

Marek Rotkegel*, Marcin Witek*

ODWZOROWANIE STANOWISKOWYCH BADAŃ ZGINANIA KSZTAŁTOWNIKÓW KO21 ZA POMOCĄ PROGRAMU ANSYS

Streszczenie

W artykule przedstawiono komputerową symulację stanowiskowych badań zginania prostych odcinków kształtownika KO21 z wykorzystaniem programu ANSYS, bazującego na metodzie elementów skończonych. W badaniach uwzględniono także nieliniową charakterystykę materiału gatunku HŁ500, stosowanego na kształtowniku. Badany obiekt poddano dyskretyzacji oraz nadano mu warunki brzegowe tak, aby zostały spełnione wymagania ujęte w normie PN-92/G-15000/09 oraz wynikające ze specyfiki stanowiska badawczego – maszyny wytrzymałościowej wraz z oprzyrządowaniem. Wyniki analizy porównano z wynikami badań stanowiskowych.

Representation of bending stand tests of KO21 sections by help of the ANSYS programme

Abstract

The article presents the computer simulation of bending stand tests of straight segments of KO21 section using the ANSYS programme, basing on the finite element method. During the tests also the non-linear characteristics of steel HŁ500, used on the section, was taken into account. The tested object was subjected to discretisation. Moreover, boundary conditions were given to it in a manner enabling the meeting of requirements presented in the PN-92/G-15000/09 standard and resulting from the specificity of the test stand – testing machine along with instrumentation. The analysis results were compared with stand test results.

WPROWADZENIE

W wyniku oddziaływania górotworu na obudowę, w jej elementach są generowane przede wszystkim siły podłużne, poprzeczne oraz momenty zginające. W przypadku nierównomiernego obciążenia kołnierzy kształtowników elementy są dodatkowo poddawane skręcaniu. Wartości i kierunki działania tych sił są zmienne na całej długości (obwodzie) odrzwi i wynikają z wielkości obciążenia, jego rozkładu, sposobu rozparcia odrzwi w górotworze itp.

W celu oceny elementów obudowy prowadzi się badania zarówno całych odrzwi, jak i prostych odcinków kształtowników stosowanych na łuki. Kompletne odrzwia są badane laboratoryjnie w warunkach zbliżonych do kopalnianych, zgodnie ze schematem ujętym w normie PN-92/G-15000-05, z uwzględnieniem większości sił wygenerowanych w odrzwiach przez obciążenie górotworem. Proste odcinki kształtowników natomiast są poddawane zginaniu i skręcaniu, zgodnie z normami PN-92/G-15000/09 i PN-G/15000-12:1994. Badania takie są prowadzone od wielu lat (Pytlik 1999)

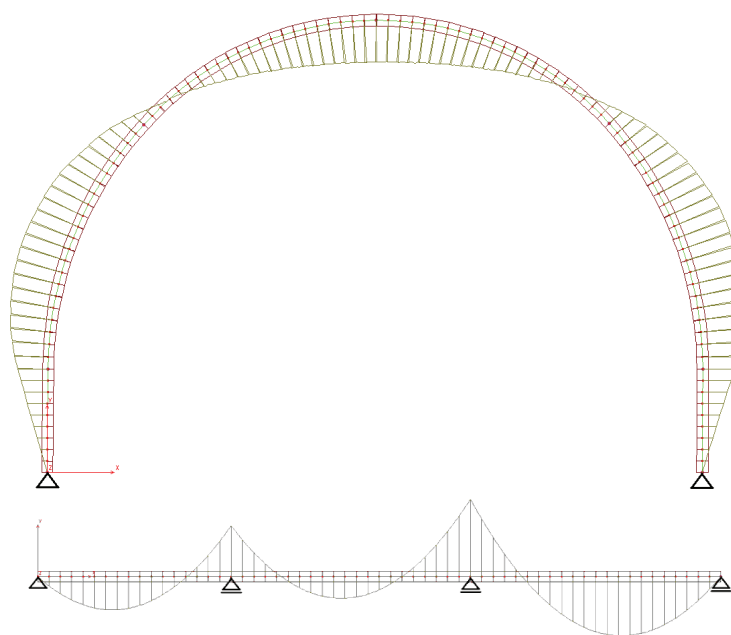
* Główny Instytut Górnictwa

w Głównym Instytucie Górnictwa. Pozwalają one na określenie parametrów wytrzymałościowych kształowników i są podstawą do wnioskowania o ich przydatności na elementy obudów. Ponadto, wyniki badań mogą być wykorzystywane do kalibracji modeli numerycznych w celu rozszerzenia symulacji z prostych kształowników na całe odrzwia.

