

PRACE NAUKOWE GIG

GÓRNICTWO I ŚRODOWISKO MINING & ENVIRONMENT

RESEARCH
REPORTS

Quarterly

KWARTALNIK

4



GŁÓWNY INSTYTUT GÓRNICTWA
CENTRAL MINING INSTITUTE

KATOWICE 2003

Rada Programowa: *prof. dr hab. inż. Jakub Siemek (przewodniczący), prof. dr hab. inż. Tadeusz Chmielniak, prof. dr hab. inż. Bernard Drzęźła, prof. dr hab. inż. Józef Dubiński, prof. dr hab. inż. Korneliusz Miksch, prof. dr hab. inż. Joanna Pinińska, prof. dr hab. inż. Janusz Roszkowski, prof. dr hab. inż. Antoni Tajduś, prof. dr hab. inż. Janusz W. Wandrasz, prof. dr hab. inż. Piotr Wolański*

Komitety Kwalifikacyjno-Opiniotwórcze: *prof. dr hab. inż. Antoni Kidybiński (przewodniczący), doc. dr hab. inż. Krystyna Czaplicka, prof. dr hab. inż. Jan Hankus, prof. dr hab. inż. Władysław Konopko, prof. dr hab. inż. Jerzy Kwiatek, doc. dr hab. Kazimierz Lebecki, prof. dr hab. inż. Adam Lipowczan, prof. dr hab. inż. Kazimierz Rułka, prof. dr hab. Jerzy Sablik, doc. dr hab. inż. Jan Wachowicz*

Redaktor Naczelny

prof. dr hab. inż. Adam Lipowczan

Redakcja wydawnicza i korekta

Ewa Gliwa

Małgorzata Kuśmirek

Barbara Jarosz

Skład i łamanie

Krzysztof Gralikowski

ISSN 1643-7608

Nakład 100 egz.

Adres Redakcji:

Zespół Wydawnictw i Usług Poligraficznych

Głównego Instytutu Górnictwa, 40-166 Katowice, Pl. Gwarków 1

tel. (0-32) 259-24-03, 259-24-04, 259-24-05

fax 032/259-65-33

e-mail: cintexmk@gig.katowice.pl

Spis treści

MAREK ROTKEGEL

Przykładowy przebieg wytwarzania obudowy połączeń wyrobisk korytarzowych	5
An exemplary course of manufacture of mine roadway junctions	

MARIUSZ SZOT

Wpływ nierówności sztywnego prowadzenia naczyń na zmianę obciążeń lin wyciągowych – metodyka badań, wyposażenie aparaturowe	29
Influence of irregularities of stiff guidance of shaft conveyances on the change of hoisting rope loading- methodology of testing, measuring equipment	

ROBERT SIATA

Zastosowanie metody płytkiej refrakcji sejsmicznej do określania własności fizycznych warstw czwartorzędowych	43
Application of the method of shallow seismic refraction in determining physical properties of Quaternary strata	

JAN WACHOWICZ, KLAUDIUSZ WYPIOR

Samozagrzewanie produktów ścierania okładek gumowych taśm przenośnikowych.....	51
Self-heating of rubber belts abrasion products of belt-conveyors	

CEZARY BARTMAŃSKI, WITOLD MRUKWA

Nowy przetwornik drgań – metoda badań, właściwości metrologiczne	69
New vibration transducer – methodology of testing, metrological characteristics	

Marek Rotkegel

PRZYKŁADOWY PRZEBIEG WYTWARZANIA OBUDOWY POŁĄCZEŃ WYROBISK KORYTARZOWYCH

Streszczenie

Szkieletowa obudowa odgałęzień i skrzyżowań stanowi rozwiązanie alternatywne typowej, „palmowej” obudowy połączeń wyrobisk, której podstawowym elementem są odrzwia normowe nieznacznie zmodyfikowane. Rozwiązanie tradycyjne, z pozoru tańsze, pochłania znaczne koszty pośrednie związane przede wszystkim z wykonywaniem ogromnych zbędnych wyłomów w stropie. Znaczna szerokość wyrobiska w miejscu wlotu do odgałęziających się wyrobisk, połączona z łukowym kształtem przekroju poprzecznego odgałęzienia powoduje dużą jego wysokość. Wolne przestrzenie przy stropie stwarzają lokalne zakłócenia w systemie wentylacji, a w niektórych przypadkach mogą być miejscem gromadzenia się metanu. Ponadto, duże gabaryty odrzwi i związana z tym mniejsza ich nośność powodują konieczność zastosowania małych podziałek obudowy łukowej. Należy także wspomnieć, że w przypadku niektórych geometrii połączeń wyrobisk, zastosowanie takiego rozwiązania jest absolutnie niemożliwe. Natomiast w przypadku obudowy szkieletowej uzyskuje się konstrukcję zwartą, zaprojektowaną i wykonaną dla konkretnego połączenia wyrobisk. Jest ona każdorazowo dostosowywana zarówno pod względem kształtu, wymaganych gabarytów, jak również parametrów wytrzymałościowo-nośnościowych.

Artykuł został napisany na podstawie referatu [8] wygłoszonego w 2003 roku na sympozjum zorganizowanym przez Hutę Łabędy S.A. Tematyka sympozjum poruszała wybrane zagadnienia z zakresu stosowania stalowych obudów chodnikowych. W artykule przedstawiono cały proces wytwarzania obudowy odgałęzień i skrzyżowań typu szkieletowego. Proces ten dzieli się na dwie zasadnicze części – projektowanie i wykonywanie. Szczególną uwagę poświęcono szeroko rozumianym zagadnieniom projektowania. Pierwszym etapem, podobnie jak w każdym etapie wytwarzania, jest jednoznaczne określenie założeń. Na ich podstawie możliwe jest opracowanie kilku koncepcji obudowy, a następnie wybór rozwiązania optymalnego ze względu na przyjęte kryteria. W dalszej kolejności następuje etap konstruowania uzupełniany licznymi analizami wytrzymałościowymi. Wynikiem jest najpierw trójwymiarowy szkic konstrukcji, a po ostatecznej weryfikacji dokumentacja rysunkowa, która po dokładnym sprawdzeniu jest przekazywana do producenta obudowy.

Przebieg całego procesu prześledzono na przykładzie oryginalnej obudowy skrzyżowania łączącego chodnik E-06 i wnękę z pochylnią B-C-02 w kopalni „Murcki”.

An exemplary course of manufacture of mine roadway junctions

Abstract

The skeletal supports of branches and crossings is an alternative solution of typical "palm-type" supports whose principal element are standard and slightly modified door frames. The traditional solution, seemingly cheaper, involves considerable indirect costs connected, first of all, with making vast unnecessary breakouts in the roof. A considerable width of the working in the place of entrance of branching out roadways, connected with the arched shape of the junction cross section, results in its height. The voids at the roof produce local disturbance in the ventilation system, and, in some cases, can be the places of methane accumulation. Besides, large size of the door frame and the related lower load-bearing capacity, entail the necessity to use small pitches of arched supports. It should be also mentioned that in the case of some geometry types of roadway junctions, there is no possibility to use such a solution. Instead, in the case of skeletal supports, one obtains a compact structure, designed and

manufactured for a specified roadway junction. It is each time adjusted both in relation to the shape, required size, and mechanical strength and load-bearing parameters.

The paper has been prepared on the basis of the presentation at the symposium organised by Huta Łabędy steelworks. The thematic scope of the symposium dealt with the selected questions from the range of utilisation of steel roadway supports.

The paper presents the whole process of production of skeletal-type branches and crossings. The process is divided into two main parts—designing and production. Particular attention has been paid to broadly considered design questions. The first phase, similarly as in every stage of manufacture, is the unambiguous defining of the assumptions. On their basis, it is possible to develop a number of conceptions of the supports, and then to choose the optimal solution in respect of the assumed criteria. Later on, the construction phase takes place, supplemented by numerous strength analyses. The result is, at first, a three-dimensional construction pre-design, and after final verification, the drawing documentation, which, after thorough checking, is passed to the manufacturer of the supports.

The course of the whole process has been followed by an example the original supports of the crossing which connects the E-06 heading and the recess with the B-C-02 incline at Murcki mine.

1. WPROWADZENIE

Najczęstszym połączeniem wyrobisk korytarzowych jest odgałęzienie jednostronne, mające w rzucie pionowym kształt nieco zdeformowanej litery Y. Jego obudowa, w wykonaniu tradycyjnym, składa się z wieloelementowych łukowych odrzwi podatnych, których szerokość zwiększa się w miarę zbliżania się do naroża odgałęzienia. W celu zachowania wymaganej nośności odrzwi konieczne jest nadanie im odpowiedniego kształtu łukowego, co pociąga za sobą konieczność wykonania wyłomu o dużej wysokości. Znaczne gabaryty odrzwi stosowanych w miejscu największej szerokości odgałęzienia i w związku z tym mniejsza ich nośność łączy się z miejscem występowania największego oddziaływania górotworu na obudowę. W niektórych przypadkach konieczne jest wtedy jak największe możliwe zagęszczenie odrzwi. Ponadto, w stropie odgałęzienia przy narożu powstaje ogromna przestrzeń, umożliwiającą niebezpieczne gromadzenie się metanu i powodującą dodatkowy opór przepływu oraz zawirowania strugi powietrza.

Alternatywnym rozwiązaniem może być obudowa szkieletowa typu „Łabędy”. Stosowana do zabezpieczenia odgałęzienia składa się z konstrukcji zasadniczej (portalu i wspornika) oraz odrzwi. W przypadku zabezpieczenia skrzyżowania konstrukcja zasadnicza obudowy najczęściej składa się z dwóch krzyżujących się portali. W obudowie takiej przeważająca część obciążeń pochodzących od górotworu jest przenoszona przez konstrukcję zasadniczą. Odrzwia natomiast stanowią ważne uzupełnienie konstrukcji, przenosząc obciążenia częściowo na wspornik, a częściowo na spąg.

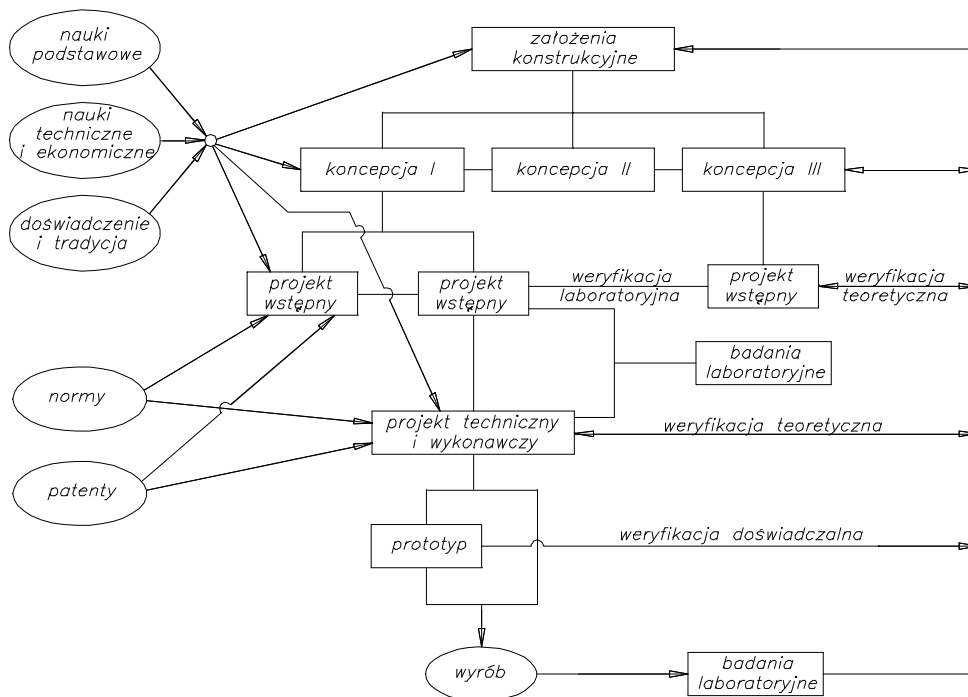
W obu przypadkach rozwiązań konstrukcyjnych (tradycyjnym i szkieletowym) obudowy odgałęzienia lub skrzyżowania wymagane jest indywidualne obliczanie gabarytów kolejnych odrzwi oraz każdorazowe obliczanie długości i promieni gięcia elementów łukowych. Początkowo obliczenia te stanowiły poważne utrudnienie. Jednak wraz z opracowaniem specjalistycznego programu komputerowego wspomagania projektowania, indywidualne podejście do projektowania poszczególnych odrzwi stało się zaletą tego typu konstrukcji. Dzięki nieograniczonym możliwościom zmiany gabarytów i przebiegów wyrobisk w rejonie ich połączenia uzyskuje się

możliwość dostosowania konstrukcji do wymagań użytkownika. Ponadto, stosowanie nietypowych łuków o różnych krzywiznach i długościach przy właściwym doborze ich parametrów geometrycznych ułatwia stabilizację – montaż rozpór, pozwalając na płynną zmianę przekrojów wyrobiska zamiast stosowania coraz większych normowych odrzwi.

2. PROCES WYTWARZANIA OBUDOWY ODGAŁĘZIEN I SKRZYŻOWAŃ

Proces wytwarzania polega na tworzeniu i przetwarzaniu informacji. W początkowej fazie formułuje się problem techniczny, następnie tworzone są koncepcje projektowe i rozwiązywane są zadania konstrukcyjne, a w końcu sporządzane są rysunki, opisy i wykazy części [13]. Na podstawie tak opracowanej dokumentacji jest możliwe wykonanie gotowego wyrobu.

Jak podaje literatura [13], celem konstruowania jest tworzenie nowych obiektów technicznych, wynikających z określonych potrzeb z uwzględnieniem możliwości ich realizacji. Konstruowanie jest procesem ciągłym, realizowanym etapowo, wynikającym z kolejnych potrzeb po spełnieniu poprzednich. Pierwszym krokiem jest zawsze sprecyzowanie potrzeby. W dalszej części procesu należy rozstrzygnąć wiele problemów, wśród których najważniejsze są problemy techniczne i ekonomiczne. Ogólny schemat procesu konstruowania przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Przebieg procesu konstruowania [13]

Fig. 1. Course of the construction process [13]

Założenia konstrukcyjne zawierają opis działania konstruowanego układu, opis warunków, w jakich będzie eksploatowany oraz opis stawianych mu istotnych wymagań. Formułując założenia konstrukcyjne w jak największym stopniu wykorzystuje się doświadczenia i tradycję konstrukcyjną. Na ich podstawie, w kilku wariantach opracowuje się koncepcje układu, w której określa się podstawowe elementy wchodzące w jego skład i rodzaje materiałów. Po wyborze koncepcji opracowywany jest projekt wstępny, w którym są podane podstawowe cechy geometryczne i materiałowe. W dalszej kolejności jest przeprowadzana weryfikacja teoretyczna, obejmująca sprawdzenie własności wytrzymałościowych, funkcjonalności, niezawodności, trwałości, kosztów wykonania i eksploatacji. Po wybraniu wariantu projektu powstaje projekt techniczny, zawierający wszystkie wymiary konstrukcji, informacje o materiałach, sposobie obróbki elementów, sposobie montażu i eksploatacji. Ostatecznie powstaje konstrukcja przeznaczona do eksploatacji, przy czym najpierw produkuje się serię informacyjną. Dopiero po pozytywnych wynikach obserwacji podejmuje się decyzję o właściwej produkcji. Ostatnim etapem procesu konstruowania jest obserwacja. Dopiero podczas użytkowania w normalnych warunkach można stwierdzić, jakie są wady i zalety konstrukcji i uzyskać w ten sposób podstawę do jej udoskonalenia [13].

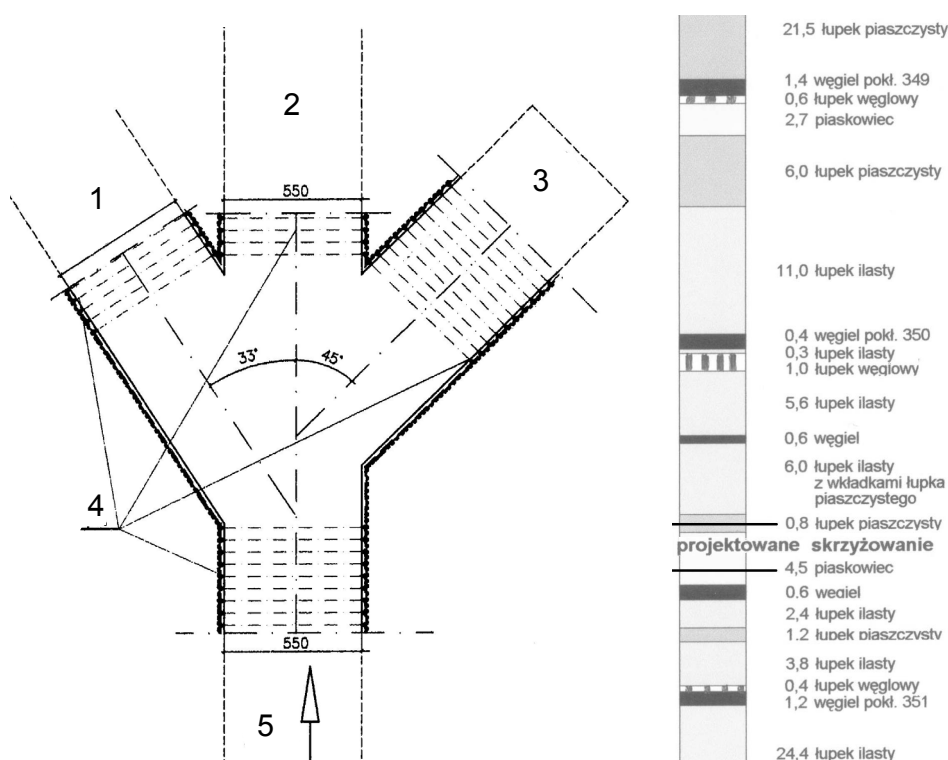
Wybory oraz decyzje, na różnych etapach konstruowania, są dokonywane z uwzględnieniem różnych kryteriów, z których najważniejsze to kryterium bezpieczeństwa i funkcjonalności, rozumianej jako spełnianie wszystkich zadań przytoczonych wcześniej. Istotne są także kryteria masy, ekonomiki użytkowania oraz technologiczności [14, 15]. Obudowa wyrobisk powinna być tak zaprojektowana, aby mogła być odporna na działanie sił podczas wznoszenia i użytkowania w określonym czasie, właściwie zachowywać się w normalnych warunkach użytkowania, a także stanowić konstrukcyjną całość w przypadkach sytuacji ekstremalnych.

Poważnym sprzymierzeńcem konstruktora w jego działaniach jest w dzisiejszych czasach technika komputerowa, z systemami CAD (*computer aided design*) i CAM (*computer aided manufacturing*) [13, 16, 17]. Bez tych systemów trudno sobie wyobrazić proces wytwarzania.

Proces projektowo-konstrukcyjny obudowy odgałęzień i skrzyżowań wyrobisk korytarzowych nie odbiega w zasadniczy sposób od ogólnego procesu projektowania i konstruowania maszyn i urządzeń. Mimo, że coraz częściej granice między poszczególnymi etapami procesu zacierają się, podjęto próbę ich wyodrębnienia, zebrania podstawowych elementów i opisanie na przykładzie obudowy skrzyżowania w kopalni „Murcki”, zaprojektowanej i wykonanej w 2003 roku. Przedstawiona kolejność działań jest logiczna i uzasadniona, jednak niejednokrotnie zdarza się, że niektóre etapy przebiegają równocześnie lub zazębiają się. Zdarzają się także powroty do wcześniejszych etapów, a czasami występują drobne zmiany w kolejności poszczególnych prac. Umożliwia to wysoki stopień komputeryzacji prowadzonego procesu projektowania.

2.1. Określenie założeń

Pierwszym, bardzo istotnym etapem procesu projektowania jest właściwa identyfikacja potrzeby – zdefiniowanie zadania projektowego. Składa się na nią, między innymi określenie wielkości wyrobisk oraz kątów pod jakimi się one łączą. Konieczne jest bowiem dokładne określenie położenia wyrobisk w przestrzeni trójwymiarowej. Nie mniej ważne jest określenie obciążeń działających na obudowę. Powinno ono być zgodne z obowiązującymi zasadami i przepisami na podstawie dostarczonych przez kopalnię parametrów wytrzymałościowych skał w otoczeniu projektowanego połączenia wyrobisk. Zatem do podjęcia prac projektowych konieczny jest komplet informacji dotyczących lokalizacji planowanego odgałęzienia, a co za tym idzie warunków geologiczno-górnich, wielkości wyrobisk, kątów lub promienia krzywizny odgałęziającego się wyrobiska. W przypadku wspomnianego skrzyżowania z kopalni uzyskano kompletne dane. Część z nich przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Dane wymagane do rozpoczęcia prac projektowych: 1 – chodnik E-06, 2 – pochylnia B-C-02, 3 – wnęka, 4 – obudowa łukowa podatna ŁP10/29/A, 5 – kierunek drążenia wyrobisk

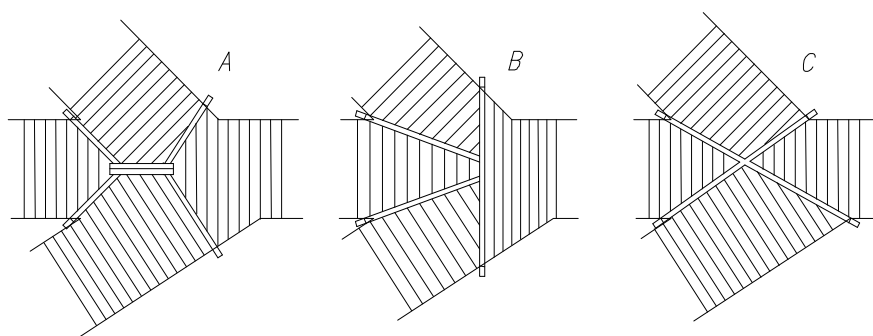
Fig. 2. Data needed for starting the design work: 1 – E-06 heading, 2 – B-C-02 inclined drift, 3 – niche, 4 – arched yielding supports ŁP10/29/A, 5 – direction of roadway drivage

Analizowane zabezpieczane skrzyżowanie łączy, pod kątem 33°, chodnik E-06 z pochylnią B-C-02. Dodatkowo po przeciwnej stronie od pochylni pod kątem 45° odgałęzia się wnęka. W rejonie projektowanego połączenia wyrobiska były poziome.

2.2. Opracowanie koncepcji

Opracowanie koncepcji jest pierwszym właściwym etapem konstruowania. W tym etapie powstaje kilka wariantów obudowy, z których, ze względu na przyjęte kryteria, wybiera się optymalne. Wybór jest kwestią indywidualną, tzn. w przypadku każdego zadania projektowego analizuje się względy ruchowe i sposób zabudowy. Ważne są też zagadnienia konstrukcyjne i związana z nimi technologiczność konstrukcji warunkująca możliwość jej wykonania i zmontowania. Idealna konstrukcja to taka, która w zadowalającym stopniu umożliwi rozwiązanie powyższych kwestii, przy korzystnej cenie.

Z powyższego wynika, że każda zaprojektowana konstrukcja jest oryginalna, niepowtarzalna i przeznaczona do połączenia konkretnych wyrobisk w ściśle określony sposób. Na rysunku 3 przedstawiono trzy analizowane koncepcje obudowy omawianego skrzyżowania. Do dalszych prac projektowych wybrano wariant C – obudowę w postaci dwóch krzyżujących się portali uzupełnioną odrzwiami. O wyborze tym zdecydowały głównie względy ekonomiczne oraz planowana technologia zabudowy – przebudowa skrzyżowania. Wybrana koncepcja charakteryzuje się najmniejszym ciężarem, dzięki czemu zminimalizowane zostały koszty materiałów oraz koszty związane z transportem i zabudową w wyrobisku.



Rys. 3. Analizowane warianty obudowy przykładowego skrzyżowania

Fig. 3. Analysed variants of the supports of exemplary crossing

Z rysunku 3 wynika, że już w tym etapie konstruowania zostały wstępnie ustalone wielkości profili używanych do budowy konstrukcji (IPB, V) oraz rozstawy odrzwi. Ustalenia te następnie podlegają szczegółowej weryfikacji pod względem wytrzymałości i ewentualnych kolizji.

2.3. Projektowanie geometrii obudowy

Na podstawie wybranej i zaakceptowanej przez użytkownika koncepcji możliwe jest szczegółowe określenie kształtu i wymiarów całej konstrukcji. Ten etap dzielony jest na część dotyczącą konstrukcji zasadniczej oraz część dotyczącą odrzwi.

Najpierw zostają określone gabaryty konstrukcji zasadniczej. Przy ich określaniu stosuje się kilka istotnych zasad. Podstawową jest zapewnienie należytych wymiarów

wynikających z linii przenikania się „brył” wyrobisk. Bezpośrednio wynikają z tego rozpiętości portali i wsporników konstrukcji szkieletowych. Ponadto istotne jest, aby poszczególne belki (elementy) były w miarę zwarte i krótkie, dzięki czemu mogą być łatwiej transportowane, a potem montowane.

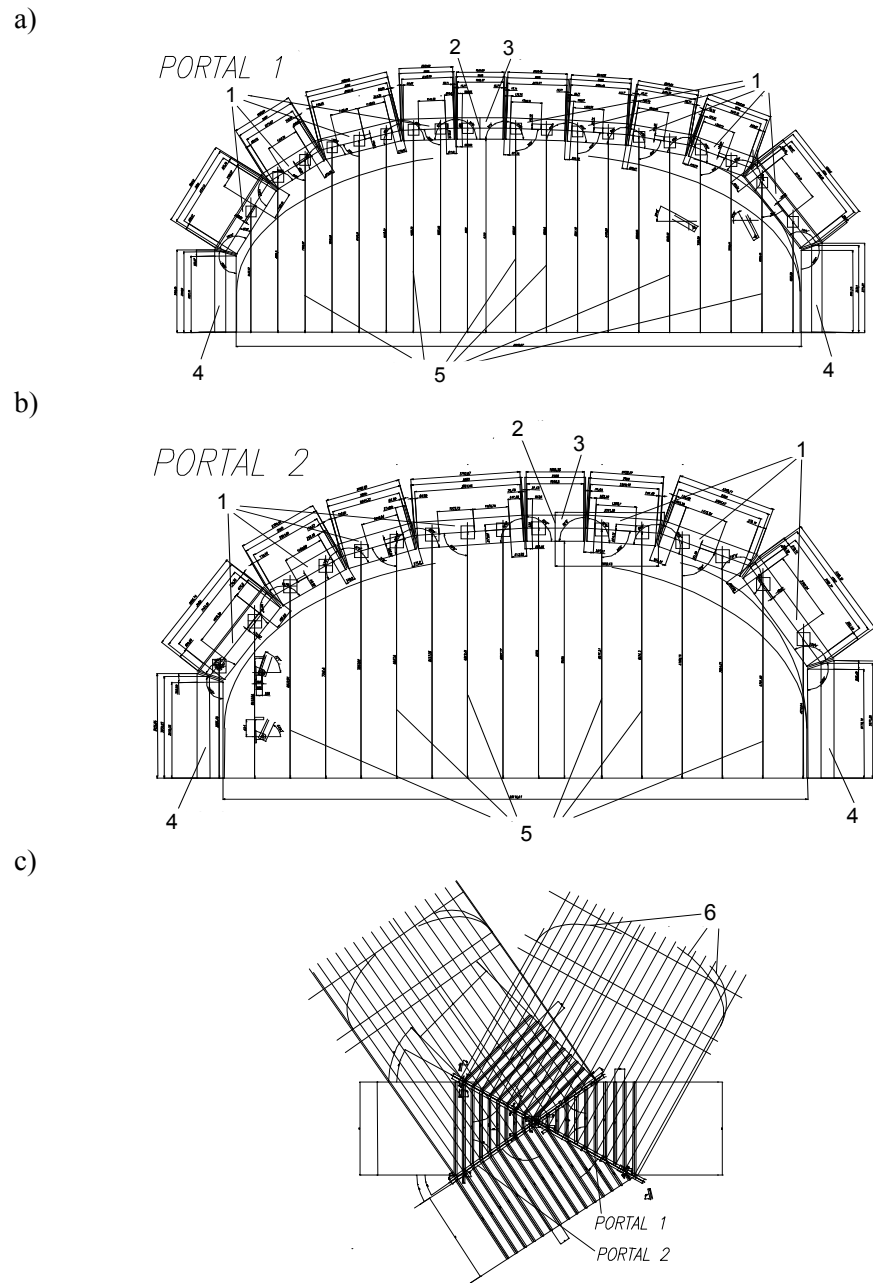
W tym etapie jest ustalany podział konstrukcji na poszczególne belki i lokalizacja łączników, wynikająca między innymi z założonego rozstawu odrzwi. Czynniki te są ściśle powiązane. Podział konstrukcji na belki musi uwzględniać takie rozmieszczenie łączników, aby nie występowały kolizje między konstrukcją zasadniczą a przyłączonymi do niej odrzwiami. Szczególnie dotyczy to blach łączących belki oraz pólek dwuteownika. Określone jest także dokładne ustawienie konstrukcji w wyrobisku, od którego częściowo zależą wymiary odrzwi.

