

*Marek Rotkegel*

## **WPLYW WIELKOŚCI KSZTAŁTOWNIKÓW I GATUNKU MATERIAŁU NA STAN WYTEŻENIA KONSTRUKCJI OBUDOWY ODGAŁĘZIENI WYROBISK KORYTARZOWYCH**

### **Streszczenie**

W ostatnim czasie, w celu zwiększenia atrakcyjności ofert, producenci obniżają ceny swoich wyrobów. Pociąga to za sobą konieczność ograniczania zapasów magazynowych. Dodatkowo tryb realizacji zamówień powoduje często, że konieczne jest poszukiwanie zamienników wcześniej stosowanych i sprawdzonych materiałów i kształtowników. Poszukiwania takie nie ograniczają się jedynie do przeglądania ofert hurtowni wyrobów stalowych. Znacznie ważniejsza jest weryfikacja wytrzymałościowa projektowanej konstrukcji. W artykule zaprezentowano przykładowy przebieg i wyniki analizy wytrzymałościowej konstrukcji zasadniczej obudowy odgałęzienia wykonanej z dostępnych profili i materiałów.

### **Influence of sections sizes and material sort on the state strain of support construction of corridor excavations branches**

#### **Abstract**

Recently, to increase an attractiveness of offers, producers lower prices of their articles. It results in necessity of reserve stock limiting. A course of completion of orders causes that searching of substitutes for practised and checked materials and sections becomes necessary. This searching is not only revision of the offers of steel articles dealer. More important is strength verification of designed structure. An example course and results of strength analysis of support of crossing gallery made of accessible sections and materials were presented.

### **WPROWADZENIE**

W ostatnich latach trudności w projektowaniu konstrukcji dla górnictwa wynikają nie tylko ze specyfiki tej gałęzi przemysłu, ale także są związane z dostępnością materiałów na ich wykonanie. W celu zwiększenia atrakcyjności oferty, obniżane są ceny materiałów, co wiąże się także z ograniczeniem ich zapasów magazynowych. Działania takie podejmują nie tylko wytwórcy gotowego wyrobu, ale również producenci i dystrybutorzy wyrobów hutniczych – stalowych kształtowników. Wynikiem takiego stanu rzeczy jest poszukiwanie na rynku kształtowników, które mogą być zastosowane w nowo projektowanej konstrukcji w miejsce stosowanych, przebadanych i sprawdzonych wcześniej kształtowników.

Sytuacja taka nierzadko występuje podczas projektowania szkieletowej obudowy odgałęzień i skrzyżowań. Wymagany przez klienta termin dostawy niejednokrotnie zmusza projektanta i producenta do szybkiego działania. Ułatwieniem jest obecny poziom techniki. Mechanika w połączeniu z informatyką dostarczają projektantowi stosownych narzędzi, które przy właściwym ich użytkowaniu ułatwiają podejmowanie

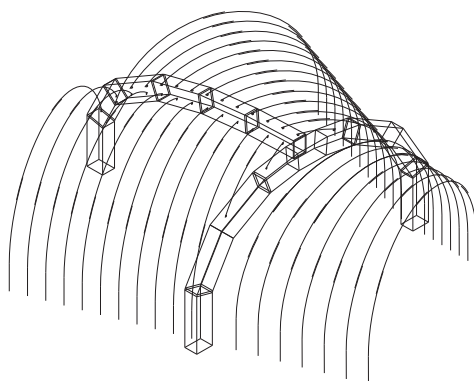
decyzji w złożonym procesie projektowym. Najważniejszym takim narzędziem jest metoda elementów skończonych (Rusiński E. 1994; Rakowski G., Kacprzyk Z. 1996; Rakowski G. 1996) z licznymi aplikacjami komputerowymi.

## 1. SZKIELETOWA OBUDOWA ODGAŁĘZIENÍ I SKRZYŻOWAŃ

Najczęstszym połączeniem wyrobisk korytarzowych jest odgałężenie 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 do naroża odgałężenia. W celu zachowania wymaganej nośności odrzwi, konieczne jest nadanie im odpowiedniego kształtu łukowego, a to pociąga za sobą konieczność wykonania wyłomu o dużej wysokości. Odrzwia zabudowane w miejscu największego oddziaływania górotworu – największej szerokości odgałężenia – mają znaczne gabaryty i charakteryzują się małą nośnością. W skrajnych przypadkach daje to efekt zagęszczenia odrzwi do granic możliwości. Ponadto, w stropie odgałężenia, przy narożu stykających się wyrobisk powstaje bardzo duża przestrzeń, w której gromadzi się metan oraz powodująca dodatkowy opór przepływu i zawirowania strugi powietrza.