Celem badań było odwzorowanie prób zginania kształownika KO21 za pomocą symulacji komputerowych, z wykorzystaniem programu ANSYS, bazującego na metodzie elementów skończonych (MES). W badaniach uwzględniono zarówno nieliniową charakterystykę materiału, jak i sposób podparcia i obciążania próbki w stanowisku badawczym.

1. MOMENTY ZGINAJĄCE W ELEMENTACH ODRZWI

Jak wcześniej wspomniano, w łukowej obudowie odrzwiowej pod wpływem obciążenia górotworem są generowane między innymi momenty zginające, powodujące zginanie kształownika w dwóch kierunkach. W części stropowej ma się najczęściej do czynienia z tzw. zginaniem kształownika „dnem w dół”, natomiast w części ociosowej występuje zginanie „dnem w górę”. Dokładny przebieg momentów zginających w elementach odrzwi zależy od rozkładu i wielkości obciążenia czynnego i biernego oraz usytuowania ewentualnych dodatkowych elementów podpierających obudowę, na przykład stojaków czy kotwi. Przykładowy wykres momentów zginających w odrzwiach obudowy łukowej podpartej jedynie na spągu przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Przykładowe wykresy momentów zginających w elementach odrzwi

Fig. 1. Exemplary diagrams of bending moments in frame elements

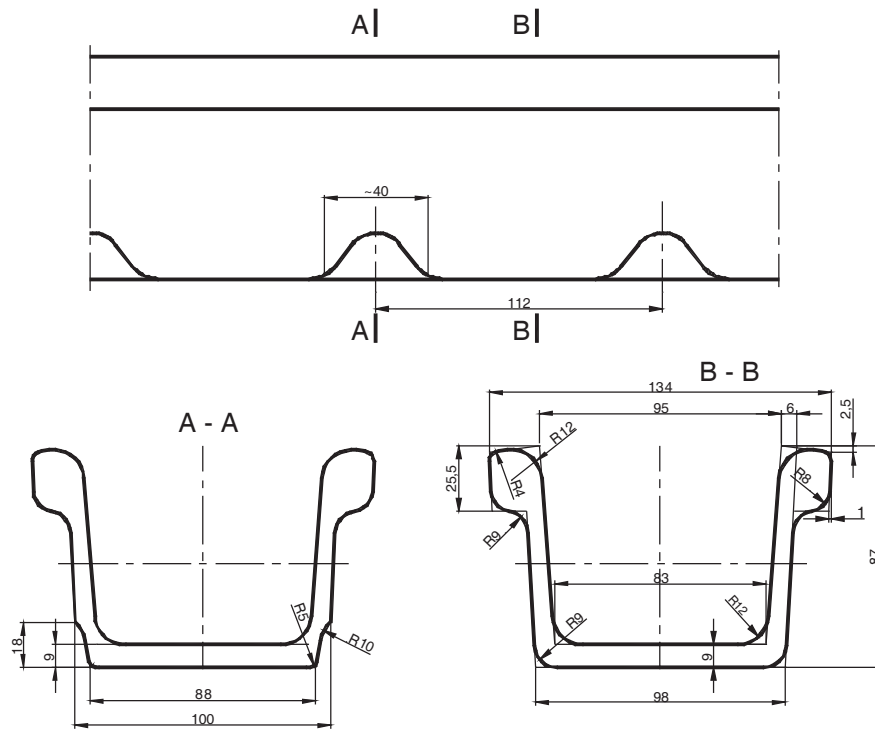
Ze zmianą kierunku zginania ma się także do czynienia w przypadku pracy prostych stropnic podpartych, na co najmniej trzech podporach (Rotkegel 2009). W stropnicy nad stojakami środkowymi lub w miejscach przykotwienia występuje moment podporowy, który przy prawidłowo dobranych rozstawach podpór ma kierunek działania przeciwny w stosunku do momentu przęsłowego, występującego między podporami. W związku z powyższym, w czasie badań stanowiskowych prostych odcińków kształtowników określa się ich odporność na zginanie (maksymalny przenoszony moment zginający) w obu kierunkach – „dnem w dół” oraz „dnem w górę”. Szczegółowo warunki badania zostały określone w normie PN-92/G-15000/09.