Na rysunku 4 został przedstawiony w pomniejszeniu szkic konstrukcji zasadniczej, będący podstawą do tworzenia dokumentacji warsztatowej. Zawiera on wszystkie wymiary i stanowi także istotną podstawę do dalszej analizy ewentualnych kolizji oraz szczegółowego sprawdzenia dokumentacji rysunkowej.

W przedstawionym przykładzie konstrukcja zasadnicza składała się z 16 belek ustawionych na czterech elementach upodatkowanych. W części stropowej, w kluczu za pomocą specjalnego krzyżaka były połączone ze sobą dochodzące belki. Powstała w ten sposób przestrzenna rama w kształcie dwóch krzyżujących się pod ostrym kątem portali, mających w rzucie pionowym kształt litery „X”.

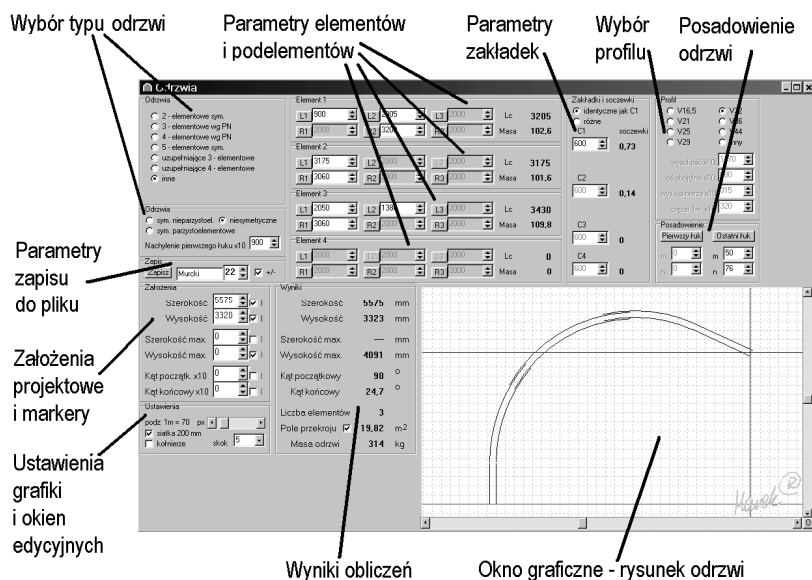
Należy zwrócić uwagę, że obudowa taka stanowi konstrukcję samostabilizującą. Nie ma ona tendencji do utraty założonej formy – płaskości portali. Zupełnie inna sytuacja występuje w przypadku „typowej” obudowy odgałęzienia, składającej się z portala i wspornika. Górotwór działający na wspornik powoduje, że ten oprócz obciążenia pionowego przekazuje na portal także składową poziomą. Zatem, aby nie doprowadzić do przechylenia portalu i jego zwichrowania – utraty płaskości, konieczne jest właściwe zastabilizowanie go w górotworze.

Dysponując geometrią konstrukcji zasadniczej, a w szczególności dokładną lokalizacją – współrzędnymi punktów połączenia z nią odrzwi możliwe jest rozpoczęcie ich projektowania. Określenie parametrów geometrycznych odrzwi stało się w ostatnim czasie znacznie łatwiejsze i mniej czasochłonne. Związane jest to z opracowaniem i wdrożeniem w Głównym Instytucie Górnictwa specjalistycznego oprogramowania typu CAD, służącego do projektowania odrzwi obudowy chodnikowej wszelkich typów. Napisana w pakiecie Delphi aplikacja [12], której formę przedstawiono na rysunku 5, pozwala na projektowanie geometrii praktycznie dowolnych, ograniczonych jedynie wyobraźnią i zdrowym rozsądkiem projektanta odrzwi obudowy chodnikowej. Mogą to być zatem odrzwia dwu-, trzy-, cztero- i pięcioczęściowe, składające się z elementów prostych (charakteryzujących się stałą krzywizną) lub złożonych (o maksymalnie trzech różnych krzywiznach). W związku z powyższym możliwe jest projektowanie takich typów odrzwi obudowy jak ŁP, ŁPP, ŁPZ, ŁPZS, ZOKP, ŁPO, ŁPrP, ŁPrPZ, ŁPS, ŁPrw, KaPa i wiele innych. Zwiększenie efektywności projektowania odrzwi uzyskano przez automatyczną regenerację rysunku odrzwi po zmianie dowolnego ich parametru. Dzięki temu projektant może łatwo dostrzec w jaki sposób wpływają one na kształt przekroju poprzecznego obudowy.



Rys. 4. Kompletny szkic konstrukcji zasadniczej: a – portal 1, b – portal 2, c – rysunek odgałęzienia, podziałka zmienna; 1 – belki, 2 – miejsce połączenia portali, 3 – krzyżak, 4 – upodatknienie, 5 – położenie drzwi, 6 – linie przenikania zarysów wyrobisk

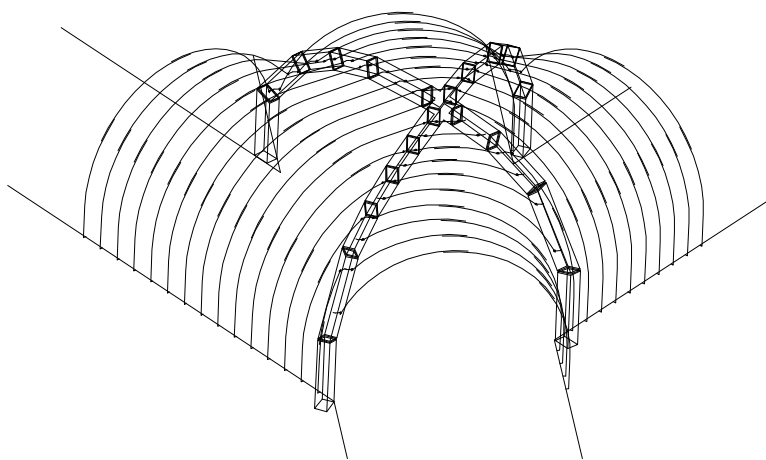
Fig. 4. Full pre-design of the main construction: a – portal 1, b – portal 2, c – drawing of the branch, variable scale; 1 – beams, 2 – location of portals connection, 3 – cross-bar, 4 – yielding element, 5 – door-frame position, 6 – lines of intersection of roadway profiles



Rys. 5. Okno programu CAD w czasie projektowania odrzwi

Fig. 5. CAD application in the course of designing the supplementary door frame

Ostatecznym wynikiem obu etapów konstruowania jest zarys kompletnego skrzyżowania zabezpieczonego projektowaną obudową, przedstawiony na rysunku 6. Rysunek ten jest jednocześnie podstawą do ustalenia rozmieszczenia rozpór, określania miejsc, w których może zachodzić kolizja elementów oraz sprawdzenia poprawności zaprojektowanych odrzwi. Ponadto, na podstawie trójwymiarowego rysunku obudowy tworzy się następnie model do obliczeń wytrzymałościowych.



Rys. 6. Trójwymiarowy rysunek obudowy skrzyżowania

Fig. 6. Three-dimensional drawing of supports of the crossing

2.4. Analiza wytrzymałościowa

Najistotniejsze z uwagi na bezpieczeństwo użytkowania obudowy odgałęzienia jest sprawdzenie jej wytrzymałości w warunkach prognozowanych obciążeń górotworem. Znaczna część elementów została przebadana w czasie badań stanowiskowych. Szczegółowe informacje na temat badań stanowiskowych elementów obudowy odgałęzienia można znaleźć w publikacji [11]. Mimo, że wszystkie bardziej wyężone fragmenty obudowy odgałęzień i skrzyżowań zostały przebadane w stanowisku, w przypadku każdej projektowanej konstrukcji przeprowadza się symulację jej zachowania w warunkach obciążeń przewidywanych w miejscu zabudowy. Badania takie wykonuje się numerycznie metodą elementów skończonych (MES, ang. FEM) [3, 4]. Istotą tej metody jest podział (dyskretyzacja) złożonego układu na skończoną liczbę elementów, analiza pojedynczego elementu, którego zachowanie jest określone przez skończoną liczbę parametrów, a następnie ponowne złożenie wszystkich elementów w celu wykonania badania odpowiedzi całego układu. Łatwiej jest zbadać i zrozumieć odpowiedź pojedynczego elementu, a następnie ponownie zbudować złożony układ w celu zbadania jego odpowiedzi, niż badać układ w całości [10].

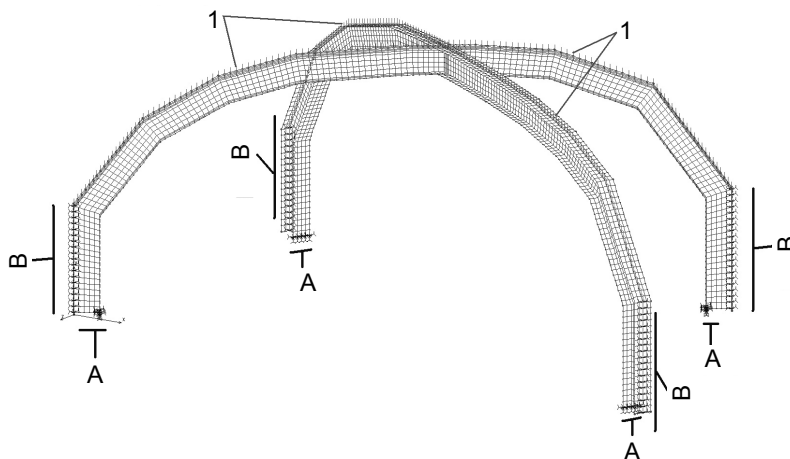
Do analiz najczęściej jest wykorzystywany program COSMOS/M [1, 2] firmy Structural Research and Analysis Corporation. Z punktu widzenia użytkownika modelowanie w systemie COSMOS/M sprowadza się do zadania geometrii całego badanego układu oraz określenia parametrów poszczególnych jego części. Parametrami tymi są własności materiałowe, parametry przekrojowe, a w przypadku analizy nieliniowej krzywe materiałowe. Geometrię układu można zadać, tworząc ją w module GEOSTAR, bądź importując trójwymiarowy rysunek w formacie dxf, na przykład z programu AutoCAD, natomiast bardzo uciążliwa dyskretyzacja, zwłaszcza w przypadku skomplikowanych modeli, dokonywana jest przez program w sposób automatyczny, ale pod kontrolą użytkownika. Po wprowadzeniu powyższych danych konieczne jest określenie sposobu obciążenia i podparcia modelu.

Podczas realizacji wielu projektów został wypracowany algorytm prowadzenia numerycznych badań modelowych. Na rysunku 7 przedstawiono program analizy wytrzymałościowej. Wynika z niego, że proces w dążeniu do uzyskania zadowalających wyników może ulegać zapętleniu. W algorytmie zostały uwzględnione dwie pętle – większa związana z przekonstruowaniem całej konstrukcji lub jej fragmentów oraz mniejsza dotycząca drobnych zmian (grubość elementów, gatunek materiału) w modelu MES. Oczywiście jest, że zmiany w modelu pociągają za sobą także zmiany w projektowanej konstrukcji.

Analiza wytrzymałościowa konstrukcji zasadniczej obudowy skrzyżowania w kopalni „Murcki” przebiegała w kilku etapach. W pierwszym etapie przeprowadzono badania liniowe. Badania te wykazały, że w niektórych fragmentach konstrukcji, pod wpływem przewidywanych obciążeń wynikających z działania górotworu, mogą wystąpić naprężenia przekraczające granicę plastyczności materiału. Zatem konieczne było rozszerzenie analizy o badania nieliniowe, uwzględniające nieliniowość fizyczną związaną z nieliniową charakterystyką materiału. Dzięki temu możliwe było uwzględnienie tzw. plastycznej rezerwy materiału oraz znaczne zwiększenie wartości dopuszczalnych naprężeń występujących w konstrukcji. Zatem podstawę analizy wytrzymałościowej konstrukcji stanowiły badania nieliniowe.

Fig. 7. Algorithm of mechanical strength computations

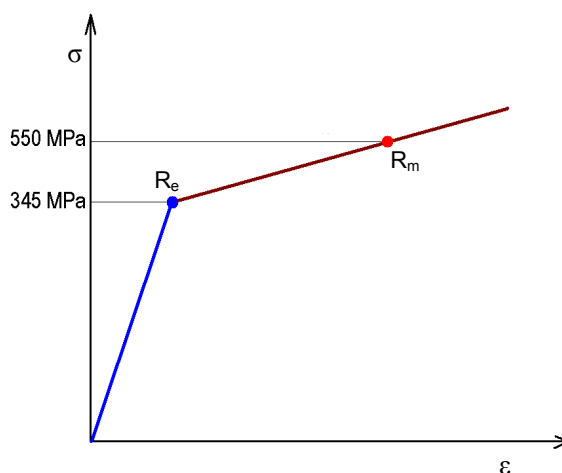
Model ten został podparty w kilku miejscach. Podpory typu A modelowały podparcie konstrukcji na spągu, natomiast podpory typu B – odpór ociosów (rys. 8). Tak podpartą konstrukcję obciążono siłami odpowiadającymi ciśnieniu, z jakim górotwór oddziałuje na obudowę. Obciążenie to wyznaczono zgodnie z „Uproszczonymi zasadami...” [9] z uwzględnieniem zmiennej szerokości wyrobiska w rejonie skrzyżowania, z której wynika różna wartość obciążenia działającego na poszczególne belki konstrukcji zasadniczej. Ponadto przy określaniu sił działających na konstrukcję uwzględniono fakt, że część tego obciążenia jest przenoszona przez odrzwia na spąg.



Rys. 8. Model konstrukcji zasadniczej obudowy skrzyżowania z zaznaczonym sposobem podparcia i obciążenia: A, B – podpory, 1 – obciążenie

Fig. 8. Model of the main supports of the crossing with marked method supporting and loading: A, B – supports, 1 – loading

Elementom nadano parametry materiałowe odpowiadające stali 18G2A, przy czym wykres rozciągania przybliżono dwiema liniami, tworząc biliniową charakterystykę materiału. Krzywą materiałową przedstawiono na rysunku 9. Punktami charakterystycznymi są: granica plastyczności ($R_e = 345$ MPa) oraz wytrzymałość materiału na rozciąganie ($R_m = 550$ MPa), przyjęta jako wartość między minimalną a maksymalną wytrzymałością ($R_{m18G2A} = 490\text{--}630$ MPa).

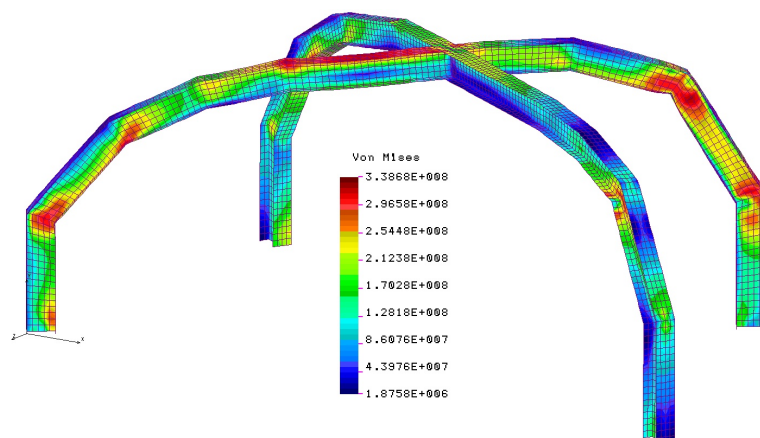


Rys. 9. Biliniowy model materiału: ϵ – odkształcenie względne, σ – naprężenie, R_m – wytrzymałość materiału, R_e – granica plastyczności

Fig. 9. Bilinear model of the material: ϵ – strain, σ – stress, R_m – material strength, R_e – yield point

Z analizą nieliniową bezpośrednio związany jest iteracyjny charakter obliczeń numerycznych, dlatego badanie wykonano zmodyfikowaną metodą Newtona-Raphsona (MNR) [1, 3, 4]. W czasie analizy model obciążany był w sposób stopniowy od zera do założonej wartości (odpowiadającej ciśnieniom górotworu). Program automatycznie rozpoznawał w jakim punkcie charakterystyki znajdował się każdy z elementów i nadawał mu właściwe parametry opisane pierwszą bądź drugą linią powyższej charakterystyki.

W wyniku obliczeń uzyskano, między innymi zdeformowaną postać modelu oraz rozkład naprężeń. Na rysunku 10 przedstawiono barwną mapę rozkładu naprężeń zredukowanych wyznaczonych według hipotezy Hubera [5, 6]. Maksymalne naprężenia osiągnęły w tym przypadku wartość 338,7 MPa.



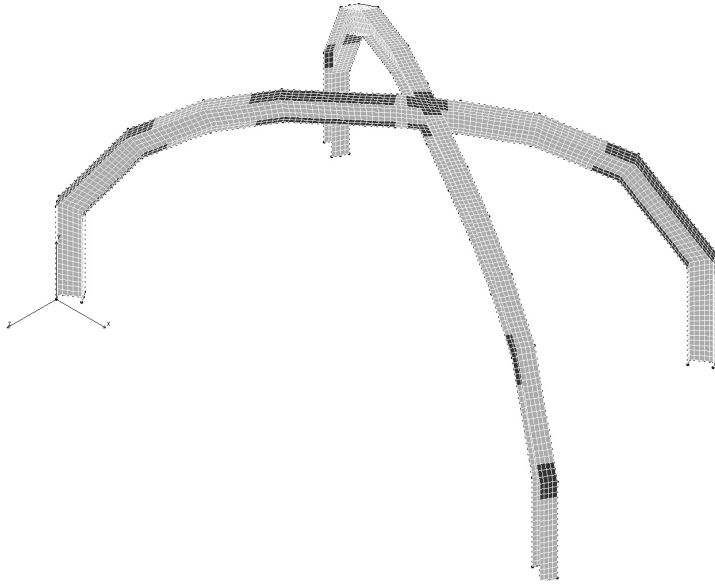
Rys. 10. Rozkład naprężeń w modelu konstrukcji zasadniczej obudowy skrzyżowania (skala deformacji 10×, naprężenia w Pa)

Fig. 10. Distribution of stress in the model of the main construction of the crossing supports (deformation scale 10×, stress in Pa)

Uzyskane wartości naprężeń, znacznie mniejsze od wytrzymałości materiału, skłaniają do wzmocnienia konstrukcji w miejscach bardziej wytężonych. Nastąpiło cofnięcie do wcześniejszych etapów zgodnie z mniejszą pętlą algorytmu obliczeniowego. Analizę takiej obudowy przeprowadzono dla modelu przedstawionego na rysunku 11. Model ten charakteryzuje się zastosowaniem elementów o zwiększonej grubości. Zebrano je w oddzielnej grupie i nadano im grubość uwzględniając zastosowanie spawanych nakładek na półki. Na rysunku miejsca wzmocnienia zaznaczono ciemniejszym odcieniem. Pozostałe parametry zarówno geometryczne, jak i fizyczne pozostały identyczne, jak w poprzednim modelu.

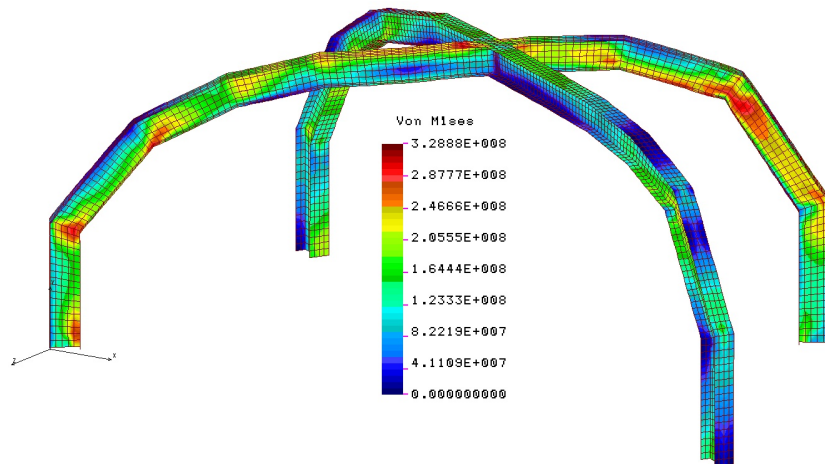
W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano, podobnie jak poprzednio, rozkład naprężeń zredukowanych. Na rysunku 12 przedstawiono barwną mapę naprężeń zredukowanych występujących w modelu pod wpływem obciążenia odpowiadającego ciśnieniu górotworu. Wyraźne jest zmniejszenie naprężeń zredukowanych – osiągają one maksymalną wartość 328,9 MPa i nie przekraczają granicy plastyczności

materiału. Ponadto, daje się zauważyć lepsze wykorzystanie materiału, tzn. występuje bardziej równomierny stan wyężenia elementów niż w poprzednim modelu, a obszary spiętrzenia naprężeń zostały znacznie zmniejszone.



Rys. 11. Model obudowy skrzyżowania ze spawanymi nakładkami wzmacniającymi (ciemniejszym odcieniem oznaczono elementy wzmacnione)

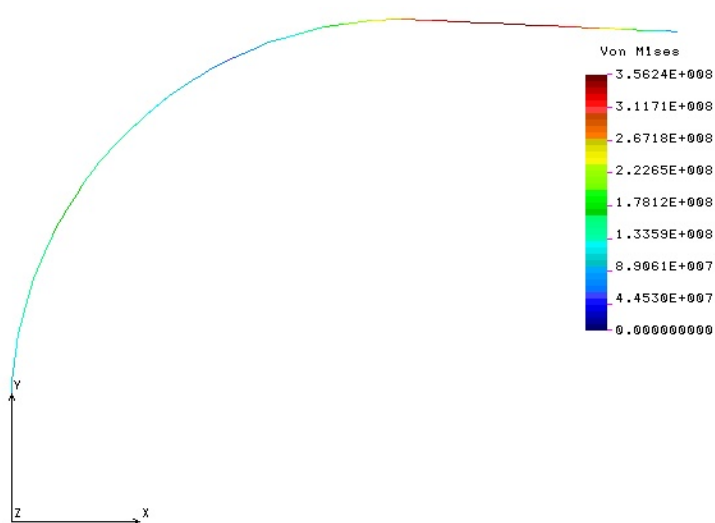
Fig. 11. Model of the crossing supports with welded reinforcing plates (reinforced elements marked with deeper shade)



Rys. 12. Rozkład naprężeń w modelu wzmacnionej konstrukcji zasadniczej obudowy skrzyżowania (skala deformacji 10×, naprężenia w Pa)

Fig. 12. Distribution of stress in the model of reinforced main construction of the crossing supports (deformation scale 10×, stress in Pa)

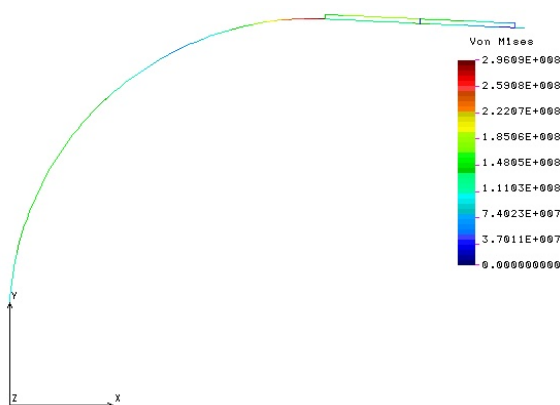
Kolejnym sprawdzanym wytrzymałościowo elementem były odrzwia uzupełniające, stanowiące istotną część konstrukcji obudowy skrzyżowania. W omawianej konstrukcji obawy budziły odrzwia o prostoliniowej stropnicy. Związane to było z mniejszą wytrzymałością prostych elementów niż elementów łukowych. Zatem celowe było przeprowadzenie badań wytrzymałościowych takich odrzwi. Do badań wytypowano odrzwia najszersze, najbardziej obciążone, z najdłuższym prostym odcinkiem łuku stropnicowego oraz zabudowane w największym rozstawie. Badania przeprowadzono metodą elementów skończonych za pomocą programu COSMOS/M w zakresie liniowym. W celu wykonania obliczeń zbudowano odpowiedni model. Do jego budowy wykorzystano elementy belkowe typu BEAM2D, którym nadano parametry przekrojowe kształtownika V32. Model został podparty w miejscu kontaktu ze spągami oraz w miejscu połączenia sworzniowego z konstrukcją zasadniczą. W wyniku obliczeń otrzymano rozkład naprężeń w poszczególnych elementach. Maksymalna ich wartość wynosiła 356,2 MPa i była dość znaczna (przekraczała granicę plastyczności). Ekstremum było zlokalizowane w płaskiej (prostoliniowej) części stropnicy. Na rysunku 13 przedstawiono rozkład naprężeń w modelu odrzwi.



Rys. 13. Naprężenia w modelu odrzwi

Fig. 13. Stress distribution in the model of the door frame

W celu poprawy stanu wyężenia odrzwi zastosowano dodatkowy element prosty łączony z prostą częścią stropnicy, tworząc podwójne złożenie kształtowników V32 na tym odcinku. Element połączony był z zasadniczą stropnicą za pomocą strzemion SD. W wyniku zastosowania tego dodatkowego elementu uzyskano znaczne zmniejszenie wartości naprężeń w elementach odrzwi. Na rysunku 14 przedstawiono rozkład naprężeń w elementach wzmocnionych odrzwi. Maksymalne naprężenia nie przekraczały 300 MPa, zatem zastosowanie proponowanego wzmocnienia było w pełni uzasadnione.



Rys. 14. Naprężenia w modelu wzmocnionych odrzwi

Fig. 14. Stress distribution in the model of the reinforced door frame

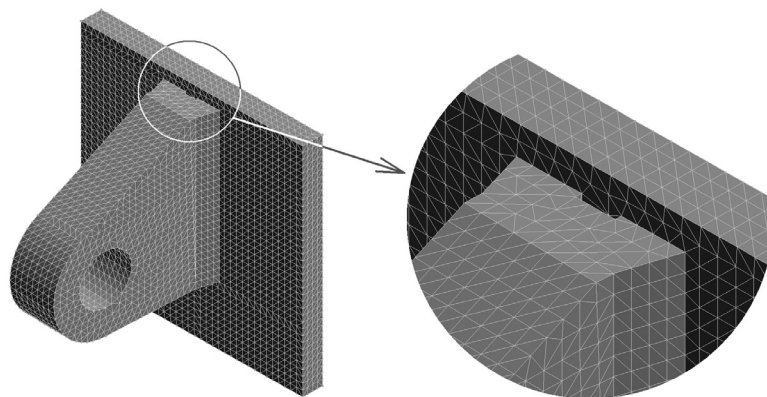
Często zdarza się, że analiza wytrzymałościowa konstrukcji zasadniczej i odrzwi nie jest wystarczająca. Dzieje się tak, gdy ma się do czynienia ze słabszym (niepewnym) elementem konstrukcji. W przypadku omawianej konstrukcji były to ucha do łączenia odrzwi uzupełniających z poszczególnymi belkami. Zastosowany łącznik jednoprzegubowy, przedstawiony na zdjęciu 1, zastąpił dotychczas stosowane rozwiązanie łącznika dwuprzegubowego, który nie mógł być użyty ze względu na ostre kąty pod jakimi łączone są odrzwia z portalami. Zatem konieczne było przeprowadzenie badań tego elementu. Badania, podobnie jak poprzednio, przeprowadzono metodą elementów skończonych. Wytypowano łącznik najbardziej obciążony, tzn. łączący odrzwia o największej szerokości z konstrukcją oraz zabudowane w największym rozstawie.



Fot. 1. Łącznik jednoprzegubowy (fot. M. Rotkegel)

Photo 1. One-articulation connector (photo M. Rotkegel)

W celu przeprowadzenia badań zbudowano model łącznika uwzględniający jego budowę – kształt i wymiary. Uwzględniono także sposób łączenia ucha z płytą za pomocą spoin. Model tego łącznika przedstawiono na rysunku 15.

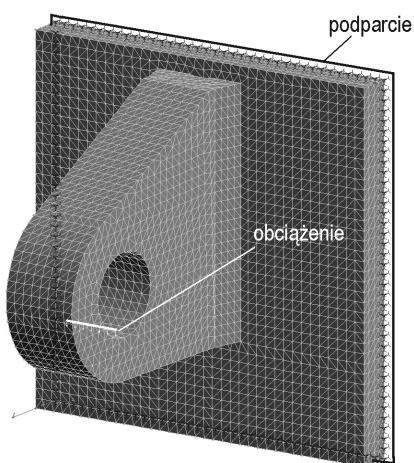


Rys. 15. Model łącznika z uwzględnieniem spoin

Fig. 15. Connector model

Model został podparty na wszystkich krawędziach płyty. Odpowiadało to w przybliżeniu spawaniu do środka dwuteownika IPB spoiną pachwinową na całym obwodzie. Ucho obciążono obciążeniem pionowym o charakterze liniowym działającym na otwór.