Alternatywnym rozwiązaniem jest obudowa portalowa, dokładnie dopasowana do gabarytów łączących się wyrobisk. W przypadku odgałężenia składa się ona z konstrukcji zasadniczej (portalu i wspornika) oraz odrzwi. W przypadku skrzyżowania dwustronnego w skład zasadniczej konstrukcji najczęściej wchodzi dwa krzyżujące się portale. Konstrukcja zasadnicza przenosi przeważającą część obciążeń pochodzących od górotworu. Odrzwia natomiast stanowią ważne uzupełnienie konstrukcji; przenoszą obciążenia częściowo na wspornik, a częściowo na spąg (Rotkegel M. 2003; Stałęga S. 2001).

Obudowa taka stanowi skuteczne zabezpieczenie wyrobisk korytarzowych w strefie ich połączenia. Właściwie zaprojektowana obudowa w porównaniu z tradycyjną obudową typu palmowego ma wiele zalet. Najważniejsze z nich to korzystne wymiary gabarytowe pozwalające na zminimalizowanie wysokości wyłomu w narożu połączenia oraz zwiększona nośność obudowy. Schematycznie zarys obudowy przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Obudowa korytarzowych

połączenia wyrobisk

Fig. 1. Support of connection of crossing gallery

## 2. WYBÓR KSZTAŁTOWNIKA I MATERIAŁU

Uzyskanie optymalnego rozwiązania (Podstawy ... 1995; Dietrych J. 1974) obudowy odgałęzienia wymaga odpowiedniego kształtownika i materiału. Niestety przy doborze materiałów trzeba kierować się także ich dostępnością na rynku. Dysponując określoną liczbą kształtowników walcowanych z pewnych gatunków stali nie można zaprojektować rozwiązania optymalnego, a jedynie najlepsze z wykorzystaniem dostępnych kształtowników. W prezentowanym przypadku projektowania obudowy odgałęzienia dostępnymi kształtownikami były:

- dwuteownik normalny I500 wg PN-91/H-93407 ze stali St3S,
- dwuteownik normalny I450 wg PN-91/H-93407 ze stali 18G2A,
- dwuteownik normalny I500 wg PN-91/H-93407 ze stali St44,
- dwuteownik równoległościenny IPE550 wg PN-91/H-93419 ze stali 18G2A.

Jeden z wymienionych, dostępnych kształtowników, miał zastąpić wstępnie przewidziany na tę konstrukcję dwuteownik I500 walcowany ze stali 18G2A. W celu wybrania odpowiedniego kształtownika zastosowano metodę elementów skończonych.

### 2.1. Metoda badawcza i przebieg modelowania

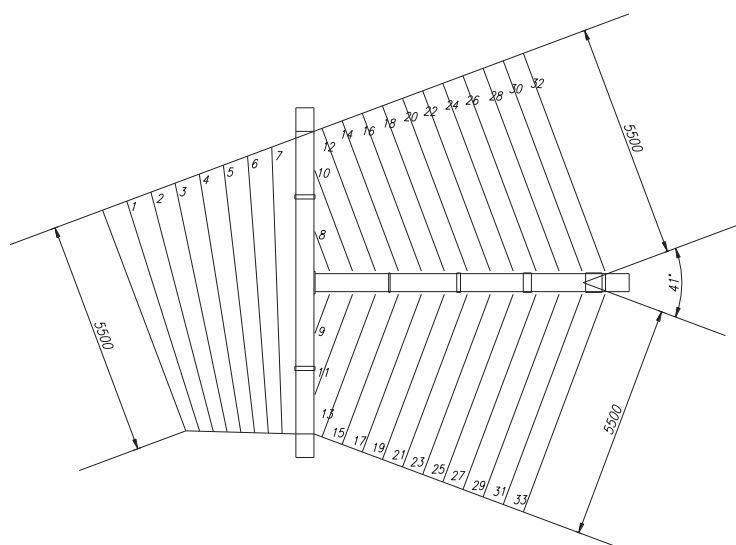
Z uwagi na rozmiary i cenę obiektu (przedmiotu analizy) przeprowadzenie laboratoryjnych badań wytrzymałościowych nie było możliwe. Poza tym pełny cykl takich badań wiąże się ze zniszczeniem drogiego wyrobu. W związku z tym jedynym sposobem przeprowadzenia takich badań były badania modelowe, z zastosowaniem na przykład metody elementów skończonych (MES, ang. *FEM*). Metoda ta pozwala na wykonanie badań wytrzymałościowych w przestrzeni wirtualnej – już na etapie prac projektowych. Jej istotą 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 zbadania 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 (Chmielewski T., Nowak H. 1996).

