

Marek Rotkegel

DOBÓR PARAMETRÓW MATERIAŁOWYCH MODELU MES NA PODSTAWIE WYNIKÓW PRÓB ZGINANIA KSZTAŁTOWNIKA V29

Streszczenie

W artykule przedstawiono przebieg prób zginania kształtowników V29 opartych na symulacji komputerowej, z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Punktem granicznym symulacji było maksymalne obciążenie przenoszone przez kształtowniki, zarejestrowane w czasie prób w stanowisku badawczym. Symulację wykonano w celu uzyskania takiego opisu materiału stali, przy którym modele kształtowników poddane zginaniu zachowują się w sposób zbliżony do zarejestrowanego w badaniach stanowiskowych.

Material property selection of FEM model on base of results of V29 shape bend test

Abstract

In the paper has showed bend test of straight part of V29 shape relying on computer simulation by finite element method. This simulation was limited by maximum load registered during laboratory tests. Test's object was finding description of material properties, at which computer model corresponds with results of laboratory bend tests.

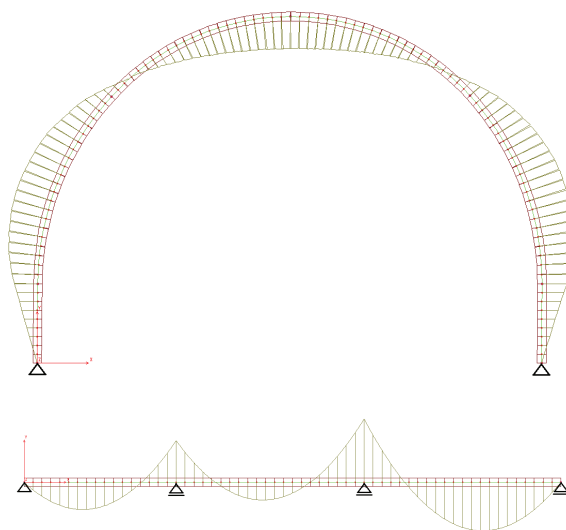
WPROWADZENIE

Jedną z podstawowych metod określania przydatności kształtowników na elementy obudowy górniczej jest laboratoryjna próba zginania ich prostych odcinków. Próby takie od wielu lat są prowadzone w Głównym Instytucie Górnictwa, a ich wyniki stanowią o wartościach parametrów wytrzymałościowych przekrojów, przyjmowanych jako kryteria w modelowych analizach wytrzymałościowych odrzwi i ich elementów (Pytlik A. 1999). Ponadto, w przypadku modyfikacji składu chemicznego stali mogą być one traktowane jako weryfikacja nowego gatunku materiału. Umożliwiają zatem porównanie parametrów kształtowników jednej wielkości wykonanych z różnych gatunków stali. Przeprowadzenie takich badań już na etapie projektowania składu chemicznego i własności nowych materiałów czy profili jest możliwe w formie symulacji komputerowej. Badania takie mogą mieć znaczący wpływ na zmniejszenie kosztów ich wdrożenia oraz pozwalają na ich wirtualną weryfikację jeszcze przed wykonaniem gotowego wyrobu.

Celem opisanych w artykule badań było opracowanie modeli materiału stali, przy których proste kształtowniki V29 wykonane ze stali 35GJ oraz G480V poddane zginaniu zachowują się zgodnie z wynikami rzeczywiście wykonanej próby. W czasie badań modele kalibrowano na podstawie wyników badań stanowiskowych.

1. MOMENTY ZGINAJĄCE W ELEMENTACH ODRZWI

Badania, prowadzone zgodnie z normą PN-86/G-15000/09, obejmują próby zginania kształtowników w dwóch kierunkach. Taki sposób wykonywania badań wynika z charakteru pracy obudowy chodnikowej. W łukowej obudowie odrzwiowej momenty zginające, występujące w wyniku obciążenia górotworem działają w dwóch kierunkach. W części stropowej ma się najczęściej do czynienia z tzw. zginaniem kształtownika „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 obudowy, na przykład stojaków czy kotwi. Przykładowy wykres momentów zginających w odrzwiach obudowy łukowej przedstawiono na rysunku 1. Ze zmianą kierunku zginania ma się także do czynienia w przypadku pracy prostych stropnic podpartych na trzech i więcej podporach (Rotkegel M. 2001). W stropnicy nad stojakami (lub kotwiami) środkowymi występuje moment podporowy, który przy prawidłowo dobranych ich rozstawach, ma kierunek działania przeciwny do momentu przęsłowego występującego w stropnicy między podporami.