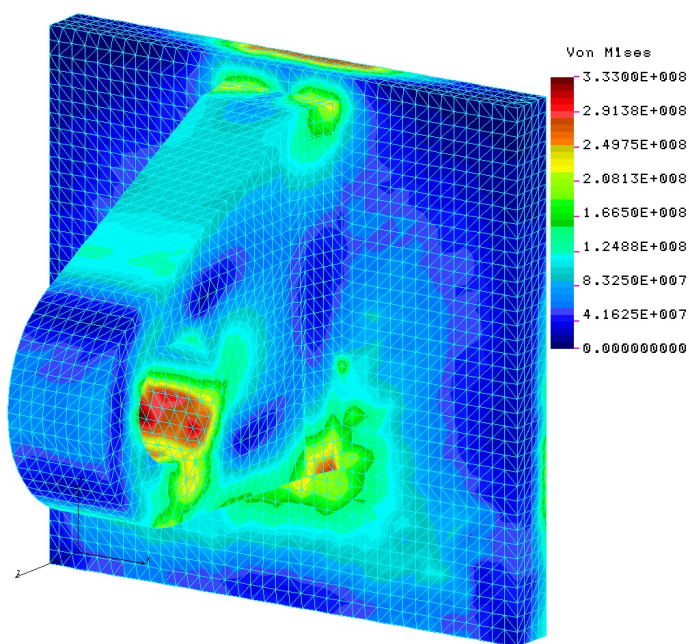
Taki sposób obciążenia jest znacznie bardziej niekorzystny od rzeczywistego, w którym kontakt i przeniesienie obciążeń między sworzniem a otworem zachodzi na powierzchni, znacznie zmniejszając tym samym naprężenia w miejscach obciążonych. Na rysunku 16 przedstawiono sposób podparcia i obciążenia modelu.



Rys. 16. Sposób podparcia i obciążenia łącznika

Fig. 16. Method of supporting and loading

Wartość obciążenia dobrano tak, aby uwzględniło ono obciążenie odrzwi obudowy oraz ich rozstaw. W wyniku przeprowadzonej analizy otrzymano między innymi rozkład naprężeń w modelowanym elemencie. Na rysunku 17 przedstawiono barwną mapę naprężeń zredukowanych wyznaczonych według hipotezy Hubera. Maksymalne wartości naprężeń wynosiły $\sigma = 333,3 \text{ MPa}$ i były zlokalizowane na obciążonej powierzchni otworu. Wartości te nieznacznie zbliżały się do granicy plastyczności i poprawne działanie analizowanego elementu nie było zagrożone. Ponadto, jak już wspomniano, przyjęty przypadek obciążenia był bardziej niekorzystny niż w rzeczywistości, zatem w badanym łączniku należy się spodziewać mniejszych wartości naprężeń.



Rys. 17. Rozkład naprężeń w łączniku odrzwi z konstrukcją zasadniczą

Fig. 17. Distribution of stress in the connector between the door frame and main construction

2.5. Geometryczna weryfikacja konstrukcji

Przed przekazaniem szkiców do wykonania dokumentacji zaprojektowana konstrukcja wymaga gruntownego sprawdzenia. Nie sposób tu wymienić wszystkich elementów i fragmentów konstrukcji podlegających tej weryfikacji. Wraz z każdym przypadkiem obudowy odgałęzienia ich lista jest tworzona od nowa. Wśród najczęściej występujących należy wymienić sprawdzenie możliwych kolizji między elementami, zwłaszcza łukami odrzwi i dwuteownikiem IPB.

W przykładowym skrzyżowaniu lista sprawdzanych fragmentów konstrukcji była szczególnie długa. Oprócz standardowego sprawdzenia, czy kołnierze łuków V nie

kolidują z blachami czołowymi w niektórych odrzwiach, konieczne było określenie wycięcia w dnie profilu V tak, aby było możliwe ich połączenie z konstrukcją zasadniczą. Sytuację tę przedstawiono na zdjęciu 2.



Fot. 2. Podcięcie w dnie kształtownika V (fot. M. Rotkegel)

Photo 2. Undercut in the V-shape bottom (photo M. Rotkegel)

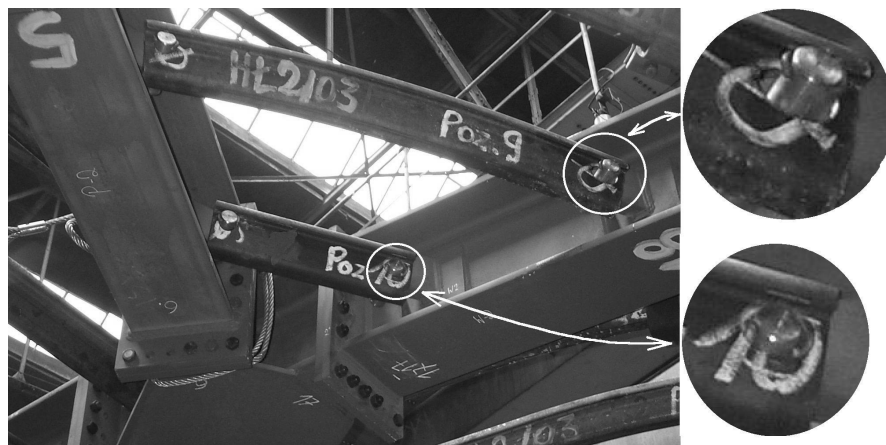
Kolejnym fragmentem poddanym szczegółowej analizie było ucho do mocowania odrzwi do konstrukcji zasadniczej pod bardzo ostrym kątem. W tym celu zaprojektowano i zweryfikowano specjalną konstrukcję ucha umożliwiającą zamocowanie odrzwi w sposób bezkolizyjny zarówno ze środkiem dwuteownika IPB, jak również z blachą czołową belki. Ponadto w tym węźle także było konieczne wykonanie podcięcia w dnie kształtownika V. Opisaną sytuację przedstawiono na zdjęciu 3.

Szczególną uwagę poświęcono odrzwiom jednoczęściowym. Dokładne określenie ich parametrów geometrycznych, połączone z bezbłędnym wykonaniem, decydowało o możliwości ich zabudowy do konstrukcji zasadniczej. W czasie późniejszego próbnego montażu okazało się, że przyjęta w fazie projektowania wielkość otworu owalnego na sworzeń okazała się zbyt duża, a przyjęta przez to tolerancja zbyt mała. Na zdjęciu 4 przedstawiono opisany wyżej fragment konstrukcji.



Fot. 3. Specjalne ucho do mocowania odrzwi do belki pod ostrym kątem (fot. M. Rotkegel)

Photo 3. Special eye for fastening the door frame to the bar at an acute angle (photo M. Rotkegel)



Fot. 4. Jednoczęściowe odrzwia uzupełniające (fot. M. Rotkegel)

Photo 4. One-piece supplementary door frame (photo M. Rotkegel)

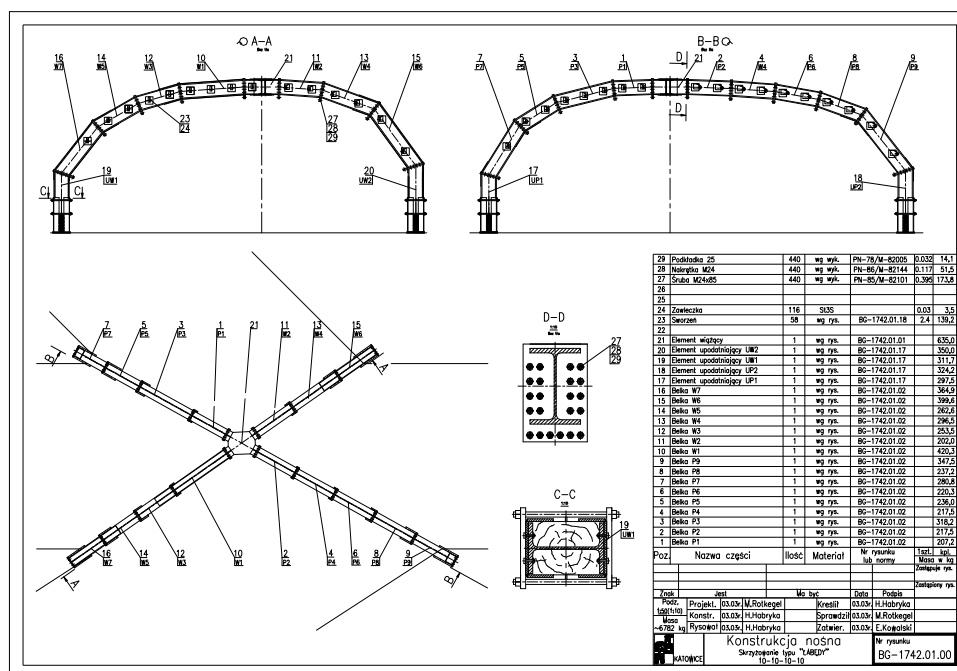
2.6. Wykonanie dokumentacji rysunkowej

Pomijając opracowanie ramowej technologii zabudowy, wykonanie dokumentacji technicznej jest ostatnim etapem procesu projektowego, wieńczącym całość wcześniejszych działań. Poprawność wyników tego fragmentu procesu rzutuje na właściwe i bezproblemowe wykonanie gotowego wyrobu.

Cała dokumentacja techniczna wykonywana jest obecnie w wykorzystaniem systemu AutoCAD. Dysponując dodatkowo bibliotekami typowych, powtarzalnych elementów, daje to znaczne skrócenie czasu projektowania. Ponadto, komputerowe wydruki są bardziej czytelne niż wykonane metodami tradycyjnymi. Ważnym aspektem jest także łatwiejsza dystrybucja rysunków. W trybie pilnym mogą one być w ciągu kilku sekund dostarczone w formie elektronicznej do wykonawcy. Jest to szczególnie istotne w ostatnim czasie, kiedy zamawiający coraz częściej wymagają bardzo krótkich terminów realizacji. Na rysunku 18 przedstawiono zestawienie konstrukcji zasadniczej, stanowiące część dokumentacji rysunkowej omawianej obudowy skrzyżowania.

2.7. Wykonanie poszczególnych elementów obudowy i zabudowa w wyrobisku

Renomowanym wykonawcą zaprojektowanych w GIG odgałęzień i skrzyżowań jest Huta „Łabędy”. Świadczy o tym długa lista odbiorców i jeszcze dłuższa wykonanych obudów [7, 11]. Należy wymienić obudowy odgałęzień i skrzyżowań wykonane dla kopalń: „Knurów” (9 odgałęzień), „Bogdanka”, Staszic”, „Wesoła” (po 8), „Jankowice” (6), „Murcki” (4), „Janina”, „Jaworzno” (ZGE Sobieski-Jaworzno III), „Nowa Ruda” (po 2) oraz po jednym „Bolesław Śmiały”, „Budryk”, „Chwałowice”, „Kazimierz Juliusz”, „Kleofas”, „Lubin”, „Marcel”, „Piast”, „Pokój”, „Rozbark”, „Śląsk” i „Ziemowit”.



Rys. 18. Rysunek zestawieniowy konstrukcji zasadniczej przykładowego skrzyżowania

Fig. 18. Assembly drawing of the main construction of an exemplary crossing

Każda zaprojektowana i wykonana konstrukcja jest próbnie zmontowana na powierzchni. Montaż próbny dostarcza jednoznacznych wniosków dotyczących poprawności zaprojektowania i wykonania konkretnej obudowy. Dopiero po zmontowaniu i zaakceptowaniu przez odbiorcę konstrukcja może zostać przekazana do zabudowy w wyrobisku. Na zdjęciach 5 i 6 przedstawiono przykładową obudowę skrzyżowania w czasie montażu kontrolnego.



Fot. 5. Obudowa w czasie montażu próbnego (fot. M. Rotkegel)

Photo 5. Supports in the course of trial assembly (photo M. Rotkegel)



Fot. 6. Obudowa w czasie montażu próbnego (fot. M. Rotkegel)

Photo 6. Supports in the course of trial assembly (photo M. Rotkegel)

2.8. Obserwacje i badania dołowe

Pełny cykl badań był przeprowadzony na początku uruchamiania produkcji [11]. Natomiast szczegółowe obserwacje i badania dołowe są prowadzone przede wszystkim w przypadku rozwiązań nowatorskich.

Obecnie prowadzone są badania dołowe nowego rozwiązania obudowy odgałęzienia. Obudowa ta [18], zabudowana w kopalni „Janina”, charakteryzuje się zastosowaniem jednego portalu o dużej wytrzymałości, rozpiętego ponad odgałęziającym się wyrobiskiem.

3. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wykazano, że proces projektowania, a potem wykonania obudowy połączeń wyrobisk korytarzowych jest dość złożony i pracochłonny. Można jednak stwierdzić, że dzięki wdrożonym systemom jakości zarówno w Hucie „Łabędy”, jak i w GIG możliwe jest sprawne przeprowadzanie szeroko rozumianego procesu wytwarzania. Wynikiem wieloletniej współpracy Huty „Łabędy” i Pracowni Projektowania Obudowy Chodnikowej i Utrzymania Wyrobisk Korytarzowych Głównego Instytutu Górnictwa było opracowanie i wykonanie ponad sześćdziesięciu obudów połączeń wyrobisk korytarzowych. Często, przy tej okazji, były wdrażane nowe rozwiązania konstrukcyjne, które mogą być stosowane także w innych obudowach chodnikowych. Bardzo pomocne w całym procesie wytwórczym okazały się wdrożone w ostatnich latach systemy CAD. Komputerowe wspomaganie projektowania jest szczególnie ważne przy projektowaniu obudowy odgałęzień i skrzyżowań o nietypowej geometrii lub nietypowo obciążonej. Przykładem mogą być liczne konstrukcje zamknięte od spągu opracowane dla kopalni „Bogdanka”, obudowa skrzyżowania wielkogabarytowych wyrobisk dla kopalni „Wesoła”, obudowa odgałęzienia nachylonych względem siebie wyrobisk w kopalniach „Janina” i „Marcel” oraz wiele innych.

Ponadto, można sformułować kilka wniosków istotnych dla obecnych i przyszłych użytkowników obudów odgałęzień:

- Wyniki badań wytrzymałościowych wykazują, że dla właściwej pracy obudowy istotne jest jej prawidłowe zabudowanie. Szczególną uwagę należy zwrócić na zapewnienie odporu na ociosach tak, aby konstrukcja zasadnicza pod wpływem obciążeń stropowych nie miała tendencji do zwiększania swej rozpiętości. W przypadku obudowy z portalem i wspornikiem ważna jest stabilizacja portalu, uniemożliwiająca wychylenie go z pierwotnej płaszczyzny zabudowy.
- Zmiana geometrii odrzwi w rejonie zabudowy odgałęzienia często utrudnia, a w niektórych miejscach wręcz uniemożliwia, właściwe zabudowanie typowych rozpór. Dlatego też konstruktorzy zalecają stosowanie w tych miejscach rozpór wieloprzegubowych typu HS. Dzięki ich konstrukcji możliwe jest połączenie sąsiadujących odrzwi nawet wtedy, gdy znacznie różnią się one gabarytami.

Literatura

1. COSMOS/M – User's Guide, Structural Research & Analysis Corp. Los Angeles, USA, 1999.
2. Rusiński E.: *Metoda elementów skończonych. System COSMOS/M*. Warszawa, Wydaw. Komunikacji i Łączności 1994.
3. Rakowski G., Kacprzyk Z.: *Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji*. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 1996.
4. Rakowski G.: *Metoda elementów skończonych. Wybrane problemy*. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 1996.
5. Szuścik W., Kuczyński J.: *Wytrzymałość materiałów (Mechanika modelu ciała odkształcalnego i ciała rzeczywistego)*. Część 1. Gliwice, Wydaw. Politechniki Śląskiej 1998.
6. Dyląg Z., Jakubowicz A., Orłowski Z.: *Wytrzymałość materiałów*. Tom I. Warszawa, Wydaw. Naukowo-Techniczne 1996.
7. Huta Łabędy: *Stalowe obudowy górnicze i akcesoria*. Katalog wyrobów.
8. Rotkegel M.: *Obudowa odgałęzień i skrzyżowań wyrobisk korytarzowych. Od założeń do gotowego wyrobu. Wybrane zagadnienia z zakresu stosowania stalowych obudów chodnikowych*. Prace Naukowe GIG. Seria Konferencje 2003 nr 45.
9. Rułka K. i inni: *Uproszczone zasady doboru obudowy odrzwiowej wyrobisk korytarzowych w zakładach wydobywających węgiel kamienny*. Główny Instytut Górnictwa, Seria Instrukcje 2001 nr 15.
10. Chmielewski T., Nowak H.: *Mechanika budowli. Metoda przemieszczeń. Metoda Crossa. Metoda elementów skończonych*. Warszawa, Wydaw. Naukowo-Techniczne 1996.
11. Stałęga S.: *Podstawy teoretyczno-badawcze projektowania szkieletowych konstrukcji obudowy skrzyżowań i odgałęzień wyrobisk udostępniających*. Prace Naukowe GIG 2001 nr 845.
12. Lischner R.: *Delphi. Almanach*. Gliwice, Wydaw. Helion 2002.
13. *Podstawy konstrukcji maszyn*. Tom 1. Praca zbiorowa pod redakcją M. Dietricha. Warszawa, Wydaw. Naukowo-Techniczne 1995.
14. Dietrich J.: *Projektowanie i konstruowanie*. Warszawa, Wydaw. Naukowo-Techniczne 1974.

15. Dziama A.: *Metodyka konstruowania maszyn*. Warszawa, Państwowe Wydaw. Naukowe 1985.
16. *Podstawy konstrukcji maszyn*. Praca zbiorowa pod redakcją Z. Osińskiego. Warszawa, Wydaw. Naukowe PWN 1999.
17. Osiński Z., Wróbel J.: *Teoria konstrukcji*. Warszawa, Wydaw. Naukowe PWN 1995.
18. Najman W., Daniłowicz R.: *Obudowa odgałęzienia typu „Łabędy” wzmocniona kotwiami w warunkach KWK „Janina”. Wybrane zagadnienia z zakresu stosowania stalowych obudów chodnikowych*. Prace Naukowe GIG. Seria Konferencje 2003 nr 45.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Józef Kabiesz

Mariusz Szot

WPLYW NIERÓWNOŚCI SZTYWNEGO PROWADZENIA NACZYŃ NA ZMIANĘ OBCIĄŻEŃ LIN WYCIĄGOWYCH – METODYKA BADAŃ, WYPOSAŻENIE APARATUROWE

Streszczenie

W praktyce kontrola i diagnostyka wyciągów szybowych polega przede wszystkim na badaniu prostoliniowości torów prowadzenia naczyń, w celu określenia miejsc w szybach, w których występują nierówności tych torów. Badania zmian obciążeń lin wyciągowych prowadzone są w ograniczony sposób z uwagi na brak dostępnej aparatury badawczej. Nie wykonywano dotychczas równoczesnych badań prostoliniowości torów prowadzenia naczyń i zmian obciążeń lin wyciągowych nośnych, które umożliwiałyby ustalenie współzależności między tymi zmianami.

W artykule przedstawiono dotychczas stosowane sposoby obliczania zmiany obciążeń lin wyciągowych, przyczyny powstawania nierówności torów prowadzenia naczyń i metodę kontroli tych nierówności.

Stosowane dotychczas układy do pomiaru obciążeń lin wyciągowych są układami stacjonarnymi przystosowanymi do badań w konkretnym wyciągu szybowym. Zaprezentowane urządzenie do pomiaru obciążeń lin wyciągowych opracowano w GIG i będzie ono wykorzystane do badań przemysłowych. Opracowana metodyka pomiarów umożliwi weryfikację teoretycznych zależności, co będzie stanowiło następny etap prac badawczych.

Influence of irregularities of stiff guidance of shaft conveyances on the change of hoisting rope loading – methodology of testing, measuring equipment

Abstract

In practice, the control and diagnosis of mine hoists relies, first of all, on checking the rectilinearity of conveyance guiding tracks, with the aim to find the locations in the shafts, in which the irregularities of these tracks are present. The examination of changes of hoisting rope loading is performed to limited extent because of the lack of availability of measuring equipment. So far the simultaneous examination of rectilinearity of conveyance guiding tracks, and of the changes of hoisting rope loading, with the aim to determine the interrelation between these changes, has not been performed. The paper presents the methods used until now in computing the changes of hoisting rope loading, the causes of origination of irregularities of conveyance guiding tracks, and the method to control these irregularities. The systems used up to now in measurements of loading of hoisting ropes are stationary ones, adapted to testing in a specified shaft hoisting machine.

The presented measuring apparatus for measuring the loads of hoisting ropes was developed at the Central Mining Institute, and it is to be used in measurements in industrial conditions. The developed measuring methodology will make possible to verify the theoretical relationships, which is to be the next phase of research.

1. WSTĘP

Do ważnych elementów górniczych wyciągów szybowych zalicza się prowadzenie naczyń i liny wyciągowe. Prowadzenie naczyń, podobnie jak inne elementy,

w miarę upływu czasu eksploatacji ulega zużyciu; następuje zmiana geometrycznych parametrów takich, jak nieliniowość ciągów i zmiany odstępów między naprzeciwległymi przewodnikami. Zmiany te oddziałują na układ naczynie – zbrojenie, powodując losowo zmienne obciążenia elementów wyciągu, w tym również na obciążenia lin wyciągowych. Ma to więc bezpośredni wpływ na warunki pracy lin, ich trwałość i niezawodność. Z badań przeprowadzonych w RPA wynika, że niekorzystny dla trwałości lin jest zakres zmienności siły (statycznej i dynamicznej) w linie, przekraczający 15% nominalnej siły zrywającej linę.

Przyczyny różnej trwałości lin, wykonanych przez tego samego producenta i pracujących w tym samym wyciągu szybowym, można wyjaśnić na podstawie określenia wpływu stanu prowadzenia naczyń na wielkość i charakter zmian obciążeń lin wyciągowych.

Na naczynie wyciągowe poruszające się wzdłuż ciągów przewodniczych działa w każdej chwili układ sił, którego wypadkowa zależy od fazy ruchu wyciągu szybowego.

W celu całościowego przedstawienia zjawisk występujących w czasie ruchu naczynia wyciągowego należy uwzględnić kolejne fazy jego pracy, tzn: rozruch, jazdę ustaloną, hamowanie, załadunek, rozładunek.

Pierwszą fazą jest opuszczanie naczynia wyciągowego, które początkowo zwiększa swoją prędkość, następnie porusza się ze stałą prędkością, by w końcu zmniejszyć prędkość do zera. Druga faza ruchu naczynia to postój, w czasie którego następuje załadunek naczynia. W trzeciej fazie pracy, tak jak w przypadku opuszczania naczynia, następuje ruch jednostajnie przyspieszony, następnie ustalony ze stałą prędkością, a w końcu hamowanie naczynia ze stałą wartością opóźnienia.

Przyspieszenie i opóźnienie ruchu zależy od ustalonego cyklu pracy układu wyciągowego i osoby obsługującej. Wartości tych przyspieszeń i opóźnień są rygorystycznie określone w obowiązujących przepisach.

W chwili, gdy koło napędowe zaczyna pracować następuje rozciąganie liny wyciągowej. Przyspieszenie naczynia wyciągowego wzrasta wolniej niż przyspieszenie koła pędnego. Różnica zaczyna się powoli wyrównywać, siła w linie maleje do wartości niezbędnej do rozpoczęcia ruchu z założonym przyspieszeniem. Występują wzdłużne oscylacje powodujące zmiany wartości siły i momentu odkrętu liny.

W czasie załadunku naczynia wyciągowego powstają również zjawiska dynamicznego oddziaływania na linę spowodowane napełnianiem naczynia ładunkiem.

W czasie jazdy naczynia, sztywne przewodniki, elastyczne prowadnice i konieczne luzy między nimi wpływają na poziome ruchy naczynia, powodujące wystąpienie dodatkowych sił w układzie. Przypadkowe nierówności przewodników pobudzają naczynie do drgań poziomych z amplitudą o rozkładzie losowym. Mogą to być powtarzające się cyklicznie nierówności na złączach przewodników, przypadkowe duże nierówności przewodników lub długie nierówności, powodujące wzrost wartości prześwitów i zmianę położenia środka ciężkości naczynia wyciągowego.

W miejscach zwiększonych prześwitów następuje zwiększenie amplitudy drgań poziomych naczynia i związane z tym większe przemieszczenie boczne zawiesia, powodujące zmiany obciążenia lin wyciągowych nośnych.

Dodatkowy wpływ na powstanie zmiany obciążeń lin wyciągowych ma:

- mimośrodowość i eliptyczność koła linowego,
- mimośrodowość zamocowania koła linowego.

Gwałtowną zmianę obciążenia liny wyciągowej powoduje wjazd naczynia w urządzenia hamujące zarówno w położeniu górnym, jak i dolnym naczynia, a także uderzenia naczynia o belki odbojowe.

Przy zmianie parametrów toru prowadzenia naczyń może nastąpić:

- zmniejszenie prześwitu między torami prowadzenia naczyń aż do zakleszczenia naczynia między prowadnikami,
- zwiększenie prześwitu grożące wypadnięciem naczynia z torów prowadzenia naczyń.

Przy zakleszczeniu naczynia podczas jazdy w dół, odciążona lina wyciągowa zaczyna się układać na głowicy naczynia, zwiększając jego ciężar. Dotyczy to zwłaszcza maszyn bębnowych. Po przekroczeniu pewnej granicznej wartości, naczynie może ruszyć gwałtownie w dół, powodując nagłe dynamiczne obciążenie liny wyciągowej.

Podczas jazdy w górę w przypadku zakleszczenia naczynia mogą wystąpić nagłe dynamiczne wzrosty wartości siły w linie wyciągowej. Przy wypadnięciu naczynia wyciągowego z torów prowadzenia naczyń może nastąpić zahaczenie o element szybu, co spowoduje dynamiczny wzrost siły w linie wyciągowej aż do jej zerwania.

Z danych zebranych przez autora wynika, że dotychczas zaistniał jeden taki przypadek w polskim górnictwie [11]. Do wydarzenia tego doszło w 1961 roku w nieistniejącej już kopalni „Zabrze”.

Z omówionych wyżej przykładów wynika, że stan prowadzenia naczynia oraz inne czynniki ruchowe mają istotny wpływ na zmianę obciążenia lin nośnych.

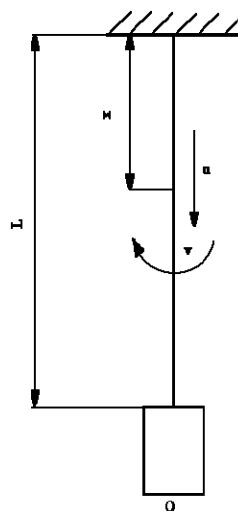
2. ROZKŁAD SIŁ W LINIE WYCIĄGOWEJ NOŚNEJ

W linie wyciągowej obciążonej ciężarem Q powstaje siła osiowa P , wzdłużne przemieszczenie u , przemieszczenie skrętne v i stały moment odkrętu M . Traktując linę wyciągową jako pręt jednorodny o określonej stałej sztywności [4, 5] obciążenie w dowolnym punkcie liny możemy określić ze wzoru

$$P(x) = Q + q(L - x) \quad (1)$$

gdzie:

- Q – obciążenie końca liny,
- q – ciężar 1 m liny,
- L, x – długości odcinka liny (rys. 1).



Rys. 1. Uproszczony schemat obciążenia liny wyciągowej

Fig. 1. Simplified scheme of hoisting rope loading

Zakładając, że lina jest układem sprężystym o dwóch stopniach swobody, siłę w linie można określić jako związek między odkształceniami [2]

$$\begin{aligned} A \frac{du}{dx} + C \frac{dv}{dx} &= P(x) \\ C \frac{du}{dx} + B \frac{dv}{dx} &= M(x) \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie:

$P(x)$ – uogólniona siła rozciągająca,

$M(x)$ – uogólniony moment skręcający,

$\frac{du}{dx}, \frac{dv}{dx}$ – względne odkształcenie wzdłużne i skrętne przekroju liny,

A, B, C – uogólnione współczynniki sztywności liny określające:

A – sztywność liny przy czystym rozciąganiu,

B – sztywność liny przy czystym skręcaniu,

C – współczynnik wpływu, równy momentowi skręcającemu w linie przy jednostkowym względnym jej wydłużeniu $\frac{du}{dx} = 1$ i skręceniu $v = 0$.

Siłę bezpośrednio nad zawiesiem naczynia wyciągowego można wyznaczyć z zależności przedstawionych w publikacji [3].

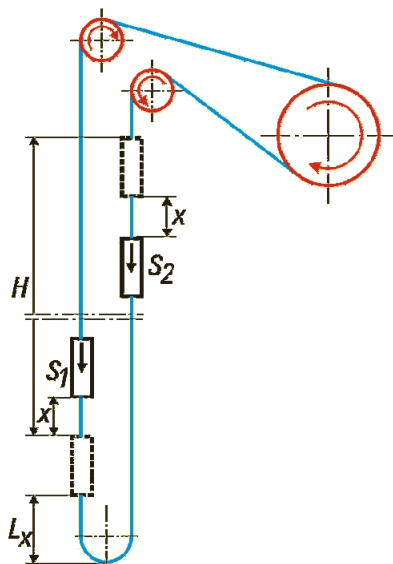
Wartości sił S_1 i S_2 , zgodnie z oznaczeniami na rysunku 2, można opisać następującymi zależnościami:

$$S_1 = [Q_m + Q_u + q_w(x + l_w)](1 + \frac{a}{g}) + Y_1 \quad (3)$$

$$S_2 = [Q_m + q_w(H - x + l_w)](1 - \frac{b}{g}) + Y_2 \quad (4)$$

gdzie:

- S_1 – siła w miejscu mocowania do naczynia podnoszonej gałęzi liny,
- S_2 – siła w miejscu mocowania do naczynia opuszczanej gałęzi liny,
- H – głębokość ciągnięcia,
- l_w – długość liny wyrównawczej, od naczynia do miejsca nawrotu przy dolnym położeniu naczynia,
- x – droga ruchu naczyń liczona od skrajnego ich położenia,
- Q_m – masa martwa,
- Q_u – masa użyteczna urobku,
- q_w – masa 1 m liny wyrównawczej,
- Y_1, Y_2 – szybowe opory ruchu naczyń podnoszonej i opuszczanej gałęzi liny,
- a – przyspieszenie,
- g – przyspieszenie ziemskie.