2. BADANIA ZMODYFIKOWANEGO KSZTAŁTOWNIKA KO

Z uwagi na potrzeby górnictwa, w Hucie Łabędy SA uruchomiono produkcję nieco zmienionego kształtownika KO, przeznaczonego przede wszystkim na uniwersalne stropnice górnicze (USG) (Rotkegel, Grodzicki 2009). Kształtownik KO21 jest modyfikacją stosowanego dawniej kształtownika KO (PN-H-93441-2), z którego do połowy lat 90. były wykonywane łuki ociosowe stalowych odrzwi podatnych (PN-73/G-15003). Opracowana konstrukcja nowego kształtownika pozwala na bezpośrednie posadowienie stropnicy na stojakach z głowicą koronową. Nie są wtedy wymagane dodatkowe elementy w postaci stabilizatorów. Efekt ten osiągnięto przez odpowiednie wyprofilowanie denka i ścianek bocznych kształtownika. W celu właściwej współpracy stropnicy z koronką w dotychczasowym profilu poszerzono denko oraz wykonano symetryczne wgniecenia (gniazda) o podziałce 112 mm, odpowiadającej rozstawowi kółców koronki (PN-G-15534). Nowy, żądany kształt profilu otrzymano przez przekalibrowanie ostatniego przepustu na walcach ostatniej klatki walcowniczej (Rotkegel, Grodzicki 2009). Zmodyfikowany profil KO21 przedstawiono na rysunku 2, natomiast na zdjęciu 1 przedstawiono sposób posadowienia stropnicy na stojakach z głowicą koronową.



Fot. 1. Sposób posadowienia nowego kształtownika KO21 na stojakach z głowicą koronową
Photo. 1. Way of placing of new KO21 section on props with a crown head



Rys. 2. Kształtownik KO21 na uniwersalne stropnice górnice (USG)

Fig. 2. KO21 section for universal mining roof-bars (USG)

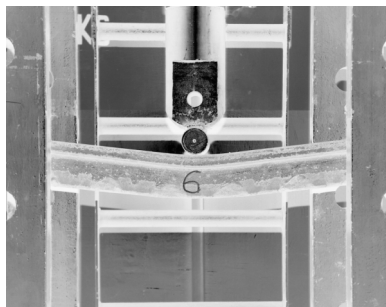
3. SYMULACJA BADAŃ STANOWISKOWYCH ZGINANIA Kształownika KO21

Badania kształtowników KO21 na uniwersalne stropnice górnicze zostały przeprowadzone w stanowisku laboratoryjnym w Głównym Instytucie Górnictwa, zgodnie z normą PN-92/G-15000/09. Polegały one na stopniowym zwiększaniu obciążenia działającego na badany kształtownik. Rejestrowano zarówno obciążenie, jak i ugięcie badanych elementów. Na zdjęciach 2 i 3 przedstawiono stanowisko wraz z badanym obiektem.

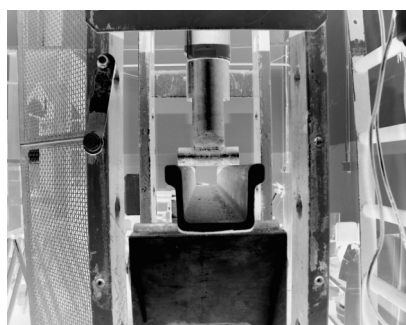
Badania obejmowały po cztery próby zginania kształtowników w każdym kierunku – „dnem w górę” i „dnem w dół”. Schemat przeprowadzonych badań przedstawiono na rysunkach 3 i 4, natomiast wyniki prób – na rysunkach 5 i 6.

Symulację prób zginania kształtowników KO21 wykonano metodą elementów skończonych (Rakowski, Kacprzyk 1996; Rakowski 1996; Szuścik, Kuczyński 1998; Dyląg, Jakubowicz, Orłoś 1996). Metoda ta jest obecnie jedną z najszerszej stosowanych metod rozwiązywania różnych problemów inżynierskich. Jej istotą jest podział (dyskretyzacja) złożonego układu na skończoną liczbę elementów, analiza pojedynczego elementu, którego zachowanie jest określone przez skończoną liczbę para-

