

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.

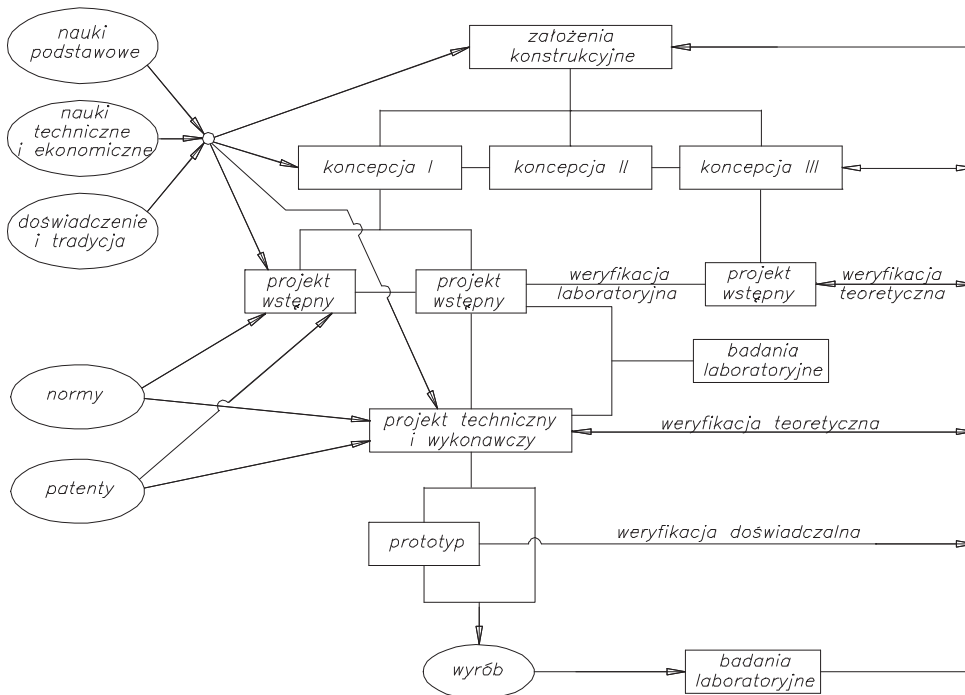
W obu przypadkach rozwiązań konstrukcyjnych (tradycyjnym i szkieletowym) obudowy odgałęzienia lub skrzyżowania wymagane jest indywidualne obliczanie gabarytów kolejnych odrzwi oraz każdorazowe obliczanie długości i promieni gięcia elementów łukowych. Początkowo obliczenia te stanowiły poważne utrudnienie. 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].

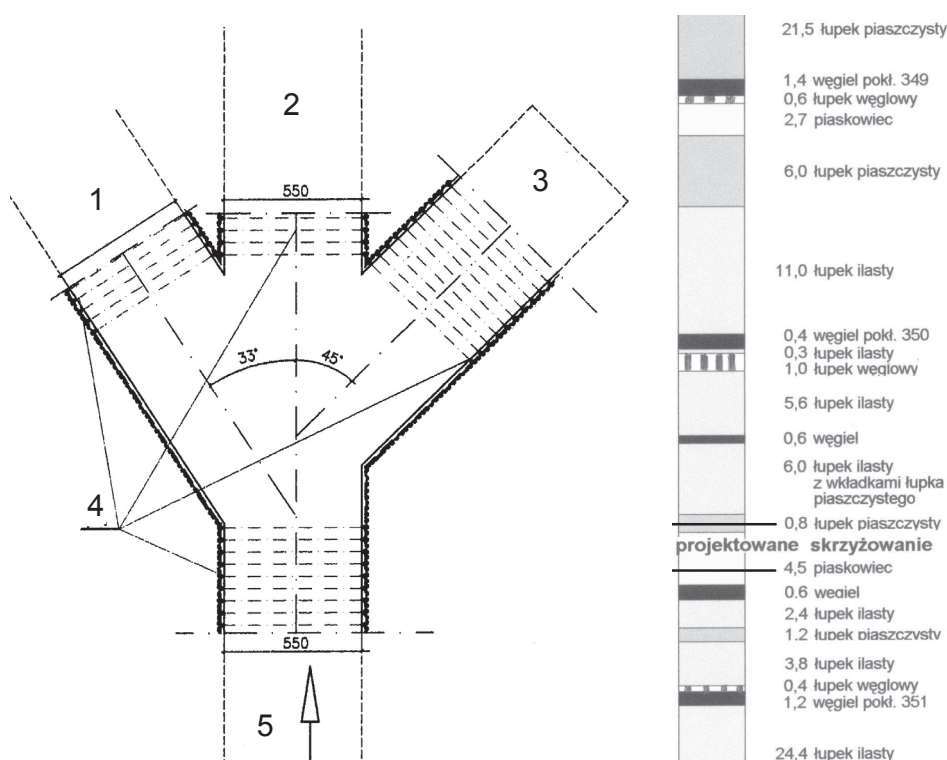
Wybory oraz decyzje, na różnych etapach konstruowania, są dokonywane z uwzględnieniem różnych kryteriów, z których najważniejsze to kryterium bezpieczeństwa i funkcjonalności, rozumianej jako spełnianie wszystkich zadań przytoczonych wcześniej. Istotne są także kryteria masy, ekonomiki użytkowania oraz 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-górnicznych, 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