W analizach wykorzystano program COSMOS/M (COSMOS/M ... 1994). Z punktu widzenia użytkownika programu badanie sprowadza się do zamodelowania geometrii całego układu wraz z określeniem parametrów poszczególnych jego części. Parametrami tymi są własności materiału, parametry przekrojowe, a w przypadku analizy nieliniowej – krzywe materiałowe oraz funkcje przebiegu dociążania. Geometrię układu można zadać, tworząc ją w module GEOSTAR, bądź importując trójwymiarowy rysunek w formacie dxf, na przykład z programu AutoCAD. Bardzo uciążliwa dyskretyzacja natomiast, zwłaszcza w przypadku skomplikowanych modeli, jest dokonywana przez program w sposób automatyczny, ale pod kontrolą użytkownika

ka. Dalszym etapem modelowania jest określenie sposobu obciążenia i podparcia modelu. W wyniku obliczeń uzyskuje się między innymi deformacje modelu i rozkład naprężeń w elementach.

W celu wykonania powyższych badań konieczne było zbudowanie pięciu modeli o analogicznej budowie i identycznym schemacie podparcia i obciążenia. Różniły się one przekrojami belek konstrukcji zasadniczej oraz parametrami materiałowymi.

Modele odpowiadały gabarytami jednostronnemu połączeniu pod kątem  $41^\circ$  dwóch wyrobisk korytarzowych o formatach odpowiadających obudowie ŁP10 (Huta Łabędy ...). Zarys tego odgałęzienia przedstawiono na rysunku 2.












**Rys. 2.** Połączenie wyrobisk z naniesionym zarysem projektowanej obudowy

**Fig. 2.** Connection of excavations with support design outlined

Dla zwiększenia przejrzystości modele oznaczono literami A–E. Na każdy model złożyły się 4022 czterowzłowe elementy powłokowe typu SHELL opisane na 4006 węzłach. Elementy, w zależności od modelu, zebrano w dwóch lub trzech grupach. Pierwsza grupa obejmowała elementy modelujące półki dwuteowników, druga środniki, natomiast w trzeciej grupie zebrano elementy symulujące półki wzmocnione nakładkami. W zależności od przyjętego dwuteownika elementom każdej z grup nadano odpowiednie grubości. W tabelicy 1 zebrano opisy modeli wraz z parametrami przekrojowymi belek i grubościami elementów.

Każdy z modeli obciążono siłami równomiernie rozłożonymi na długości każdej z belek. Wartość sił dobrano tak, aby odpowiadała obciążeniom konstrukcji przez górotwór wyznaczonym zgodnie z „Uproszczonymi zasadami doboru obudowy odrzwiowej...” (Rułka K. i inni 2001). Uwzględniono także fakt, że część tego obciążenia przenoszą odrzwia uzupełniające bezpośrednio na spąg. Na rysunku 3 przedstawiono kompletny przykładowy model z zaznaczonym sposobem podparcia i obciążenia oraz wzmocnionymi elementami.

