced stresses and directional deformations in the entire volume of the computational model (the same value for all legend colors).

Fig. 15. Spatial grid of computational model of roadway support's side wall arch

Fig. 16. Boundary conditions in computational model

Fig. 17. Results of FEM calculations: a) map of displacements [m]; b) map of reduced stresses [Pa]; c) map of directional deformations

Linear deformations at any point of the object are defined as the quotient of the difference between the initial and end values of the given finite element and the end value (resulting from the acting load). The computational model was validated to fit it into the range of the material parameters (characteristics).

Fig. 18. Results of calculations for edge support of side wall arch section – map of directional deformations (neutral zone marked in light orange)

Then, a fulcrum of the computational model was introduced, which resulted in a significant difference in the directional deformations depending on the position of the strain gauge in the transverse cross-section of the arch support (Fig. 18). This is a result of torque, as the edge of the support does not cross the loading force axis.

4. MEASUREMENTS OF SUPPORT GEOMETRY

The support geometry was measured by draw-wire sensors. Draw-wire sensors measure the position of and monitor the movement of an object by the use of a measuring wire wound around a drum [6]. The wire end is fixed to the tested object, and the sensor is fixed to a stable base. Displacement of the tested object sets the measuring drum into motion. A multi-turn potentiometer is connected to the drum (Fig. 19).

The potentiometer (variable resistor) in the intrinsically safe circuits is treated as a passive element that does not need a certificate. Such a solution extends the possibility of using sensors from different manufacturers. The problem of protecting the sensors against environmental impact (temperature, humidity, dust, etc.) can be solved by placing them in an additional enclosure.

In Figure 20, the time processes of the slides recorded on the roof support joints by the draw-wire sensors are presented. The results have positive values due to the method of calibrating the measuring instruments during the test. The sensors were placed on both sides of the arch support joints in such a way that the wire is run from the sensor to the fixation point behind the joint. The wire made a chord of the arch section behind the joint, so it was not a direct measurement of the joint slide but merely an approximate value (to enable us to assess the result).

In Figure 21, the slides (ΔW) in the joints of the support frame as the difference between the thick lines drawn on the tested arch components are presented. The recorded readings of the left and right sensors can be transformed into the slides.

Fig. 19. Draw-wire sensor [6]

The upper draw-wire sensor recorded the cylinder extension, which can be transformed into a total reduction in the support height as a result of the slides in the joints including elastic deformation and changes in the position of the support's frame. Measurements of the slide between the arch components will enable us to determine the current geometry of the support's

frame (without the deformation resulting from the elastic and plastic deformations).

Under actual conditions, changing the support height will only be measured by draw-wire sensors placed directly on the arch support. The number of installed sensors will depend on the number of support joints.

Fig. 20. Results of displacement measurements with use of draw-wire sensors

Fig. 21. Slide on support's frame joints: a) left side; b) right side; c) center

5. CONCLUSIONS

Being used to monitor building structures more and more often, strain gauges with vibrating wires also work well when measuring the deformation of an arch support's frame. Their high sensitivity ensures a stable reading even at the slightest load to the support's frame. The strain results obtained from wire strain gauges are comparable to those obtained from film strain gauges. Due to the ambiguous test results recorded on one side of the arch support's frame, additional tests should be carried out with a different sensors arrangement. It should be noted that the measurement is burdened with errors resulting from the operating conditions of the arch support and co-operation with the stand (e.g., warping, movement of the supports, uneven load, or deformation of the supports). In the case of underground tests, more diffi-

culties should be expected due to the difficult working conditions.

Measuring the slide between roof support components using wire strain gauges in a targeted measurement system will allow us to assess any changes in the support geometry.

The strength calculations showed a great compliance with the results of the stand tests. Their aim will be to indicate specific locations for placing a wire strain gauge or film strain gauge, especially in the case of non-planar support of an object.