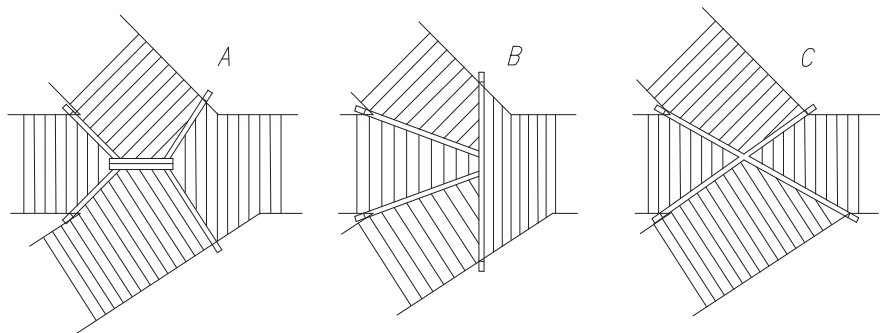
Fig. 2. Data needed for starting the design work: 1 – E-06 heading, 2 – B-C-02 inclined drift, 3 – niche, 4 – arched yielding supports ŁP10/29/A, 5 – direction of roadway drivage

Analizowane zabezpieczone 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.

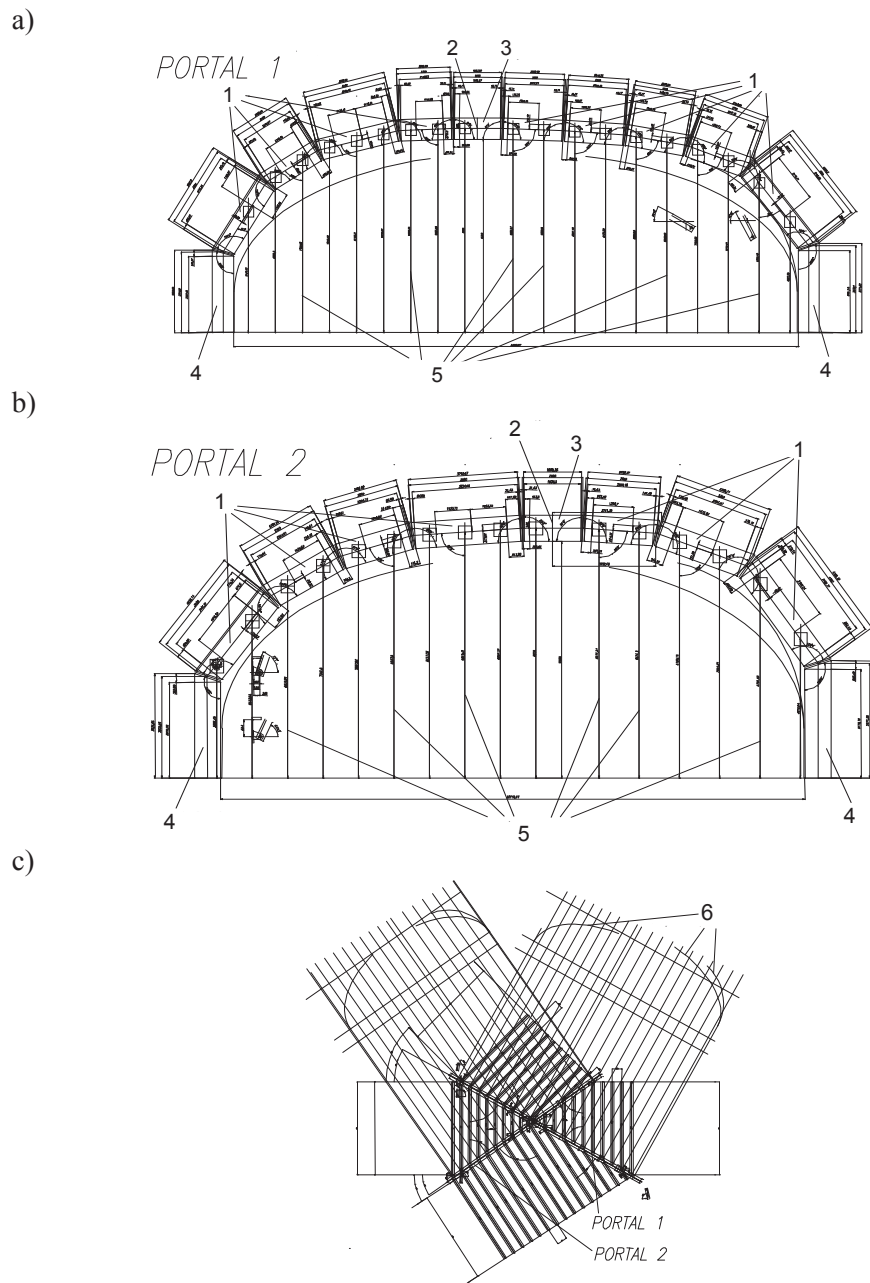
W tym etapie jest ustalany podział konstrukcji na poszczególne belki i lokalizacja łączników, wynikająca między innymi z założonego rozstawu odrzwi. Czynniki te są ściśle powiązane. Podział konstrukcji na belki musi uwzględniać takie rozmieszczenie łączników, aby nie występowały kolizje między konstrukcją zasadniczą a przyłączonymi