



Modele materiałowe wybranych gatunków stali stosowanych na odrzwia obudowy wyrobisk korytarzowych

Material models of selected types of steel used for double timber of mine roadways

Mgr inż. Łukasz Szot*)

Treść: W artykule zaprezentowano wyniki kalibracji modeli materiałowych stali gatunków 25G2, S480W oraz S550W, w oparciu o porównanie wyników przeprowadzonych obliczeń numerycznych metodą elementów skończonych z wynikami badań stanowiskowych statycznej próby zginania kształowników typu V. Modele te opracowano w oparciu o rzeczywiste charakterystyki materiałowe ww. gatunków stali, uzyskane na podstawie badań stanowiskowych przeprowadzonych w ramach pracy statutowej pt. „Modele materiałowe wybranych gatunków stali, stosowanych na odrzwia obudowy wyrobisk korytarzowych”, realizowanej w Głównym Instytucie Górnictwa w latach 2013-2014.

Abstract: This paper presents the results of material model calibration of steel type 25G2, S480W and S550W, based on a comparison of the results of numerical calculations using the finite element method with the results of bench tests of static bending tests conducted on V sections. The models were developed on the basis of the actual material characteristics of the above-mentioned steel types, obtained through tests carried out as a part of a project titled: “Material models of selected types of steel used for double timber of mine roadways” carried out in the Central Mining Institute between 2013 and 2014.

Słowa kluczowe:

kształtowniki stalowe, zginanie, obliczenia numeryczne, modele materiałowe

Key words:

steel sections, bending, numerical calculation, material models

1. Wprowadzenie

W artykule przedstawiono wyniki badań prowadzonych w ramach wieloletniej pracy statutowej pt. „Modele materiałowe wybranych gatunków stali, stosowanych na odrzwia obudowy wyrobisk korytarzowych”, realizowanej w Głównym Instytucie Górnictwa w latach 2013-2014. Na potrzeby prowadzonych prac stworzono algorytm badawczy pozwalający na opracowanie szeregu numerycznych modeli materiałowych, rozszerzających istniejącą już, wykorzystywaną w GIG, bibliotekę materiałową. Oczekiwany efekt pracy były nieliniowe modele materiałowe odwzorowujące rzeczywiste parametry wytrzymałościowe gatunków stali wykorzystywanych do produkcji kształowników typu V dla górnictwa. Algorytm postępowania przedstawiono na rys. 1.

W pierwszym etapie prac (realizowanym w roku 2013), próbki płaskie pobrane z kształowników V29 i V36, wykonane z trzech gatunków stali (25G2 [6], S480W i S550W [5]) poddano statycznej próbie rozciągania, zgodnie z normą PN-EN ISO 6892-1:2010P [3]. Etap ten zakończony został opracowaniem biliniowych charakterystyk materiałowych wyżej wymienionych gatunków stali. W ramach kontynuacji badań, w roku 2014, wykonano wiele prób stanowiskowych statycznej próby zginania kształowników typu V (zgodnie z PN-G-15000-09:1998P) [4]. Wykonano również obliczenia numeryczne odwzorowujące te próby stanowiskowe, w oparciu o algorytmy metody elementów skończonych (MES), z wykorzystaniem opracowanych wcześniej modeli materiałowych.

Celem prac badawczych była kalibracja opracowanych modeli materiałowych poprzez porównanie wyników statycznej próby zginania próbek kształowników V29 i V36 z ich numerycznymi odpowiednikami (MES), a finalnie rozszerzenie wykorzystywanej w GIG bazy materiałowej o zweryfikowane charakterystyki trzech gatunków stali (25G2, S480W i S550W).