Rys. 1. Przykładowe wykresy momentów zginających w elementach odrzwi

Fig. 1. Graph samples of bending moment door-frame

2. OPIS METODY BADAWCZEJ

Podstawową metodą badawczą wykorzystywaną w analizach modelowych jest metoda elementów skończonych (MES, ang. *FEM*, *FEA*) (Chmielewski T., Nowak H. 1996; Konderla P., Kasprzak T. 1997; Cook R.D. i inni 2002; Rakowski G., Kacprzyk Z. 1993; Rusiński E. 1994), pozwalająca na wierne odwzorowywanie skomplikowa-

nych układów rzeczywistych modelami komputerowymi, zwłaszcza w przypadku dostępu do wyników prób wytrzymałościowych. Możliwe jest wtedy dokładne wykalibrowanie modelu, co prowadzi do zwiększenia dokładności wyników analiz i odniesienia modeli wirtualnych do układów rzeczywistych. W badaniach wykorzystano profesjonalne oprogramowanie – system COSMOS/M (COSMOS/M v. 2.5... 1999; Konderla P., Kasprzak T. 1997; Rusiński E. 1994).

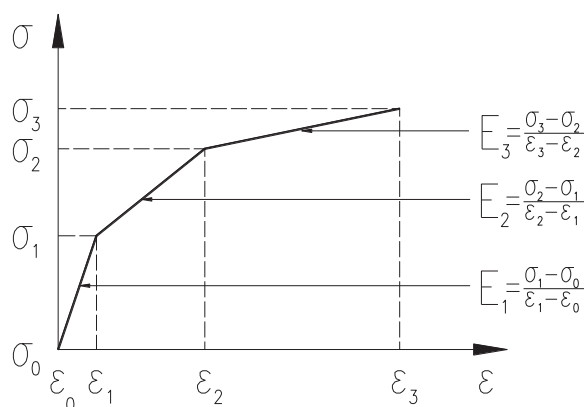
Istotą metody elementów skończonych jest podział złożonego, badanego układu na skończoną liczbę elementów, następnie analiza pojedynczego elementu, którego zachowanie jest określone przez skończoną liczbę parametrów i ponowne złożenie wszystkich elementów w celu badania odpowiedzi całego układu. Dzięki temu możliwe jest znaczne uproszczenie badań w porównaniu z analizą całej konstrukcji. Podział ten jest nazywany dyskretyzacją. Do najważniejszych zalet metody można zaliczyć łatwość algorytmizacji, możliwość rozwiązywania zadania przy niewielkim stopniu dyskretyzacji, efektywność, uniwersalność oraz duże możliwości zastosowania (Chmielewski T., Nowak H. 1996; Rakowski G., Kacprzyk Z. 1993).

Z punktu widzenia użytkownika modelowanie w systemie COSMOS/M sprowadza się do wprowadzenia geometrii całego badanego układu oraz określenia parametrów poszczególnych jego części. Parametrami tymi są własności materiałowe, a w przypadku niektórych typów elementów także grubość (w przypadku powłok) lub parametry przekrojowe (w przypadku belek). Geometrię układu można zadać, tworząc ją w module GEOSTAR, bądź importując trójwymiarowy rysunek z programu CAD. Bardzo uciążliwa dyskretyzacja, zwłaszcza w przypadku skomplikowanych modeli, jest dokonywana przez program w sposób automatyczny, ale pod kontrolą użytkownika. Jest to szczególnie ważne, gdyż od przyjętej siatki podziału na elementy zależy dokładność uzyskiwanych wyników (Rotkegel M. 2001). Do przeprowadzenia analizy konieczne jest także określenie sposobu obciążenia i podparcia modelu. W wyniku analizy otrzymuje się między innymi barwne mapy odkształcenia modelu, rozkładu naprężeń, odkształcenia względne elementów oraz wartości reakcji podporowych, a w przypadku modeli z elementami typu belka – wykresy sił wewnętrznych.

Jak wspomniano, do przeprowadzenia analizy konieczne jest zadanie parametrów materiałowych. W wielu przypadkach przyjmuje się liniowy model materiału, tzn. taki, w którym zależność odkształceń od naprężeń jest liniowa. Uproszczenie to jest dopuszczalne jedynie w przypadku pracy każdego fragmentu badanej konstrukcji w zakresie proporcjonalności. Analiza taka nieuwzględniająca nieliniowości fizycznej materiału jest ograniczona stosowalnością (obowiązaniem) prawa Hooke'a (Dyląg Z. i inni 1996; Jakubowicz A., Orłowski Z. 1968; Niezgodziński M.E., Niezgodziński T. 2000; Szuścik W., Kuczyński J. 1998). W przypadku niektórych typów analiz model taki jest zbyt dużym uproszczeniem zagadnienia i prowadzi do bardzo dużych błędów. Wyniki obliczeń nie odpowiadają wtedy wynikom uzyskiwanym w czasie badań laboratoryjnych. Z taką sytuacją często ma się do czynienia w przypadku analizy wytrzymałościowej konstrukcji dla górnictwa, które pracują także w zakresie odkształceń plastycznych.