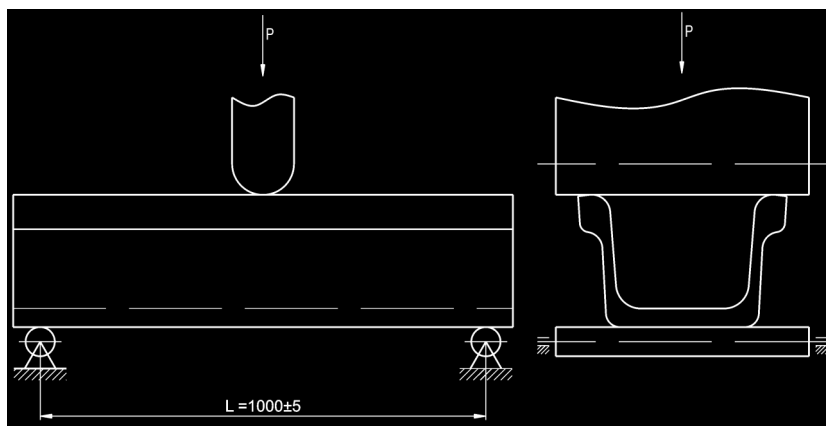
metrów, a następnie ponowne złożenie wszystkich elementów w celu badania odpowiedzi całego układu. Łatwiej jest bowiem zbadać i zrozumieć odpowiedź pojedynczego elementu, a następnie ponownie zbudować złożony układ w celu zbadania jego odpowiedzi, niż badać układ w całości.



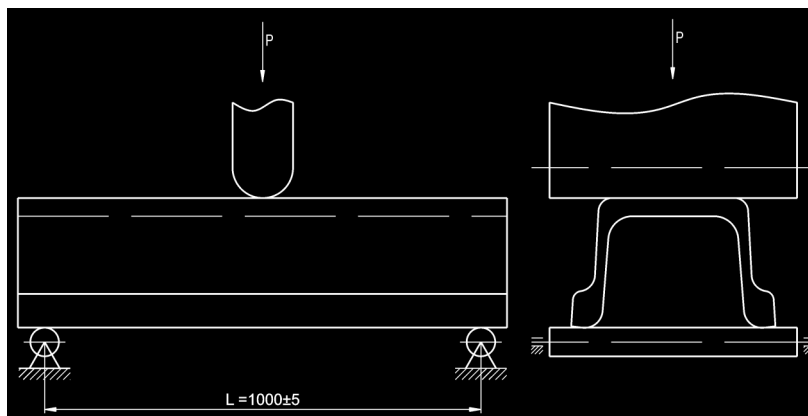
Fot. 2. Kształtownik KO21 na uniwersalne stropnice górnicze w czasie prób zginania
Photo. 2. KO21 section for universal mining roof-bars during bending tests



Fot. 3. Kształtownik KO21 na uniwersalne stropnice górnicze w czasie prób zginania
Photo. 3. KO21 section for universal mining roof-bars during bending tests

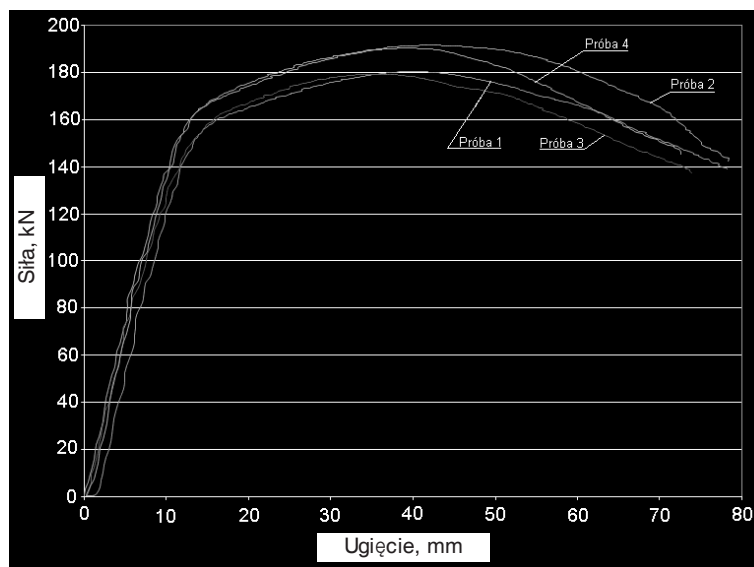


Rys. 3. Schemat próby zginania „dnem w dół” prostych odcinków kształtowników
Fig. 3. Scheme of “bottom-down” bending test of straight section segments