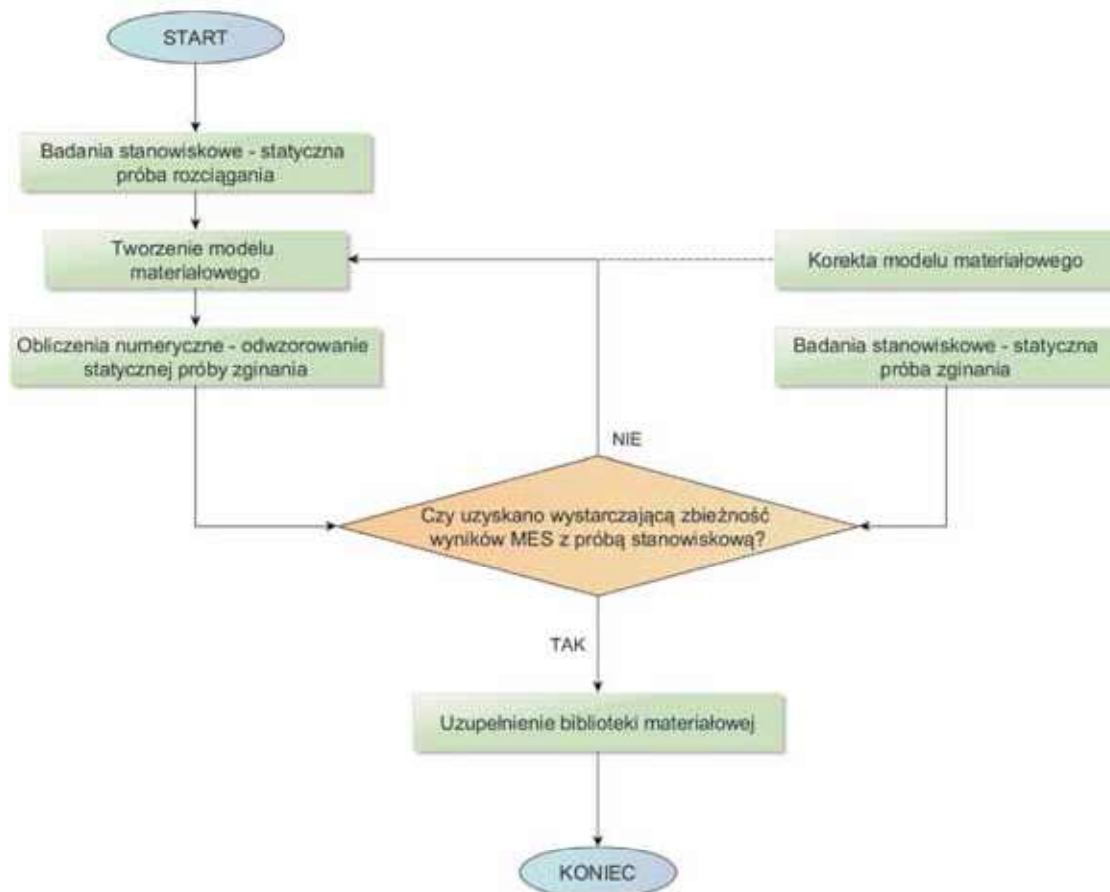
2. Statyczna próba zginania kształowników typu V - badania laboratoryjne

Jako dane porównawcze do kalibracji nieliniowych modeli materiałowych badanych stali wytypowano wyniki statycznej próby zginania kształowników typu V. Jest to jedna z podstawowych metod badawczych, pozwalająca na określenie maksymalnej nośności (maksymalnego momentu zginającego) kształowników korytkowych. Standardowo wyniki statycznej próby zginania, po interpretacji, wykorzystuje się w GIG przy projektowaniu odrzwia obudowy chodnikowej. Na wykorzystanie statycznej próby zginania w prowadzonych badaniach znaczny wpływ miał również nieskomplikowany układ stanowiska pomiarowego i przebiegu próby, łatwy do odwzorowania w późniejszych obliczeniach numerycznych.