Sposobem na zwiększenie dokładności obliczeń oraz powiązania rzeczywistej pracy konstrukcji z jej modelem numerycznym jest przyjęcie modelu materiału

nieliniowego. Najczęściej materiał taki opisuje się wtedy zmiennym modułem sprężystości, przybliżonym (opisanym) pewną liczbą odcinków prostych. Przykładowy opis modelu materiału przedstawiono na rysunku 2. Przyjęcie takiego modelu materiału ma pewne niedogodności. Podstawową jest konieczność prowadzenia badań jako iteracyjnych, na przykład zmodyfikowaną metodą Newtona-Raphsona (MNR) (Dyląg Z. i inni 1996; Cook R.D. i inni 2002; Rakowski G., Kacprzyk Z. 1993). Prowadzi to do wielokrotnego wydłużenia czasu obliczeń oraz zwiększenia wymagań stawianych sprzętowi komputerowemu. W każdym kroku obliczeniowym program sprawdza, na której linii charakterystyki znajdują się poszczególne elementy modelu. W zależności od tego nadaje im odpowiednie parametry sztywnościowe opisane konkretnym odcinkiem położonym w przestrzeni naprężenia-odkształcenia (σ - ϵ) wykresu rozciągania materiału modelowanej konstrukcji.



Rys. 2. Przykładowy model materiału nieliniowego: ϵ – odkształcenie względne, σ – naprężenie, E – moduł sprężystości wzdłużnej

Fig. 2. Model of nonlinear material: ϵ – strain, σ – Stress, E – elastic modulus

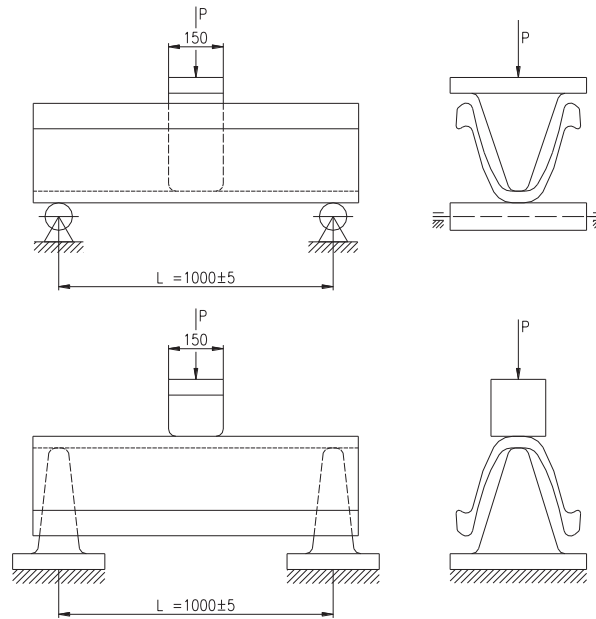
Oprócz nieliniowości fizycznej w niektórych przypadkach analizy można mieć także do czynienia z nieliniowością geometryczną. Związana jest ona z dużymi przemieszczeniami i brakiem proporcjonalności między przemieszczeniami i odkształceniami (y, ϵ).

3. DOBÓR PARAMETRÓW MATERIAŁOWYCH MODELU MES

Kalibracja modelu ma na celu skorelowanie wyników analiz modelowych z wynikami próby wykonanej na konkretnym elemencie. Jej wyniki mogą być pomocne na przykład przy projektowaniu i modyfikacji elementów konstrukcji łączonych z odzwami oraz ewentualnym wzmacnianiu odzwami w miejscu połączenia. Przyjęcie jednej próby jako wzorcowej, po wykalibrowaniu modelu, daje możliwość wykonania takich samych badań na innych modelach w identycznych warunkach. Może się to

sprowadzać do porównania pracy różnych rozwiązań konstrukcyjnych danego elementu za każdym razem wykonanego z identycznego materiału. Wykonanie takiej próby w stanowisku jest trudne i obarczone dużą niepewnością wynikającą z ograniczonej powtarzalności parametrów materiałowych.