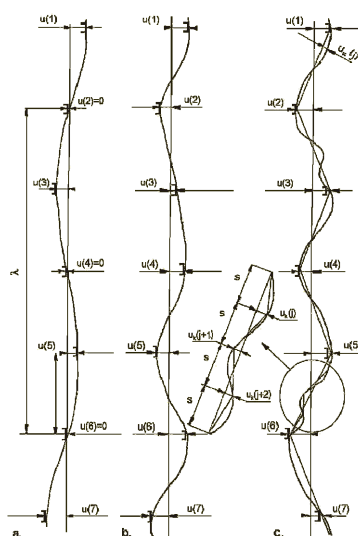
Rys. 2. Schemat jednolinowego urządzenia wyciągowego

Fig. 2. Scheme of a single-rope hoisting machine

Zależności te pozwalają na określenie teoretycznej wartości sił dla różnych warunków pracy urządzenia wyciągowego.

3. NIERÓWNOŚCI TORU PROWADZENIA NACZYŃ

Naczynie poruszające się w szybie jest w nim prowadzone wzdłuż przewodników za pomocą prowadnic toczących się po przewodnikach. Przewodniki mocowane są do poziomych belek zwanych dźwigarami szybowymi lub do wsporników kotwionych bezpośrednio do obmurza szybowego. Przewodniki zabudowane są do pionu z pewną dokładnością, co powoduje przesunięcie jednego przewodnika względem drugiego o pewną wartość mierzoną od linii pionowej, w odniesieniu do której miały być montowane przewodniki. Dodatkowo na styku następujących po sobie przewodników mogą wystąpić przesunięcia ich czołowych płaszczyzn. Wskutek źle wykonanego spawania lub niewłaściwego pokrycia galwanicznego, przewodniki mogą także ulec skręceniu, które w pewnym stopniu udaje się zlikwidować podczas ich montażu w szybie. Przesadnie zdeformowany tor przedstawiono na rysunku 3. Drogę, wzdłuż której jest prowadzone naczynie wyciągowe można przyjąć jako linię łamaną, z uskokami na załamaniach, gdzie wielkości p_n i u_n są nieskorelowanymi ze sobą zmiennymi losowymi, o dowolnych rozkładach prawdopodobieństwa.



Rys. 3. Zdeformowany tor przewodników

Fig. 3. Deformed guiding track

3.1. Przyczyny powstawania nierówności przewodników

Nowo powstałe oraz zmodernizowane w ostatnich latach szyby charakteryzują się dużą głębokością i dużą średnicą. Miało to na celu zwiększenie wydobywania oraz udostępnienie głębszych pokładów.

Podczas wykonywania szybów najistotniejsze jest poprawne wykonanie obudowy, dotyczy to przede wszystkim jej pionowości, a także poprawności, zgodnie

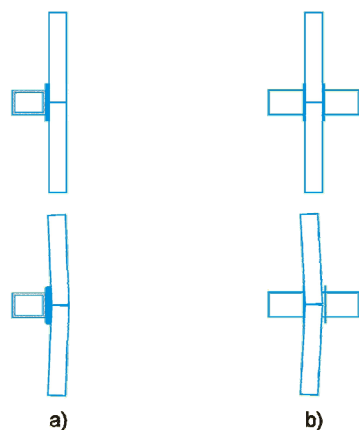
z obowiązującymi przepisami [1] oraz wykonania tarczy szybowej (wymiarów geometrycznych).

Zbyt duże odchyłki w wykonaniu obudowy szybowej utrudniają poprawne zabudowanie zbrojenia szybowego zgodnie z obowiązującymi przepisami. Czasami w celu zapewnienia poprawnej eksploatacji wyciągu szybowego wykonuje się tak zwane „szablonowanie” obmurza, aby uzyskać właściwe odstępy ruchowe. Jest to jednak nie zawsze wykonalne i zgodne z obowiązującymi przepisami (należy zachować właściwą grubość obudowy szybowej). Dlatego czasami wykonuje się montaż zbrojenia szybowego, stosując dopuszczalne odchyłki montażowe tak, aby zapewnić właściwą geometrię toru prowadzenia naczyń i odstępów ruchowych.

Prowadzenie eksploatacji w pobliżu szybów oraz zmniejszanie ich filarów ochronnych powoduje lokalne deformacje obudowy szybowej, jej pochylanie, a co za tym idzie zmianę parametrów geometrii prowadzenia naczyń.

Ważnym zagadnieniem jest wodoszczelność obudowy szybowej. Pierwsze próby doszczelnienia obudowy szybowej były wykonywane już na początku poprzedniego stulecia, kiedy to jako materiał uszczelniający stosowano słoninę. W następnych latach wraz z rozwojem przemysłu chemicznego zaczęto stosować różnego rodzaju folie, środki iniekcyjne oraz polepszające szczelność betonu. Stosowano także obudowy wielowarstwowe i tubingowe.

Woda dostająca się do szybu, jak i jej skład chemiczny (duża zawartość różnego rodzaju soli), powoduje przyspieszenie korozji zbrojenia szybowego, jak i innych elementów wyciągu szybowego. Na przykład przewodnik szybowy jest mocowany do dźwigara szybowego za pomocą złącza śrubowego. W celu zapewnienia odpowiedniego prześwitu między naprzeciwległymi przewodnikami stosuje się podkładki (rys. 4a). Podkładki te pod wpływem wody zawierającej sole, korodują (dolna część rysunku 4a) pęcznią i powstaje nierówność toru prowadzenia naczyń. Dlatego zaleca się stosowanie maksymalnie trzech podkładek, co ograniczy powstanie zbyt dużych nierówności przewodników w punktach mocowania i pochylenia przewodników między ich punktami podparcia [13].



Rys. 4. Schemat mocowania przewodnika do dźwigara

Fig. 4. Scheme of fastening the guide to the girder

W przypadku ograniczników zabezpieczających prowadniki przed przesunięciem w bok, korozja powoduje powstanie szczeliny między prowadnikiem a ogranicznikiem. Powoduje to przesunięcie prowadnika w bok i załamanie jego bocznej płaszczyzny (rys. 4b). Ponadto, następuje przyśpieszona korozja płaszczyzn roboczych prowadników. Powoduje to szybsze ścieranie prowadników i zwiększenie rozstawu naprzeciwległych ciągów prowadniczych. Należy wziąć pod uwagę także złącza śrubowe łączące prowadnik z dźwigarem szybowym. Gdy śruby nie są dokręcone z właściwym momentem określonym w [10], może dojść do poluzowania złącza, co wpłynie na zmianę ustawienia prowadnika względem dźwigara szybowego.

Najbardziej podatne na uszkodzenia i powstawanie nierówności są prowadniki drewniane. Prowadniki te w przypadku źle wyregulowanych prowadnic tocznych ulegają szybszemu ścieraniu niż prowadniki stalowe. Powstawanie nierówności torów prowadzenia naczyń powoduje także pęknięcie drewna i murszenie prowadników.

Zdarzają się przypadki uszkodzenia prowadników wtedy, gdy między prowadnicę ślizgową a płaszczyznę roboczą prowadnika dostają się przedmioty (kawałki skały, kawałki metalu).

Inną przyczyną powstawania nierówności w przypadku prowadników drewnianych jest zmiana warunków klimatycznych i wentylacyjnych w szybie (może nastąpić nadmierne spęcznienie lub ich wysuszenie).

4. WPLYW NIERÓWNOŚCI TORU PROWADZENIA NACZYŃ NA ZMIANĘ OBCIĄŻEŃ LIN WYCIĄGOWYCH

W celu określenia wpływu nierówności toru prowadzenia naczyń na obciążenie lin wyciągowych wprowadzono współczynnik skrzywienia toru prowadzenia naczyń [2], przy przekroczeniu którego następuje pobudzenie do powstania drgań w układzie naczynie – zbrojenie. Współczynnik ten ma postać

$$D = \frac{\Delta}{\alpha} \quad (5)$$

gdzie:

Δ – wartość oczekiwana amplitudy skrzywienia prowadników,

α – średnia matematyczna wartości luzów między płaszczyzną roboczą prowadników a prowadnicami ślizgowymi.

Autorzy [2], wykorzystując równania ruchu drgań poprzecznych z działającym wymuszeniem od nierównych prowadników, opisane powyżej, wykonali obliczenia, określając „dynamiczne oddziaływanie” na linę naczynia wyciągowego poruszającego się wzdłuż nierównego toru.

Zależności zostały wyznaczone dla poszczególnych faz ruchu naczynia wyciągowego, czyli:

- rozruchu naczynia wyciągowego,

- jazdy ustalonej,
- hamowania naczynia wyciągowego.

Odpowiednio:

- w chwili rozruchu maszyny wyciągowej ze stałym przyspieszeniem wartość amplitudy dynamicznego oddziaływania na linę zależy od wartości przyspieszenia a i praktycznie nie zależy od nierówności przewodników, zgodnie ze wzorem

$$P_D \approx 2Q \frac{a}{g} \quad (6)$$

gdzie:

- Q – ciężar naczynia,
- a – przyspieszenie naczynia,
- g – przyspieszenie ziemskie,

- w czasie równomiernego ruchu maszyny wyciągowej, w fazie jazdy ustalonej, wartość amplitudy dynamicznego oddziaływania na linę wynosi:

$$P_D \approx Q \left(\frac{a}{g} + 0,25 \right) \text{ dla } 2 < \frac{\Delta}{\delta} < 3 \quad (7)$$

$$P_D \approx Q \left(\frac{a}{g} + 0,50 \right) \text{ dla } \frac{\Delta}{\delta} \geq 3 \quad (8)$$

Wielkość P_D określa dynamiczne oddziaływanie i nie była dotychczas weryfikowana w praktyce.

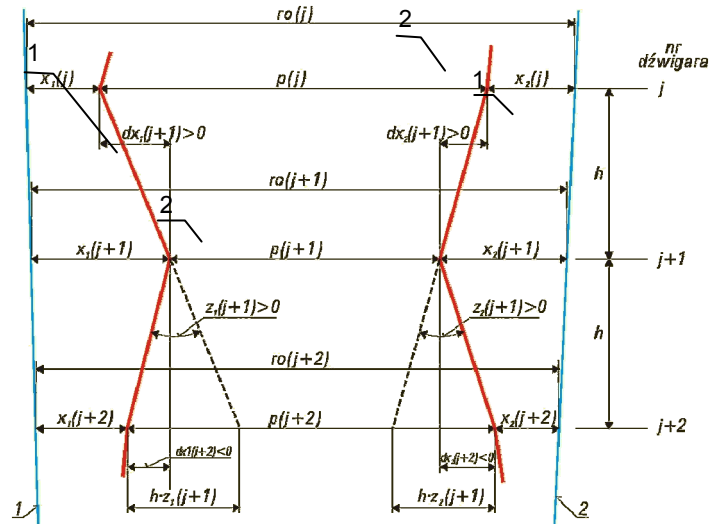
5. METODY POMIAROWE I ZASTOSOWANA APARATURA

W celu wykazania słuszności przedstawionych rozważań należało przeprowadzić równoczesne pomiary nierówności torów prowadzenia naczyń i zmian obciążeń lin nośnych wyciągów szybowych. Aby wykonać takie badania w warunkach przemysłowych zastosowana aparatura badawcza powinna charakteryzować się odpowiednią dokładnością i uniwersalnością zastosowania.

5.1. Pomiary nierówności torów prowadzenia naczyń

Do wyznaczenia nierówności torów prowadzenia naczyń wykorzystano metodę, która została opracowana w GIG i wdrożona w latach dziewięćdziesiątych XX wieku. Do chwili obecnej wykonano pomiary w ponad 200 wyciągach szybowych, co pozwoliło na udoskonalenie metody i przyjęcie definicji nierówności toru prowadzenia naczyń.

Zmontowany ciąg przewodniczy (zgodnie z obowiązującymi aktami prawnymi) stanowi tor złożony z odcinków prostych (rys. 5) o załamaniach na wysokości dźwigarów.



Rys. 5. Schemat fragmentu zarysów naprzeciwnych ciągów prowadniczych:
1 – linie odniesienia, 2 – linie zarysów ciągów prowadniczych

Fig. 5. Scheme of the fragment of the contours of opposite guide trains:
1 – reference lines, 2 – contour lines of trains of guides

Równanie określające sprzężenie kątów załamania [1] naprzeciwnych ciągów prowadników z luzami sumarycznymi ma postać

$$l_s(j+1) + \frac{h}{2}z_1(j+1) + \frac{h}{2}z_2(j+1) = sls(j+1) \quad (9)$$

gdzie sls – średni luz sumaryczny na poziomach sąsiednich dźwigarów,

$$sls(j+1) = \frac{1}{2}[l_s(j) + l_s(j+2)] \quad (10)$$

W czasie wykonywanych badań postanowiono zdefiniować pojęcie nierówności toru sztywnego prowadzenia naczyń.

Wiadomo, że naczynie wyciągowe w czasie ruchu jest prowadzone między dwoma ciągami prowadzenia naczyń. Ciągi te są zabudowane w szybie z pewną dokładnością. Zmiana kąta załamania czołowych płaszczyzn poszczególnych ciągów prowadniczych między punktami podparcia j i $j+1$ prowadnika powoduje zmianę odciętej poziomej. Elementem łączącym obydwie ciągi prowadnicze jest odległość między czołowymi płaszczyznami tych ciągów. Dla każdego wyciągu szybowego jest określona wartość projektowa tej odległości, która w warunkach eksploatacyjnych może się zmieniać w pewnych określonych przedziałach.

Zmiana któregokolwiek z kątów pochylenia lub ich równoczesna zmiana, powoduje zmianę odległości między czołowymi płaszczyznami ciągów przewodniczych. Dlatego miarę nierówności toru prowadzenia naczyń można zdefiniować jako

$$\Delta P = P_{\text{rzecz}} - P_{\text{nom}} \quad (11)$$

gdzie:

- ΔP – przyrost odległości między czołowymi płaszczyznami przewodników,
- P_{rzecz} – rzeczywista odległość między czołowymi płaszczyznami przewodników,
- P_{nom} – nominalna odległość między czołowymi płaszczyznami przewodników zgodna z dokumentacją, z uwzględnieniem dopuszczalnych wartości przyjętych dla obowiązujących przepisów.

Aby uzyskać dane do wyznaczenia zarysów torów prowadzenia naczyń i wyznaczenia nierówności przewodników, należy wykonać badanie ich prostoliniowości metodą GIG (urządzenie TS).

Do wyznaczenia nierówności ciągów przewodniczych i zmiany odległości między czołowymi płaszczyznami ciągów przewodników wykorzystuje się dane pomiarowe kątów pochylenia czołowych i bocznych płaszczyzn przewodników. Obliczenia wykonuje się za pomocą opracowanego wcześniej oprogramowania „TOR” napisanego w języku Pascal. Dokładność wskazań urządzenia została omówiona w pracy [9].

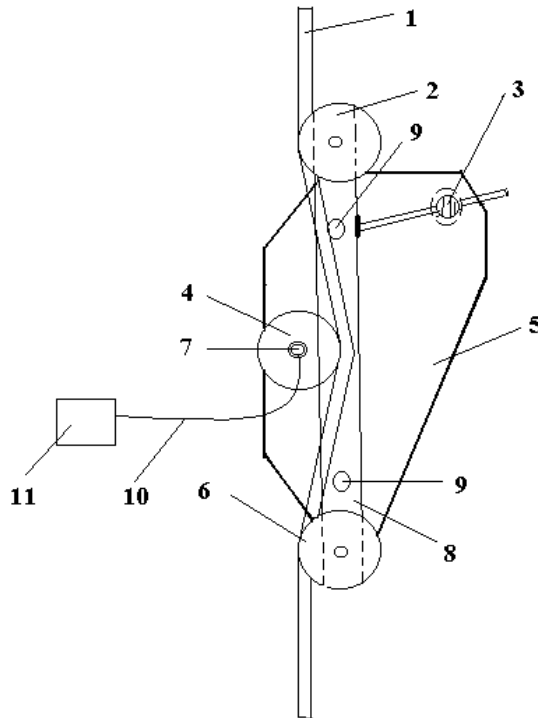
5.2. Pomiar sił w linach wyciągowych

Układ pomiarowy rejestrujący zmiany obciążeń lin wyciągowych nośnych, musi odpowiadać wymaganiom, jakimi są:

- możliwość zastosowania układu w różnych typach wyciągów szybowych,
- łatwość zabudowy i demontażu, aby ograniczyć czas prac przygotowawczych i ograniczyć zaangażowanie pracowników kopalni,
- odpowiednia dokładność taka, aby wartość niepewności nie przekraczała spodziewanych zmian siły w linie,
- możliwość wykorzystania układu w ewentualnych późniejszych badaniach przemysłowych.

Dlatego do realizacji postawionych zadań, opracowano całkowicie nowe urządzenie pomiarowe, którego schemat został przedstawiony na rysunku 6.

Działanie urządzenia polega na wytworzeniu siły naporu liny (1) na rolkę pomiarową (4) osadzoną na sworzniu pomiarowym (7). Do przetworzenia siły w linie na sygnał elektryczny zastosowano tensometry oporowe. Sworzeń pomiarowy z rolką (4) osadzony jest w korpusie (5) urządzenia. Rolki (2) i (6) osadzone na belce napinającej (8) służą do wytworzenia siły poziomej za pomocą układu napinającego (3). Po napięciu liny belka napinająca jest łączona z korpusem dynamometru (5), górną śrubą (9). Układ napinający (3) po połączeniu korpusu (5) z belką napinającą (8) jest demontowany.

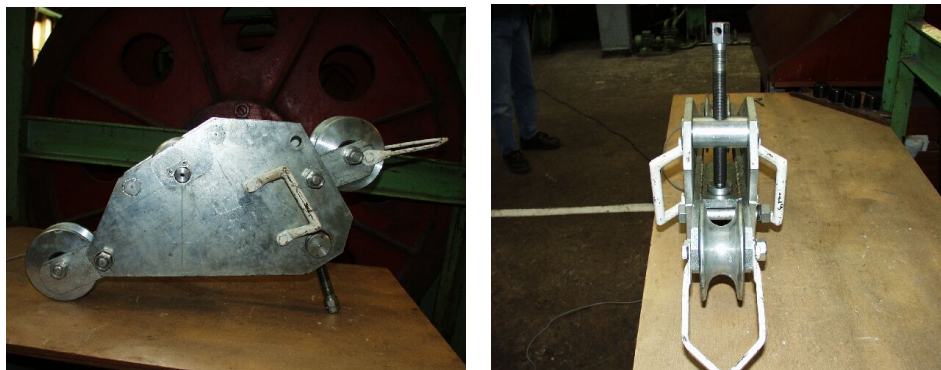


Rys. 6. Urządzenie do pomiaru sił w linach: 1 – lina, 2, 4, 6 – rolki, 3 – układ napinający, 5 – korpus, 7 – sworzeń pomiarowy, 8 – belka napinająca, 9 – śruba, 10 – kabel, 11 – rejestrator

Fig. 6. Apparatus for measurement of forces in the ropes: 1 – rope, 2, 4, 6 – rollers, 3 – tensioning system, 5 – housing, 7 – measuring pin, 8 – tensioning beam, 9 – bolt, 10 – cable, 11 – recorder

Rolka pomiarowa (4) oraz rolki (2) i (6) są wymienne. Ich parametry konstrukcyjne, jak promień rowka, są dobierane indywidualnie do średnicy liny. Urządzenie jest zabudowane nieruchomo w stosunku do liny, a zasilanie tensometrów i odbiór sygnałów odbywa się przez kabel (10). Wyniki pomiarów są zapisywane w pamięci rejestratora (11), który stanowi równocześnie układ zasilający dla tensometrów. Po zakończeniu pomiarów wyniki są przenoszone za pomocą szeregowego łącza RS – 232 do pamięci komputera klasy PC, z wykorzystaniem którego przeprowadza się analizę wyników badań.

Wartość siły podłużnej w linie otrzymywana jest jako iloczyn wartości siły poprzecznej działającej na rolkę pomiarową i współczynnika skalującego. Urządzenie jest skalowane w warunkach [12] laboratoryjnych z wykorzystaniem legalizowanej maszyny wytrzymałościowej dla różnych średnic liny; szacuje się również niepewność. Urządzenie przedstawiono na zdjęciu 1.



Fot. 1. Urządzenie do pomiaru sił w linach

Photo 1. Apparatus for measuring forces in the ropes

5.3. Ocena stanu prowadzenia naczyni w polskim przemyśle wydobywczym

W celu wytypowania obiektów do badań, dokonano analizy stanu prowadzenia naczyni w szybach polskiego przemysłu wydobywczego przeprowadzonych w latach 1996–2001. Stwierdzono, że stan prowadzenia naczyni w poszczególnych szybach przemysłu wydobywczego jest bardzo zróżnicowany. Zależy od rodzaju stosowanych materiałów, roku budowy, intensywności eksploatacji szybów, zmieniających się z biegiem lat przepisów dotyczących budowy i eksploatacji.

Podstawę wstępnej oceny stanowiły wykonane w Laboratorium Lin i Urzędach Szybowych w latach 1995–2001 wyniki badań prostoliniowości torów prowadzenia naczyni. Wykonano badania [8] ponad 200 wyciągów szybowych o bardzo zróżnicowanych parametrach technicznych.

Na ogół prowadzenie naczyni w szybach z drewnianym prowadzeniem naczyni jest gorsze niż wyposażone w prowadniki stalowe.

Im większy pionowy odstęp między dźwigarami, tym na ogół lepszy stan prowadzenia naczyni. Korzystny wpływ zwiększenia odstępów między dźwigarami na spójność jazdy naczynia był stwierdzany wielokrotnie [4, 5].

6. PODSUMOWANIE

W zależnościach opisujących siły, w miejscu mocowania do naczynia podnoszonej i opuszczanej gałęzi liny (3) i (4), nie został uwzględniony wpływ stanu prowadzenia naczyni na zmianę obciążeń lin wyciągowych nośnych. Wzory (7) i (8) natomiast, określające dynamiczne oddziaływanie na linę nie zostały dotychczas zweryfikowane w praktyce. Stwierdzono, że w celu wykazania związku między nierównościami toru prowadzenia naczyni a zmianą obciążeń lin wyciągowych nośnych, należy wykonać badania umożliwiające równoczesne określenie nierówności toru prowadzenia naczyni i zmiany obciążeń lin wyciągowych nośnych. Dotychczas takich badań nie wykonano. Badania te należy wykonać w szybach wyposażonych

w przewodniki stalowe o zwiększonym pionowym rozstępie podparcia przewodników oraz wyposażonych w przewodniki drewniane. Będą one polegały na modelowaniu nierówności ciągów przewodniczych bądź przeprowadzeniu regulacji przewodników, co spowoduje usunięcie nierówności ciągów przewodniczych. Wyniki badań umożliwią weryfikację wielkości tych zmian w odniesieniu do obliczonych teoretycznie. Zaproponowane wyposażenie aparaturowe pozwoli na zebranie danych, które zostaną wykorzystane do wykonania obliczeń, a następnie na uzupełnienie zależności (3) i (4).

Literatura

1. Bura L., Kawulok St.: *Określanie korekt nierówności i rozstawu torów prowadzenia naczyni wyciągowych w szybie*. Prace Naukowe GIG 1994 Nr 788.
2. Garkuszka N.G., Dwornikow W.I.: *Wlianie wzaimnodiejstwa padjomnowo sasuda s iskriwliennymi prowadnikami na naprzejnnoje sastajanije gołownowo kanata*. Stałnyje kanaty 1972 Tom 9 nr 9.
3. Hankus J.: *Budowa i własności mechaniczne lin stalowych*. Katowice, GIG 2000.
4. Hankus J., Szotłysik P.: *Pomiary obciążeń ruchowych lin nośnych urządzeń wyciągowych*. Prace GIG, Komunikat nr 731. Katowice 1983.
5. Kawulok St.: *Wpływ zwiększenia odstępów między dźwigarami szybowymi na obciążenie zbrojenia szybowego*. Prace GIG. Komunikat nr 550. Katowice 1972.
6. Kawulok St.: *Wpływ zwiększenia odstępów pomiędzy dźwigarami szybowymi na obciążenie zbrojenia szybowego*. Praca doktorska. Katowice 1969.
7. Kawulok St., Hankus J., Szot M.: *Doskonalenie metodyki i urządzenia do pomiaru odległości między naczyniem a przewodnikami oraz prostoliniowości prowadzenia naczyni w oparciu o wyniki badań i obserwacji ruchowych w szybach prowadzonych w okresie 1996–1998*. Praca realizowana w ramach działalności statutowej GIG 1998.
8. Kawulok S., Hankus J.: *Uzupełniające badania atestacyjne urządzenia TS-3 dotyczące dokładności, powtarzalności wskazań i jego funkcjonalności*. Dokumentacja pracy wykonywanej w ramach działalności statutowej. Symbol planistyczny I.1.10.2. 1997 rok. Praca niepublikowana.
9. PN-81/M-82056 Połączenia gwintowe stalowe. Dopuszczalne momenty dokręceń.
10. Protokół zgłoszenia wypadku w KWK Zabrze w 1961 roku.
11. Szot M., Hankus J.: *Wykonanie urządzenia do pomiaru zmian obciążeń w linach szybowych*. Dokumentacja pracy wykonywanej w ramach działalności statutowej. Symbol planistyczny II.1.2 2002 rok (praca niepublikowana).
12. Szot M.: *Wpływ nierówności sztywnego prowadzenia naczyni na zmianę obciążeń lin nośnych górniczych wyciągów szybowych*. Praca doktorska. Katowice 2003.
13. Wytyczne Ministerstwa Górnictwa i Energetyki z 28.12.1964 ustalające ogólne warunki techniczne wykonania zbrojenia szybowego z szybowymi przewodnikami stalowymi i drewnianymi. Departament Energo-Mechaniczny MM – 2/274/4603/64. Katowice 1964.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Jan Hankus

Robert Siata

ZASTOSOWANIE METODY PŁYTKIEJ REFRAKCJI SEJSMICZNEJ DO OKREŚLANIA WŁASNOŚCI FIZYCZNYCH WARSTW CZWARTORZĘDOWYCH

Streszczenie

Metodę płytkiej refrakcji stosuje się standardowo do obliczania granic litologicznych. W artykule przedstawiono możliwość jej dodatkowego wykorzystania do obliczania stałych materiałowych. Na podstawie wykonanych badań obliczono dynamiczne moduły sprężystości dla utworów czwartorzędowych, wykształconych w postaci piasków (suchych i zawodnionych), gliny i łu.

Najmniejsze wartości prędkości propagacji fal sejsmicznych stwierdzono w piaskach suchych ($V_p = 410$ m/s, $V_s = 280$ m/s), te same piaski ale zawodnione (poniżej poziomu zwierciadła wód gruntowych) charakteryzowały się prędkościami: $V_p = 1600$ – 2000 m/s, $V_s = 500$ – 600 m/s. Nieco większe prędkości (w stosunku do suchych piasków) zanotowano w przypadku glin: $V_p = 700$ m/s, $V_s = 500$ m/s.

Application of the method of shallow seismic refraction in determining physical properties of Quaternary strata

Abstract

The method of shallow refraction is commonly used to determine the lithological boundaries. The paper presents the possibility of its additional application to determine the material constants. On the basis of performed investigations, the dynamic moduli of elasticity were determined for Quaternary formations, developed in the form of sands (dry and watered), clay and silt.

The lowest values of propagation velocity of seismic waves were found in the dry sands ($V_p = 410$ m/s, $V_s = 280$ m/s). The same sands, but watered, (below the underground water table) were characterised by the velocities $V_p = 1600$ – 2000 m/s, $V_s = 500$ – 600 m/s. Slightly higher velocities (in relation to those of dry sands) were recorded in the case of clays $V_p = 700$ m/s, $V_s = 500$ m/s.

1. WSTĘP

Określenie własności fizycznych ośrodka skalnego, na przykład jego jakości i wytrzymałości, ma duże znaczenie w:

- budownictwie podziemnym i lądowym,
- prognozowaniu zagrożeń naturalnych,
- rozpoznawaniu budowy geologicznej,
- modelowaniu analitycznym.

Jedną z metod określania stałych materiałowych ośrodka jest metoda sejsmiczna, która umożliwia wyznaczanie parametrów dynamicznych (modułów sprężystości postaciowej i objętościowej, współczynnika Poissona, współczynnika dobroci) na podstawie zmierzonych prędkości propagacji podłużnych i poprzecznych fal sprężystych i znanej gęstości ośrodka.