2.1. Metoda badań

Statyczna próba zginania kształownika typu V prowadzona powinna być zgodnie z normą PN-G-15000-09:1998P „Obudowa chodników odrzwiami podatnymi z kształowników korytkowych. Kształowniki korytkowe pro-

*) Główny Instytut Górnictwa w Katowicach

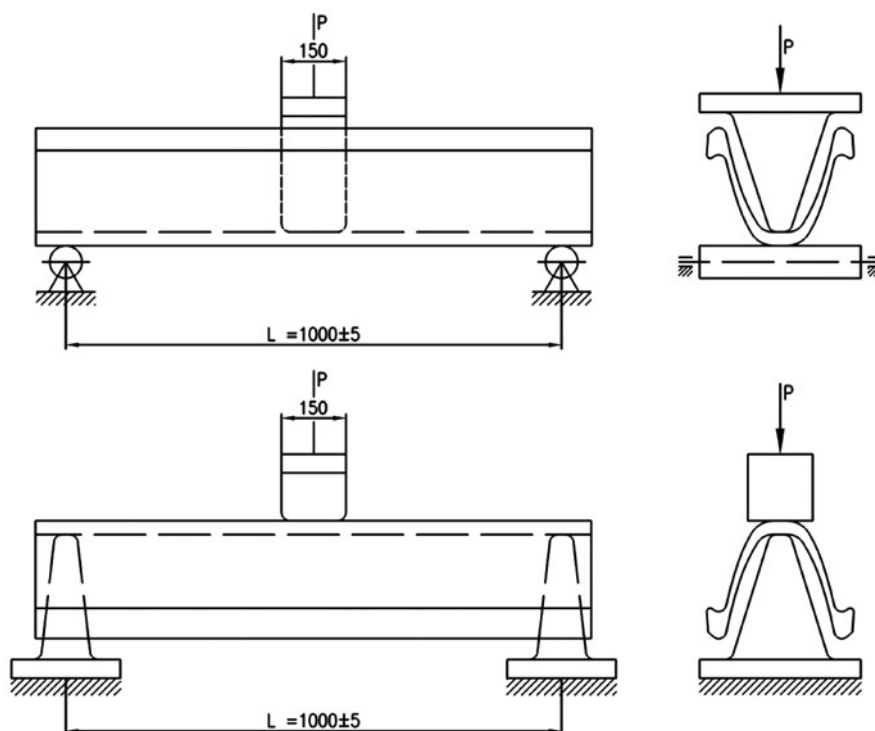


Rys. 1. Algorytm badawczy tworzenia i kalibracji modeli materiałowych
 Fig. 1. Research algorithm for development and calibration of material models

ste. Próba statyczna zginania”. Próba ta polega na statycznym obciążeniu w sposób ciągły odcinka prostego kształtownika korytkowego, posadowionego na dwóch odpowiednio ułożonych podporach. Siła przyłożona jest dokładnie pomiędzy podporami. Maszyna wytrzymałościowa musi spełniać określone wymagania odnośnie zakresu i błędu pomiarowego, a także możliwości pomiaru i rejestracji wyników. Wyposażenie stanowiska pomiarowego (podpory, sworznie, trzpienie) dokładnie opisuje ww. norma.

Próbki badawcze mają postać odcinków prostych kształtowników górniczych, o długości $1250 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$. Wykonuje się statyczne zginanie próbek zarówno dnem skierowanym w górę, jak i w dół. Schemat przygotowania stanowiska badawczego przedstawia rys. 2.

Przebieg próby obejmuje symetryczne pozycjonowanie próbki w stanowisku badawczym, kasowanie luzów maszyny poprzez wstępne obciążenie, a następnie obciążanie wzrastającą siłą z prędkością wysuwu części obciążającej maks. 6 mm/



Rys. 2. Układy badawcze do statycznej próby zginania kształtownika korytkowego; u góry - próba zginania dnem w dół, u dołu - próba zginania dnem w górę [4]

Fig. 2. Test systems for static bending tests of sections: top – an attempt to bend the bottom down; bottom – an attempt to bend the bottom up [4]

min. Zakończenie próby następuje w momencie spadku siły do wartości $0,8 P_{max}$ (po przekroczeniu P_{max}). Wynikiem próby jest wykres zginania, na którym na osi odciętych oznaczana jest strzałka ugięcia f , natomiast na osi rzędnych odpowiadająca jej siła obciążająca próbkę P (rys. 3.).

2.2. Wyniki badań laboratoryjnych

Próby zginania wykonano w laboratorium GIG, na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej (rys. 4), zgodnie z obowiązującą normą [4]. Badania przeprowadzono dla kształtowników usytuowanych dnem w dół (rys. 2 - u góry).