Acknowledgements

The article was developed with the INESI (Increase efficiency and safety improvement in underground mining transportation routes) project (Contract No. 754169) financed from the Coal and Steel

Research Fund. The numerical calculation were realized on a computer belonging to the Academic Computer Center in Gdansk – TASK.

Bibliography

- [1] Bednarski Ł., Sieńko R.: *Pomiary odkształceń konstrukcji przetwornikami strunowymi*, “Inżynieria i Budownictwo” 2013, 11: 615–619.
- [2] www.sisgeo.com/products/strain-gauges-and-thermometers/item/corda-vibrante.html
- [3] Pytlik A.: *Stanowisko i metodyka badań obudowy podporowo-kotwowej w skali naturalnej*, “Przegląd Górniczy” 2017, 73, 8: 18–23.
- [4] Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z.: *The Finite Element Method. Vol 1: Its Basis & Fundamentals. Vol 2: For Solid and structural mechanics*, Sixth edition. Elsevier Butterworth – Heinemann, Oxford 2005.
- [5] Tokarczyk J., Winkler T.: *Numerical simulation of dynamic impact of loads, transported by suspended monorails, on yielding arch supports*, “Coal International” 2013, 5: 47–51.
- [6] www.dacpol.eu/pl/zasada-dzialania-linkowego-przetwornika-odleglosci-przeglad-dostepnych-typow/product/zasada-dzialania-linkowego-przetwornika-odleglosci-przeglad-dostepnych-typow_CELESCO.

MARIUSZ WOSZCZYŃSKI, Ph.D., Eng.
 JAROSŁAW TOKARCZYK, Ph.D., Eng.
 KRZYSZTOF MAZUREK, Ph.D., Eng.
 KOMAG Institute of Mining Technology
 ul. Pszczyńska 3, 44-101 Gliwice, Poland
 {mwoszczyński, jtokarczyk, kmazurek}@komag.eu

ANDRZEJ PYTLIK, Ph.D., Eng.
 Central Mining Institute
 pl. Gwarków 1, 40-166 Katowice, Poland
 apytlik@gig.eu

MARIUSZ WOSZCZYŃSKI
JAROSŁAW TOKARCZYK
KRZYSZTOF MAZUREK
ANDRZEJ PYTLIK

Monitorowanie obciążeń w obudowie łukowej z zastosowaniem przetworników strunowych

W artykule zaprezentowano koncepcję pomiaru obciążenia i geometrii obudowy wyrobiska korytarzowego z zastosowaniem przetworników z drgającą struną oraz przetworników linkowych. W ramach realizacji projektu europejskiego INESI przeprowadzono badania laboratoryjne, a następnie badania stanowiskowe kompletnych odrzwi obudowy łukowej pod obciążeniem. Wyniki odkształcenia uzyskane z przetworników strunowych są porównywalne z wynikami uzyskanymi z tensometrów. Zaprezentowano również obliczenia wytrzymałościowe MES, które wykazały dużą zgodność z wynikami badań stanowiskowych.

Słowa kluczowe: przetwornik z drgającą struną, pomiar odkształceń, geometria obudowy łukowej, badania, analiza MES

1. WSTĘP

Główną celem koordynowanego przez KOMAG projektu INESI (*Increase efficiency and safety improvement in underground mining transportation routes*), realizowanego w ramach Funduszu Badawczego w obszarze Węgla i Stali (RFCS – *Research Fund for Coal and Steel*), jest zwiększenie prędkości i poprawa bezpieczeństwa w podziemnym, pomocniczym transporcie górniczym. Zwiększenie prędkości kolejek podwieszonych wiąże się z koniecznością monitorowania dróg transportowych. W tym celu w ramach projektu zaproponowano system pomiarowy, którego zadaniem jest zbieranie informacji o występującym obciążeniu i zmianach geometrii obudowy wyrobiska korytarzowego.