Prędkości fal sprężystych i wyznaczone na ich podstawie stałe materiałowe wykorzystuje się, między innymi do: modelowania, obliczania współczynnika wzmocnienia (amplifikacji) drgań, klasyfikacji masywu skalnego na podstawie skal opracowanych przez, między innymi Bartona [1], Bieniawskiego [3], Bestyńskiego [2] (dla fliszu karpackiego).

Zaletą metody jest wyznaczanie parametrów dynamicznych skał *in situ*, w istniejących warunkach naprężeniowo-deformacyjnych, bez naruszania struktury ośrodka. Wadą jest mniejsza dokładność pomiarów (w porównaniu na przykład ze stosowaniem metody ultradźwiękowej) oraz całościowe traktowanie większej objętości masywu, bez możliwości wydzielania mniejszych fragmentów (przy prędkości fali sejsmicznej 4000 m/s i częstotliwości fali 200 Hz rozdzielczość przestrzenna metody wynosi 5–10 m).

2. KINEMATYCZNE PARAMETRY PROPAGACJI FAL SEJSMICZNYCH

Podstawą wyznaczania własności fizycznych ośrodka jest założenie, że zachowuje się on sprężysto w zakresie odkształceń wywołanych propagacją fal sprężystych. Z rozwiązania równania różniczkowego ruchu falowego w ośrodku sprężystym dla fal podłużnych i poprzecznych otrzymuje się ich prędkości wyrażone zależnościami [4]:

$$V_P = \sqrt{\frac{\lambda + 4G/3}{\rho}}$$

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

gdzie:

- V_P – prędkość fali podłużnej,
- V_S – prędkość fali poprzecznej,
- λ – moduł sprężystości objętościowej,
- G – moduł sprężystości postaciowej,
- ρ – gęstość ośrodka.

Fale podłużne w ośrodku izotropowym są falami kulistymi, w których ruch cząstek ośrodka jest zgodny z kierunkiem ich propagacji i polega na zmianie objętości ośrodka. Fale poprzeczne powodują zmianę postaci ośrodka, a ruch cząsteczek odbywa się w kierunku prostopadłym do kierunku rozchodzenia się drgań. Fale poprzeczne nie propagują w płynach ($G = 0$).

Prędkości fal podłużnych i poprzecznych są związane zależnością

$$V_P = V_S \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}}$$

Stała Poissona ν zmienia się w zakresie od 0 do 0,5, z czego wynika, że prędkość fal podłużnych jest zawsze większa od prędkości fal poprzecznych.

Dla typowych skał krystalicznych $v = 0,25$, co daje stosunek prędkości $k = V_P/V_S = 1,73$. Dla utworów luźnych stosunek ten zmienia się w zakresie od 3 do 12.

Znajomość prędkości propagacji fal podłużnych i poprzecznych pozwala na wyznaczanie dynamicznych stałych sprężystych, na przykład z następujących zależności [4]:

$$\lambda_d = \rho \left(V_P^2 - \frac{4V_S^2}{3} \right)$$

$$G_d = \rho V_S^2$$

$$E_d = \rho V_S^2 \frac{3k^2 - 4}{k^2 - 1}$$

$$\nu_d = 0,5 \frac{k^2 - 2}{k^2 - 1}$$

gdzie:

V_P – prędkość fali podłużnej,

V_S – prędkość fali poprzecznej,

$k = V_P/V_S$,

λ_d – dynamiczny moduł sprężystości objętościowej,

G_d – dynamiczny moduł sprężystości postaciowej,

E_d – dynamiczny moduł sprężystości,

ν_d – dynamiczny współczynnik Poissona,

ρ – gęstość ośrodka.

3. PŁYTKIE BADANIA REFRAKCYJNE

3.1. Dane ogólne

Warstwy górotworu, leżące najpłycej, utworzone są najczęściej z osadów trzecio- i czwartorzędowych oraz utworów zwietrzałych. Warstwa, w której prędkości fal sejsmicznych są najmniejsze, jest strefą małych prędkości (SMP); tworzą ją grunty nieskonsolidowane lub utwory zwietrzałe. Strefa ta charakteryzuje się małymi wartościami prędkości poniżej 1000 m/s, podczas gdy twarde podłoże charakteryzuje się prędkościami większymi od 1500 m/s (2000 m/s). Dodatkowym czynnikiem wpływającym na prędkość fal sejsmicznych w ośrodku jest poziom zwierciadła wód gruntowych. SMP charakteryzuje się wzrostem prędkości wraz z głębokością, lecz może również charakteryzować się jedną wartością prędkości. Przypadek taki występuje na przykład w warstwach piasków.

3.2. Metoda pomiaru

Przeprowadzono rozpoznanie prędkości fal sejsmicznych w warstwach zalegających nad twardym podłożem metodą płytkiej refrakcji. Na profilach sejsmicznych rozmieszczono 24 geofony w odległości co trzy metry. Falę sejsmiczną wzbudzano po obydwu stronach profilu w odległości 5 m od ostatniego geofonu, co umożliwiło uzyskanie hodografów zbieżnych.

Profile sejsmiczne zostały wykonane w następujących rejonach:

- Leśniaki (gmina Kleszczów),
- Chabielice,
- Stróża,
- Rząśnia.

Miejsca pomiarowe wybrane zostały w pobliżu otworów wiertniczych, których dane geologiczne były dostępne.

3.3. Interpretacja

Na podstawie analizy hodografów zbieżnych wyznaczono prędkości i miąższości poszczególnych warstw metodą średnich arytmetycznych (sposób t_0). Metoda ta jest powszechnie stosowana do interpretacji hodografów związanych z granicami refrakcyjnymi, których promień krzywizny jest znacznie większy od głębokości występowania granicy sejsmicznej. W metodzie tej pomijane jest zjawisko przenikania fal i nie może być ona stosowana przy gwałtownych zmianach prędkości granicznych wzdłuż profilu sejsmicznego.

3.4. Wyniki pomiarów

Rejon Leśniaki (Ujęcie Stanisławów)

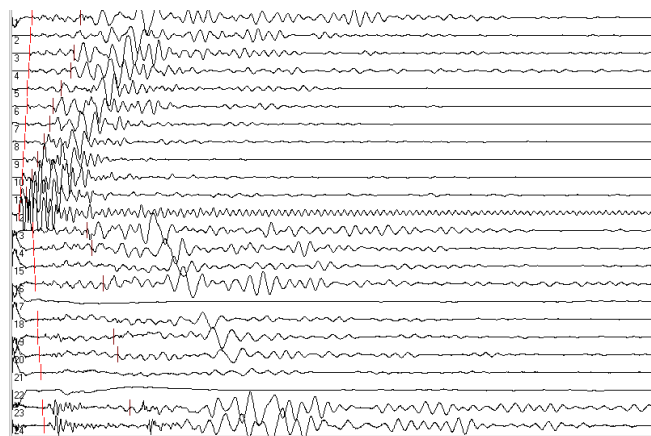
Dane z otworu PVII/VIII-8:

- 0–2 m – piasek żółty i rdzawy, drobnoziarnisty, średnio wysortowany,
- 2–3 m – glina rdzawobrazowa, piaszczysta,
- 3–17 m – glina zwałowa, ciemnoszara z pojedynczymi otoczkami,
- 17–27 m – piasek jasnoszary, średnioziarnisty, źle wysortowany,
- 27–37 m – mułek niebieskoszary.

MODEL SEJSMICZNY OŚRODKA

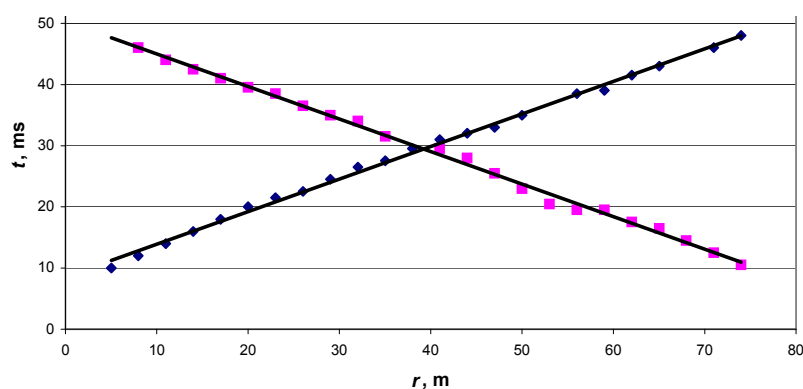
Na profilu sejsmicznym nie uzyskano fal refrakcyjnych typu P, prędkość fali tego typu jest stała i wynosi około 1880 m/s. Było to prawdopodobnie spowodowane zawodnieniem piasku znajdującego się na nieprzepuszczalnej glinie. W występującej sytuacji geologicznej nie obserwowano wzrostu prędkości z głębokością (w warstwach przypowierzchniowych), a warstwa zawodnionego piasku tworzyła swoisty ekran sejsmiczny.

Prędkość poprzecznej fali sejsmicznej zmieniała się od około 320 m/s w przypadku utworów najpłycej zalegających do 440 m/s w przypadku zalegających głębiej, które należy korelować z glinami. Przykładowe sejsmogramy oraz hodografy zbieżne fali P dla tego rejonu przedstawiają rysunki 1 i 2. Wyniki przedstawiono w tablicy 1.



Rys. 1. Przykładowe sejsmogramy zarejestrowane wzdłuż profilu w miejscowości Leśniaki

Fig. 1. Exemplary seismograms recorded along the profile at Leśniaki location



Rys. 2. Przykładowe hodografy zbieżne fali P (brak fal refrakcyjnych z większych głębokości):
 r – odległość od punktu wzbudzenia, t – czas

Fig. 2. Exemplary convergent hodographs of wave P (lack of refraction waves from greater depths),
 r – distance from the point of excitation, t – time

Tablica 1. Wyniki pomiarów sejsmicznych

Numer warstwy	Prędkość fali		Dynamiczny moduł sprężystości			Dynamiczny współczynnik Poissona
	poprzecznej V_P , m/s	podłużnej V_S , m/s	objętościowej K_d , GPa	postaciowej G_d , GPa	E_d , GPa	
1	1880	320	9,1	0,3	0,9	0,48
2	1880	440	8,9	0,5	1,5	0,47

Rejon Chabielice (Młynki)

Dane z otworu Ps 20A

0–7 m – glina zwałowa szara z otoczkami,

7–13 m – piasek jasnoszary z domieszką żwiru,
 13–15 m – glina zwałowa szara z otoczkami,
 15–21 m – żwir różnoziarnisty,
 21–53 m – piasek jasnoszary drobnoziarnisty z domieszką żwiru.

MODEL SEJSMICZNY OŚRODKA

Na profilu nie uzyskano wyraźnej fali refrakcyjnej typu P, co było prawdopodobnie spowodowane brakiem wzrostu prędkości z głębokością i izolacją płytkich piasków przez gliny oraz brakiem ich zawodnienia.

Prędkość poprzecznej fali sejsmicznej zmieniała się od około 360 m/s dla utworów najpłycej zalegających do 510 m/s. Wyniki przedstawia tablica 2.

Tablica 2. Wyniki pomiarów sejsmicznych

Numer warstwy	Prędkość fali		Dynamiczny moduł sprężystości			Dynamiczny współczynnik Poissona
	poprzecznej V_p , m/s	podłużnej V_s , m/s	objętościowej K_d , GPa	postaciowej G_d , GPa	E_d , GPa	
1	515	360	0,24	0,36	0,7	0,006
2	695	510	0,37	0,7	1,3	–

Warstwę pierwszą stanowiła glina, natomiast drugą – glina lub piasek, prawdopodobnie częściowo zawodniony. Dla warstwy drugiej współczynnik Poissona traci sens fizyczny. Jest to prawdopodobnie wynikiem błędu wyznaczenia prędkości fali poprzecznej.

Rejon Stróża (Wola Wydrzana)

Dane z otworu PVI/VII-4-1

0–3 m – glina ciemnożółta, piaszczysta,
 3–12 m – piasek żółty drobnoziarnisty,
 12–33 m – piasek szary, średnioziarnisty,
 23–40 m – ił szaroniebieski, piaszczysty.

MODEL SEJSMICZNY OŚRODKA

Na profilu sejsmicznym uzyskano wyraźną falę refrakcyjną typu P związaną z zawodnionymi piaskami (poziom wód gruntowych).

Prędkość poprzecznej fali sejsmicznej zmieniała się od około 300 m/s dla utworów najpłycej zalegających do 640 m/s dla iłów. Wyniki przedstawia tablica 3.

Tablica 3. Wyniki pomiarów sejsmicznych

Numer warstwy	Prędkość fali		Dynamiczny moduł sprężystości			Dynamiczny współczynnik Poissona
	poprzecznej V_p , m/s	podłużnej V_s , m/s	objętościowej K_d , GPa	postaciowej G_d , GPa	E_d , GPa	
1	580	310	0,46	0,21	0,56	0,3
2	2030	495	8,4	0,54	1,6	0,47
3	2030	640	7,9	0,9	2,6	0,44

Rejon Rząśnia (Ujście Rząśnia)

Dane z otworu P_{RZ}-1

0–19 m – piasek szarobrazowy i szarobezowy,

19–20 m – glina,
 20–24 m – piasek jasnoszary,
 24–39 m – piasek.

MODEL SEJSMICZNY OŚRODKA

Na profilu sejsmicznym uzyskano wyraźną falę refrakcyjną typu P związaną z zawodnionymi piaskami (poziom wód gruntowych).

Prędkość poprzecznej fali sejsmicznej wynosiła 285 m/s dla utworów najpłycej zalegających (piasek suchy) i 565 m/s dla piasków zawodnionych. Wyniki przedstawia tabela 4.

Tablica 4. Wyniki pomiarów sejsmicznych

Numer warstwy	Prędkość fali		Dynamiczny moduł sprężystości			Dynamiczny współczynnik Poissona
	poprzecznej V_p , m/s	podłużnej V_s , m/s	objętościowej K_d , GPa	postaciowej G_d , GPa	E_d , GPa	
1	410	280	0,14	0,17	0,37	0,063
2	1685	565	5,3	0,7	2,0	0,44

Warstwa pierwsza to piasek suchy, natomiast druga to piasek zawodniony (poziom wód gruntowych).

4. WNIOSKI

1. Badania sejsmiczne metodą płytkiej refrakcji wykazały, że można określić wartości dynamiczne modułów sprężystości utworów czwartorzędowych, wykształconych w postaci piasków (suchych i zawodnionych), gliny i iłu.
2. Wartości prędkości propagacji fal sejsmicznych są wyraźnie zróżnicowane. Najmniejsze wartości stwierdzono w przypadku piasków suchych ($V_p = 410$ m/s, $V_s = 280$ m/s), natomiast te same piaski zawodnione (poniżej poziomu zwierciadła wód gruntowych) charakteryzowały się prędkościami: $V_p = 1600$ – 2000 m/s, $V_s = 500$ – 600 m/s. Nieco większe prędkości (w stosunku do suchych piasków) zanotowano dla glin: $V_p = 700$ m/s, $V_s = 500$ m/s.
3. Pomiary terenowe wykazały, że badanie własności warstw czwartorzędowych metodą płytkiej refrakcji jest utrudnione z kilku powodów, a mianowicie:
 - często prędkość fal sejsmicznych nie wzrasta znacząco z głębokością (brak fal refrakcyjnych),
 - w warstwach utworów piaszczystych rozkład prędkości fal jest zależny przede wszystkim od położenia zwierciadła wód gruntowych, poniżej którego nie zawsze można wyróżnić następne warstwy,
 - wyznaczonych dynamicznych modułów sprężystości nie można porównać ze statycznymi, gdyż dla skał nieskonsolidowanych nie można ich wyznaczyć na próbkach. Mogą one być użyte do modelowań i obliczeń wytrzymałościowych, opisując grunty nieskonsolidowane jako masyw.

4. Na podstawie wyznaczonych prędkości fal sejsmicznych i modułów dynamicznych w utworach czwartorzędowych łatwo wydzielić można strefy zawodnienia. Dla niektórych utworów uzyskiwane wartości współczynnika Poissona tracą sens, jest to prawdopodobnie efekt wyznaczenia prędkości fali poprzecznej z dużym błędem.

Literatura

1. Barton N., Loset F., Lien R., Lunde J.: *Application of the Q-system in design decision*. Bergman M. (ed.). Subsurface Space 1980 Vol. 2, s. 553-561.
2. Bestyński Z.: *Ocena własności geotechnicznych fliszu karpackiego na podstawie badań geofizycznych*. Kraków, AGH 1998 (Praca doktorska).
3. Bieniawski Z.T.: *Engineering rock mass classification*. New York, Wiley 1989.
4. Fajkiewicz Z. (red.): *Zarys geofizyki stosowanej*. Warszawa, Wydaw. Geologiczne 1972.
5. Gustkiewicz J. (red.): *Własności fizyczne wybranych skał karbońskich Górnośląskiego Zagłębia Węglowego*. Kraków, IGSMiE PAN 1999.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Józef Dubiński

Jan Wachowicz, Klaudiusz Wypior

SAMOZAGRZEWANIE PRODUKTÓW ŚCIERANIA OKŁADEK GUMOWYCH TAŚM PRZENOŚNIKOWYCH

Streszczenie

Praktyka ubiegłych lat wykazała, że przenośniki taśmowe stanowią jedną z głównych przyczyn pożarów egzogenicznych w kopalniach. Główny element przenośnika – taśma przenośnikowa – może być zarówno przyczyną pożaru, jak i powodem jego rozprzestrzeniania się. Aby zminimalizować to niebezpieczeństwo, w górnictwie podziemnym stosuje się wyłącznie trudno palne taśmy przenośnikowe. Pomimo tego, jak również stosowania wielu dodatkowych środków bezpieczeństwa, zidentyfikowane zostało nowe zagrożenie związane z pracą przenośników, polegające na tworzeniu się, a następnie samozagrzewaniu produktów ścierania bieżników taśm przenośnikowych. Ściery z bieżników taśm przenośnikowych, w warunkach pracy pod ziemią, powstają najczęściej na skutek tarcia, co powoduje podwyższenie ich temperatury już podczas samego procesu ich powstawania. Zważywszy na konieczność ciągłego przewietrzania chodników kopalnianych, związaną z wymuszonym ruchem powietrza wokół nagrzanego ściery, niebezpieczeństwo zaistnienia gwałtownej reakcji z wydzieleniem ciepła jest duże. Dotychczas nie stwierdzono zapalenia się ściarów gumowych płomieniem, zaobserwowano jednak występowanie wysokiej temperatury, do której nagrzewały się ściery (ok. 600°C). Ze względu na fakt, że w warunkach naturalnych następuje bezpośredni kontakt rozgrzanego ściery z węglem, istnieje poważne niebezpieczeństwo powstania pożaru.

Przedstawione w artykule badania stanowią próbę wyjaśnienia zjawiska samozagrzewania produktów ścierania bieżników gumowych taśm przenośnikowych. Omówiono wyniki analizy termicznej (DTA) oraz badań samozagrzewania ściarów trzech rodzajów mieszanek gumowych stosowanych do produkcji taśm przenośnikowych. Dowiedziono istotnego wpływu rozdrobnienia materiału używanego na bieżniki taśm na jego skłonność do samozagrzewania (niezależnie od zastosowanych środków uniepalniających). Ponadto, określono wpływ temperatury otoczenia oraz atmosfery na przebieg zjawiska samozagrzewania ściarów gumowych oraz wyznaczono parametry krytyczne samozagrzewania. Temperatura krytyczna ściarów okładek gumowych taśm przenośnikowych oznaczona według normy PN-93/G-04558 wynosi: mieszanka MK (kauczuk chloroprenowy) 225°C, mieszanka GB (kauczuk nitrylowy) 215°C, mieszanka PZ (kauczuk butadienowo-styrenowy) 225°C. Badania temperatury krytycznej wykonano, stosując trzy różne szybkości przepływu powietrza (10, 25, 40 dm³/h). Wykazano możliwość zagrożenia pożarowego wynikającego ze skłonności do samozagrzewania produktów ścierania okładek taśm przenośnikowych stosowanych w kopalniach węgla kamiennego.

Self-heating of rubber belts abrasion products of belt-conveyors

Summary

As practice has proved in the last years, conveyor belts are one of the main reasons of exogenous fires in collieries. The belts as main part of a conveyor, often working in hard conditions, may be both the reason of fires and the path of its spreading. In order to minimise this kind of hazard there are exclusively fire-resistant conveyor belts used in underground mining. Despite that, and application in collieries many additional safeguards, new threat connected with operation of conveyors have been defined. This is formation and self-heating of rubber belts abrasion products. Abrasion products of used in underground mining conveyor belts usually result from friction that is accompanied by increasing temperature of those

products. Considering the necessity of continuous ventilation of mining galleries which is connected with forced air circulation around the hot abrasion products, there is a big danger of arising a rapid heat emission reaction. Although materials testing have not proved ignition of the abrasion products so far, however high temperatures (about 600°C) up to which they have become heated have been observed. Because of the fact that underground there is a direct contact of abrasion products with coal the danger of arising fire is high.

Research works presented in this article are to explain the effect of self-heating of rubber belts abrasion products of conveyor belts. Results of the thermal analysis (DTA) as well as of material testing of self-heating of three kinds of rubber compounds applied in conveyor belts production have been discussed. Substantial influence of refinement of the material used for conveyor belts production and its inclination to self-heating (irrespective of added incombustible components) has been proved. Moreover, influence of ambient and atmospheric temperatures on the course of self-heating effect of rubber abrasion products as well as critical parameters of self-heating have been defined. Critical temperatures of rubber belts abrasion products of conveyor belts, fixed by device, in accordance with Polish Standard PN-93/G-04558, amount to: 225°C in case of the MK compound (chloroprene rubber), 215°C in case of the GB compound (nitrile rubber) and 225°C in case of the PZ compound (styrene-butadiene rubber). Three different air flow velocities (10, 25 and 40 dm³/h) have been applied in measurements of the critical temperature. Possibility of fire hazard resulting from the inclination to self-heating of the rubber belts abrasion products in collieries has been proved.

1. WSTĘP

Wiele materiałów wykazuje skłonność do samozagrzewania i różne mogą być jego przyczyny. W literaturze samozagrzewanie jest określane jako zjawisko wzrostu temperatury, zachodzące w materiale w wyniku procesów chemicznych lub biologicznych, bez dopływu ciepła z zewnątrz [7]. W przypadku procesów biologicznych wzrost temperatury materiałów jest wynikiem efektów cieplnych towarzyszących rozwijającym się mikroorganizmom. Jest to częste zjawisko zwłaszcza na terenach wiejskich, gdzie notowane są przypadki pożarów dużych składowisk siana, słomy i innych podobnych materiałów. Zjawisko to zachodzi najczęściej przy odpowiednio dużej wilgotności materiału podlegającego samozagrzewaniu oraz w temperaturze sprzyjającej rozwojowi mikroorganizmów. Może być ono również inicjatorem samozagrzewania o podłożu chemicznym. Temat ten jednak wykracza poza ramy niniejszego artykułu i nie będzie szerzej omawiany.

Drugą przyczyną zjawiska samozagrzewania są reakcje chemiczne zachodzące w sprzyjających warunkach, do których należy odpowiednia temperatura, dostęp tlenu oraz oczywiście materiał wykazujący skłonność do samozagrzewania w postaci, stanie i ilości sprzyjającej jego rozwojowi. Przypadki samozagrzewania materiałów obserwuje się najczęściej podczas magazynowania różnego rodzaju towarów, czy też przewożenia ich na duże odległości, na przykład drogą morską [5]. W związku z niebezpieczeństwem pożaru, stosuje się wiele środków zapobiegawczych, między innymi ograniczanie ilości przechowywanych towarów w jednym opakowaniu zbiorczym, monitoring temperatury i wilgotności w pomieszczeniach magazynowych, jak również ograniczanie czasu przechowywania danego towaru bez jego przeładowania. Wprowadzanie specjalnych środków bezpieczeństwa przeciwpożarowego było spowodowane wystąpieniem szeregu udokumentowanych przypadków pożarów,

spowodowanych samozagrzewaniem materiału. Jako przykład można podać pożar magazynów, w których przechowywano między innymi rękawiczki lateksowe, pożary składowisk starej odzieży i szmat nasączonych olejem i innych [5]. Nierzadkie są także, szczególnie na terenach eksploatacji górniczej, pożary hałd, jak również pożary egzogeniczne w kopalniach, powstałe na skutek samozagrzewania węgla, obszernie omówione, między innymi w publikacjach [10, 15].

2. ZAGROŻENIE POŻAROWE W KOPALNIACH WĘGLA KAMIENNEGO ZWIĄZANE Z TRANSPORTEM TAŚMOWYM

Kopalnie węgla kamiennego są szczególnym miejscem pod względem zagrożenia pożarowego. Trudne warunki pracy i znacznie utrudniona droga ucieczki powodują, że nawet najmniejszy pożar może doprowadzić do groźnych konsekwencji w postaci ofiar w ludziach i dużych strat materialnych.

Często źródło pożaru pod ziemią stanowią przenośniki taśmowe, które dzięki licznym zaletom technicznym są powszechnie stosowane do transportu urobku w górnictwie podziemnym. Przenośniki taśmowe, jak wykazuje praktyka, mogą być przyczyną powstawania i rozprzestrzeniania pożaru. Zasadniczo wynika ona z dwóch powodów związanych z charakterem pracy przenośnika taśmowego. Po pierwsze, przenośniki stosowane bywają często w ekstremalnych warunkach, co skutkuje skłonnością do zatarć części ruchomych przenośnika (bębny napędowe, zwrotne, krążniki) i tworzenia się miejscowych źródeł ciepła. Ponadto, taśma przenośnikowa, stanowiąca element przenośnika wykonany z materiału potencjalnie palnego, rozciąga się na wiele kilometrów chodnika i może być dobrym nośnikiem ognia. Sytuacje takie wielokrotnie występowały w historii górnictwa podziemnego, co spowodowało konieczność stosowania trudno palnych taśm przenośnikowych [4, 16]. Wymaganie to obowiązuje prawie we wszystkich krajach wydobywających węgiel kamienny. W Polsce w 1992 roku również wprowadzono obowiązek stosowania trudno palnych taśm przenośnikowych, dla których kryteria trudnopalności wprowadzono w krajach Unii Europejskiej już w 1974 roku [3]. Według ogólnie przyjętych kryteriów za trudno palną uznaje się taką taśmę, która nie ulega zapaleniu od ciepła powstającego w wyniku tarcia taśmy o elementy konstrukcji przenośnika, a jeżeli znajdzie się w środowisku pożaru (ognisko pożarowe, powstałe z przyczyny niezależnej od pracy przenośnika) taśma nie powoduje jego rozprzestrzeniania się.

Pomimo rygorystycznego egzekwowania wytycznych zawartych w normach dotyczących trudnopalności taśm i zaostrzonych środków bezpieczeństwa ciągle występuje jednak zagrożenie związane ze stosowaniem taśm przenośnikowych. Obserwacje pracy przenośników taśmowych i wykonane w Głównym Instytucie Górnictwa wstępne badania dowiodły skłonności do samozagrzewania się produktów ścierania bieżników gumowych taśm przenośnikowych (nazywanych w dalszej części artykułu „ścierami”) uznanych oficjalnie za trudno palne i spełniających obowiązujące w górnictwie kryteria trudnopalności [8, 13]. Zjawisko to odkryte zostało przypadkowo podczas dochodzenia przyczyn jednego z pożarów podziemnych. W zeznaniach

górników pojawiły się wówczas opisy zauważonych niewielkich kopców usypanych ze ścieru taśm w okolicy przenośnika taśmowego. W niektórych przypadkach stwierdzono ich żarzenie się. Badania [13] nie dowiodły zapalenia się ścierów gumowych płomieniem z uwagi na ich skład chemiczny (obecność dodatków zmniejszających palność), zaobserwowano jednak występowanie wysokiej temperatury, do której nagrzewały się ściery. Ze względu na fakt, że w warunkach naturalnych następuje bezpośredni kontakt rozgrzanego ścieru z węglem, istnieje poważne niebezpieczeństwo powstania pożaru.