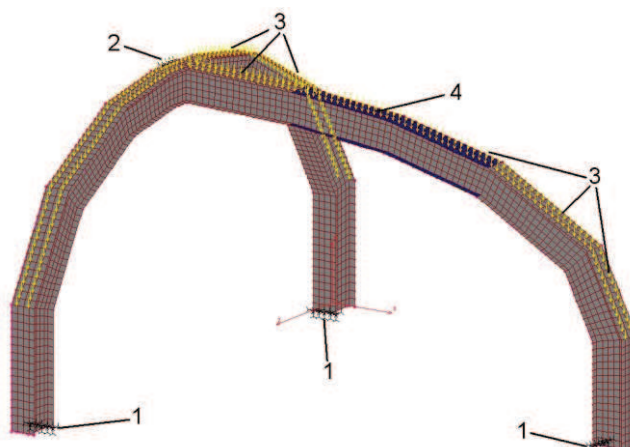
Tablica 1. Podstawowe parametry modeli

Oznaczenie modelu	Oznaczenie przekroju belki	Gatunek materiału	Przekroje	h × b mm	W <sub>x</sub> cm <sup>3</sup>	Grubości elementów w grupie		
						I (półki) mm	II (środniki) mm	III (półki wzmocnione) mm
A	2×I500	18G2A		500×370	5500	27,0	18,0	nie występują
B	2×I500	St3S		500×370	5500	27,0	18,0	nie występują
				532×370	8125	27,0	18,0	43,0
C	2×I450	18G2A		450×340	4080	24,3	16,2	nie występują
				482×340	6250	24,3	16,2	40,0
D	2×I500	St44		500×370	5500	27,0	18,0	nie występują
				532×370	8125	27,0	18,0	43,0
E	2×IPE550	18G2A		550×420	4880	17,2	11,0	nie występują
				585×420	8745	17,2	11,0	35,0

**Oznaczenia:** h – wysokość przekroju, b – szerokość przekroju, W<sub>x</sub> – wskaźnik wytrzymałości przekroju na zginanie

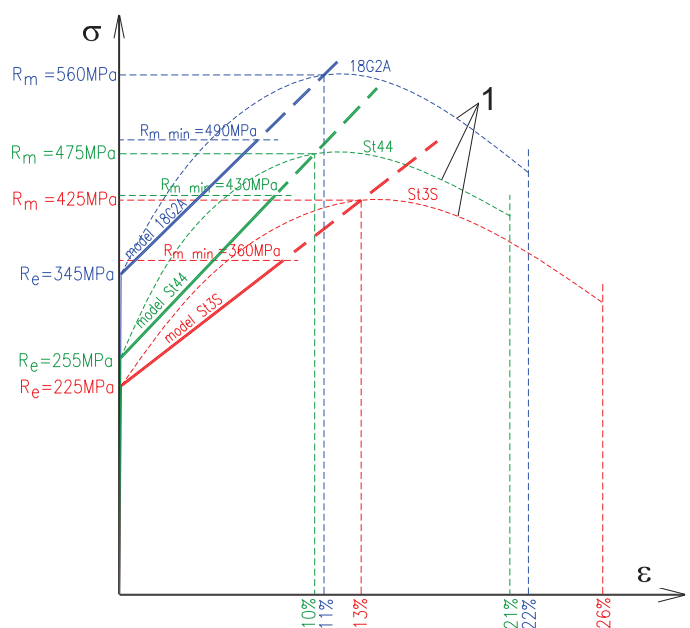
Uwzględniając dostępne kształtowniki i gatunki stali przyjęto odpowiednie modele materiałów. Krzywe materiałowe we wszystkich przypadkach przybliżono dwiema liniami, uzyskując biliniowe charakterystyki opisujące model ciała sprężysto-

-plastycznego z umocnieniem liniowym (Bąk R., Burczyński T. 2001). Na rysunku 4 przedstawiono charakterystyki materiałowe – modele stali przyjęte w analizach – St3S, St44 i 18G2A. Zaznaczono także minimalne wartości wytrzymałości na rozciąganie ( $R_{m \min}$ ) oraz orientacyjne wykresy rozciągania każdego z materiałów.



Rys. 3. Geometryczne modele zbudowane do analiz: 1 – podparcie na spągu, 2 – stabilizacja portalu, 3 – obciążenie modelu, 4 – półki wzmocnione

Fig. 3. Geometrical models constructed for analyses: 1 – floor support, 2 – portal stabilisation, 3 – model load, 4 – strengthened shelves