Strukturę systemu pomiarowego przedstawiono na rysunku 1. Wszystkie komponenty elektroniczne zostaną opracowane jako rozwiązania iskrobezpieczne, umożliwiające pracę systemu w warunkach zagrożenia wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego. Zakłada się, że system monitoringu docelowo będzie składał się z modułów pomiarowych oraz modułu zbierającego dane, połączonych szeregowo w grupy, w których liczba modułów będzie związana z ograniczeniami zasilania. Zebrane informacje będą przekazywane kolejno do następnego modułu, a na końcu linii odczytywane przez zewnętrzny system komputerowy. Głównym za-

daniem oprogramowania współpracującego z modulem sprzętowym będzie rejestrowanie, analiza danych pomiarowych oraz generowanie ostrzeżeń o zagrożeniach związanych z deformacją trasy kolejki na podstawie opracowanego systemu ekspertowego, czyli oprogramowania, które na podstawie szczegółowej wiedzy może wyciągać wnioski i podejmować decyzje, działając w sposób zbliżony do procesu rozumowania człowieka.

W ramach wstępnych prac koncepcyjnych zaproponowano zmianę konstrukcji łuków ociosowych obudowy w taki sposób, aby zabudować układ pomiarowy pomiędzy przeciętymi elementami obudowy przy spagu. Wymagałoby to wycięcia fragmentu łuku ociosowego o kilka centymetrów w celu zabudowy tensometrycznego przetwornika siły. Wewnątrz modułu pomiarowego poza przetwornikiem siły zabudowany będzie przetwornik przemieszczenia oraz elektroniczny układ pomiarowy. Linki przetwornika przemieszczenia będą poprowadzone w taki sposób, aby zminimalizować kolizję z pozostałymi elementami wyrobiska. Podstawowymi funkcjami układu pomiarowego są:

- tensometryczny pomiar siły,
- pomiar przemieszczenia,
- analiza pomiarów,
- wyświetlanie stanów ostrzegawczych i alarmowych,
- wysłanie danych do modułu zbierającego.

Rys. 1. Struktura systemu pomiarowego

Rys. 2. Koncepcja zabudowy modułów pomiarowych

2. PRZETWORNIKI Z DRGAJĄCĄ STRUNĄ

Utrudnienia związane z montażem przetworników siły w warunkach dołowych oraz wysoka cena tego typu przetworników były znaczącym powodem analizy rynku pod kątem wyboru innej metody pomiarowej. Wybrano przetworniki z drgającą struną, które są powszechnie stosowane w budownictwie [1]. Przetworniki z drgającą struną charakteryzują się przede wszystkim niską ceną (około 10% ceny przetworników siły) oraz zdecydowanie prostszą metodą montażu, która może być wykonana bezpośrednio

w podziemiach kopalni na istniejących odrzwiach, np. przez przyklejenie uchwytów montażowych. Przetworniki tego typu można w łatwy sposób dostosować do wymagań Dyrektywy ATEX, poprzez zabezpieczenie całego przetwornika zalewą oraz podłączenie go do iskrobezpiecznego układu pomiarowego. Istotną zaletą tych przetworników jest liniowa charakterystyka drgań struny w zależności od odkształceń. Konstrukcja takich przetworników przewiduje zastosowanie ich w trudnych warunkach atmosferycznych. Producent podaje, że w budownictwie zachowują one parametry pracy do 25 lat [2]. W warunkach dołowych

ze względu na inne warunki korozyjne czas ten może się skrócić.

Przetworniki posiadają stalową strunę rozpiętą pomiędzy dwoma punktami montażowymi (rys. 3). Zmiana odległości między tymi punktami powoduje zmianę częstotliwości drgań własnych struny, odczytywanych za pomocą elektromagnesu, działającego okresowo (pobudzenie – odczyt). Sterowanie elektromagnesem odbywa się np. za pomocą dedykowanego czytnika, a w przedmiotowym przypadku docelowo poprzez iskrobezpieczny układ pomiarowy.