3. SAMOZAGRZEWANIE ŚCIERÓW

Spośród wielu opracowań, w których opisano samozagrzewanie materiałów, najczęściej spotykane są prace dotyczące samozagrzewania węgla, w mniejszym stopniu innych palnych materiałów organicznych [2, 6, 10, 14, 15]. Brak również w literaturze światowej doniesień na temat omawianej w niniejszym artykule problematyki samozagrzewania ścierów bieżników taśm przenośnikowych. Należy jednak zauważyć, że istnieje wiele podobieństw w mechanizmie samozagrzewania ścierów gumowych i węgla. W związku z tym, wiele pojęć opisujących samozagrzewanie węgla znajduje również zastosowanie przy opisie omawianego zagadnienia. Należą do nich między innymi temperatura krytyczna czy masa krytyczna, opisujące graniczne wartości masy i temperatury, powyżej których, w danych warunkach, materiał gwałtownie będzie się nagrzewał bez dopływu ciepła z zewnątrz. Do zainicjowania procesu samozagrzewania jest konieczna pewna minimalna ilość materiału oraz wstępne dostarczenie energii z zewnątrz, przy zapewnieniu wystarczającej ilości tlenu. Wynika to z mechanizmu samozagrzewania, które w omawianym przypadku jest wynikiem reakcji utleniania. Ilość dostarczanej energii z zewnątrz w celu zainicjowania procesu jest uzależniona od wielu czynników, do których należą: ciepło właściwe materiału, przewodnictwo cieplne, energia aktywacji, warunki otoczenia i inne. Materiał wykazujący skłonność do samozagrzewania powinien na tyle dobrze przewodzić ciepło, aby mogło ono rozprzestrzeniać się w jego wnętrzu, a zarazem być na tyle dobrym izolatorem, aby ciepło nie było tracone przez przekazywanie go do otaczającego środowiska. Niezwykle istotne jest również zapewnienie odpowiedniej ilości materiału, która gwarantuje, że ciepło zgromadzone w nim nie będzie w łatwy sposób przekazywane do otoczenia. Materiał taki powinien mieć strukturę umożliwiającą łatwą penetrację tlenu, co w przypadku ścierów gumowych nie stanowi problemu. Wiąże się z tym konieczność zapewnienia dostępu odpowiedniej ilości powietrza, z którym jest dostarczana wymagana ilość tlenu, nie powodując obniżenia temperatury. Po spełnieniu powyższych warunków możliwe jest miejscowe nagrzewanie się materiału na skutek utleniania się pojedynczych jego cząsteczek. Każda z takich egzotermicznych reakcji dostarcza niewielkiej ilości ciepła, które gromadząc się w masie materiału, przyspiesza przebieg kolejnych etapów reakcji. Dzięki takiej reakcji łańcuchowej istnieje możliwość stosunkowo szybkiego wzrostu temperatury, która w sprzyjających warunkach, w przypadku ścierów gumowych, osiąga nawet

kilkaset stopni, co z łatwością może doprowadzić do powstania pożaru [13]. Przystępując do rozwiązania tego niewątpliwie ciekawego i ważnego problemu postanowiono przeprowadzić dwa rodzaje badań. W pierwszym etapie wykonano analizę termiczną materiału, a następnie dokonano badań samozagrzewania, przystosowując do tego celu znormalizowaną metodę badania skłonności do samozagrzewania węgla [12].

3.1. Wybór materiału do badań

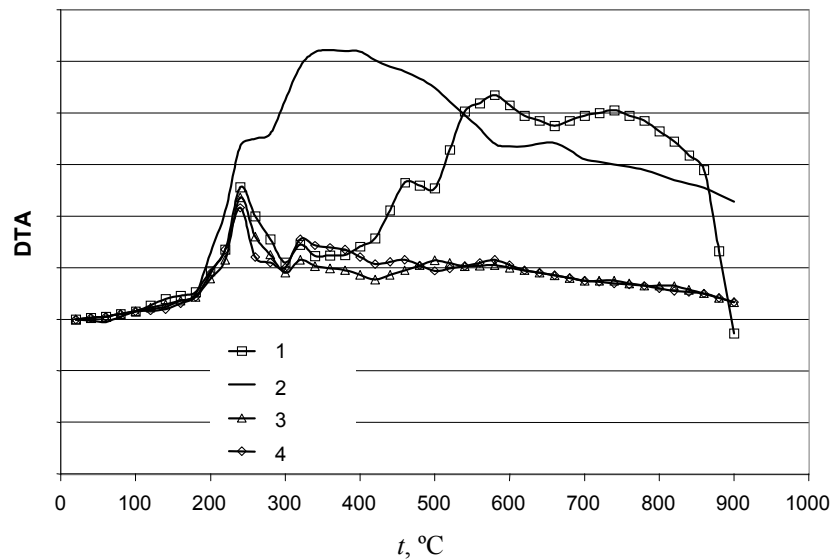
Materiały stosowane na bieżniki taśm przenośnikowych można podzielić na dwie grupy. Są to mieszanki gumowe otrzymywane z różnego rodzaju kauczuków oraz plastyfikowany polichlorek winylu [7]. W artykule zostały omówione jedynie materiały gumowe; polichlorek winylu nie ulega samozagrzewaniu w warunkach pracy przenośników taśmowych [8, 13].

Do badań wybrano trzy rodzaje mieszanek gumowych powszechnie stosowanych w produkcji bieżników taśm przenośnikowych. Oznaczono je symbolami: MK, GB i PZ. Mieszanka MK zawiera kauczuk chloroprenowy, a mieszanka GB kauczuk nitylowy. Są one trudno palne i uznane zostały za reprezentatywny materiał, stosowany do wytwarzania większości trudno palnych taśm przenośnikowych. Mieszanka gumowa PZ nie ma właściwości trudno palnych i otrzymana była na bazie kauczuku butadienowo-styrenowego. Służy ona do produkcji taśm przenośnikowych ogólnego przeznaczenia, do stosowania w warunkach niewymagających użycia taśm trudno palnych i została wybrana jako materiał porównawczy.

Próbki do badań w postaci ściery wykonano przy użyciu szlifierki wyposażonej w metalową tarczę do szlifowania, produkcji firmy Bosch, oznaczonej symbolem HM CT. Pozostałe próbki wycięto ręcznie nożem technicznym.

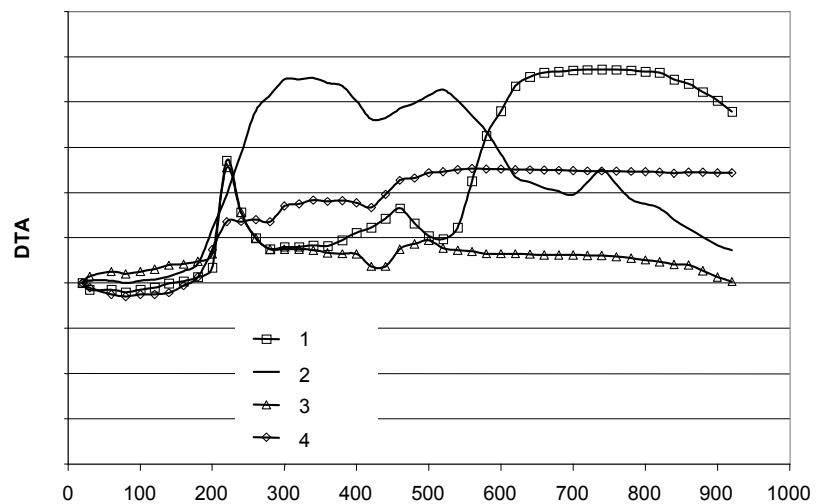
3.2. Analiza termiczna mieszanek gumowych stosowanych na okładki taśm przenośnikowych

Różnicowa analiza termiczna (DTA) jest techniką badawczą pozwalającą na określenie efektów cieplnych zachodzących w materiale podczas jego ogrzewania. Polega ona na pomiarze różnicy temperatury między próbką a substancją stanowiącą wzorzec, rejestrowanej w funkcji czasu lub temperatury [9, 11]. Analiza termiczna jest od wielu lat stosowana w Głównym Instytucie Górnictwa jako metoda pozwalająca na określenie podstawowych parametrów opisujących odporność termiczną materiałów. Metodą tą posłużono się również w pierwszych próbach badania zjawiska samozagrzewania startych okładek taśm przenośnikowych [13], jak również w badaniach przedstawionych w niniejszym artykule. Badania wykonano derywatografem typu MOM OD 102, przy zastosowaniu identycznych parametrów jak w przypadku wspomnianych już wcześniej badań okładek taśm przenośnikowych. Badania termiczne wzorcowych mieszanek gumowych, przeznaczonych na okładki taśm przenośnikowych, zostały wykonane w atmosferze powietrza i azotu, a próbki badanych materiałów przygotowano zgodnie z opisem podanym w poprzednim rozdziale. Wyniki badań w postaci wykresów obrazujących przebieg krzywych DTA przedstawiono na rysunkach 1–3.



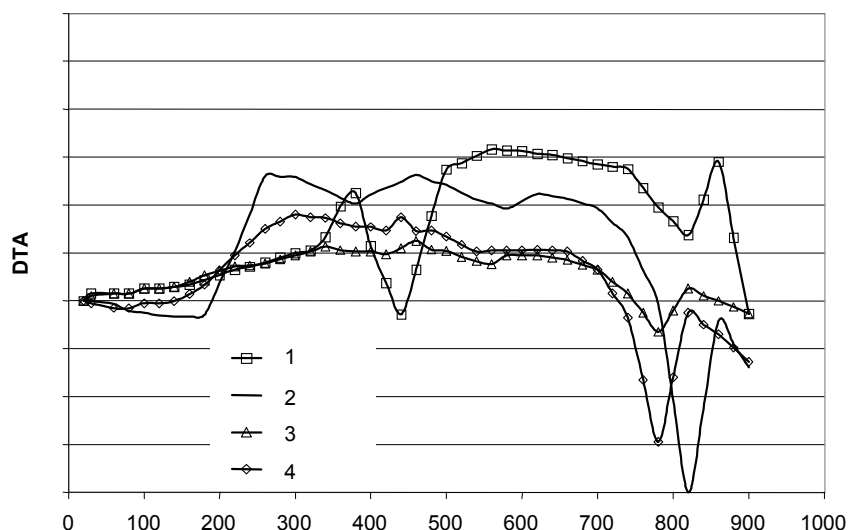
Rys. 1. Krzywe DTA ścieru gumy MK i gumy MK uzyskane w atmosferze powietrza i azotu: t – temperatura, 1 – guma MK, powietrze, 2 – ścier MK, powietrze, 3 – guma MK, azot, 4 – ścier MK, azot

Fig. 1. DTA curves of ground MK rubber and MK rubber in the atmosphere of air and nitrogen: t – temperature, 1 – MK rubber, air, 2 – ground MK rubber, air, 3 – MK rubber, nitrogen, 4 – ground MK rubber, nitrogen



Rys. 2. Krzywe DTA ścieru gumy GB i gumy GB uzyskane w atmosferze powietrza i azotu: t – temperatura, 1 – guma GB, powietrze, 2 – ścier GB, powietrze, 3 – guma GB, azot, 4 – ścier GB, azot

Fig. 2. DTA curves of ground GB rubber and GB rubber in the atmosphere of air and nitrogen: t – temperature, 1 – GB rubber, air, 2 – ground GB rubber, air, 3 – GB rubber, nitrogen, 4 – ground GB rubber, nitrogen



Rys. 3. Krzywe DTA ścieru gumy PZ i gumy PZ uzyskane w atmosferze powietrza i azotu: t – temperatura, 1 – guma PZ, powietrze, 2 – ścier PZ, powietrze, 3 – guma PZ, azot, 4 – ścier PZ, azot

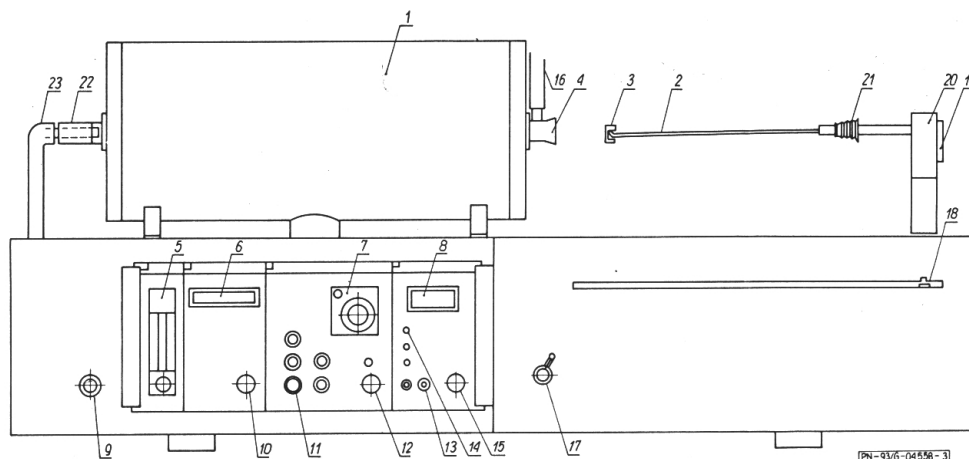
Fig. 3. DTA curves of ground PZ rubber and PZ rubber in the atmosphere of air and nitrogen: t – temperature, 1 – PZ rubber, air, 2 – ground PZ rubber, air, 3 – PZ rubber, nitrogen, 4 – ground PZ rubber, nitrogen

3.3. Omówienie wyników analizy termicznej

Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że rozkład termiczny badanych próbek, niezależnie od ich postaci i atmosfery, w której przeprowadzono badania, rozpoczynał się w granicach temperatury 160–180°C. W tym przedziale temperatury zaobserwowano wzrost krzywych DTA (rys. 1–3), jak również początek ubytku masy. Mniejsze efekty cieplne zarówno w przypadku próbek nierozdrobnionych, jak i w postaci ścieru stwierdzono w przypadku badań wykonanych w atmosferze azotu. Można oszacować, że ciepło oddawane przez ścier było tylko niewiele większe lub wręcz równe ciepłu oddanemu przez materiał nierozdrobniony. Zaobserwowano kilka charakterystycznych pików świadczących o przemianach zachodzących w materiałach, które zależą jedynie od temperatury, nie zaś od rodzaju otaczającej atmosfery. Najciekawsze wyniki uzyskano porównując krzywe DTA uzyskane w atmosferze powietrza. W przypadku próbek ścieru można łatwo zaobserwować rozległy egzotermiczny pik pojawiający się w przypadku wszystkich badanych materiałów już w temperaturze około 200°C. Wzrasta on gwałtownie w przedziale temperatury 200–300°C, a następnie wolno opada w miarę wyżarzania się badanego materiału. Te same materiały w postaci nierozdrobnionej nie wykazały tak gwałtownych efektów cieplnych aż do temperatury około 400–550°C, zależnie od gatunku badanej mieszanki gumowej. Początek rozległego piku egzotermicznego zaobserwowano dopiero powyżej tej temperatury.

Stwierdzone zależności, jakkolwiek podobne dla wszystkich trzech badanych gatunków gumy, są lepiej widoczne w przypadku gum trudno palnych MK i GB. Badanie ścieru pozbawionej antypirenow mieszanki gumowej PZ, w atmosferze powietrza wykazał również rozległy pik egzotermiczny powyżej 200°C; nie osiągnął on jednak tak dużych wartości względnych jak w przypadku mieszanek gumowych MK i GB. Ponadto w temperaturze około 450°C i 780–880°C zaobserwowano piki egzo-, jak i endotermiczne związane z reakcjami chemicznymi zachodzącymi w tej temperaturze w materiale, o czym świadczy fakt, że obserwuje się je również podczas badań w atmosferze azotu.

Uzyskane wyniki badań jednoznacznie wykazały duży wpływ rozdrobnienia materiału na jego skłonność do gwałtownych reakcji egzotermicznych w zakresie temperatury powyżej 200°C. Ten sam materiał w postaci nierozdrobnionej wykazywał podobne skłonności dopiero w znacznie wyższej temperaturze.



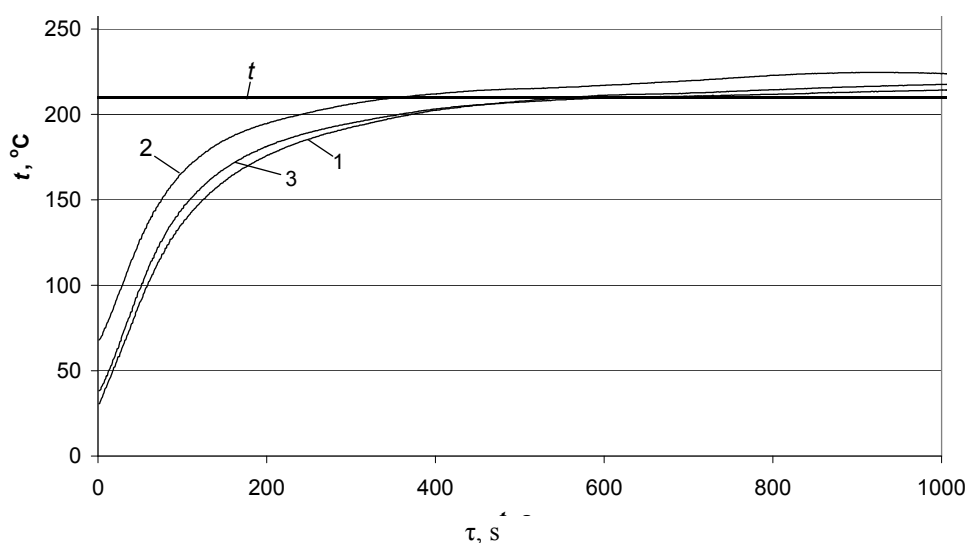
Rys. 4. Urządzenie do badania skłonności materiału do samozagrzewania wg PN-93/G-04558 [3]: 1 – piec, 2 – sonda pomiarowa temperatury, 3 – próbka badana, 4 – króciec wylotowy komory reakcyjnej, 5 – rotametr, 6 – wyświetlacz wskaźnika samozapalności (dla węgla), 7 – termoregulator, 8 – wyświetlacz temperatury próbki, 9 – pokrętko regulacji natężenia przepływu objętości powietrza, 10 – przycisk zerowania układu obliczeniowego wskaźnika samozapalności, 11 – bezpieczniki zasilania, 12 – przycisk do włączenia dodatkowej grzałki pieca i dioda luminescencyjna, 13 – zaciski wyjściowe dla rejestratora, 14 – diody luminescencyjne sygnalizujące sprawność napięć zasilających, 15 – przycisk uruchomienia układu transportu próbki, 16 – wąż gumowy wylotowy, 17 – wyłącznik sieciowy stanowiska, 18 – uchwyt przesuwu sondy pomiarowej, 19 – obudowa termistora odniesienia, 20 – wspornik sondy pomiarowej, 21 – korek uszczelniający sondę pomiarową temperatury powietrza, 22 – korek uszczelniający wlot, 23 – wąż gumowy

Fig. 4. Apparatus for testing the susceptibility of material to spontaneous heating, in accordance with PN-93/G-04558 Polish standard [3]: 1 – furnace, 2 – temperature measuring probe, 3 – tested sample, 4 – outlet stub pipe of the reaction chamber, 5 – rotameter, 6 – display of spontaneous combustion index (for coal), 7 – temperature controller, 8 – display of sample temperature, 9 – control knob of air volume flow, 10 – key for zero setting of the computing unit of spontaneous combustion index, 11 – power supply fuses, 12 – key for switching on the additional heater of the furnace and LED, 13 – output terminals to recorder, 14 – LEDs for signalling correct values of supply voltages, 15 – key for switching on the sample transport system, 16 – rubber outlet hose, 17 – mains switch of the unit, 18 – clamp of shift of measuring probe, 19 – reference thermistor casing, 20 – bracket for measuring probe, 21 – plug for sealing the air temperature measuring probe, 22 – inlet sealing plug, 23 – rubber hose

3.4. Badania procesu samozagrzewania

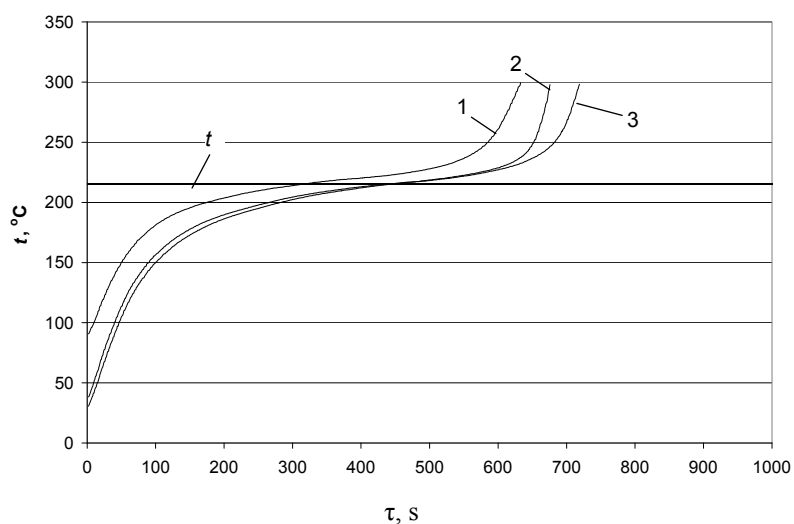
Badania wykonano zmodyfikowaną metodą badawczą przedstawioną w normie PN-93/G-04558 „Węgiel kamienny. Oznaczanie wskaźnika samozapalności”. Do badań wykorzystano urządzenie przedstawione na rysunku 4. Próbkę w postaci ściery gumowego w ilości 200 mg umieszczano w koszyczku wykonanym z drutu stalowego, który zamocowany był na końcu sondy pomiarowej (2) zaopatrzonej w termoparę. Sondę wraz z próbką (3) umieszczono w piecu (1) nagrzanym uprzednio do żądanej temperatury. Za pomocą wbudowanej do urządzenia pompki i rotametu (5) ustalano wymagany przepływ powietrza omywającego próbkę. Wyniki pomiarów (temperatura próbki, temperatura pieca i czas) były rejestrowane komputerowo.

Badania wykonano na trzech gatunkach mieszanek gumowych: MK, GB i PZ w postaci ściery, przy przepływie powietrza 10, 25 i 40 dm³/h. Zakładaną temperaturę pieca określano, stosując dynamiczny plan badań zależnie od uzyskiwanych wyników. Wyniki badań zestawiono w postaci zależności temperatury pieca i próbki od czasu (rys. 5–16).



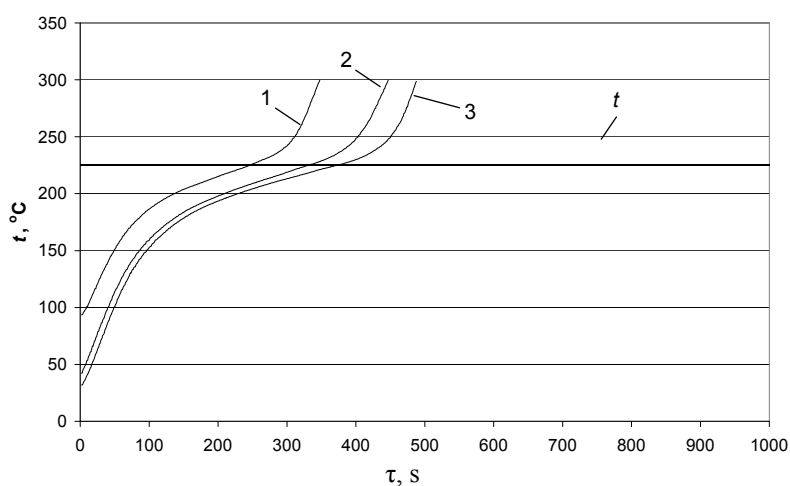
Rys. 5. Zmiany temperatury próbek ściery mieszanki gumowej GB podczas samozagrzewania dla różnych szybkości przepływu powietrza (temperatura pieca 210°C): τ – czas, t – temperatura, 1 – 10 dm³/h, 2 – 25 dm³/h, 3 – 40 dm³/h

Fig. 5. Temperature changes of samples of ground GB rubber mixture in the course of spontaneous heating for various airflow rates (furnace temperature 210°C): τ – time, t – temperature, 1 – 10 dm³/h, 2 – 25 dm³/h, 3 – 40 dm³/h



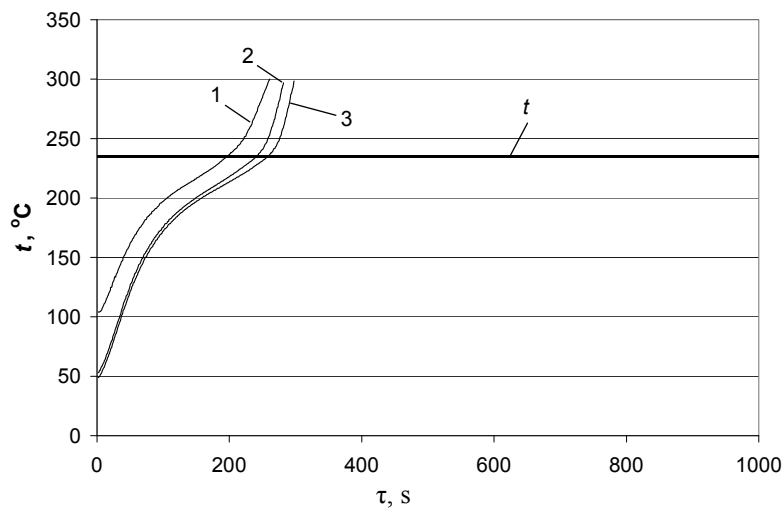
Rys. 6. Zmiany temperatury próbek ścieru mieszanki gumowej GB podczas samozagrzewania dla różnych szybkości przepływu powietrza (temperatura pieca 215°C): τ – czas, t – temperatura, 1 – 10 dm³/h, 2 – 25 dm³/h, 3 – 40 dm³/h

Fig. 6. Temperature changes of samples of ground GB rubber mixture in the course of spontaneous heating for various airflow rates (furnace temperature 215°C): τ – time, t – temperature, 1 – 10 dm³/h, 2 – 25 dm³/h, 3 – 40 dm³/h



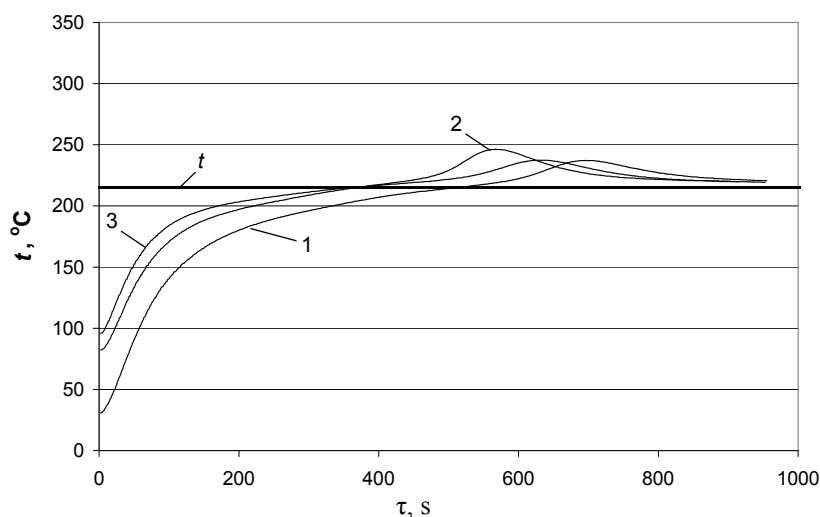
Rys. 7. Zmiany temperatury próbek ścieru mieszanki gumowej GB podczas samozagrzewania dla różnych szybkości przepływu powietrza (temperatura pieca 225°C): τ – czas, t – temperatura, 1 – 10 dm³/h, 2 – 25 dm³/h, 3 – 40 dm³/h

Fig. 7. Temperature changes of samples of ground GB rubber mixture in the course of spontaneous heating for various airflow rates (furnace temperature 225°C): τ – time, t – temperature, 1 – 10 dm³/h, 2 – 25 dm³/h, 3 – 40 dm³/h



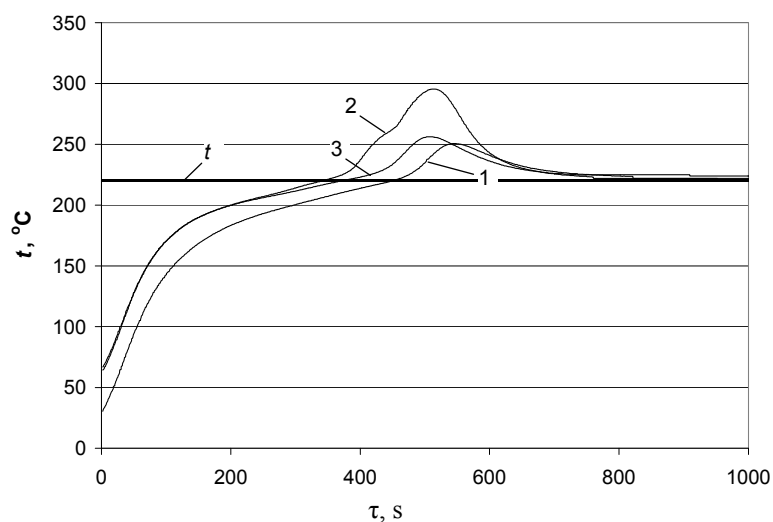
Rys. 8. Zmiany temperatury próbek ścieru mieszanki gumowej GB podczas samozagrzewania dla różnych szybkości przepływu powietrza (temperatura pieca 235°C): τ – czas, t – temperatura, 1 – 10 dm³/h, 2 – 25 dm³/h, 3 – 40 dm³/h

Fig. 8. Temperature changes of samples of ground GB rubber mixture in the course of spontaneous heating for various airflow rates (furnace temperature 235°C): τ – time, t – temperature, 1 – 10 dm³/h, 2 – 25 dm³/h, 3 – 40 dm³/h