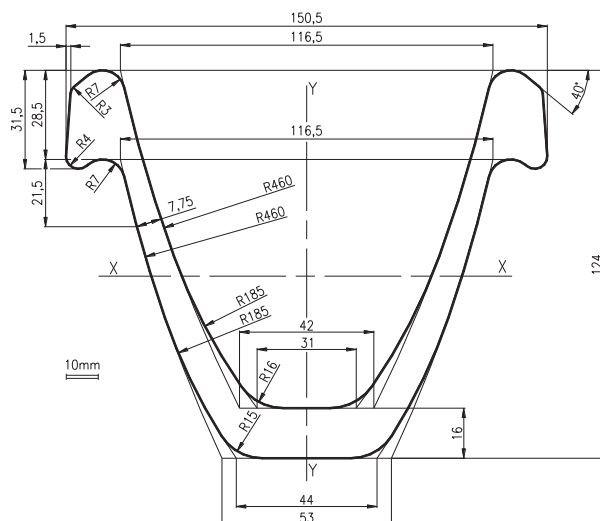
W badaniach została dokonana kalibracja modelu prostego odcinka kształtownika V29 zginanego w dwóch układach – dnem w górę i dnem w dół, zgodnie z założeniami normy PN-86/G-15000/09. Schemat takiej próby przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat próby zginania „dnem w dół” (u góry) i „dnem do góry” (na dole) prostych odcinków kształtowników
Fig. 3. Schema of bend test “to bottom rock – bottom” (top) and „for top rock – bottom” (bottom) of straight parts of sections

W czasie analiz poszukiwano takich modeli materiału nieliniowego odpowiadających stali 34GJ i G480V, które w numerycznej symulacji próby zginania z zadowalającą zgodnością dają wyniki zbliżone do zarejestrowanych podczas stanowiskowych badań zginania. Przebieg takiego skalowania modelu jest bardzo pracochłonny i żmudny. Wynika to z nieliniowych zależności zarówno naprężenia i odkształcenia na wykresie rozciągania materiału, jak również obciążenia i ugięcia na wykresie z próby zginania kształtowników.

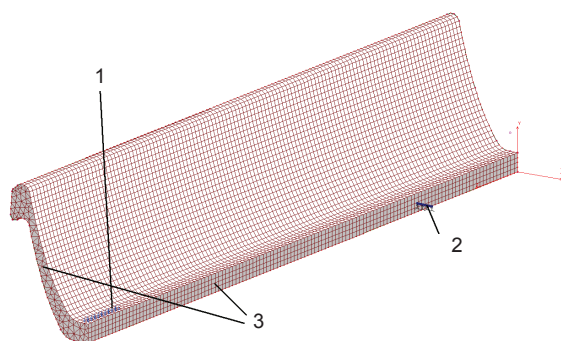
W celu przeprowadzenia kalibracji zbudowano trójwymiarowy model zginanego odcinka kształtownika V29. Przekrój nominalny badanego kształtownika, według normy PN-H-93441-3, jest przedstawiony na rysunku 4. Ponadto, model pod względem długości próbki, sposobu podparcia i obciążenia spełniał założenia normy PN-86/G-15000/09.



Rys. 4. Nominalne wymiary profilu V29 według PN-H-93441-3:1994

Fig. 4. Nominal size of V29 shape according to PN-H-93441-3:1994

Modelowanie ograniczono do ćwiartki układu rzeczywistego, nadając odpowiednie więzy na płaszczyznach symetrii. Model zbudowano z 21749 elementów bryłowych typu SOLID opisanych na 15876 węzłach. Zamodelowany odcinek kształtownika V29 przedstawiono na rysunku 5.




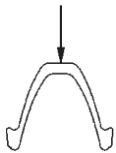
Rys. 5. Model prostego odcinka kształtownika V29 poddanego próbie zginania „dnem w dół”:

1 – obciążenie pionowe, 2 – podparcie w kierunku pionowym, 3 – więzy na płaszczyznach symetrii