Rys. 4. Schemat próby zginania „dnem w górę” prostych odcinków kształtowników

Fig. 4. Scheme of “bottom-up” bending test of straight section segments

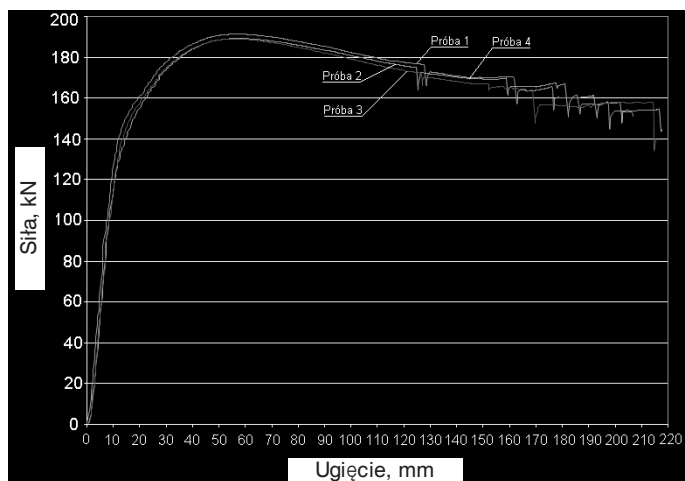


Rys. 5. Wyniki próby zginania „dnem w dół” prostych odcinków kształtowników

Fig. 5. Results of “bottom-down” bending test of straight section segments

Na odwzorowanie przebiegu zginania prostego odcinka kształtownika KO21 składały się następujące etapy:

- budowa geometrycznego modelu badanego obiektu,
- podział obiektu na skończoną liczbę elementów – dyskretyzacja,
- zdefiniowanie parametrów materiałowych,
- zdefiniowanie podparcia i obciążenia modelu,
- przeprowadzenie obliczeń.

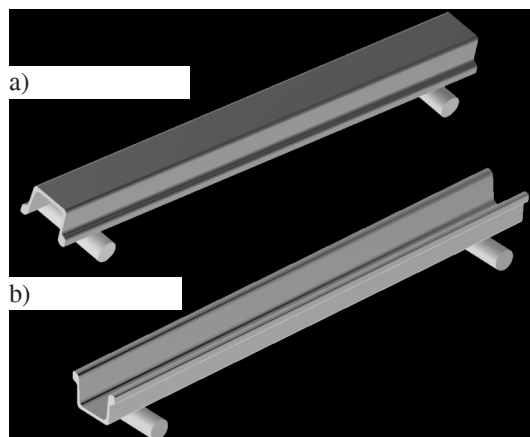


Rys. 6. Wyniki próby zginania „dnem w górę” prostych odcinków kształtowników

Fig. 6. Results of “bottom-up” bending test of straight section segments

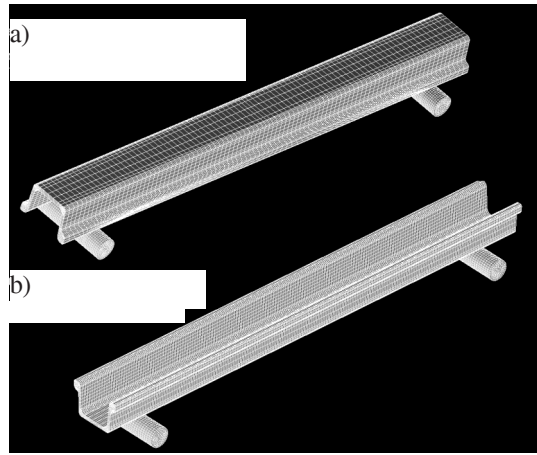
Na podstawie przekroju nominalnego kształtownika KO21, przedstawionego na rysunku 2, w programie CAD zamodelowano trójwymiarowe obiekty o długości wynoszącej 1200 mm. W celu maksymalnego uproszczenia tych obiektów, w czasie procesu modelowania pominięto nagnioty, służące do posadowienia kształtownika na stojakach z głowicą koronową. Dla każdego kierunku zginania zbudowano odrębny model.

Tak zamodelowane obiekty, opisujące geometrię badanego kształtownika (rys. 7), wczytano do preprocesora programu ANSYS, gdzie zostały one poddane dalszej rozbudowie. Następnie, wygenerowano siatkę elementów skończonych, na którą złożyło się 52 680 elementów opisanych na 67 821 węzłach. Do budowy modeli (rys. 8) wykorzystano elementy sześciokątne.