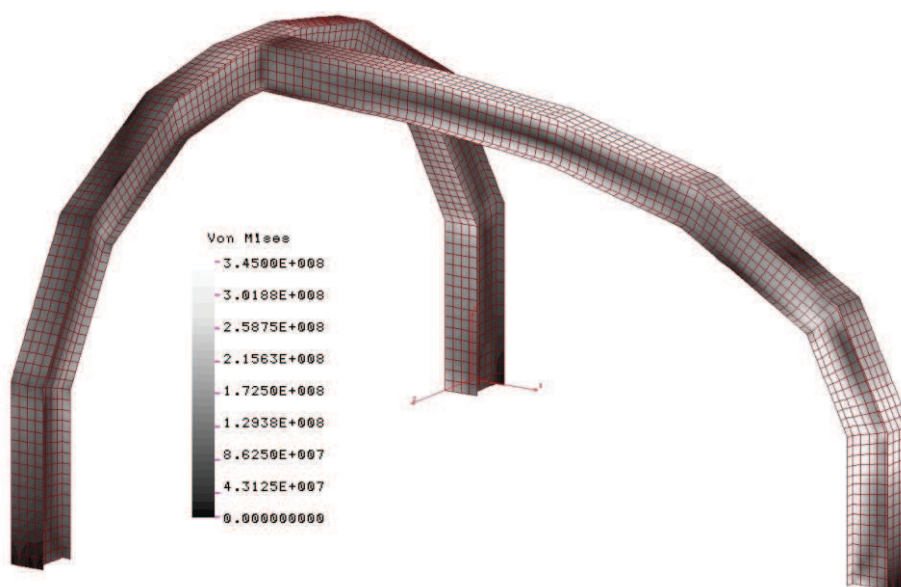


Rys. 4. Modele stali przyjęte do analiz:  $\epsilon$  – odkształcenia,  $\sigma$  – naprężenia, 1 – wykresy rozciągania

Fig. 4. Models of steel accepted for analyses:  $\epsilon$  – strains,  $\sigma$  – stress, 1 – tension diagrams

## 2.2. Wyniki analizy

Analiza przeprowadzona została w kilku etapach. W każdym etapie modelowano jedno rozwiązanie konstrukcyjne obudowy odgałęzienia. Pierwszym było określenie stanu wyężenia konstrukcji zbudowanej z połączonych ze sobą dwóch dwuteowników normalnych I500 ze stali 18G2A. Na rysunku 5 przedstawiono rozkład naprężeń zredukowanych (Dyląg Z., Jakubowicz A., Orłoś Z. 1996) w konstrukcji zasadniczej obudowy odgałęzienia bez dodatkowych wzmocnień lecz z dodatkowo podpartym portalem.



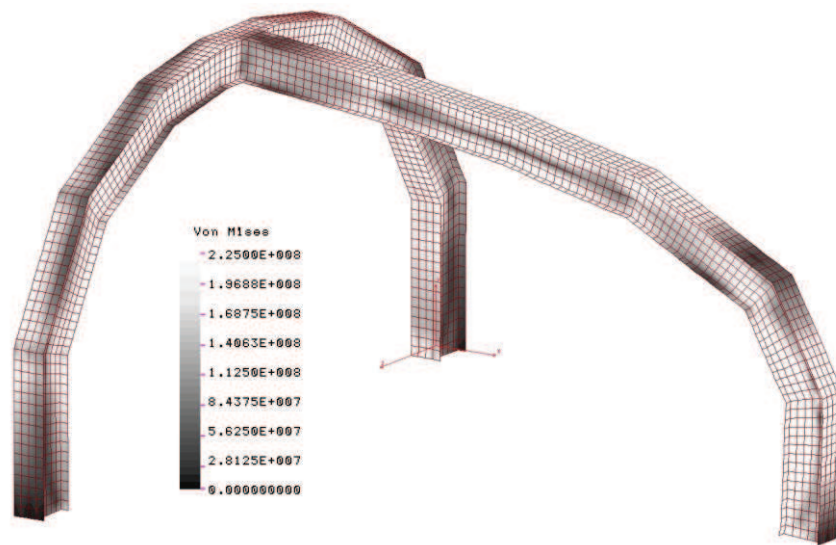
Rys. 5. Rozkład naprężeń zredukowanych w modelu A; konstrukcja wykonana z dwuteownika normalnego I500 ze stali 18G2A (naprężenia, Pa)

Fig. 5. Reduced stress distribution in model A; construction made from usual I500 double-tee bar of 18G2A steel (stresses, Pa)

Na zaprezentowanej mapie wyężenia w żadnym miejscu modelu naprężenia nie przekroczyły granicy plastyczności materiału ( $R_{e\ 18G2A} = 345\text{ MPa}$ ). Zatem przeprowadzona symulacja potwierdziła możliwość bezpiecznego zastosowania modelowanej konstrukcji w zaplanowanym miejscu zabudowy. Jednak, jak wcześniej wspomniano, zastosowanie tego przekroju było niemożliwe ze względu na występujące braki handlowe.