do niej odrzwiami. Szczególnie dotyczy to blach łączących belki oraz półek 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 upodatniających. 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”.

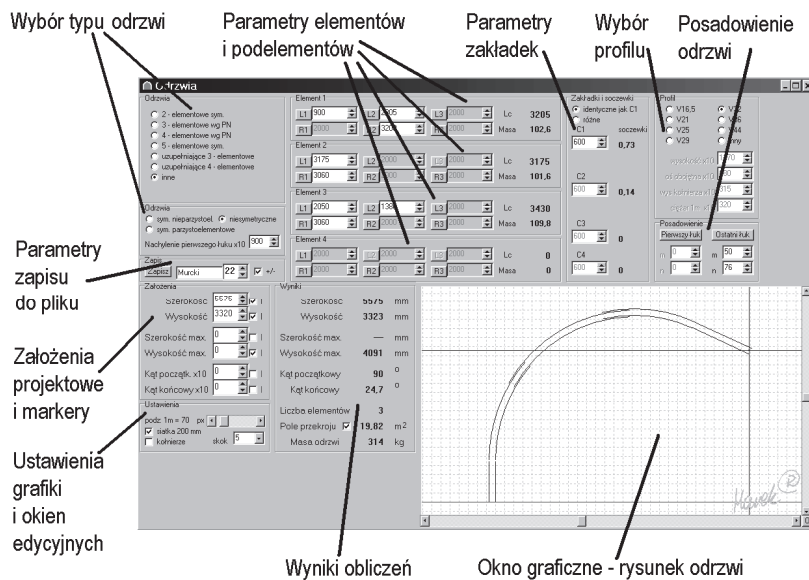
Należy zwrócić uwagę, że obudowa taka stanowi konstrukcję samostabilizującą. Nie ma ona tendencji do utraty założonej formy – płaskości portali. Zupełnie inna sytuacja występuje w przypadku „typowej” obudowy odgałęzienia, składającej się z portala i wspornika. Górotwór działający na wspornik powoduje, 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 – upodatnienie, 5 – położenie odzwi, 6 – linie przenikania zarysów wyrobisk