Rys. 7. Model kształtownika KO21 wraz z podporami usytuowany: a – „dnem w górę”, b – „dnem w dół”

Fig. 7. Model of KO21 section with supports located: a – “bottom-up”, b – “bottom down”



Rys. 8. Siatka elementów skończonych nałożona na modele kształtowników KO usytuowanych: a – „dnem w górę”, b – „dnem w dół”

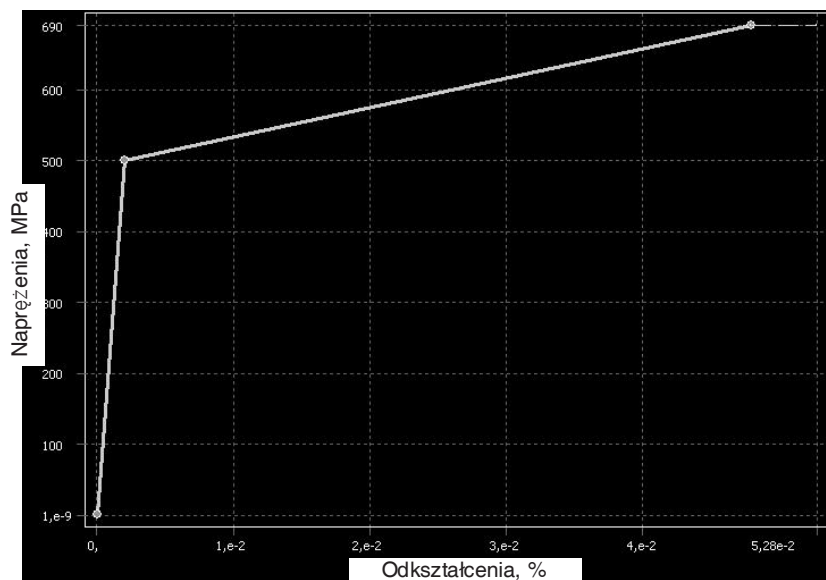
Fig. 8. Finite element network put on KO section models located: a – “bottom-up”, b – “bottom-down”

Poprawność wykonanych badań numerycznych w dużej mierze wynika z odpowiedniego dobrania parametrów fizycznych analizowanych modeli. W przypadku analizy liniowej sprowadza się to w głównej mierze do wybrania, z biblioteki programu, odpowiedniego materiału, natomiast w przypadku analiz nieliniowych należy określić model materiału – krzywą materiałową. Zastosowanie nieliniowej charakterystyki materiału powoduje wydłużenie czasu obliczeń oraz wymaga dużych mocy obliczeniowych. Wynika to z iteracyjnych algorytmów rozwiązywania takich zadań. W każdym kroku obliczeniowym program sprawdza naprężenia w poszczególnych elementach i nadaje im odpowiednie parametry sztywnościowe, wynikające z charakterystyki materiałowej. W prezentowanych analizach przyjęto biliniowy model materiału gatunku HŁ500, z którego były wykonane kształtowniki, zdefiniowany na podstawie prób rozciągania. Model ten przedstawiono na rysunku 9.

W kolejnym etapie przystąpiono do nadania warunków brzegowych (rys. 10) tak, aby zostały spełnione warunki ujęte w normie PN-92/G-15000/09 oraz wynikające ze specyfikacji stanowiska badawczego – maszyny wytrzymałościowej wraz z oprzyrządowaniem. Od sposobu ich przyjęcia w dużej mierze zależy zgodność uzyskanych wyników analizy numerycznej z badaniami stanowiskowymi.

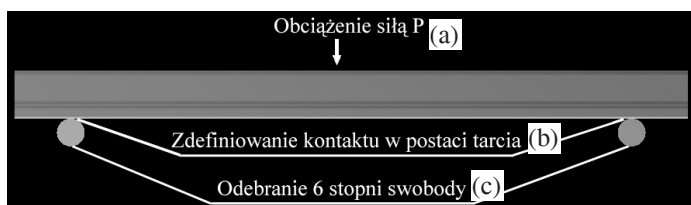
Tak przygotowany model prostego odcinka kształtownika KO21 poddano analizie wytrzymałościowej. W jej wyniku uzyskano między innymi deformacje, składowe naprężenia oraz ich rozkład. Jednak z uwagi na zakres symulacji najbardziej interesującym wynikiem są deformacje modeli obciążonych siłą P równą 170 kN, zbliżoną do wytrzymałości kształtownika określoną podczas badań stanowiskowych. Wyniki analizy zostały przedstawione na rysunku 11 i 12.

Uzyskane w czasie kolejnych iteracji zdeformowane postacie modeli oraz odpowiadające im wartości obciążeń pozwalały na odniesienie symulacji do rzeczywistych prób wytrzymałościowych. Porównanie wyników badań przedstawiono na rysunku 13 i 14.