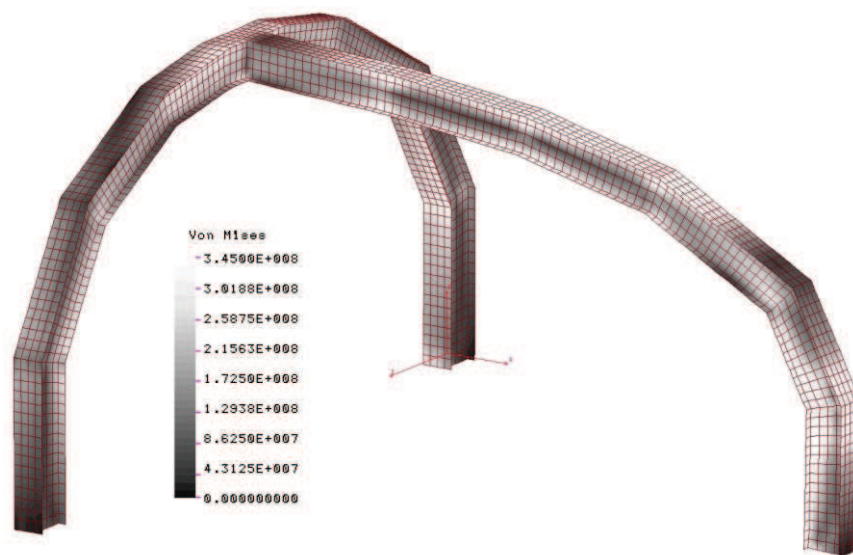
W kolejnych etapach w podobny sposób analizowano pozostałe modele, oznaczone literami B–E. Na rysunkach 6–9 przedstawiono stan wyężenia i deformacji pozostałych modeli. Mimo, że wykonano badania wszystkich wariantów konstrukcji, w artykule przedstawiono jedynie modele ze wzmocnionymi półkami oraz z dodatkowo zastabilizowanym portalem. Na wszystkich rysunkach skalę naprężeń dobrano tak, aby szósty kolor odpowiadający największym naprężeniom obejmował elementy uplastycznione – w których przekroczona została granica plastyczności.





**Rys. 6.** Rozkład naprężeń zredukowanych w modelu B; konstrukcja wykonana z dwuteownika normalnego I500 ze stali St3S z dwoma wzmocnionymi belkami wspornika oraz zastabilizowanym portalem (naprężenia, Pa; skala deformacji 2x)

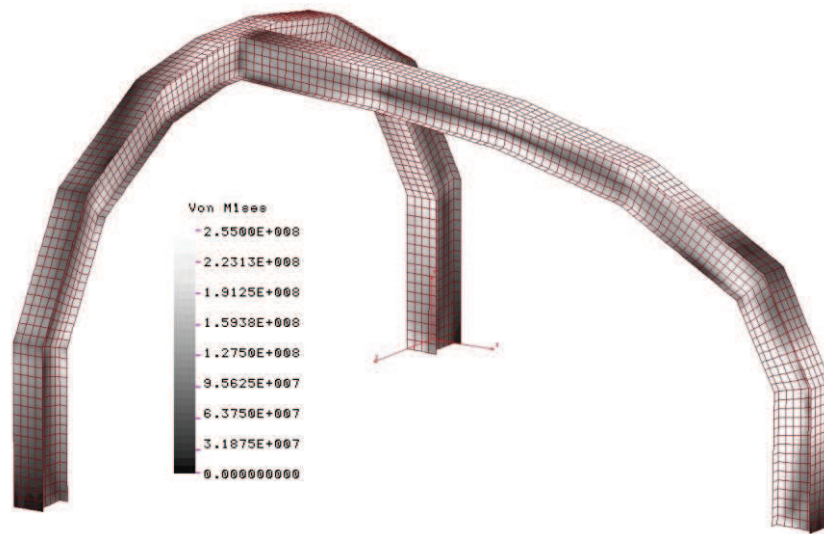
**Fig. 6.** Reduced stress distribution in model B; construction made from usual I500 double-tee bar of St3S steel with two strengthened cantilever beams and stabilised portal (stresses, Pa; strain scale x2)



**Rys. 7.** Rozkład naprężeń zredukowanych w modelu C; konstrukcja wykonana z dwuteownika normalnego I450 ze stali 18G2A z dwoma wzmocnionymi belkami wspornika oraz zastabilizowanym portalem (naprężenia, Pa; skala deformacji 2x)