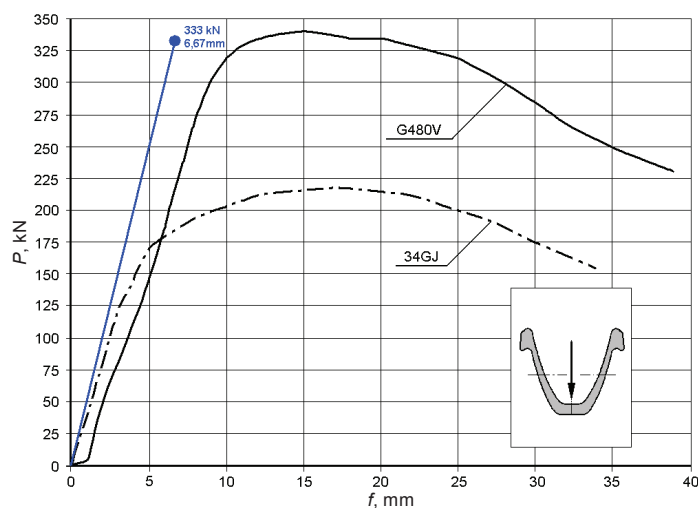
Fig. 5. Model of straight part of V29 shape while bend test “to bottom rock – bottom”: 1 – vertical load, 2 – support in vertical direction, 3 – bonds on symmetry surface

Model podparto, a następnie obciążono, jak w przypadku prób opisanych w normie PN-86/G-15000/09. Obciążenie modelu dobrano tak, aby jego sumaryczna wartość była zgodna z uśrednionym maksymalnym obciążeniem $P_{\max \text{ śr}}$, jakie przenoszą kształtowniki V29 wykonane ze stali 34GJ i G480V. Dane przedstawione w tabelicy 1, zaczerpnięto z prac (Kowalski E., Skrzyński K., Kozek B. 2004; Kowalski E., Rułka K., Skrzyński K. 2004).

Tablica 1. Wyniki prób zginania kształtowników V29 (Kowalski E., Skrzyński K., Kozek B. 2004; Kowalski E., Rułka K., Skrzyński K. 2004)

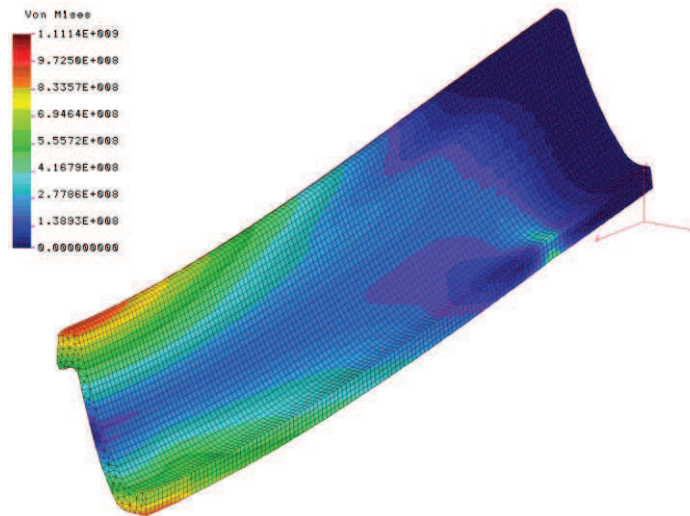
Kierunek zginania	Gatunek stali	Maksymalna siła P_{max} , kN	Ugięcie przy maksymalnej sile f , mm
	34GJ	214	17,5
	G480V	333	16,8
	34GJ	313	95,7
	G480V	426	83,6

W czasie badań poszukiwano takiego opisu materiału, który pozwalałby na uzyskanie zadowalającej zgodności z charakterystyką zginania kształtownika zarejestrowaną w badaniach stanowiskowych. Wyniki analizy numerycznej przeprowadzonej w zakresie liniowym, przy zastosowaniu typowego, liniowego modelu materiału typu STEEL, potwierdziły konieczność prowadzenia badań jako nieliniowych. Dowodem może być, uzyskana z badań modelowych, charakterystyka naniesiona na wykres próby zginania kształtownika V29 (Kowalski E., Skrzyński K., Kozek B. 2004; Kowalski E., Rułka K., Skrzyński K. 2004), przedstawiony na rysunku 6. Natomiast rozkład naprężeń i przemieszczenia modelu przedstawiono na rysunkach 7 i 8. Stwierdzono, że uzyskane naprężenia były wielokrotnie zawyżone, a ugięcia znacznie zaniżone w porównaniu z faktycznym przebiegiem próby. Wynikało to między innymi z faktu, że w modelu materiału nie uwzględniono odkształceń plastycznych i redystrybucji naprężeń.