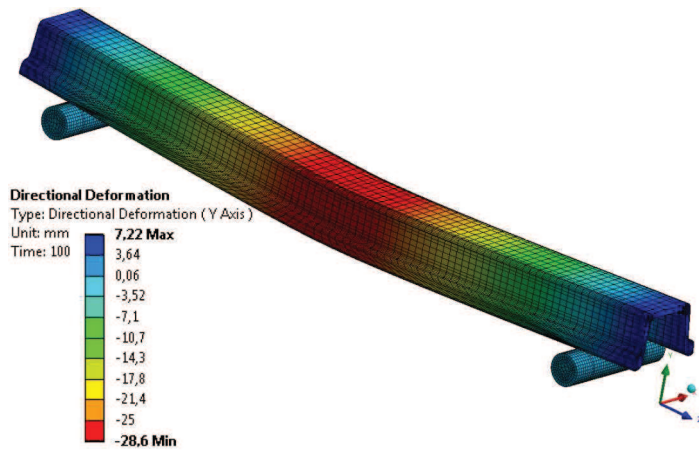
Rys. 9. Nieliniowa charakterystyka materiału gatunku HL500

Fig. 9. Non-linear characteristics of steel HL500



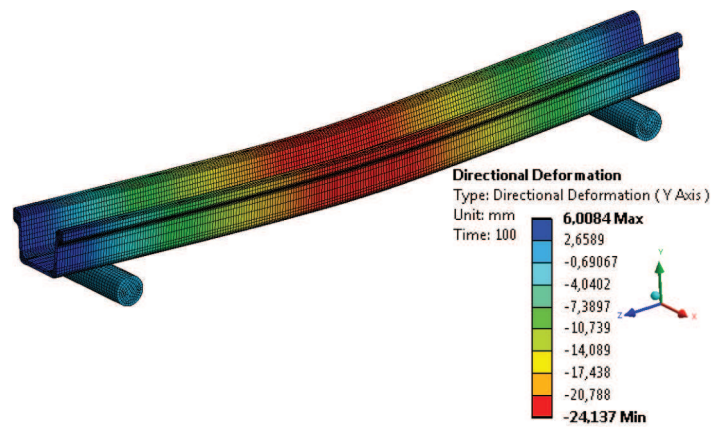
Rys. 10. Warunki brzegowe i sposób obciążenia modelu

Fig. 10. Bounding conditions and way of model loading

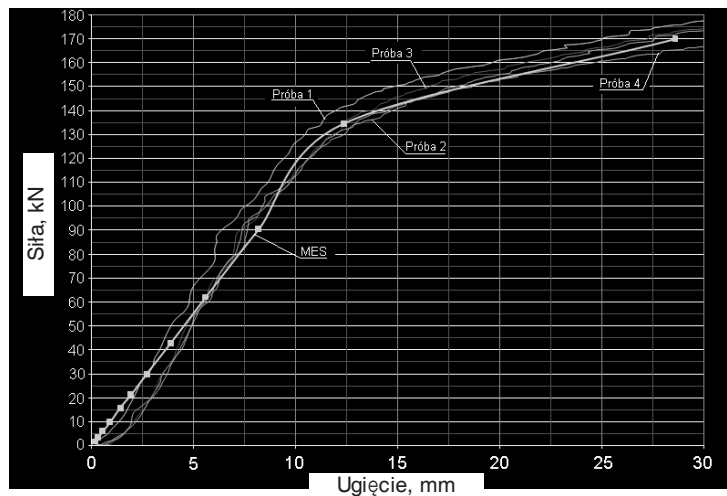


Rys. 11. Deformacje prostego odcinka kształtownika KO21 „dnem w górę”; przemieszczenia [mm], skala $\times 1$

Fig. 11. Deformations of a straight KO21 section segment “bottom-up”; displacements [mm], scale $\times 1$