Rys. 3. Przykładowe przetworniki z drgającą struną [2]

3. BADANIA Z ZASTOSOWANIEM PRZETWORNIKÓW STRUNOWYCH

3.1. Badania stanowiskowe

W ramach projektu przeprowadzono badania wstępne, które miały na celu zbadanie możliwości zastosowania przetworników z drgającą struną do pomiaru odkształceń (a pośrednio obciążeń) obudowy łukowej. Przetwornik zamontowany na odcinku profilu V29 o długości 30 cm, poddano obciążeniu na stanowisku badawczym w KOMAG-u (rys. 4). Przetwornik zamontowano przez przyspawanie uchwyty na bocznej części profilu. Przy wyborze miejsca montażu uwzględniono dostępną powierzchnię oraz aspekty bezpieczeństwa samego przetwornika, który w kopalni będzie narażony na uszkodzenia.

Podczas badania rejestrowano częstotliwość drgań struny przy obciążaniu profilu siłą o wartości od 0 kN do 400 kN (maksymalna siła możliwa do uzyskania na maszynie wytrzymałościowej). Badanie potwierdziło liniową charakterystykę przetwornika z drgającą struną. Na rysunku 5 zaprezentowano wykres proporcjonalnej zależności częstotliwości od przyłożonej siły.

Rys. 4. Stanowisko pomiarowe w KOMAG-u

Rys. 5. Wykres zależności częstotliwości drgań struny w funkcji siły

Po przekształceniu wyników wg zależności (1), można uzyskać wartość odkształcenia podawaną w literaturze jako mikroodkształcenie (*microstrain*), które jest wielkością bezwymiarową, często jednak wyrażane jest w $\mu\text{m/m}$ lub $\mu\text{cal/cal}$ [2]:

$$\mu\epsilon = (f^2 \cdot 10^{-3}) \cdot G \quad (1)$$

gdzie:

f – częstotliwość drgań struny [Hz],

G – stała pomiarowa, dostarczana przez producenta w certyfikacie przetwornika [$1/\text{Hz}^2$].

Kolejnym krokiem, mającym na celu zebranie danych z przetworników strunowych, były badania stanowiskowe odrzwi obudowy łukowej typu ŁPP10/V29/4/A/I, przeprowadzone wg schematu przedstawionego na rysunku 6, w stanowisku badawczym (rys. 7) Głównego Instytutu Górniczego [3].

Przetworniki strunowe oraz dodatkowo tensometry foliowe (do porównania wyników) zamontowano po obu stronach odrzwi obudowy, na jednym boku profilu V w dolnej części łuku ociosowego (rys. 7).

Odrzwa obudowy obciążono od strony stropu za pomocą trzech siłowników hydraulicznych: F4, F5 i F6. Reakcja od strony ociosów odwzorowywana była za pomocą sześciu siłowników hydraulicznych wg schematu przedstawionego na rysunku 6. Dodatkowo podczas pomiaru rejestrowano zsuwy w złączach pomiędzy łukiem stropnicowym a łukiem ociosowym za pomocą dwóch linkowych przetworników drogi. Podczas próby rejestrowano również wartość obniżenia wysokości odrzwi obudowy ΔW w sposób pośredni, mierząc długość wysunięcia rdzennika siłownika F5 obciążającego odrzwa w osi symetrii.

Przebieg wartości uzyskanych podczas badania zaprezentowano w postaci wykresów na rysunkach 8–10.

Rys. 6. Schemat obciążenia odrzwi obudowy ŁPP10/V29/4/A/I podczas stanowiskowych badań: F4, F5, F6 – siły czynne; F1, F2, F3, F7, F8, F9 – siły reakcji (tzw. siły odporu biernego) [3]

Rys. 7. Widok stanowiska badawczego

Na rysunku 8 przedstawiono przebieg czasowy wartości przyłożonej siły, wyznaczonej arytmetycznie z ciśnienia w obwodzie hydraulicznym siłowników F4, F5 i F6, obciążających badany obiekt. Okresowe wzrosty siły i następujące po nich nagłe spadki spowodowane były zsuwem na zamkach odrzwi obudowy.