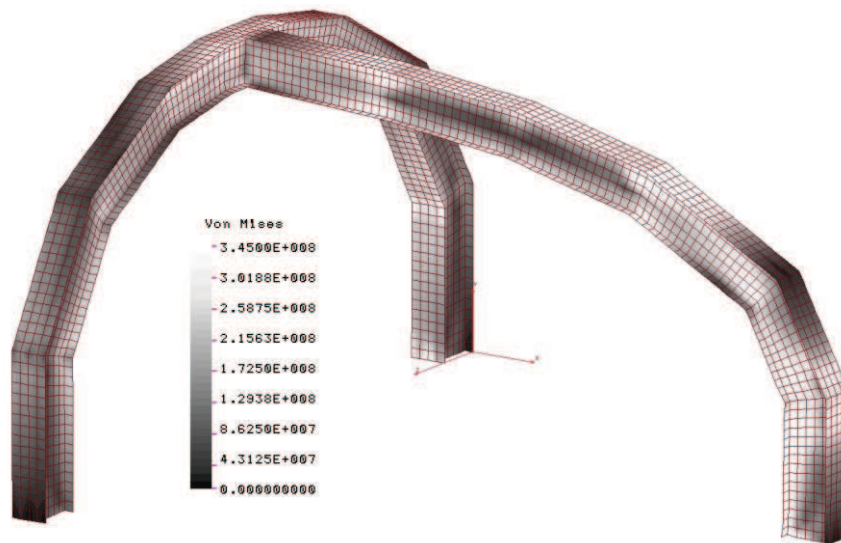
**Fig. 7.** Reduced stress distribution in model C; construction made from usual I450 double-tee bar of 18G2A steel with two strengthened cantilever beams and stabilised portal (stresses, Pa; strain scale x2)





**Rys. 8.** Rozkład naprężeń zredukowanych w modelu D; konstrukcja wykonana z dwuteownika normalnego I500 ze stali St44 z dwoma wzmocnionymi belkami wspornika oraz zastabilizowanym portalem (naprężenia, Pa; skala deformacji 2x)

**Fig. 8.** Reduced stress distribution in model D; construction made from usual I500 double-tee bar of St44 steel with two strengthened cantilever beams and stabilised portal (stresses, Pa; strain scale x2)

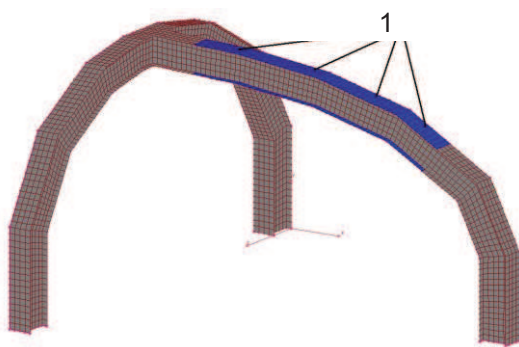


**Rys. 9.** Rozkład naprężeń zredukowanych w modelu E; konstrukcja wykonana z dwuteownika normalnego IPE550 ze stali 18G2A z dwoma wzmocnionymi belkami wspornika oraz zastabilizowanym portalem (naprężenia, Pa; skala deformacji 2x)

**Fig. 9.** Reduced stress distribution in model E; construction made from usual IPE550 double-tee bar of 18G2A steel with two strengthened cantilever beams and stabilised portal (stresses, Pa; strain scale x2)

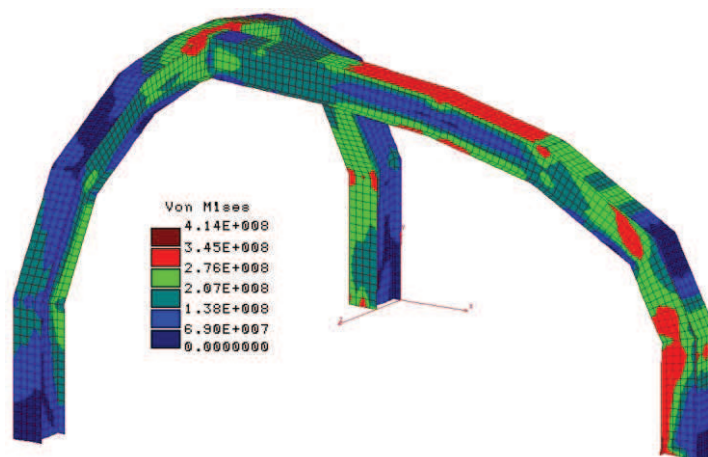
Z przedstawionych map naprężeń wynika, że w przypadku zastosowania dwuteowników ze stali St3S i St44 (odpowiednio modele B i D), pomimo wzmocnienia belek wspornika i zastabilizowania portalu, w konstrukcji nadal występują znaczne obszary uplastycznione. Jedynie w modelach C i D, wykonanych ze stali 18G2A, stan wyężenia jest akceptowalny, zwłaszcza w przypadku niewielkiego rozszerzenia zasięgu wzmocnień.