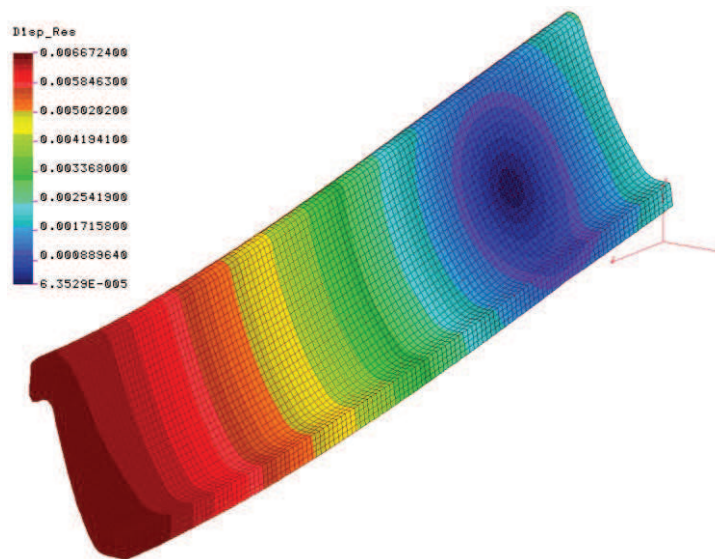
Rys. 6. Porównanie wykresów zginania kształtowników V29: f – ugięcie, P – siła, G480V i 34GJ – gatunek stali

Fig. 6. Comparison of graphs of V29 shape flex: f – deflection, P – force, G480V and 34GJ – kind of steel



Rys. 7. Rozkład naprężeń w modelu liniowym (naprężenia wyrażone w Pa)

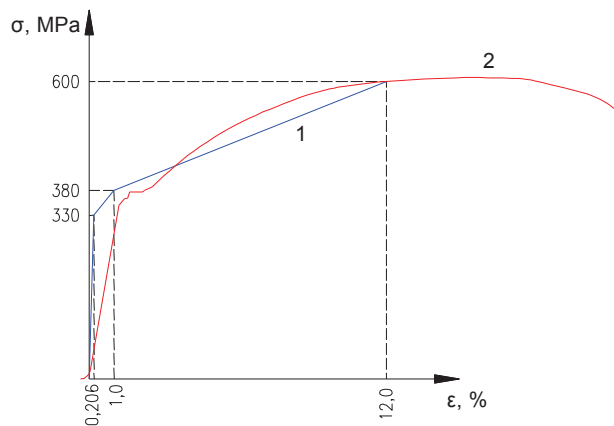
Fig. 7. Stress pattern in linear model (stress in Pa)



Rys. 8. Zdeformowana postać modelu (przemieszczenia wyrażone w metrach)

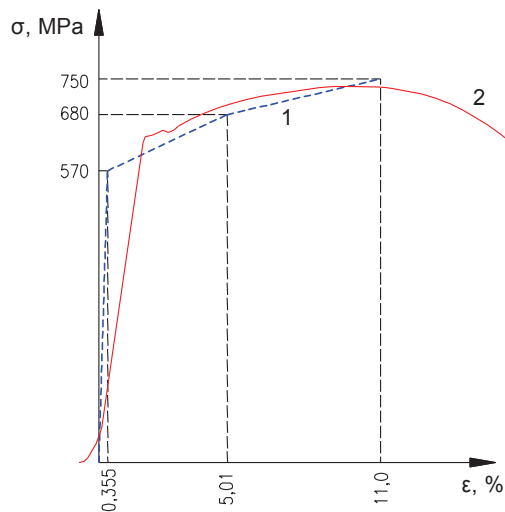
Fig. 8. Deformed model (displacements in meter)

W związku z powyższym zasadniczą część badań stanowiły badania prowadzone w zakresie nieliniowym. Ostatecznie w obu przypadkach (stal gatunku 34GJ i G480V) przyjęto modele materiału opisane trzema odcinkami prostymi. Modele te przedstawiono na rysunkach 9 i 10 (krzywa 1) na tle przykładowych krzywych rozciągania (krzywa 2) analizowanych gatunków stali.



Rys. 9. Przyjęty model materiału odpowiadający stali gatunku 34GJ: ε – odkształcenie względne, σ – napężenie, 1 – model materiału opisany trzema odcinkami, 2 – krzywa rozciągania