Z kolei na rysunku 9 przedstawiono przebieg czasowy odkształcenia uzyskanego z tensometrów foliowych. Zarejestrowane wartości są ujemne, ponieważ tensometry były ściskane. Prawy tensometr pracował prawidłowo, idealnie odwzorowując zależność odkształcenia od przyłożonej siły. Wzrost siły powodował zwiększenie odkształcenia, natomiast zsuwy i związany z tym spadek siły powodowały skokowe

zmniejszenie odkształcenia. Przez połowę czasu trwania próby wskazania lewego tensometru były bliskie 0, a następnie wskazywał on wartości sugerujące ściskanie obudowy.

Na rysunku 10 przedstawiono wyniki uzyskane z przetworników z drgającą struną. Zastosowany czujnik, przeznaczony do zakupionych przetworników, umożliwił bezpośredni odczyt odkształcenia [mm/m]. Podobnie jak w przypadku tensometrów, prawy przetwornik odwzorowywał wskazania siły (wartości również ujemne, związane ze ściskaniem struny). W przypadku przetwornika lewego uzyskano wyniki sugerujące, że obudowa w miejscu montażu przetwornika była rozciągana.

Rys. 8. Przebieg badania – siła wyznaczona z ciśnienia w układzie hydraulicznym

Rys. 9. Przebieg badania – odkształcenie z tensometrów

Rys. 10. Przebieg badania – odkształcenie z przetworników strunowych

Zarejestrowane podczas badań dane z przetworników strunowych i tensometrów zestawiono stronami i przedstawiono na wykresach (rys. 11 i 12).

Z wykresu przedstawionego na rysunku 11 wynika, że zarejestrowane wartości odkształcenia i zsuw na zamkach odrzwi obudowy, zarówno z przetwornika strunowego prawego, jak i tensometru prawego, są bardzo zbliżone.

Z zestawienia lewej strony (rys. 12) wynika, że pomiary z obu przetworników odbiegały od oczekiwa-

nych wartości. Tensometr pracował w okolicy wartości zerowej, natomiast przetwornik strunowy pokazał znaczne rozciągnięcie struny. Ten stan w pewnym momencie badania uległ zmianie i zarówno tensometr, jak i przetwornik strunowy zaczęły wskazywać wartości sugerujące ściskanie odrzwi obudowy.

Wnioski, które uzyskano z przeprowadzonych badań, opierają się przede wszystkim na tym, że odrzwia obudowy, na których były prowadzone badania, były już wcześniej obciążane (w ramach innych badań).

Rys. 11. Zestawienie wyników – strona prawa

Rys. 12. Zestawienie wyników – strona lewa

Dodatkowo siłowniki obciążające lekko odkształciły prawą stronę odrzwi obudowy i element, przenosząc obciążenie główne, uległ skręceniu podczas badania (rys. 13). Mogło to powodować zwiększenie nacisku na prawą stronę obudowy.

Ponadto prostoliniowe odcinki łuków ociosowych były odgięte do wewnątrz, co również mogło mieć wpływ na nierównomierny rozkład obciążenia w badanym obiekcie. Sugeruje to również przemieszczenie stalowej płyty, usytuowanej pod lewą stroną elementu ociosowego odrzwi, która przed badaniem była na równi z płytą dolną (rys. 14a).