W omawianej konstrukcji zdecydowano się na zastosowanie belek wykonanych z zespawanych dwuteowników IPE550 ze stali 18G2A. Dodatkowo zastosowano częściowe wzmocnienie nakładkami belek wspornika pierwszej i czwartej po stronie wzmocnionych wcześniej belek drugiej i trzeciej. Zasięg strefy wzmocnień przedstawiono na rysunku 10. W wyniku przeliczeń zmodyfikowanego modelu E uzyskano zadawalający rozkład naprężeń zredukowanych. W żadnym miejscu konstrukcji nie została przekroczona granica plastyczności materiału. Barwną mapę naprężeń przedstawiono na rysunku 11.



**Rys. 10.** Belki wspornika wzmocnione nakładkami: 1 – wzmocnienie nakładkami

**Fig. 10.** Cantilever beams strengthened by fish-plates: 1 – strengthening with fish-plates



**Rys. 11.** Mapa naprężeń zredukowanych w konstrukcji zasadniczej obudowy odgałęzienia przeznaczonej do wykonania (naprężenia, Pa)

**Fig. 11.** Map of reduced stress in branch principal support intended for realisation (stresses, Pa)

### 3. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wszystkie modele konstrukcji, oprócz wyjściowego (model A – kształtownik 2×I500, stal 18G2A), dla właściwej pracy wymagają całkowitego zastabilizowania portalu. Brak takiej stabilizacji prowadzi do dużej deformacji wspornika na skutek uplastycznienia znacznych części przekroju drugiej i trzeciej belki. W analizowanym przypadku obudowy odgałęzienia jako stabilizację zastosowano układ dwóch długich kotwi.

Praktycznie na konstrukcję obudowy odgałęzień narażonych na znaczne obciążenia, jak w omawianym przypadku, nie może być stosowana stal węglowa zwykłej jakości. Ewentualne jej zastosowanie wiąże się z dodatkowym wzmacnianiem prawie całej konstrukcji, co wymaga znacznych kosztów i powoduje, że rozwiązanie jest nieekonomiczne, a ponadto nie zawsze daje zadowalającą poprawę stanu wytrzymałości konstrukcji.

W przypadku zastosowania „wytrzymałych” przekrojów (profil, materiał) możliwe jest ich dodatkowe skuteczne wzmocnienie przy niewielkim nakładzie kosztów. Uzyskuje się wtedy konstrukcję, która jest w stanie przeciwstawić się działającym na nią obciążeniom. Przykładem może tu być nieco zmodyfikowany model oznaczony literą E.

#### Literatura

1. Bąk R., Burczyński T. (2001): *Wytrzymałość materiałów z elementami ujęcia komputerowego*. Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
2. Chmielewski T., Nowak H. (1996): *Mechanika budowli. Metoda przemieszczeń. Metoda Crossa. Metoda elementów skończonych*. Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
3. COSMOS/M – User’s Guide. Structural Research & Analysis Corp. Los Angeles, USA 1999.
4. Dietrych J. (1974): *Projektowanie i konstruowanie*. Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
5. Dyląg Z., Jakubowicz A., Orłoś Z. (1996): *Wytrzymałość materiałów*. Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
6. Huta Łabędy: *Stalowe obudowy górnicze i akcesoria*. Katalog wyrobów.
7. *Podstawy konstrukcji maszyn*. Tom 1. Praca zbiorowa pod redakcją M. Dietricha (1995). Warszawa, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
8. Rakowski G. (1996): *Metoda elementów skończonych. Wybrane problemy*. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
9. Rakowski G., Kacprzyk Z. (1996): *Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji*. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
10. Rotkegel M. (2003): *Obudowa odgałęzień i skrzyżowań wyrobisk korytarzowych. Od założeń do gotowego wyrobu*. Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa. Seria Konferencje Nr 45.
11. Rułka K. i inni (2001): *Uprozczone zasady doboru obudowy odrzwiowej wyrobisk korytarzowych w zakładach wydobywających węgiel kamienny*. Główny Instytut Górnictwa, Seria Instrukcje Nr 15.
12. Rusiński E. (1994): *Metoda elementów skończonych. System COSMOS/M*. Warszawa, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.

13. Stałęga S. (2001): *Podstawy teoretyczno-badawcze projektowania szkieletowych konstrukcji obudowy skrzyżowań i odgałęzień wyrobisk udostępniających*. Prace Naukowe GIG Nr 845.

**Recenzent:** prof. dr hab. inż. Kazimierz Rułka