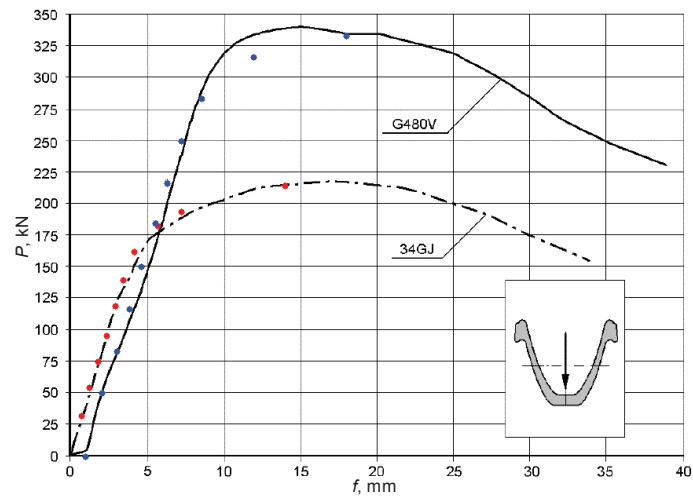
Fig. 9. Model of material connected with steel 34GJ: ε – strain, σ – stress, 1 – material model presented by three segments, 2 – experimental stress – strain curve



Rys. 10. Przyjęty model materiału odpowiadający stali gatunku G480V (oznaczenia jak na rysunku 9)

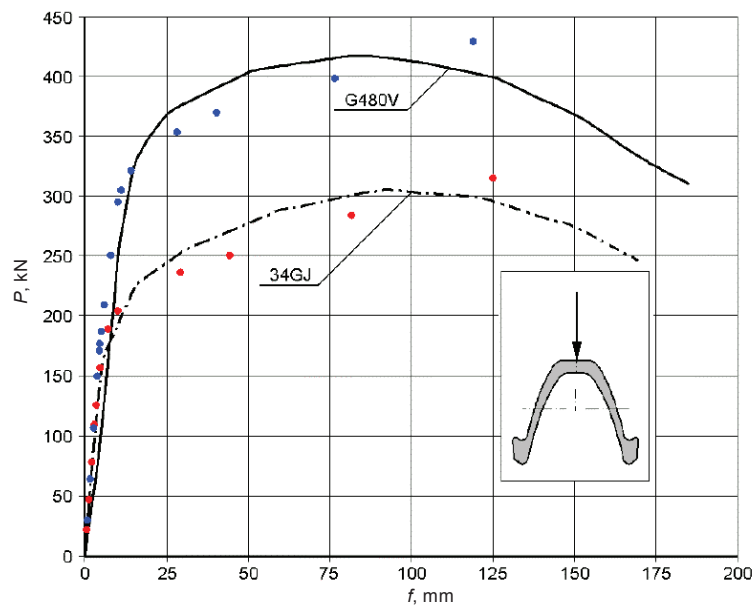
Fig. 10. Model of material connected with steel G480V (designations according to the figure 9)

Przyjęcie takich charakterystyk materiałowych pozwala na uzyskanie zadowalającej zgodności badań modelowych z badaniami stanowiskowymi. Potwierdzeniem mogą być wykresy otrzymane w wyniku badań numerycznych, przedstawione na rysunkach 11 i 12 wraz z wynikami badań stanowiskowych (Kowalski E., Skrzyński K., Kozek B. 2004; Kowalski E., Rułka K., Skrzyński K. 2004). Współrzędne charakterystycznych punktów na wykresach, będące wynikami obliczeń w kolejnych iteracjach zestawiono w tabelicy 2.



Rys. 11. Próby zginania kształtowników V29 usytuowanych dnem w dół: f – ugięcie, P – siła, G480V i 34GJ – gatunki stali

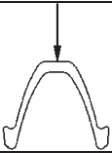
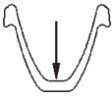
Fig. 11. Bend test of V29 shape in way of "to bottom rock – bottom": f – deflection, P – force, G480V and 34GJ – kind of steel



Rys. 12. Próby zginania kształtowników V29 usytuowanych dnem w górę (oznaczenia jak na rysunku 11)

Fig. 12. Bend test of V29 shape in way of "for top rock – bottom" (designations according to the figure 11)

Tablica 2. Wybrane iteracje obliczeniowe – współrzędne punktów na wykresach zginania

Numer iteracji								
	gatunki stali							
	34GJ		G480V		34GJ		G480V	
	siła kN	ugięcie mm	siła kN	ugięcie mm	siła kN	ugięcie mm	siła kN	ugięcie mm
5	78	2,0	106	2,6	96	2,4	150	4,7
6	109	2,8	149	3,7	118	2,9	183	5,6
7	125	3,4	170	4,4	139	3,5	216	6,4
8	156	4,6	176	4,5	161	4,2	250	7,3
9	188	7	186	5,0	182	5,7	283	8,6
10	203	10	208	5,9	193	7,3	316	12
11	235	29	250	7,8	214	14	333	18
12	250	44	293	10	–	–	–	–
13	282	81	303	11	–	–	–	–
14	313	124	319	14	–	–	–	–
15	–	–	351	28	–	–	–	–
16	–	–	367	40	–	–	–	–
17	–	–	399	76	–	–	–	–
18	–	–	426	118	–	–	–	–