Rys. 13. Widoczny obrót elementu przenoszącego obciążenie główne

Rys. 14. Widok płyt pod łukiem obudowy: a) strona lewa; b) strona prawa

Wszystkie te czynniki mogły spowodować powstanie momentu zginającego z lewej strony badanego obiektu – w miejscu montażu przetworników. Przetwornik strunowy poddany zginaniu wskazał wynik sugerujący naciągnięcie struny. Tensometr generował wyniki bliskie zera, ponieważ jeśli był zginany w osi pomiarowej, to mógł sam się kompensować (część tensometru była rozciągana, a część ściskana).

Wyniki badań z jednej strony dają nadzieję na pozytywne zastosowanie przetworników strunowych do pomiaru odkształcenia odrzwi obudowy oraz wskazują konieczność przeanalizowania miejsca montażu przetworników. W rezultacie planowane są kolejne badania, w których przetworniki zabudowane zostaną na górze dna profilu V, od strony wyrobiska. Profil ma w tym miejscu najgrubszy przekrój i wpływ zginania na wynik badania będzie mniejszy. Powtórne badania powinny być wykonane na nowej obudowie, co umożliwi ograniczenie do minimum otrzymania niejednoznacznych wyników.

Już na tym etapie należy podkreślić, że wyniki uzyskane z badań stanowiskowych stanowią wartościowy wkład do systemu eksperckiego, którego zadaniem będzie ocena warunków pracy obudowy w aspekcie zwiększenia prędkości jazdy kolejek podwieszonych. Dzięki zebranych danym możliwa będzie analiza możliwości zamontowania przetworników z drgającą struną na obudowie zamontowanej w wyrobisku, która wykazuje już pewne oznaki deformacji.

3.2. Numeryczne obliczenia wytrzymałościowe

W celu określenia wpływu warunków brzegowych i miejsca umieszczenia czujników odkształceń na

uzyskiwane wyniki przeprowadzono numeryczne obliczenia wytrzymałościowe. Warunki panujące na stanowisku badawczym odtworzono w modelu obliczeniowym, opracowanym w środowisku oprogramowania wykorzystującego metodę MES [4]. Istnieje możliwość odtworzenia kompletnego łuku obudowy i poddania go obciążeniom udarowym [5], jednakże na potrzeby zadania model obliczeniowy obejmował fragment łuku ociosowego obudowy chodnikowej o wielkości ŁP10 i profilu V29. Model geometryczny poddano dyskretyzacji i utworzono siatkę elementów skończonych, złożoną z elementów przestrzennych typu HEX8, o średniej wielkości boku wynoszącym 3 mm (rys. 16).

Następnie wprowadzono warunki brzegowe. Model obliczeniowy utwierdzono na dolnej powierzchni, oznaczonej kolorem niebieskim (rys. 16). W celu wyeliminowania oporów związanych z tarcie poszczególne węzły leżące na dwóch równoległych płaszczyznach (górnej i dolnej) miały możliwość przemieszczania się wzdłuż tych płaszczyzn. Wartość siły ściskającej F wynosiła 400 kN (rys. 16). Ponadto w celu uniknięcia wyboczenia modelu węzeł, do którego przyłożono siłę ściskającą, miał tylko możliwość przemieszczania się wzdłuż osi OZ.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń wytrzymałościowych w zakresie liniowym otrzymano wyniki, które przedstawiono na rysunku 17.

Otrzymane wyniki obliczeń wykazują dużą zgodność z badaniami stanowiskowymi. Przedstawiają liniowo narastające przemieszczenia oraz tę samą wartość naprężeń zredukowanych i odkształceń kierunkowych w całej objętości modelu obliczeniowego (jednakowa wartość dla wszystkich kolorów legendy).

Rys. 15. Siatka przestrzenna modelu obliczeniowego łuku ociosowego obudowy chodnikowej

Rys. 16. Warunki brzegowe w modelu obliczeniowym

Rys. 17. Wyniki obliczeń numerycznych MES: a) mapa przemieszczeń [m]; b) mapa naprężeń zredukowanych [Pa]; c) mapa odkształceń kierunkowych

Odształcenie liniowe w dowolnym punkcie ciała jest definiowane jako iloraz różnicy wielkości początkowej i końcowej danego elementu skończonego, do jego wielkości końcowej (wynikającej z działającego obciążenia). Przeprowadzono walidację, aby dostroić model obliczeniowy w zakresie parametrów (charakterystyk) materiałowych.