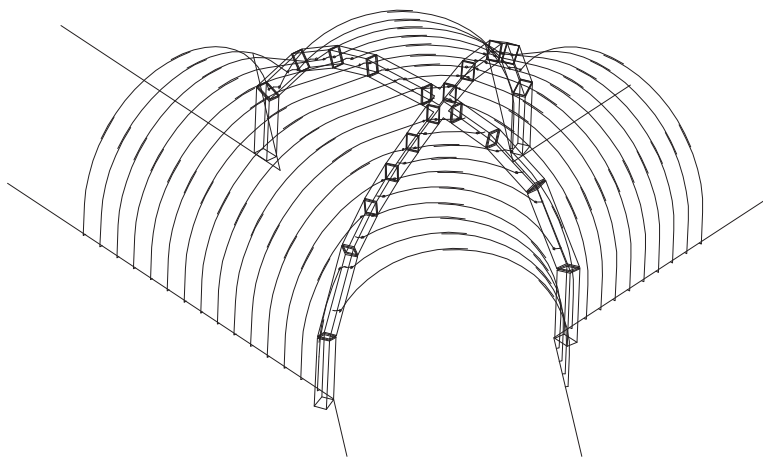
Fig. 4. Full pre-design of the main construction: a – portal 1, b – portal 2, c – drawing of the branch, variable scale; 1 – beams, 2 – location of portals connection, 3 – cross-bar, 4 – yielding element, 5 – door-frame position, 6 – lines of intersection of roadway profiles



Rys. 5. Okno programu CAD w czasie projektowania drzwi

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, określenia miejsc, w których może zachodzić kolizja elementów oraz sprawdzenia poprawności zaprojektowanych drzwi. 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

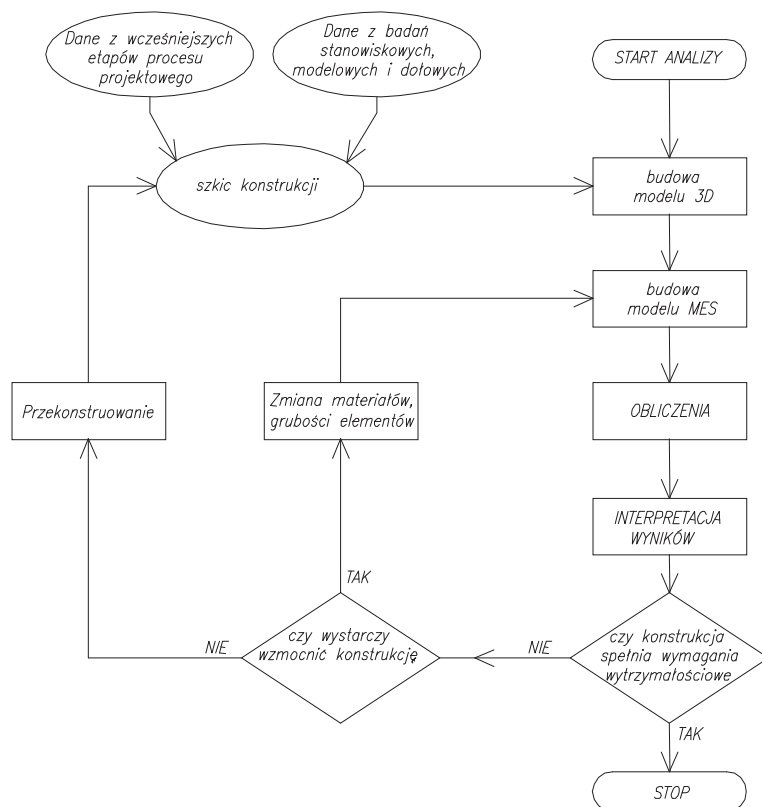
2.4. Analiza wytrzymałościowa

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.