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonych badań przyjęto dwa modele materiału nieliniowego, odpowiadające stali gatunku 34GJ i G480V. Uzyskane z badań modelowych charakterystyki zginania prostych odcinków kształtownika V29 są w zadowalającym stopniu zgodne z obserwacjami poczynionymi w czasie prób stanowiskowych. Dla każdego materiału dobrano taki model, aby uzyskane w symulacji wyniki były maksymalnie zbliżone do wyników badań wykonanych w warunkach rzeczywistych, w obu przypadkach – kierunkach zginania kształtownika. Zadanie to okazało się znacznie trudniejsze w przypadku gatunku stali 34GJ, ponieważ rozbieżności między wynikami symulacji komputerowej a wynikami badań stanowiskowych były większe niż w przypadku modelu ze stali G480V. Mogło to wynikać z wielokrotnie dłuższego okresu produkcji kształtowników ze stali 34GJ, a co za tym idzie większej liczby badań i większego rozrzutu wyników niż w przypadku dopiero uruchomionej produkcji kształtowników V ze stali w gatunku G480V.

Literatura

1. Chmielewski T., Nowak H. (1996): *Mechanika budowli. Metoda przemieszczeń. Metoda Crossa. Metoda elementów skończonych*. Warszawa, Wydaw. Naukowo-Techniczne.
2. COSMOS/M v 2.5. User's Guide. Structural Research & Analysis Corporation, 1999.

3. Dyląg Z., Jakubowicz A., Orłoś Z. (1996): *Wytrzymałość materiałów*. Warszawa, Wydaw. Naukowo-Techniczne.
4. Jakubowicz A., Orłoś Z. (1968): *Wytrzymałość materiałów*. Warszawa, Wydaw. Naukowo-Techniczne.
5. Konderla P., Kasprzak T. (1997): *Metody komputerowe w teorii sprężystości*. Część I. *Metoda elementów skończonych*. Wrocław, Dolnośląskie Wydaw. Edukacyjne.
6. Kowalski E., Skrzyński K., Kozek B. (2004): *Wpływ zastosowania stali o podwyższonych własnościach mechanicznych na nośność lukowej obudowy podatnej*. *Wiadomości Górnicze* nr 9.
7. Kowalski E., Rułka K., Skrzyński K. (2004): *Badania nad zastosowaniem stali o zwiększonych parametrach wytrzymałościowych do produkcji stalowych obudów typu V*. *Prace Naukowe GIG – Górnictwo i Środowisko* nr 2.
8. Niezgodziński M.E., Niezgodziński T. (2000): *Wytrzymałość materiałów*. Warszawa, Wydaw. Naukowe PWN.
9. PN-86/G-15000/09 – Obudowa chodników odrzwiami podatnymi z kształtowników korytkowych. Kształtowniki korytkowe proste. Próba statyczna zginania.
10. PN-H-93441-3:1994 – Kształtowniki stalowe walcowane na gorąco dla górnictwa. Kształtowniki typu V. Wymiary.
11. Pytlik A. (1999): *Kryteria oceny parametrów wytrzymałościowych na zginanie i skręcanie kształtowników typu V25 i V29*. *Prace Naukowe GIG* Nr 836.
12. Cook R.D., Malkus D.S., Plesha M.E., Witt R.J. (2002): *Concepts and applications of finite element analysis*. John Wiley & Sons, Inc. USA.
13. Rakowski G., Kacprzyk Z. (1993): *Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji*. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
14. Rotkegel M. (2001): *Contribution to the problem of frame clear interval determination of rectangular steel support*. *Archives of Mining Sciences* 46, No 3.
15. Rotkegel M. (2001): *Wpływ stopnia dyskretyzacji modelu MES na wyniki analizy wytrzymałościowej w przypadku zginania kształtownika V29*. *Przegląd Górniczy* nr 1.
16. Rusiński E. (1994): *Metoda elementów skończonych*. System COSMOS/M. Warszawa, Wydaw. Komunikacji i Łączności.
17. Szuścik W., Kuczyński J. (1998): *Wytrzymałość materiałów (Mechanika modelu ciała odkształcalnego i ciała rzeczywistego)*. Część I. Gliwice, Wydawnictwa Politechniki Śląskiej.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Kazimierz Rułka