Rys. 18. Wyniki obliczeń dla krawędziowego podparcia fragmentu łuku ociosowego – mapa odkształceń kierunkowych – kolor jasnopomarańczowy oznacza strefę neutralną

Następnie wprowadzono krawędziowe podparcie modelu obliczeniowego, co spowodowało wystąpienie znacznych różnic w odkształceniach kierunkowych w zależności od lokalizacji w przekroju poprzecznym na obudowie łukowej (rys. 18). Jest to

rezultat wystąpienia momentu siły, ponieważ krawędź podparcia nie przecinała się z osią wektora siły obciążającej.

4. POMIAR GEOMETRII OBUDOWY

Pomiar geometrii realizowano z wykorzystaniem przetworników linkowych. Linkowe przetworniki przemieszczenia dokonują pomiaru pozycji i śledzą ruch obiektu za pomocą linki nawiniętej na szpulę [6]. Koniec linki mocowany jest na ruchomym obiekcie pomiarowym, a przetwornik przytwierdzony jest do stabilnej podstawy. Przesunięcie badanego obiektu wprowadza w ruch szpulę, z którą połączony jest potencjometr wieloobrotowy (rys. 19).

W obwodach iskrobezpiecznych potencjometr (rezystor nastawny) traktowany jest jako element pasywny i nie wymaga certyfikatu. Takie rozwiązanie znacznie poszerza możliwości zastosowania przetworników różnych producentów. Problem zapewnienia odpowiedniej ochrony przetwornika od wpływów środowiskowych (temperatura, wilgotność, zapylenie itp.), można uzyskać, montując go w dodatkowej obudowie ochronnej.

Na rysunku 20 przedstawiono przebieg czasowy wartości zsuwu, zarejestrowany przez przetworniki linkowe. Wyniki przyjmują wartości dodatnie ze względu na sposób wyskalowania przyrządów pomiarowych podczas badania. Przetworniki umieszczono na obu stronach obudowy przed zamkami w taki sposób, że linka przebiegała od przetwornika do punktu zaczepienia za zamkiem. Linka tworzyła cięciwę fragmentu łuku z zamkiem, w związku z czym nie był to bezpośredni pomiar zsuwu zamka, lecz wartość przybliżona, pozwalająca go oszacować.

Rys. 19. Budowa przetwornika linkowego [6]

Na rysunku 21 przedstawiono, zaobserwowaną po zakończeniu badań, wielkość zsuwu (ΔW) w złączach odrzwi obudowy, stanowiącą różnicę pomiędzy grubymi kreskami naniesionymi na elementy łukowe badanego obiektu. Zarejestrowane wskazania lewego i prawego przetwornika linkowego mają przełożenie na wartość zsuwu. Górny przetwornik linkowy rejestrował wysunięcie siłownika, co można przełożyć na sumaryczne zmniejszenie wysokości w wyniku zsuwu na zamkach, ale również odkształcenia sprężystego

i zmiany położenia podpór odrzwi obudowy. Pomiar zsuwu pomiędzy elementami łukowymi umożliwi wyznaczenie aktualnej geometrii odrzwi obudowy (bez uwzględnienia deformacji wynikających z odkształcenia plastycznego sprężystego).

W warunkach rzeczywistych zmiana wysokości obudowy będzie mierzona wyłącznie przetwornikami linkowymi, umieszczonymi bezpośrednio na obudowie. Liczba zastosowanych przetworników będzie zależała od liczby zamków obudowy.