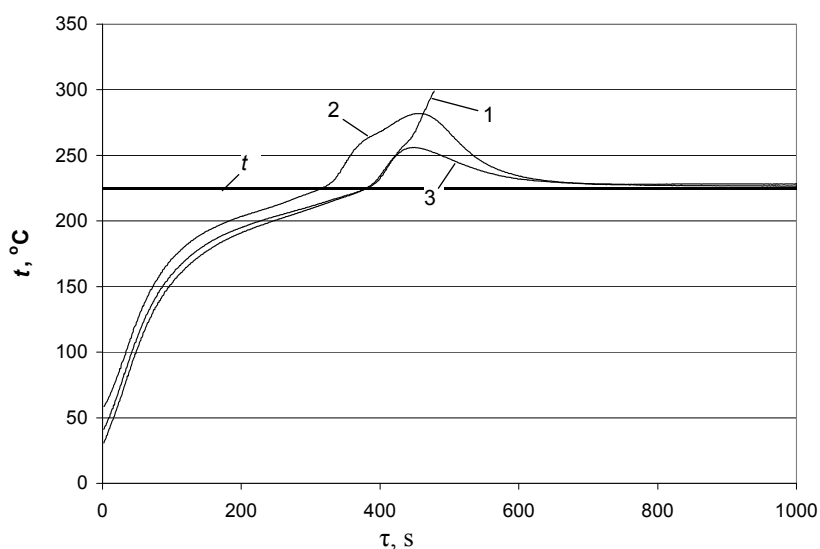
Rys. 9. Zmiany temperatury próbek ścieru mieszanki gumowej MK podczas samozagrzewania dla różnych szybkości przepływu powietrza (temperatura pieca 215°C): τ – czas, t – temperatura, 1 – 10 dm³/h, 2 – 25 dm³/h, 3 – 40 dm³/h

Fig. 9. Temperature changes of samples of ground MK rubber mixture in the course of spontaneous heating for various airflow rates (furnace temperature 215°C): τ – time, t – temperature, 1 – 10 dm³/h, 2 – 25 dm³/h, 3 – 40 dm³/h



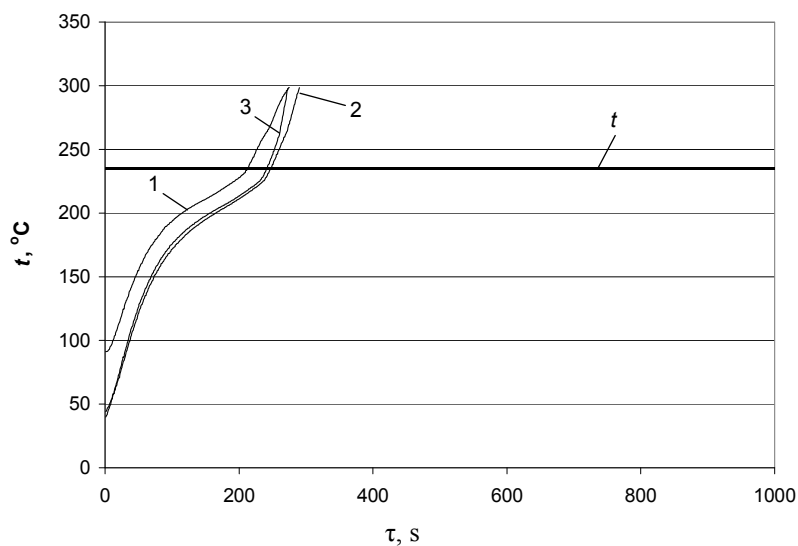
Rys. 10. Zmiany temperatury próbek ścieru mieszanki gumowej MK podczas samozagrzewania dla różnych szybkości przepływu powietrza (temperatura pieca 220°C): τ – czas, t – temperatura, 1 – 10 dm³/h, 2 – 25 dm³/h, 3 – 40 dm³/h

Fig. 10. Temperature changes of samples of ground MK rubber mixture in the course of spontaneous heating for various airflow rates (furnace temperature 220°C): τ – time, t – temperature, 1 – 10 dm³/h, 2 – 25 dm³/h, 3 – 40 dm³/h



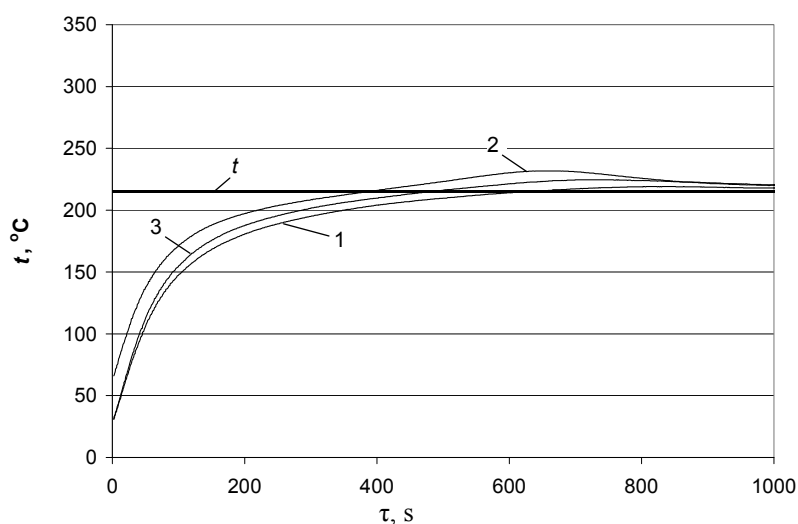
Rys. 11. Zmiany temperatury próbek ścieru mieszanki gumowej MK podczas samozagrzewania dla różnych szybkości przepływu powietrza (temperatura pieca 225°C): τ – czas, t – temperatura, 1 – 10 dm³/h, 2 – 25 dm³/h, 3 – 40 dm³/h

Fig. 11. Temperature changes of samples of ground MK rubber mixture in the course of spontaneous heating for various airflow rates (furnace temperature 225°C): τ – time, t – temperature, 1 – 10 dm³/h, 2 – 25 dm³/h, 3 – 40 dm³/h



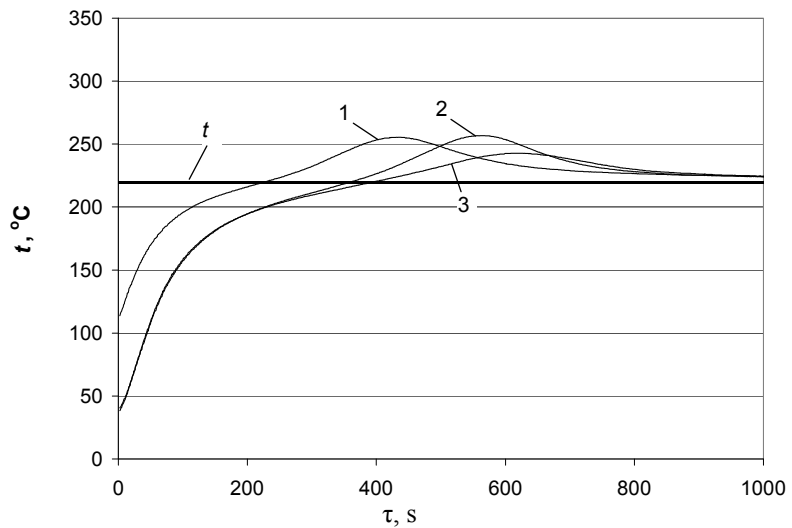
Rys. 12. Zmiany temperatury próbek ścieru mieszanki gumowej MK podczas samozagrzewania dla różnych szybkości przepływu powietrza (temperatura pieca 235°C): τ – czas, t – temperatura, 1 – 10 dm³/h, 2 – 25 dm³/h, 3 – 40 dm³/h

Fig. 12. Temperature changes of samples of ground MK rubber mixture in the course of spontaneous heating for various airflow rates (furnace temperature 235°C): τ – time, t – temperature, 1 – 10 dm³/h, 2 – 25 dm³/h, 3 – 40 dm³/h



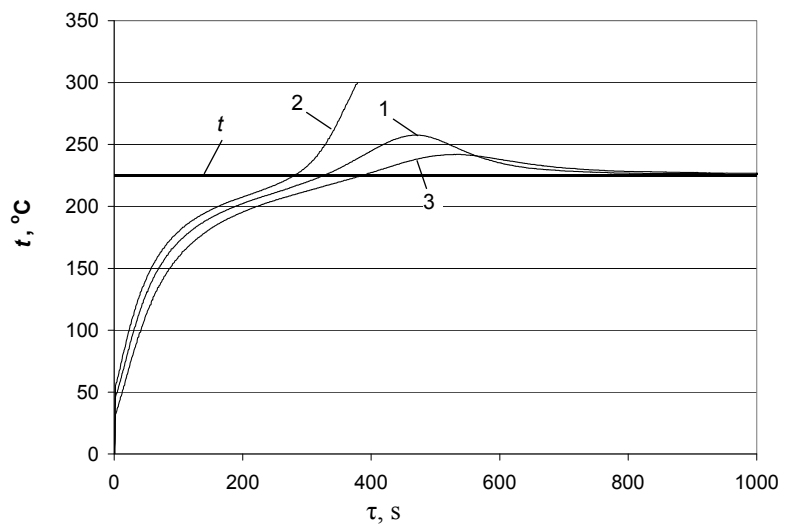
Rys. 13. Zmiany temperatury próbek ścieru mieszanki gumowej PZ podczas samozagrzewania dla różnych szybkości przepływu powietrza (temperatura pieca 215°C): τ – czas, t – temperatura, 1 – 10 dm³/h, 2 – 25 dm³/h, 3 – 40 dm³/h

Fig. 13. Temperature changes of samples of ground PZ rubber mixture in the course of spontaneous heating for various airflow rates (furnace temperature 215°C): τ – time, t – temperature, 1 – 10 dm³/h, 2 – 25 dm³/h, 3 – 40 dm³/h



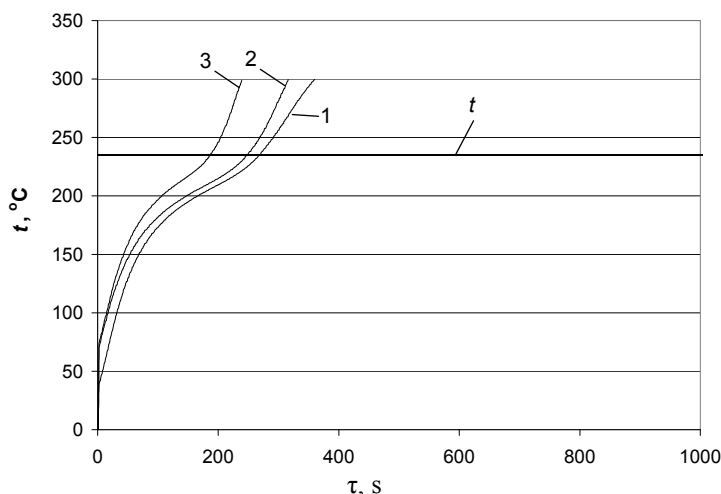
Rys. 14. Zmiany temperatury próbek ścieru mieszanki gumowej PZ podczas samozagrzewania dla różnych szybkości przepływu powietrza (temperatura pieca 220°C): τ – czas, t – temperatura, 1 – 10 dm³/h, 2 – 25 dm³/h, 3 – 40 dm³/h

Fig. 14. Temperature changes of samples of ground PZ rubber mixture in the course of spontaneous heating for various airflow rates (furnace temperature 220°C): τ – time, t – temperature, 1 – 10 dm³/h, 2 – 25 dm³/h, 3 – 40 dm³/h



Rys. 15. Zmiany temperatury próbek ścieru mieszanki gumowej PZ podczas samozagrzewania dla różnych szybkości przepływu powietrza (temperatura pieca 225°C): τ – czas, t – temperatura, 1 – 10 dm³/h, 2 – 25 dm³/h, 3 – 40 dm³/h

Fig. 15. Temperature changes of samples of ground PZ rubber mixture in the course of spontaneous heating for various airflow rates (furnace temperature 225°C): τ – time, t – temperature, 1 – 10 dm³/h, 2 – 25 dm³/h, 3 – 40 dm³/h



Rys. 16. Zmiany temperatury próbek ścieru mieszanki gumowej PZ podczas samozagrzewania dla różnych szybkości przepływu powietrza (temperatura pieca 235°C): τ – czas, t – temperatura, 1 – 10 dm³/h, 2 – 25 dm³/h, 3 – 40 dm³/h

Fig. 16. Temperature changes of samples of ground PZ rubber mixture in the course of spontaneous heating for various airflow rates (furnace temperature 235°C): τ – time, t – temperature, 1 – 10 dm³/h, 2 – 25 dm³/h, 3 – 40 dm³/h

4. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

Na podstawie wyników badań stwierdzono, że wszystkie badane mieszanki gumowe w postaci rozdrobnionej (ścier gumowy) wykazują skłonność do samozagrzewania. Największą zdolność do inicjacji procesu samozagrzewania wykazała mieszanka gumowa zawierająca kauczuk nitrylowy oznaczona symbolem GB. Z wykresów przedstawionych na rysunkach 5–8 wynika, że już w temperaturze pieca 215°C reakcja rozwinęła się w sposób lawinowy, prowadząc do gwałtownego wzrostu temperatury próbki ścieru. Z przyczyn technicznych pomiar temperatury mógł być prowadzony jedynie do 300°C, niemniej jednak na podstawie obserwacji, koloru żarzącej się próbki, po wyjęciu jej z pieca (czerwony żar), można było przypuszczać, że uzyskana maksymalna temperatura mogła wynosić około 600°C. Obserwacja ta jest zgodna z wynikami wcześniejszych badań wykonanych w GIG z zastosowaniem kamery termowizyjnej [13]. Analizując wpływ temperatury pieca na przebieg procesu samozagrzewania można określić temperaturę graniczną (krytyczną), powyżej której proces ten może zostać zainicjowany i rozwinąć się lawinowo. W przypadku próbki GB niezależnie od natężenia przepływającego powietrza, temperatura ta wynosi 215°C. Należy zwrócić uwagę, że wraz ze wzrostem temperatury otoczenia próbki wyraźnie wzrasta jej szybkość samozagrzewania. O ile czas przekroczenia temperatury pieca przez krzywą samozagrzewania dla temperatury 210°C wyniósł około 500–650 sekund, to dla temperatury 235°C zmalał już do około 200–260 sekund.

Należy nadmienić, że czas ten był mierzony od momentu umieszczenia próbki w piecu do osiągnięcia przez próbkę temperatury pieca.

Nieco mniejszą skłonność do samozagrzewania wykazał ścier mieszanki gumowej zawierającej kauczuk chloroprenowy, oznaczonej symbolem MK. Wprawdzie gwałtowne rozgrzanie materiału nastąpiło dopiero w temperaturze 225°C, przy natężeniu przepływu powietrza równym 40 dm³/h, to jednak już w temperaturze 215 i 220°C zaobserwowano pierwsze symptomy samozagrzewania widoczne na wykresie (rys. 9–10) w postaci wypukłości ponad prostą określającą temperaturę pieca. Fakt ten świadczy o tym, że w materiale jest generowana energia w ilości niewystarczającej do zainicjowania lawinowego przebiegu reakcji. Interesujący jest również wpływ natężenia przepływającego w środowisku reakcji powietrza na przebieg krzywych samozagrzewania. Zbyt małe natężenie przepływu powietrza w wielu przypadkach nie wystarczało do zapewnienia niezbędnej do przebiegu reakcji ilości tlenu. W przypadku zbyt dużego przepływu powietrza natomiast, pomimo tego, że ilość tlenu była wystarczająca, występowało równocześnie zjawisko chłodzenia próbki. Stwierdzono wyraźny związek między temperaturą pieca i natężeniem przepływu powietrza potrzebnego do zainicjowania lawinowego przebiegu reakcji. Określając zatem parametry krytyczne należy podać zarówno temperaturę, jak i natężenie przepływu powietrza. Można przypuszczać, przez analogię do badań samozagrzewania węgla, że istotną rolę w ustaleniu tych dwu parametrów krytycznych odgrywa również masa próbki. Planowane jest wykonanie badań w celu określenia roli tego parametru.

Próbka ścieru mieszanki gumowej zawierającej kauczuk butadienowo-styrenowy (PZ) zasadniczo zachowywała się podobnie do ścieru mieszanki MK, jednakże analizując szybkość narastania temperatury krzywych samozagrzewania, stwierdzono, że w przypadku mieszanki PZ średni czas osiągnięcia przez próbkę temperatury pieca był dłuższy niż w przypadku mieszanki MK. Można na tej podstawie wnioskować, że ścier mieszanki PZ, niezawierającej dodatków uniepalniających, wykazuje najlepszą odporność na samozagrzewanie. Potwierdzają to również omówione w rozdziale 3.3 wykresy DTA (rys. 1–3). W przypadku mieszanki PZ ustalono temperaturę krytyczną samozagrzewania równą 225°C w warunkach przepływu powietrza z szybkością 25 dm³/h.

5. PODSUMOWANIE

W niniejszym artykule omówiono wyniki wstępnych badań samozagrzewania ścierów gumowych z okładek taśm przenośnikowych stosowanych w górnictwie. Na ich podstawie dokonano wstępnej oceny skłonności badanych materiałów do samozagrzewania i określono wpływ niektórych czynników na samozagrzewanie materiału.

Zarówno analiza DTA, jak i badania samozagrzewania wyraźnie wykazały, że rozdrobnienie materiału, z którego są wykonane, do postaci ścieru ma zasadniczy wpływ na jego skłonność do samozagrzewania. Zależność ta występuje także w przypadku innych materiałów. Interesujący jest fakt, że najmniejszą skłonność do samozagrzewania wykazał materiał pozbawiony dodatków uniepalniających.

Ten nieco zaskakujący wniosek wskazuje na konieczność dalszych badań. Świadczy on bowiem o tym, że stosowanie gum trudno palnych na okładki taśm przenośnikowych nie daje pełnej gwarancji bezpieczeństwa ich stosowania w warunkach dużego zagrożenia pożarowego, z którym można się spotkać w podziemiach kopalń.

Stwierdzono również konieczność występowania określonych warunków krytycznych do zainicjowania i gwałtownego rozwoju samozagrzewania materiału. Należą do nich przede wszystkim temperatura minimalna, jak również optymalna ilość tlenu, co wiąże się z określonym natężeniem przepływu powietrza dostarczanego do materiału. Zbyt duże natężenie przepływu powietrza, zwłaszcza w przypadku niskiej temperatury inicjującej samozagrzewanie ścierów gumowych, prowadzi do schłodzenia materiału i hamuje w nim zachodzące reakcje egzotermiczne.

Należy podkreślić, że ściery z okładek taśm przenośnikowych, w warunkach pracy pod ziemią powstają najczęściej na skutek tarcia, co związane jest z podwyższeniem ich temperatury już podczas samego procesu ich powstawania. Zważywszy na konieczność ciągłego przewietrzania chodników kopalnianych, co wiąże się z wymuszonym ruchem powietrza wokół nagrzanego ściery, niebezpieczeństwo zaistnienia gwałtownej reakcji z wydzielaniem ciepła jest duże. Pomimo, że nie stwierdzono palenia się ściery okładek taśm przenośnikowych płomieniem [13], ich wysoka temperatura z powodzeniem może zainicjować proces samozagrzewania i samozapłonu znajdującego się wokół węgla. Może to doprowadzić do groźnego w skutkach pożaru. Skłonność do samozagrzewania materiałów stosowanych na okładki taśm przenośnikowych powinna być brana pod uwagę podczas ich wyboru do produkcji taśm przenośnikowych.

Badania skłonności do samozagrzewania ściery gumowych wytypowanych mieszanek gumowych będą kontynuowane w ramach realizacji dalszej części projektu badawczego.

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego nr 5 T12A 023 25 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Informatyzacji, realizowanego w Głównym Instytucie Górnictwa.

Literatura

1. Anderson A.E.: *Review of fire belting requirements*. Proc. 2nd International Conference on Fire Resistant Hoses, Cables and Belting, University of Lancaster, U.K., Sept., 1986.
2. Drysdale D.: *An Introduction to Fire Dynamics*. John Wiley & Sons Ltd, 2000.
3. EEC *Safety and Health Commission for the Mining and the other Extractive Industries*. First Report on tests and criteria of flammability of conveyor belting with fabric core used in mines of coal in EC countries. Luxemburg 1974.
4. Hardygóra M., Wachowicz J., Czaplicka-Kolarz K., Markusik S.: *Taśmy przenośnikowe*. Warszawa, WNT 1999.
5. Hill S.M., Quintiere J.G.: *Investigating Materials from Fires Using a Test Method for Spontaneous Ignition*. Fire And Materials, Fire Mater. 2000 Vol. 24, s. 61-66.
6. Jones J.C.: *Recent Developments and Improvements in Test Methods for Propensity Towards Spontaneous Heating*. Fire and Materials, Fire Mater. 1999 Vol. 23, s. 239-243.
7. Leksykon naukowo-techniczny. Wyd. 3. Warszawa, WNT 1984.

8. Małecki B., Wachowicz J.: *Problematyka stosowania testu ciernego dla oceny trudno palnych gumowych taśm przenośnikowych w górnictwie*. Przegląd Górniczy 1992 nr 10.
9. Materiały konferencyjne III Szkoły Analizy Termicznej SAT'02, 10-12 kwietnia, Zakopane 2002. Kraków, AGH 2002.
10. Muzyczuk J.: *Samozagrzewanie węgla w procesie jego utleniania strumieniem powietrza w warunkach zbliżonych do warunków adiatermicznych*. Prace GIG, Komunikat nr 605. Katowice 1974.
11. Nakagawa Y., Komai T.: *Correlation between the Thermogravimetric Analysis and Some Other Flammability Tests on Covers of Rubber Conveyor Belts*. Journal of Fire Sciences 1990 Vol. 8, s. 455-477.
12. PN-93/G-04558, Węgiel kamienny. Oznaczanie wskaźnika samozapalności.
13. Wachowicz J.: *Investigations of the Phenomenon of Spontaneous Heating of Chloroprene Cover Wear-off in Fire-resistant Conveyor Belts*. Fire and Materials, Fire Mater. 1999 Vol. 23, s. 7-12.
14. Wachowicz J., Sobieszczuk G.: *Ocena ryzyka stosowania taśm przenośnikowych w kopalniach węgla kamiennego*. Materiały VIII Międzynarodowego Sympozjum nt. „Nowe kierunki i doświadczenia w zakresie budowy i eksploatacji taśm przenośnikowych oraz urządzeń z nimi współpracujących”, Ustroń, 08-09.06.2000.
15. Waclawik J., Cygankiewicz J., Branny M.: *Niektóre zagadnienia pożarów endogenicznych*. Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej. Kraków, AGH 2000.
16. Zyska B.: *Eksploatacja przenośników taśmowych w kopalniach węgla kamiennego a zagrożenie życia górników*. Wiadomości Górnicze 1992 nr 2 (48).

Recenzent: doc. dr hab. inż. Krystyna Czaplicka

Cezary Bartmański, Witold Mrukwa

NOWY PRZETWORNIK DRGAŃ – METODA BADAŃ, WŁAŚCIWOŚCI METROLOGICZNE

Streszczenie

Częstym skutkiem oddziaływania drgań mechanicznych na ludzi, uczestniczących w realizacji wielu procesów technologicznych, jest choroba zawodowa zwana zespołem vibracyjnym. Dotyczy to przede wszystkim przypadków, w których drgania przenoszone są do kończyn górnych pracowników obsługujących narzędzia ręczne o napędzie pneumatycznym i spalinowym. Zagrożenia człowieka w środowisku pracy, potwierdzone corocznymi raportami na temat zapadalności na choroby zawodowe wymagają systematycznych badań obejmujących pomiary parametrów drgań i, na ich podstawie, oszacowania stanu oddziaływania drgań na konkretnego pracownika.

Międzynarodowe i krajowe dokumenty normalizacyjne precyzują, między innymi prawidłową, z uwagi na transmisję drgań do organizmu człowieka, lokalizację przetwornika dla tych pomiarów – w miejscu kontaktu rąk pracownika z drgającą powierzchnią. Brak odpowiednich przetworników pomiarowych uniemożliwia jednak taki pomiar i sprawia, że w praktyce powszechnie stosuje się metodę zastępczą, tj. pomiar obok rąk pracownika, sankcjonowaną co prawda przez przepisy metodyczne, będącą jednak odstępstwem, fałszującym w pewnym stopniu wyniki pomiarów.

W artykule przedstawiono wyniki kolejnego etapu badań, prowadzonych w celu opracowania metody pomiaru drgań w miejscu kontaktu rąk człowieka, odpowiadającej wymaganiom zawartym w krajowych i międzynarodowych dokumentach normalizacyjnych.

Przedmiotem tego etapu badań był prototyp trójosiowego piezoelektrycznego przetwornika drgań, oznaczonego roboczym symbolem A3R firmy EMSON-MAT, skonstruowany specjalnie dla tego typu pomiarów. Z uwagi na specyficzny kształt przetwornika, zakres badań obejmował, opracowanie sposobu mocowania przetwornika do wzorcowego źródła drgań oraz pomiar parametrów metrologicznych przetwornika i określenie ich zgodności z wymaganiami zawartymi w przepisach metrologicznych. W ramach pomiarów parametrów metrologicznych wyznaczono czułości znamionowe, zmierzono charakterystyki przetwarzania i charakterystyki częstotliwościowe oraz wyznaczono, w ograniczonym zakresie, względne czułości poprzeczne przetwornika. Wyniki pomiarów zaprezentowano w formie tabel i wykresów.

W wyniku badań stwierdzono, że prototypowy przetwornik drgań A3R spełnia wymagania metrologiczne ustalone w przepisach metrologicznych o piezoelektrycznych użytkowych przetwornikach drgań. Pozytywne wyniki pozwalają na kontynuację badań porównawczych dwóch sposobów lokalizacji miejsca pomiaru drgań – dotychczas stosowanego w praktyce, obok rąk pracownika oraz nowego, w miejscu kontaktu rąk pracownika z drgającą powierzchnią, w warunkach symulujących pomiary na stanowisku pracy, na którym drgania są przenoszone do organizmu człowieka przez kończyny górne.

New vibration transducer – methodology of testing, metrological characteristics

Abstract

A frequent consequence of the influence of mechanical vibration on humans involved in technological processes is the occupational disease called the vibration syndrome. This refers, first of all, to the cases, in which vibration is transmitted to the upper limbs of the workers who operate hand-held equipment with pneumatic or combustion drive. The hazards in the work environment, confirmed by annual reports on the sick rates of the occupational diseases, need systematic investigations which include

the measurements of vibration parameters, and, on that basis, the evaluation of the condition on vibration influence on an individual worker.

The international and national standardisation documents precise, among the other things, a correct, in respect of vibration transmission to the human organism, location of the transducers for such measurements. This is the point of contact of the worker's hands with the vibrating surface. However, the lack of suitable measuring transducers makes such a measurement impossible, and causes that, in practice,

a substitute method is commonly used that is the measurement beside the worker's hands. As a matter of fact, this is sanctioned by methodological regulations, but still it is a deviation, which falsify, to some extent, the results of measurements. The purpose of this research is a consecutive phase of research conducted with the aim to develop a method for measuring vibration in the place of contact of the human hands, and fulfilling the requirements included in both domestic and international standardisation documents.

The subject of this research phase was a prototype of the three-axial piezoelectric vibration transducer, manufactured by EMSON- MAT under the symbol A3R, and constructed especially for such type of measurements. Considering a specific shape of the transducer, the scope of research included the development of a method of fastening the transducer to the reference source of vibration, and measurements of its metrological parameters, as well as defining their compatibility with the requirements contained in the metrological regulations. Within the framework of measurements of metrological parameters, the rated sensitivities, processing characteristics have been measured, and, to a limited extent, the relative transverse sensitivities of the transducer have been determined. The results of measurements were presented in the form of tables and diagrams.

As a result of the conducted investigations, it was found that the prototype vibration transducer A3R meets the metrological requirements specified in the metrological regulations on usable piezoelectric vibration transducers. The positive results make possible to continue the comparative studies of two methods of location of vibration measurement, the one beside the hands, and used until now in practice, and the other, new one, being the place of contact of worker's hands with the vibrating surface, in the conditions which simulate measurements at the work station where vibration is transmitted to the human organism through the upper limbs.

1. WPROWADZENIE

Drgania mechaniczne, pochodzące z różnych źródeł i oddziałujące na ludzi, należą do grupy czynników środowiska pracy, mogących stanowić poważne zagrożenie zdrowia. Skutkiem tego oddziaływania jest często choroba zawodowa, zwana zgodnie z oficjalnie przyjętą terminologią – **zespołem wibracyjnym** [14]. Według najnowszych poglądów, wyrażonych w obowiązującym akcie prawnym [14], choroba ta może występować pod trzema postaciami: naczyniowo-nerwową, kostno-stawową i mieszaną.

Z danych, zamieszczanych w corocznych raportach na temat zapadalności na choroby zawodowe w gospodarce narodowej wynika, że w ostatnich latach zaznacza się tendencja spadkowa, a mianowicie w 1998 roku wystąpiło 345 przypadków zespołu wibracyjnego, 275 w 1999 roku, 198 w 2000 roku i 205 w 2001 roku [1, 2, 3, 4].

W rankingu chorób zawodowych natomiast pod względem wartości współczynnika zachorowalności, na 20 jednostek chorobowych zespół wibracyjny, w 1998 roku zajmował szóste miejsce [1], a w 2000 roku – siódme [3].