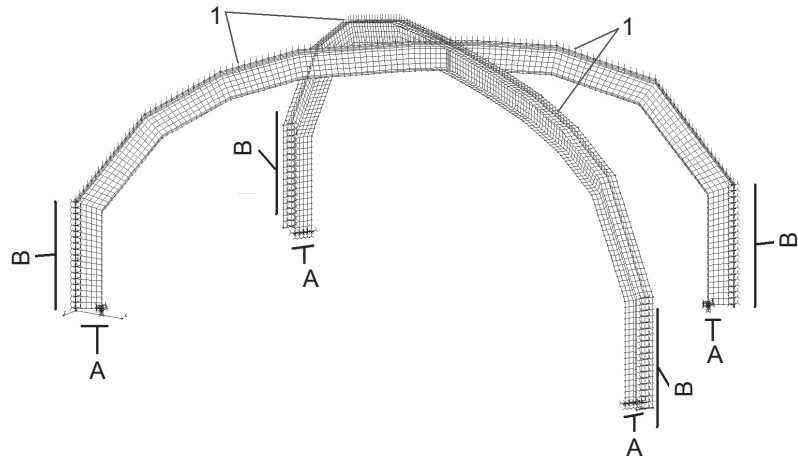


Rys. 7. Algorytm obliczeń wytrzymałościowych

Fig. 7. Algorithm of mechanical strength computations

W celu przeprowadzenia analizy konieczne było zbudowanie odpowiedniego modelu, który by jak najwierniej odzwierciedlał parametry geometryczne i fizyczne modelowanego układu. Sporządzono przestrzenny model składający się z 4493 czterowęzłowych elementów powłokowych typu SHELL4T opisanych na 4828 węzłach. Elementy zebrano w trzech grupach. W grupie pierwszej znalazły się elementy modelujące półki dwuteownika IPB, w grupie drugiej elementy modelujące środnik, natomiast w grupie trzeciej (występującej tylko w ostatnim etapie analizy) zgromadzono elementy modelujące półki wzmocnione blachą.

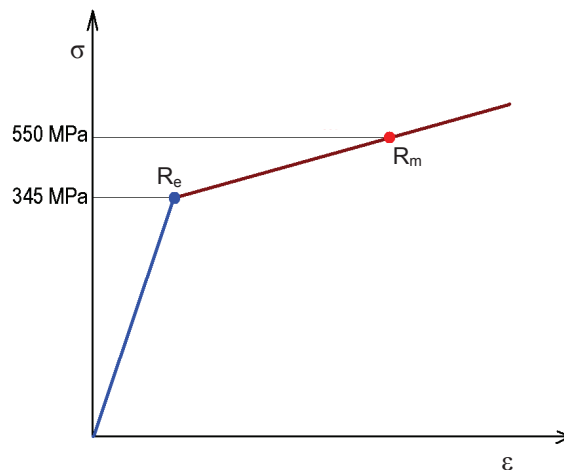
Model ten został podparty w kilku miejscach. Podpory typu A modelowały podparcie konstrukcji na spągu, natomiast podpory typu B – odpór ociosów (rys. 8). Tak podpartą konstrukcję obciążono siłami odpowiadającymi ciśnieniu, z jakim górotwór oddziałuje na obudowę. Obciążenie to wyznaczono zgodnie z „Uproszczonymi 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).

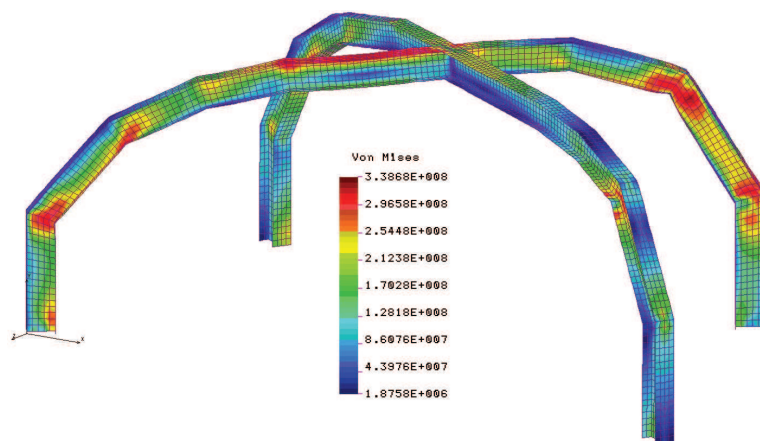


Rys. 9. Biliniowy model materiału: ϵ – odkształcenie względne, σ – naprężenie, R_m – wytrzymałość materiału, R_e – granica plastyczności

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.