Do badań wytrzymałościowych wytypowano dwa rozmiary kształtowników: V29 i V36, w trzech gatunkach materiałowych (25G2, S480W i S550W).

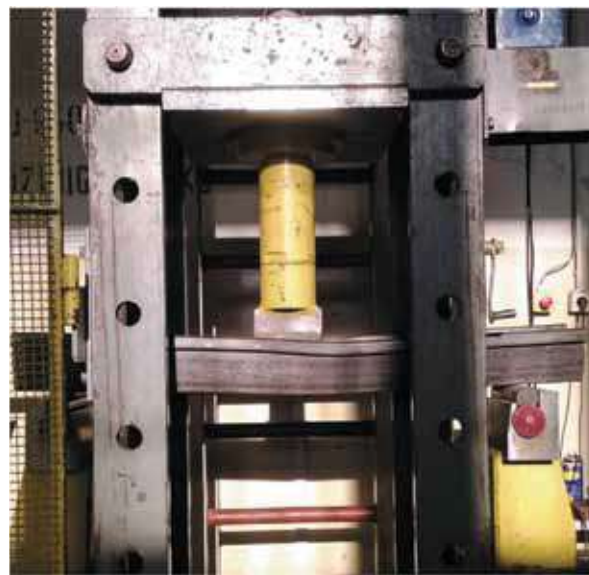
Próbki do badań dostarczone zostały w postaci odcinków prostych kształtowników V29 oraz V36, o długości 1250 mm. Każda z próbek została opisana w celu identyfikacji następującymi danymi: wymiarem kształtownika, długością próbki, numerem wytopu, gatunkiem stali.

Przeprowadzono 18 prób zginania - po 3 próby dla każdego wariantu wymiaru kształtownika i gatunku materiału. Odkształconą próbkę po badaniach przedstawiono na rys. 5. Wyniki przedstawiono w postaci tabelarycznej w tablicy 1.

3. Statyczna próba zginania kształtowników typu V - obliczenia numeryczne

Obliczenia numeryczne zostały w całości wykonane w oparciu o metodę elementów skończonych (MES). Wykorzystano w tym celu środowisko programowe ANSYS v.12.1.

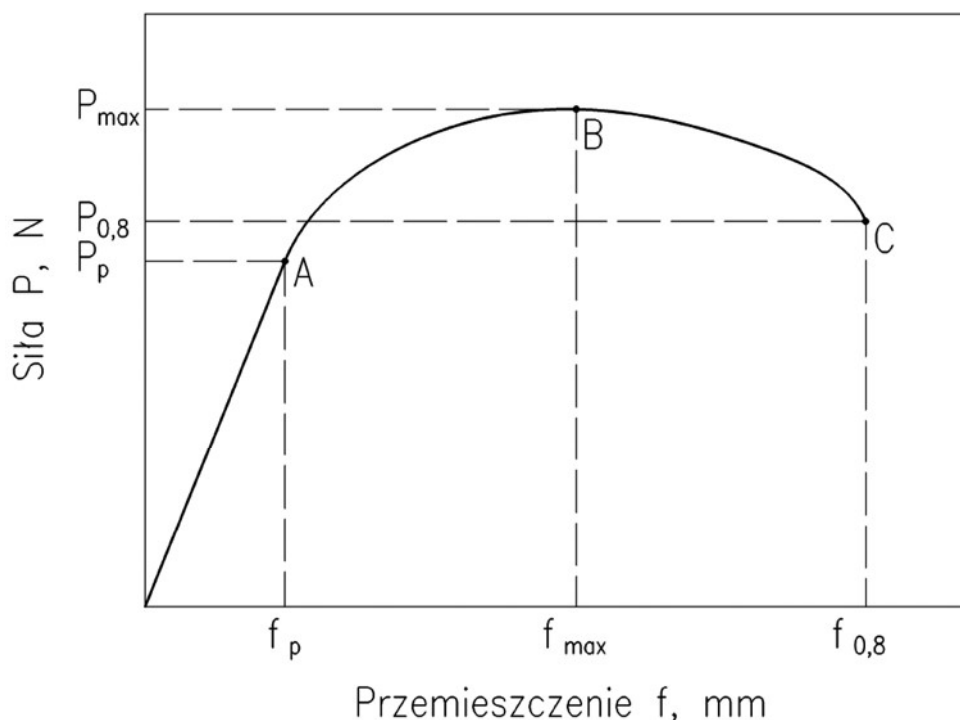
Łatwość użytkowania współczesnego oprogramowania inżynierskiego bazującego na algorytmach MES wpływa