Rys. 20. Wyniki pomiarów przemieszczenia przetwornikami linkowymi

Rys. 21. Zsuw w złączach odrzwi obudowy: a) strona lewa; b) strona prawa; c) środek

5. PODSUMOWANIE

Przetworniki z drgającą struną, coraz częściej stosowane do monitorowania konstrukcji, również sprawdzają się w przypadku pomiaru odkształcenia obudowy łukowej. Ich wysoka czułość zapewnia stabilny odczyt nawet przy najmniejszym obciążeniu odrzwi obudowy. Wyniki odkształcenia, uzyskane z przetworników strunowych, są porównywalne z wynikami uzyskanymi z tensometrów. Ze względu na niejednoznaczne wyniki badań zarejestrowane po jednej ze stron odrzwi obudowy łukowej należy przeprowadzić dodatkowe badania z innym rozmieszczeniem przetworników. Należy zaznaczyć, że pomiar obarczony jest błędami wynikającymi z warunków pracy

obudowy i współpracy ze stanowiskiem (np. zwichrowanie, ruch podpór, nierówne obciążenie, odkształcenie obudowy). W przypadku badań dołowych ze względu na ciężkie warunki pracy należy liczyć się z utrudnieniami w większej skali.

Pomiar zsuwu pomiędzy elementami obudowy z wykorzystaniem przetworników linkowych w docelowym systemie pomiarowym umożliwi oszacowanie zmian geometrii obudowy.

Obliczenia wytrzymałościowe wykazały dużą zgodność z wynikami badań stanowiskowych. Ich celem będzie wskazywanie konkretnych lokalizacji umieszczania czujnika strunowego lub tensometrycznego, szczególnie w przypadkach występowania nieplanowego podparcia obiektu.

Podziękowanie

Artykuł opracowano w ramach realizacji projektu europejskiego INESI „Increase efficiency and safety improvement in underground mining transportation routes” (numer umowy 754169), finansowanego z Funduszu Badawczego Węgla i Stali. Obliczenia numeryczne przeprowadzono na komputerach należących do Centrum Informatycznego Trójmiejskiej Akademickiej Sieci Komputerowej (Academic Computer Center in Gdansk –TASK).

Literatura

- [1] Bednarski Ł., Sieńko R.: *Pomiary odkształceń konstrukcji przetwornikami strunowymi*, „Inżynieria i Budownictwo” 2013, 11: 615–619.
- [2] www.sisgeo.com/products/strain-gauges-and-thermometers/item/corda-vibrante.html
- [3] Pytlik A.: *Stanowisko i metodyka badań obudowy podporowo-kotwowej w skali naturalnej*, „Przegląd Górniczy” 2017, 73, 8: 18–23.
- [4] Zienkiewicz O. C., Taylor R.L., Zhu J.Z.: *The Finite Element Method. Vol 1: Its Basis & Fundamentals. Vol 2: For Solid and structural mechanics*, Sixth edition. Elsevier Butterworth – Heinemann, Oxford 2005.
- [5] Tokarczyk J., Winkler T.: *Numerical simulation of dynamic impact of loads, transported by suspended monorails, on yielding arch supports*, „Coal International” 2013, 5: 47–51.
- [6] www.dacpol.eu/pl/zasada-dzialania-linkowego-przetwornika-odleglosci-przeglad-dostepnych-typow/product/zasada-dzialania-linkowego-przetwornika-odleglosci-przeglad-dostepnych-typow_CELESCO.

dr inż. MARIUSZ WOSZCZYŃSKI

dr inż. JAROSŁAW TOKARCZYK

dr inż. KRZYSZTOF MAZUREK

Instytut Techniki Górniczej KOMAG

ul. Pszczyńska 3, 44-101 Gliwice

{mwoszczynski, jtokarczyk, kmazurek}@komag.eu

dr inż. ANDRZEJ PYTLIK

Główny Instytut Górnictwa

pl. Gwarków 1, 40-166 Katowice

apytlik@gig.eu