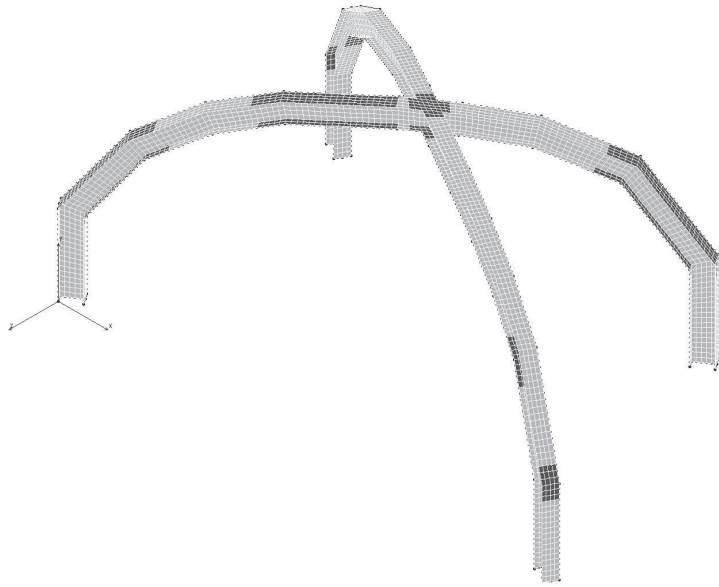
Rys. 10. Rozkład naprężeń w modelu konstrukcji zasadniczej obudowy skrzyżowania (skala deformacji 10×, naprężenia w Pa)

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 uwzględniającą 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.

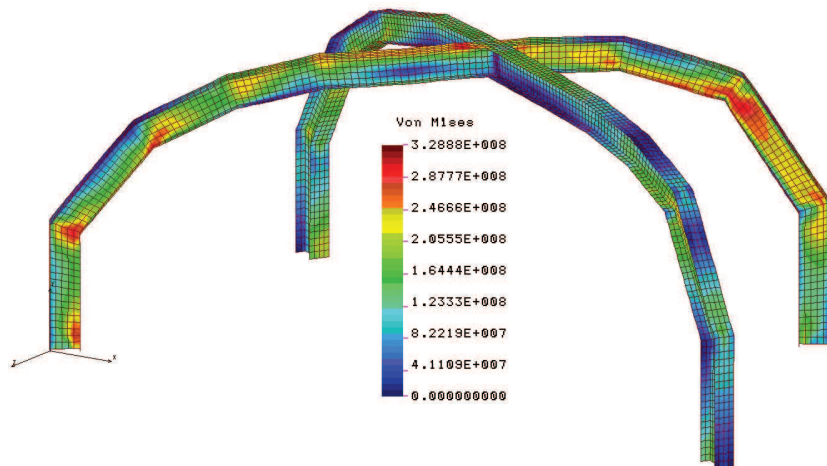
W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano, podobnie jak poprzednio, rozkład naprężeń zredukowanych. Na rysunku 12 przedstawiono barwną mapę naprężeń zredukowanych występujących w modelu pod wpływem obciążenia odpowiadającego ciśnieniu górotworu. Wyraźne jest zmniejszenie naprężeń zredukowanych – osiągają 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)

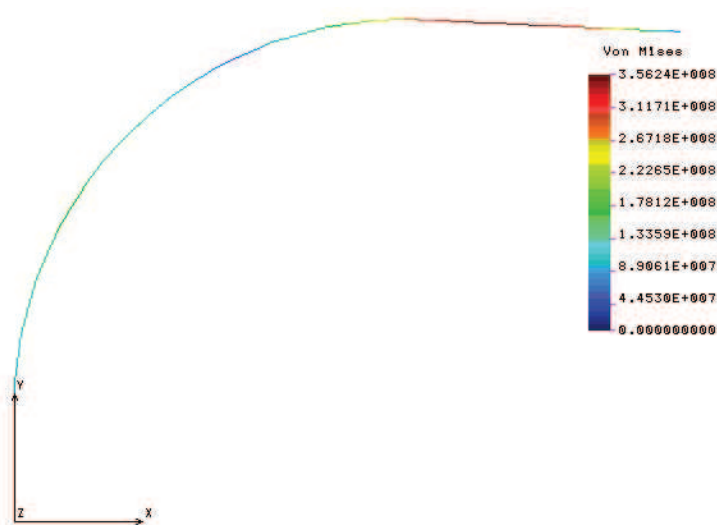
Fig. 11. Model of the crossing supports with welded reinforcing plates (reinforced elements marked with deeper shade)



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)