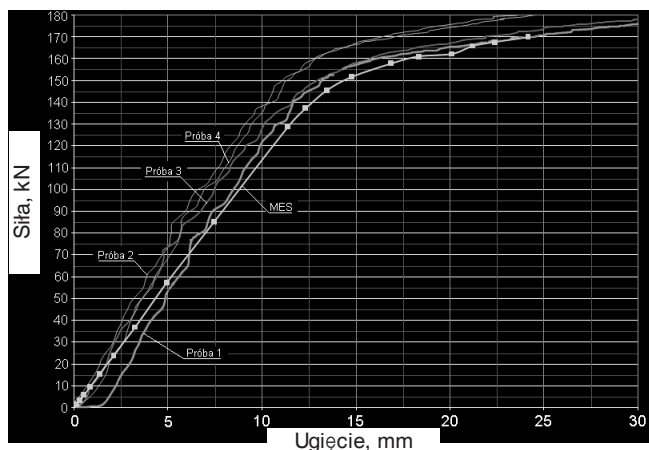


Rys. 12. Deformacje prostego odcinka kształtownika KO „dnem w dół”; przemieszczenia [mm], skala $\times 1$
Fig. 12. Deformations of a straight KO section segment “bottom-down”; displacements [mm], scale $\times 1$



Rys. 13. Porównanie wyników stanowiskowych z wynikami uzyskanymi metodą elementów skończonych, wariant „dnem w górę”
Fig. 13. Comparison of results of stand tests with results obtained by means of the finite element method, variant “bottom-up”

Na porównawczych wykresach widać wyraźnie, że zarówno obiekt badany na stanowisku pomiarowym, jak i analizowany model wirtualny, zachowują się w podobny sposób, tzn. do momentu osiągnięcia granicy plastyczności odkształcają się proporcjonalnie, a następnie jest widoczne uplastycznienie ze zwiększeniem deformacji. Z uwagi na to, że wykresy zginania, otrzymane w wyniku prac modelowych, w zadowalającym stopniu pokrywają się z wykresami otrzymanymi podczas badań stanowiskowych, stwierdzono, że badania stanowiskowe można z dużą dokładnością odwzorowywać na modelach wirtualnych.



Rys. 14. Porównanie wyników stanowiskowych z wynikami uzyskanymi metodą elementów skończonych, wariant „dnem w dół”

Rys. 14. Comparison of results of stand tests with results obtained by means of the finite element method, variant “bottom-down”

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone, metodą elementów skończonych, modelowe badania numeryczne zginania kształtowników KO21 wskazują na możliwość prowadzenia symulacji takich badań z wykorzystaniem nowoczesnego oprogramowania. Duża zgodność wyników badań modelowych ze stanowiskowymi wynika z zastosowania zaawansowanych modułów programu umożliwiających badania w zakresie nieliniowym, z uwzględnieniem charakterystyk materiałowych, a także z dokładnego odwzorowania sposobu podparcia i obciążenia modelu, uwzględniającego kontakt między badanym obiektem i podporami. Badania takie mogą być elementem projektowania i doboru obudowy prostokątnej oraz podstawą do kalibrowania większych, bardziej skomplikowanych obiektów. Możliwe jest także ich wykorzystanie do prac optymalizacyjnych nad badanym kształtownikiem.

Literatura

1. Dyląg Z., Jakubowicz A., Orłoś Z. (1996): Wytrzymałość materiałów, Tom I. Warszawa, Wydaw. Naukowo-Techniczne.
2. PN-73/G-15003 Obudowa chodników łukami korytkowymi. Odrzwia trójdzielne. Łuki ociosowe.
3. PN-92/G-15000/09 Kształtowniki korytkowe proste. Próba statycznego zginania.
4. PN-92/G-15000-05 Odrzwia łukowe otwarte. Badania stanowiskowe.
5. PN-G/15000-12:1994 Kształtowniki korytkowe proste. Próba statycznego skręcania.
6. PN-G-15534 Głowica koronowa do stojaków ciernych i hydraulicznych.
7. PN-H-93441-2 Kształtowniki korytkowe stropnicowe KS21 i kształtowniki korytkowe ociosowe KO21.
8. Pytlik A. (1999): Kryteria oceny parametrów wytrzymałościowych na zginanie i skręcanie kształtowników V25 i V29. Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa nr 836.

9. Rakowski G. (1996): Metoda elementów skończonych. Wybrane problemy. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
10. Rakowski G., Kacprzyk Z. (1996): Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
11. Rotkegel M. (2009): Siły wewnętrzne i reakcje podporowe w elementach obudowy prostokątnej. Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko nr 1, s. 51–66.
12. Rotkegel M., Grodzicki M. (2009): Zmodyfikowany kształtownik KO na uniwersalne stropnice górnicze. Wiadomości Górnicze nr 9.
13. Szuścik W., Kuczyński J. (1998): Wytrzymałość materiałów. Mechanika modelu ciała odkształcalnego i ciała rzeczywistego, Część 1. Gliwice, Wydaw. Politechniki Śląskiej.

Recenzent: dr inż. Tomasz Janoszek