Zdecydowaną większość przypadków zespołu wibracyjnego spowodowało oddziaływanie drgań przenoszonych do kończyn górnych pracowników obsługujących głównie narzędzia ręczne o napędzie pneumatycznym i spalinowym. I tak na przykład

w 2000 roku na 198 przypadków 185 – zostało spowodowanych wymienionym rodzajem drgań (125 – postać naczyniowo-nerwowa, 45 – postać kostno-stawowa, 15 – postać mieszana), 5 – drganiami o ogólnym oddziaływaniu na organizm człowieka, a w 8 przypadkach nie podano źródła zagrożenia.

Stan zagrożenia człowieka w środowisku pracy oddziaływaniem drgań przenoszonych do kończyn górnych, wymaga prowadzenia systematycznych badań. Wymuszają je postanowienia zawarte w obowiązujących aktach prawnych [13, 15]. Zakres tych badań obejmuje pomiary parametrów drgań w miejscu występowania zagrożenia oraz szacowanie stanu oddziaływania drgań na konkretnego pracownika.

Pomiary należy prowadzić, zgodnie z postanowieniem prawodawcy [15], z zastosowaniem metody sformułowanej w instrukcji metodycznej [6], opracowanej w CIOP, z wykorzystaniem postanowień zawartych w odpowiednich dokumentach ISO, przyjętych również jako normy europejskie. Istotą tych pomiarów jest lokalizacja i sposób mocowania przetwornika drgań, ponieważ od tego w znacznym stopniu zależy wiarygodność uzyskiwanych wyników. Z literatury dotyczącej badania drgań, w tym również z międzynarodowych dokumentów normalizacyjnych wynika, że omówiony w pracy [7] pomiar należy wykonywać w miejscu kontaktu rąk pracownika z drgającą powierzchnią, co uważa się za podstawowe miejsce pomiaru. Takie wymaganie sformułowano również we wspomnianej powyżej instrukcji.

2. GENEZA TEMATYKI BADAWCZEJ

Wymaganie wykonywania pomiaru drgań w miejscu kontaktu rąk z ich źródłem jest bardzo słuszne z uwagi na transmisję drgań do organizmu człowieka, jak na razie, ma ono jednak charakter wyłącznie teoretyczny. Powodem jest brak przetworników drgań o odpowiedniej konstrukcji, która umożliwiałaby taki pomiar. W związku z tym, w praktyce pomiary są dokonywane zazwyczaj obok rąk pracownika, obsługującego, na przykład wiertarkę pneumatyczną, co jest sankcjonowane przez przepisy metodyczne zarówno międzynarodowe [8, 9], jak i krajowe [6]. Trzeba jednak zdawać sobie sprawę z tego, że uzyskuje się wtedy charakterystykę drgań, na przykład narzędzia, a nie drgań transmitowanych do rąk pracownika.

Przedstawiony stan badań nad drganiami przenoszonymi do kończyn górnych trwa od wielu lat. Jak zaznaczono we wprowadzeniu, pomiar we właściwym miejscu będzie możliwy wtedy, gdy będą dostępne odpowiednie przetworniki drgań, spełniające podstawowe wymagania, sformułowane w pracy [12]. Konstrukcję specjalnego przetwornika przyspieszenia drgań, przeznaczonego w zamyśle konstruktorów do pomiarów między wewnętrzną powierzchnią ręki pracownika a powierzchnią rękojeści bądź uchwytu obsługiwanego przez niego narzędzia, opracowano w firmie EMSON-MAT w Krakowie. Wykorzystując ten fakt zespół pracowników Laboratorium Akustyki Technicznej Głównego Instytutu Górnictwa podjął badania, których końcowym celem jest opracowanie metody pomiaru, mającej zastąpić metodę, stosowaną aktualnie. W wyniku realizacji pierwszego etapu badań stwierdzono, że przetwornik nowej konstrukcji stwarza realną możliwość pomiaru drgań przeno-

szonych do kończyn górnych w miejscu kontaktu rąk pracownika z powierzchnią narzędzia bądź elementów sterowania maszynami, czy też pojazdami [7, 12]. W niniejszym artykule przedstawiono przebieg realizacji kolejnego etapu badań oraz uzyskane wyniki.

3. PRZEDMIOT I CEL BADAŃ

Przedmiotem drugiego etapu badań był prototyp trójosiowego piezoelektrycznego przetwornika drgań, oznaczony roboczym symbolem A3R (fot. 1). W aluminiowej obudowie, w kształcie spłaszczonego walca o wymiarach:

- wysokość – 10,8 mm,
- średnica – 30 mm,

zostały umieszczone trzy oddzielne elementy – czujniki przetwarzające drgania mechaniczne na odpowiadające im sygnały elektryczne. Zdaniem konstruktorów, dla założonej czułości przetwornika, jego wymiary gabarytowe są najmniejsze z możliwych, przy obecnym poziomie techniki.

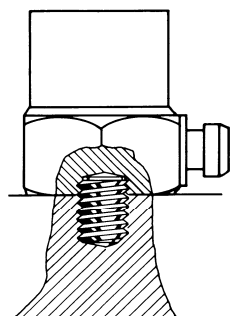


Fot. 1. Prototyp przetwornika drgań, typu A3R – widok ogólny

Photo 1. Prototype of vibration transducer, type A3R – general view

Głównym celem badań było określenie właściwości metrologicznych nowego przetwornika i ich zgodności z wymaganiami, stawianymi tego rodzaju przetwornikom przez przepisy metrologiczne [16].

Ze względu na specyficzny kształt przetwornika A3R, powstała konieczność dokonania modyfikacji metody badań, a w zasadzie jednego z jej elementów – sposobu mocowania przetwornika do wzorcowego źródła drgań. Przetworniki piezoelektryczne wymagają bezpośredniego kontaktu z drgającym obiektem. Właściwości mechaniczne połączenia w znaczący sposób wpływają na jego parametry metrologiczne, w szczególności na charakterystykę częstotliwościową. W literaturze [5, 11] i normach [10] zaleca się mocowanie z wykorzystaniem stalowego, gwintowanego wkrętu (rys. 1).



Rys. 1. Mocowanie przetwornika za pomocą gwintowanego wkrętu

Fig. 1. Fastening of the transducer by means of the threaded bolt

Taki sposób mocowania wskazany jest również w procedurze pomiarowej, dotyczącej przetworników drgań, stosowanej w Laboratorium Akustyki Technicznej GIG. Typowe przetworniki trójosiowe (obudowa w kształcie prostopadłościanu), mają w płaszczyznach obudowy, prostopadłych do poszczególnych kierunków nominalnych wektorów czułości (osi czułości), gwintowane otwory umożliwiające wykorzystanie tego sposobu mocowania. Brak w badanym przetworniku takich otworów spowodował, że należało na wstępie zrealizować cel szczegółowy – opracować taki sposób mocowania przetwornika do źródła drgań, aby jego wpływ na uzyskiwane wyniki był minimalny.

4. REALIZACJA BADAŃ

4.1. Zakres badań

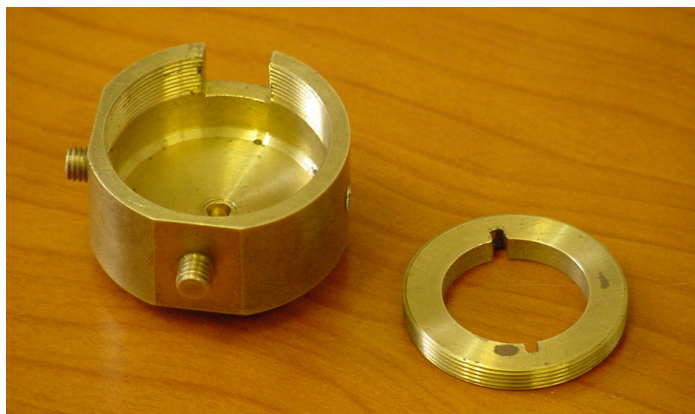
Badania obejmowały:

- opracowanie sposobu mocowania przetwornika A3R do wzorcowego źródła drgań, charakteryzującego się brakiem szkodliwych rezonansów w deklarowanym przez wytwórcę zakresie częstotliwości,
- pomiar parametrów metrologicznych przetwornika A3R zgodnie z wymaganiami instrukcji sprawdzania przetworników drgań [17], w zakresie właściwym dla procesu uwierzytelniania przetworników, przewidzianym w przepisach metrologicznych [16], tj.:
 - sprawdzenie czułości znamionowej,
 - sprawdzenie charakterystyki przetwarzania,
 - sprawdzenie charakterystyki częstotliwościowej, oraz w ograniczonym zakresie
 - sprawdzenie względnej czułości poprzecznej.

Pomiary przeprowadzono na stanowisku do badania aparatury wibroakustycznej w Laboratorium Akustyki Technicznej GIG. Aparatura, będąca wyposażeniem stanowiska, znajduje się pod nadzorem metrologicznym, objętym zakresem akredyta-

cji PCA. Parametry metrologiczne mierzono metodą porównawczą, zgodnie z procedurą pomiarową nr PP-01, pn. „Sprawdzanie przetworników drgań mechanicznych” wchodzącą w skład Księgi Procedur Pomiarowych Laboratorium Akustyki Technicznej GIG, akredytowanej przez PCA.

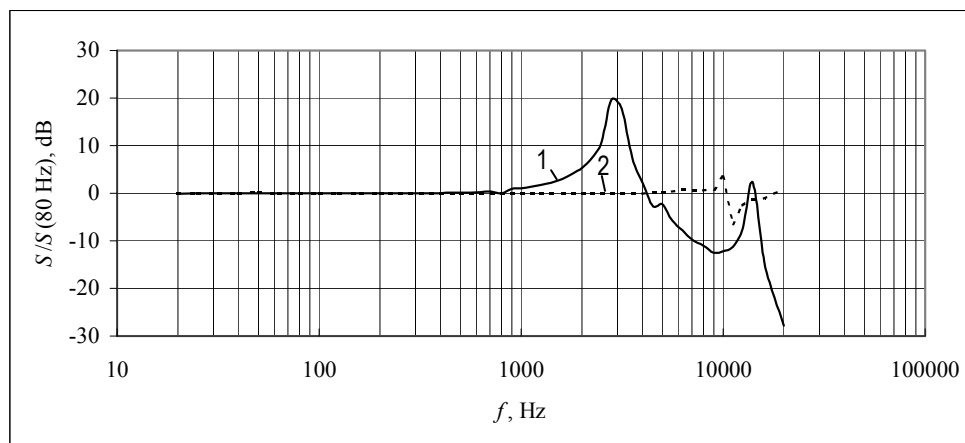
Jak wspomniano, przetwornik A3R był konstruowany z myślą o pomiarach drgań na styku ręka operatora – rękojeść narzędzia. Mocuje się go do wewnętrznej powierzchni dłoni za pomocą skórzaney opaski [7]. Aby umożliwić wykonanie pomiarów kontrolnych w laboratorium na stole wibracyjnym (wymaganych przy zatwierdzaniu typu czy też podczas okresowego wzorcowania) przetwornik został wyposażony w specjalny uchwyt, pozwalający na mocowanie go do źródła drgań, w poszczególnych osiach za pomocą złącza gwintowanego (fot. 2). Uchwyt jest wykonany w postaci mosiężnego, wydrążonego walca. Badany przetwornik drgań jest umieszczany wewnątrz walca i unieruchamiany za pomocą wkręcanego pierścienia. W podstawie walca oraz na jego powierzchni bocznej, wzdłuż prostopadłych osi, są osadzone trzy wkręty mocujące.



Fot. 2. Uchwyt do mocowania przetwornika na stole wibracyjnym

Photo 2. Clamp for mounting the transducer on the vibrating table

Z powodu zastrzeżeń do zaproponowanego przez producenta rozwiązania, zdecydowano się na wykonanie wstępnych pomiarów w celu stwierdzenia, czy konstrukcja uchwytu jest prawidłowa. Jako referencyjną metodę mocowania zastosowano klejenie przetwornika do źródła drgań przy pomocy cienkiej warstwy pszczelego wosku. Metoda ta, mająca pewne ograniczenia odnośnie do zakresu stosowania (temperatura poniżej 40°C, wartości przyspieszenia drgań do około 100 m·s⁻²), wykazuje nieznaczne pogorszenie parametrów użytkowych przetwornika w stosunku do połączenia „na gwint” [10]. Z uwagi na walcowaty kształt obudowy przetwornika i możliwość prawidłowego przytwierdzenia do wzorcowego źródła drgań jedynie jego podstawy, pomiary wstępne wykonano dla osi X, tj. dla osi prostopadłej do tej płaszczyzny. Na rysunku 2 przedstawiono charakterystyki częstotliwościowe przetwornika dla dwóch sposobów mocowania.



Rys. 2. Charakterystyki częstotliwościowe przetwornika A3R dla różnych sposobów mocowania do źródła drgań: f – częstotliwość, $S/S(80 \text{ Hz})$ – czułość względna, 1 – mocowanie za pomocą uchwytu fabrycznego, 2 – mocowanie za pomocą wosku

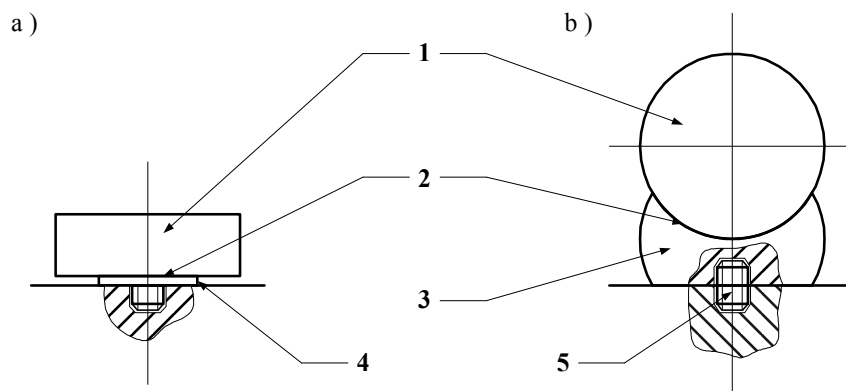
Fig. 2. Frequency characteristics of the A3R transducer for various methods of fastening to the vibration source: f – frequency, $S/S(80 \text{ Hz})$ – relative sensitivity, 1 – fastening by means the manufacturer's mount, 2 – fastening by means of wax

Porównanie obu krzywych wskazuje, że układ uchwyt mocujący – przetwornik ma rezonans mechaniczny dla częstotliwości około 3 kHz, co zaburza przebieg charakterystyki częstotliwościowej przetwornika i w istotny sposób zawęża zakres częstotliwości jego pracy.

Biorąc pod uwagę uzyskane wyniki w dalszych pomiarach odstąpiono od stosowania uchwytu skonstruowanego przez wytwórcę i zdecydowano o mocowaniu przetwornika za pomocą wosku.

Należy zaznaczyć, że podczas wykonywania badań porównawczych parametrów metrologicznych badany przetwornik był montowany na przetworniku kontrolnym. Kierunki nominalnych wektorów czułości przetwornika kontrolnego i przetwornika badanego pokrywają się. Informacje o mocowaniu badanego przetwornika do wzorcowego źródła drgań, w czasie tych badań, dotyczą więc mocowania przetwornika badanego do przetwornika kontrolnego. Aby mocowanie to było prawidłowe należy zapewnić ściśle przyleganie powierzchni obu przetworników. Dla pomiarów w osi X montaż przetwornika nie nastręcza trudności, gdyż powierzchnią przylegania jest płaszczyzna podstawy (rys. 3a). Gwintowany otwór przetwornika kontrolnego „zaślepiany” był elementem pośredniczącym, stanowiącym element standardowego wyposażenia przetwornika.

W przypadku pomiarów w osiach Y i Z , podczas których badany przetwornik przylega do źródła drgań powierzchnią boczną (walca), zaproponowano następujący sposób mocowania. Wykonano element pośredniczący, przedstawiony schematycznie na rysunku 3b. Element ten jest mocowany do przetwornika kontrolnego za pomocą wkrętu, natomiast przetwornik badany jest klejony do elementu pośredniczącego za pomocą wosku.



Rys. 3. Sposób mocowania przetwornika drgań A3R do przetwornika kontrolnego: a – dla osi X , b – dla osi Y i Z ; 1 – przetwornik drgań, 2 – cienka warstwa wosku, 3 – element pośredniczący (GIG), 4 – element pośredniczący (typ DB 2970, Brüel & Kjær), 5 – wkręt stalowy

Fig. 3. Method of fastening of the A3R vibration transducer to the control transducer: a – for X axis, b – for Y , Z axes; 1 – vibration transducer, 2 – thin wax layer, 3 – intermediate element (GIG), 4 – intermediate element (type DB 2970, Brüel & Kjær), 5 – steel bolt

4.2. Parametry metrologiczne przetwornika A3R

a. CZUŁOŚĆ ZNAMIONOWA

Czułość znamionową wyznaczono dla sygnału znamionowego o parametrach:

$$f = 80 \text{ Hz}, a = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$S_z^X = 1,68 \pm 0,03 \text{ pC} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^2$$

$$S_z^Y = 1,71 \pm 0,03 \text{ pC} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^2$$

$$S_z^Z = 1,67 \pm 0,03 \text{ pC} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^2$$

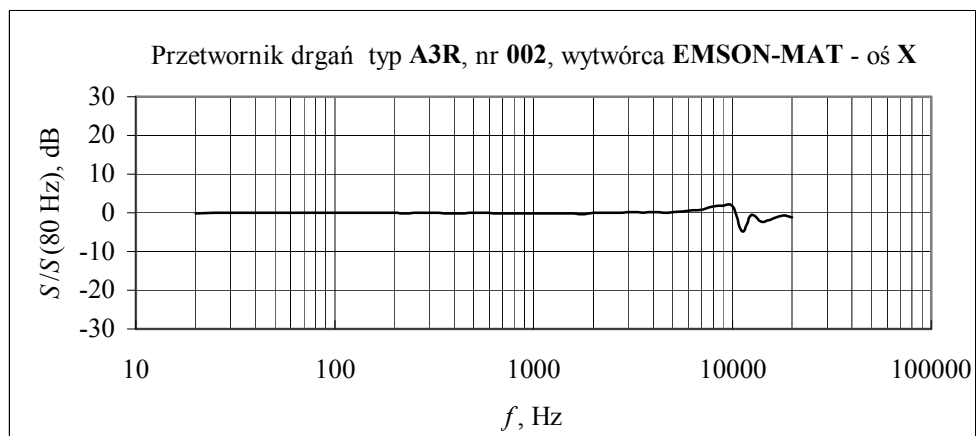
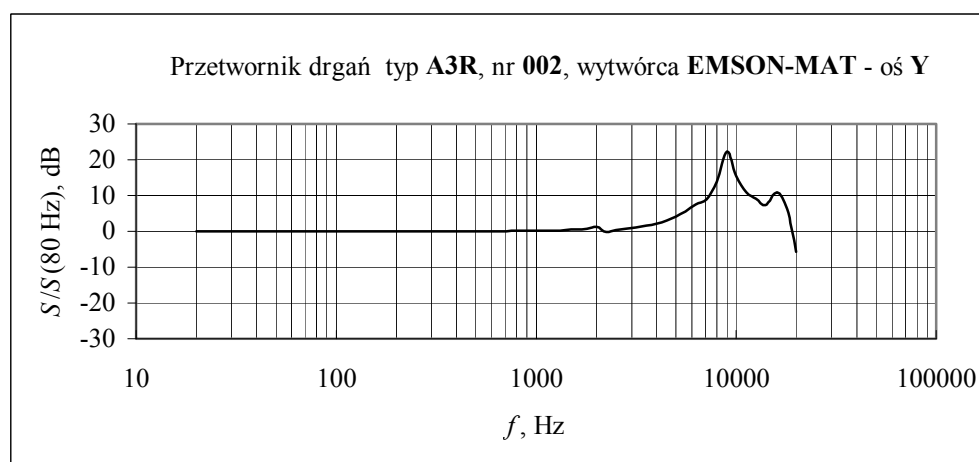
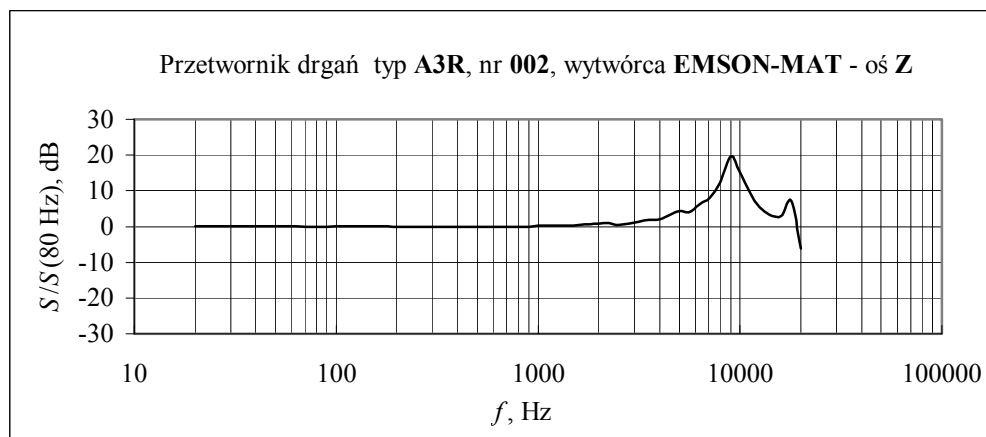
Niepewność pomiaru została określona zgodnie z dokumentem EA-04/02. Podana wartość niepewności stanowi niepewność rozszerzoną, przy poziomie ufności 95% i współczynniku rozszerzenia $k = 2$.

b. CHARAKTERYSTYKI PRZETWARZANIA

Częstotliwość $f = 80 \text{ Hz}$

a	oś X		oś Y		oś Z	
	S^X	B^X	S^Y	B^Y	S^Z	B^Z
$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	$\text{pC} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^2$	%	$\text{pC} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^2$	%	$\text{pC} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^2$	%
2	1,675	0	1,714	0	1,673	0
5	1,674	-0,06	1,713	-0,06	1,673	0
10	1,675	0	1,714	0	1,673	0
20	1,674	-0,06	1,711	-0,18	1,670	-0,18
50	1,674	-0,06	1,711	-0,18	1,670	-0,18
100	1,674	-0,06	1,710	-0,23	1,669	-0,24

c. CHARAKTERYSTYKI CZĘSTOTLIWOŚCIOWE



d. WZGLĘDNA CZUŁOŚĆ POPRZECZNA

Pomiary względnej czułości poprzecznej dla ustalonej osi, wykonuje się po zamocowaniu przetwornika badanego w taki sposób, aby kierunek nominalnego wektora czułości był prostopadły do kierunku drgań wzbudnika. Pomiary należy wykonać dla kolejnych położań przetwornika (co 45° lub mniej), w wyniku jego obrotu wokół osi pokrywającej się z kierunkiem nominalnego wektora czułości.

Z uwagi na trudności związane z mocowaniem przetwornika we wszystkich wymaganych położeniach, pomiary przeprowadzono w ograniczonym zakresie, dla kierunków prostopadłych do ustalonego kierunku nominalnego wektora czułości, pokrywających się z kierunkami nominalnych wektorów czułości dla pozostałych osi. Względną czułość poprzeczną wyznaczono dla sygnału znamionowego o parametrach $f = 80 \text{ Hz}$, $a = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Kierunek nominalnego wektora czułości	Kierunek drgań wzbudnika		
	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>
<i>X</i>	–	2,4%	2,3%
<i>Y</i>	3,8%	–	6,3%
<i>Z</i>	1,7%	2,2%	–

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Stwierdzono, że badany przetwornik ma zbliżone wartości czułości w poszczególnych osiach (rozrzut ok. 2,3%) oraz bardzo małe błędy charakterystyk przetwarzania. Przebieg charakterystyk częstotliwościowych dla osi *Y* i *Z* jest podobny – częstotliwości rezonansu mechanicznego są zbliżone i wynoszą około 9 kHz. Dla osi *X* charakterystyka częstotliwościowa jest płaska do około 7 kHz i nie wykazuje wyraźnego rezonansu w całym mierzonym paśmie (do 20 kHz). Użyteczny zakres częstotliwości pracy przetwornika wynosi około 3 kHz i jest znacznie większy niż wymagany zakres częstotliwości dla badań drgań na stanowiskach pracy.

Prototypowy przetwornik drgań A3R spełnia wymagania metrologiczne ustalone w przepisach metrologicznych o piezoelektrycznych użytkowych przetwornikach drgań [16]. Aby jednak mógł być wykorzystywany do pomiarów drgań na stanowiskach pracy jako legalne narzędzie metrologiczne, musi uzyskać zatwierdzenie typu przez Główny Urząd Miar. Inicjatywa wystąpienia z wnioskiem o zatwierdzenie typu należy do producenta przetwornika. Trzeba zaznaczyć, że wyniki dotychczasowych badań nie gwarantują pomyślnego przebiegu procesu zatwierdzenia typu z uwagi na obszerniejszy zakres wymaganych badań, niemniej roszą uzyskanie takiego zatwierdzenia.

Pozytywne wyniki pozwalają na kontynuację badań porównawczych dwóch sposobów lokalizacji miejsca pomiaru drgań – dotychczas stosowanego w praktyce, obok rąk pracownika oraz nowego, w miejscu kontaktu rąk pracownika z drgającą powierzchnią, w warunkach symulujących pomiary na stanowisku pracy, na którym

drzania są przenoszone do organizmu człowieka przez kończyny górne. W badaniach tych zostanie wykorzystane, unikalne w skali kraju, stanowisko ze stołem wibracyjnym typu 4803 firmy Brüel & Kjær. W opinii autorów, zakończenie tych badań, uzupełnionych badaniami w warunkach rzeczywistych, będzie skutkowało opracowaniem metody badań drgań przenoszonych do rąk, wykonywanych w warunkach przemysłowych, z wykorzystaniem przetwornika A3R, w celu oceny narażenia człowieka na ten rodzaj oddziaływania.

Literatura

1. Analiza struktury i zapadalności na choroby zawodowe pracowników gospodarki narodowej w Polsce w 1998 roku. Łódź, IMP 1999.
2. Analiza struktury i zapadalności na choroby zawodowe pracowników gospodarki narodowej w Polsce w 1999 roku. Łódź, IMP 2000.
3. Analiza struktury i zapadalności na choroby zawodowe pracowników gospodarki narodowej w Polsce w 2000 roku. Łódź, IMP 2001.
4. Analiza struktury i zapadalności na choroby zawodowe pracowników gospodarki narodowej w Polsce w 2001 roku. Łódź, IMP 2002.
5. Bradbury G., Saller E.: *New Sensor Mounting Technique for Machinery Vibration Monitoring*. Sound and Vibration. Feb. 1997.
6. Koton J., Szopa J.: *Drgania mechaniczne. Procedura badania drgań na stanowiskach pracy*. Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy, R. XVII. Warszawa, CIOP 2001, s. 213-233.
7. Mrukwa W., Świder J., Staniek A.: *Ocena możliwości pomiaru drgań w miejscu kontaktu ręki z ich źródłem*. Prace Naukowe GIG, Seria: Górnictwo i Środowisko 2002 nr 1, s. 91-102.
8. Norma EN-ISO 5349-1:2001 Mechanical vibration-measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration. Part 1: General guidelines.
9. Norma EN-ISO 5349-2:2001 Mechanical vibration-measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration. Part 2: Practical guidance for measurement in the workplaces.
10. Norma ISO 5348:1987 Mechanical vibration and shock – Mechanical mounting of accelerometers.
11. *Piezoelectric Accelerometers and Vibration Preamplifiers. Theory and Application Handbook*. Bruel and Kjaer 1986.
12. Praca zbiorowa: *Ocena możliwości pomiarów drgań przenoszonych do rąk w miejscu ich kontaktu z urządzeniem*. Pod kier. W. Mrukwy. Prace statutowe GIG, Katowice 2001 (niepublikowana, dostępna w archiwum GIG).
13. Rozporządzenie Ministra Zdrowia i Opieki Społecznej z dnia 9 lipca 1996 r. w sprawie badań i pomiarów czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy, Dz.U. nr 86, poz. 394.
14. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 30 lipca 2002 r. w sprawie wykazu chorób zawodowych, szczegółowych zasad postępowania w sprawach zgłaszania, podejmowania, rozpoznawania i stwierdzania chorób zawodowych oraz podmiotów właściwych w tych sprawach, Dz.U. nr 132, poz. 1115.
15. Rozporządzenie Ministra Zdrowia a dnia 20 grudnia 2002 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie badań i pomiarów czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy, Dz.U. z 2003 r. nr 21, poz. 180.

16. Zarządzenie Nr 73 Prezesa Głównego Urzędu Miar z dnia 8 czerwca 1995 r. w sprawie wprowadzenia przepisów metrologicznych o piezoelektrycznych użytkowych przetwornikach drgań i elektrodynamicznych użytkowych przetwornikach drgań o masie do 300 g, Dz. Urzęd. Miar i Prob., nr 14, poz. 78.
17. Zarządzenie nr 74 Prezesa Głównego Urzędu Miar z dnia 8 czerwca 1995 r. w sprawie wprowadzenia instrukcji sprawdzania piezoelektrycznych użytkowych przetworników drgań i elektrodynamicznych użytkowych przetworników drgań o masie do 300 g, Dz. Urzęd. Miar i Prob., nr 14, poz. 79.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Adam Lipowczan