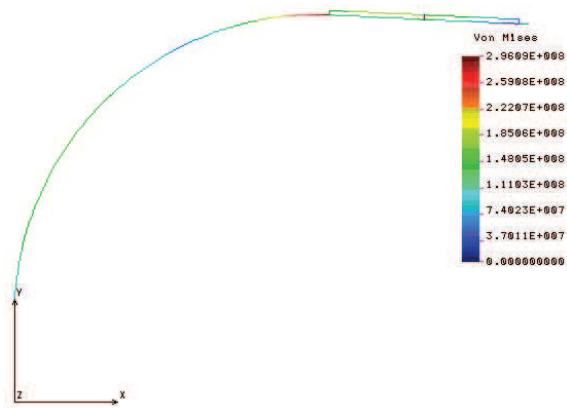
Kolejnym sprawdzanym wytrzymałościowo elementem były odrzwia uzupełniające, stanowiące istotną część konstrukcji obudowy skrzyżowania. W omawianej konstrukcji obawy budziły odrzwia o prostoliniowej stropnicy. Związane to było z mniejszą wytrzymałością prostych elementów niż elementów łukowych. Zatem celowe było przeprowadzenie badań wytrzymałościowych takich odrzwi. Do badań wytypowano odrzwia najszerze, 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 spągkiem 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

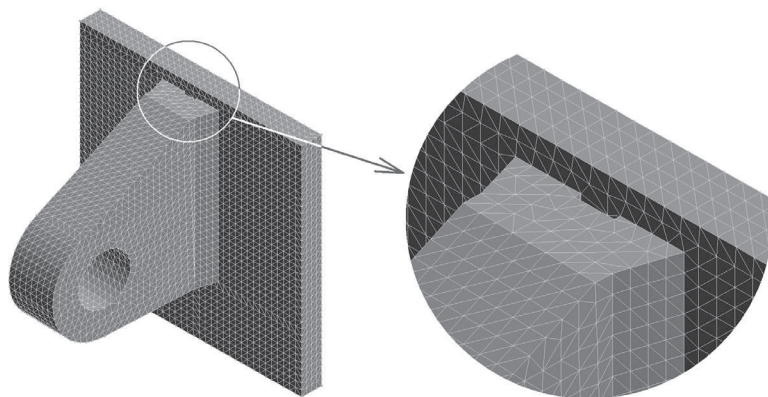
Często zdarza się, że analiza wytrzymałościowa konstrukcji zasadniczej i odrzwi nie jest wystarczająca. Dzieje się tak, gdy ma się do czynienia ze słabszym (niepewnym) elementem konstrukcji. W przypadku omawianej konstrukcji były to ucha do łączenia odrzwi uzupełniających z poszczególnymi belkami. Zastosowany 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.

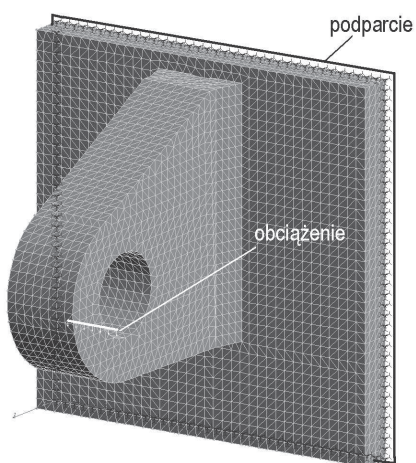


Rys. 15. Model łącznika z uwzględnieniem spoin

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.

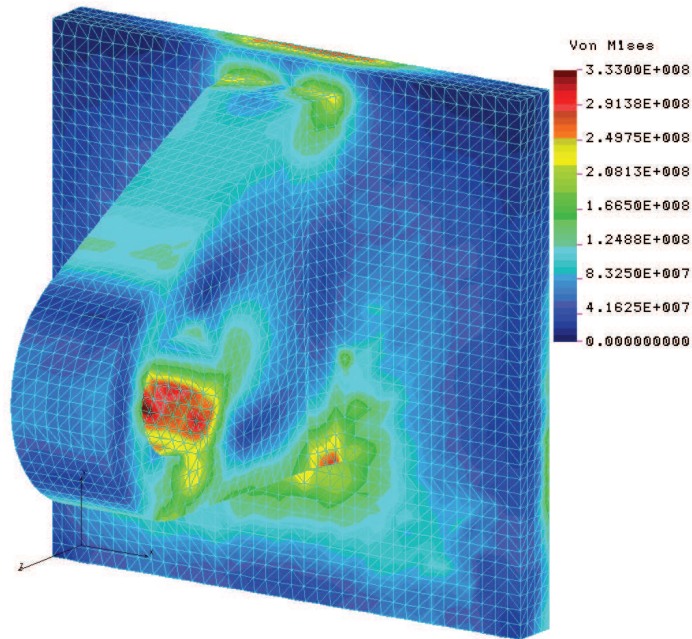
Taki sposób obciążenia jest znacznie bardziej niekorzystny od rzeczywistego, w którym kontakt i przeniesienie obciążeń między sworzniem a otworem zachodzi na powierzchni, znacznie zmniejszając tym samym naprężenia w miejscach obciążonych. Na rysunku 16 przedstawiono sposób podparcia i obciążenia modelu.



Rys. 16. Sposób podparcia i obciążenia łącznika

Fig. 16. Method of supporting and loading

Wartość obciążenia dobrano tak, aby uwzględniła 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 $\sigma = 333,3$ MPa i były zlokalizowane na obciążonej powierzchni otworu. Wartości te nieznacznie zbliżyły 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 węzle 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)

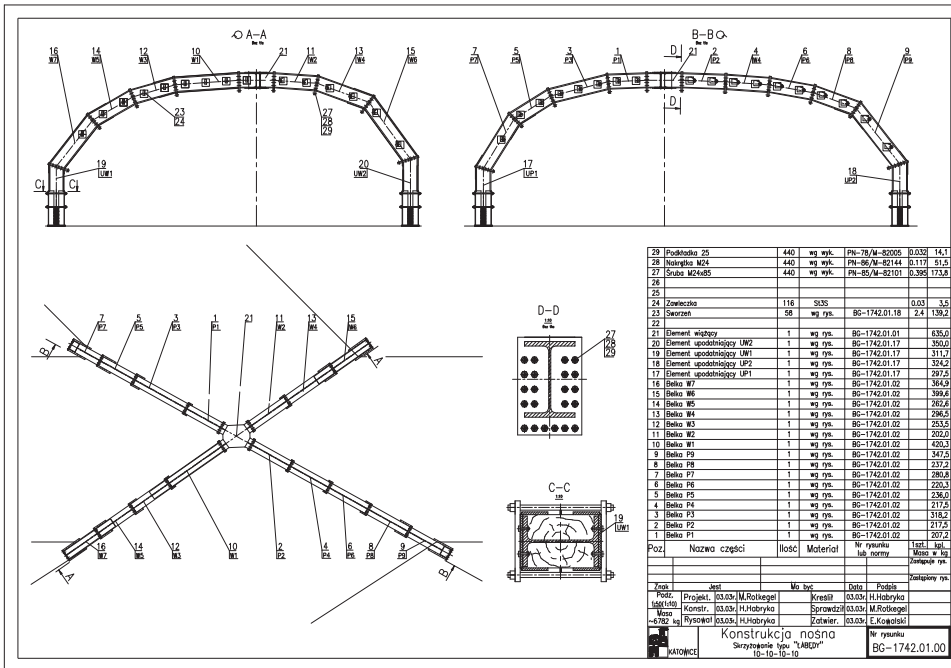
2.6. Wykonanie dokumentacji rysunkowej

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

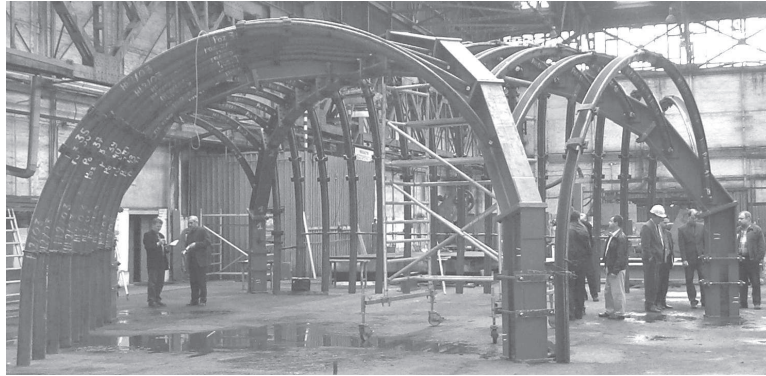
Fig. 18. Assembly drawing of the main construction of an exemplary crossing

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. Dietrych 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