Rys. 4. Widok ogólny maszyny wytrzymałościowej w konfiguracji do statycznej próby zginania kształtowników typu V - stan po próbie zginania

Fig. 4. Overall view of testing machine adjusted to carry out static bending test of V sections - the condition after the test

na ciągły wzrost popularności tej metody w mechanice konstrukcji. Dodatkowo, na korzyść tej metody przemawia stosunkowo niewielki błąd numeryczny obliczeń w przypadku dokładnego odwzorowania analizowanego obiektu, przebiegu analizowanego zjawiska i odpowiedniej dyskretyzacji modelu. Dzięki temu eliminuje się liczbę zmiennych wpływających



Rys. 3. Przykładowy wykres przebiegu próby zginania kształtownika V [4]; punkty charakterystyczne wykresu zginania: A - granica obowiązywania prawa Hooke'a, B - maksymalna zarejestrowana siła zginająca, C - dla wartości $0,8 P_{max}$

Fig. 3. Sample diagram of the attempt to bend the V section [4]; characteristic points of bend chart: A - the limit of the Hooke's law; B - the maximum recorded bending force; C - for $0.8 P_{max}$



Rys. 5. Widok odkształconej próbki prostego odcinka kształtownika V29 ze stali S480W po statycznej próbie zginania dnem w dół; widoczne charakterystyczne odkształcenie w postaci wybočenja kolnierzy kształtownika

Fig. 5. Deformation of the sample straight length of the section type V29 made of S480W steel after the static bending test of the bottom downwards; visible specific deformation as buckling of the flanges of the section

Tablica. 1. Wyniki badań stanowiskowych (statyczna próba zginania) odcinków prostych kształtowników V29 i V36 z wybranych gatunków stali

Table 1. Results of bench tests (static bending test) of straight lengths of V29 and V36 sections made of selected types of steel

Gatunek stali	V29				V36			
	Nr próby	Nr wytopu	Pmax kN	Pmax średnie kN	Nr próby	Nr wytopu	Pmax kN	Pmax średnie kN
25G2	9	79542	219,7	233,2	6	82585	308,5	323,7
	4	79545	227,5		7	526200	335,3	
	5	79545	252,4		10	526200	327,2	
S480W	16	185996	319,0	297,2	12	81513	423,0	437,6
	18	185996	296,4		8	81559	449,8	
	13	312078	276,1		11	81559	440,0	
S550W	15	78501	322,9	318,8	1	183986	497,9	504,1
	17	78501	303,8		2	183986	499,2	
	14	81667	329,6		3	183986	515,3	

na uzyskane wyniki, co pozwala na precyzyjną kontrolę analizowanych parametrów wejściowych. W rozpatrywanym modelu ułatwiło to precyzyjną kalibrację opracowywanych modeli materiałowych.

Jedynymi poważnymi ograniczeniami MES wydają się być czas obliczeń i trudność w uzyskaniu zbieżności analizy. Problem zbieżności jest kluczowy w przypadku występowania dużych deformacji w modelu, a także nieliniowych kontaktów i materiałów. Wzrost mocy obliczeniowej współczesnych komputerów osobistych i możliwość wykorzystania klastrów obliczeniowych prawie zupełnie eliminują problem czasochłonności. Niestety zbieżność rozwiązania w dalszym ciągu wymaga od użytkownika żmudnej i precyzyjnej kalibracji modelu na etapie jego przygotowania (tzw. pre-processingu).

3.1. Metoda obliczeń

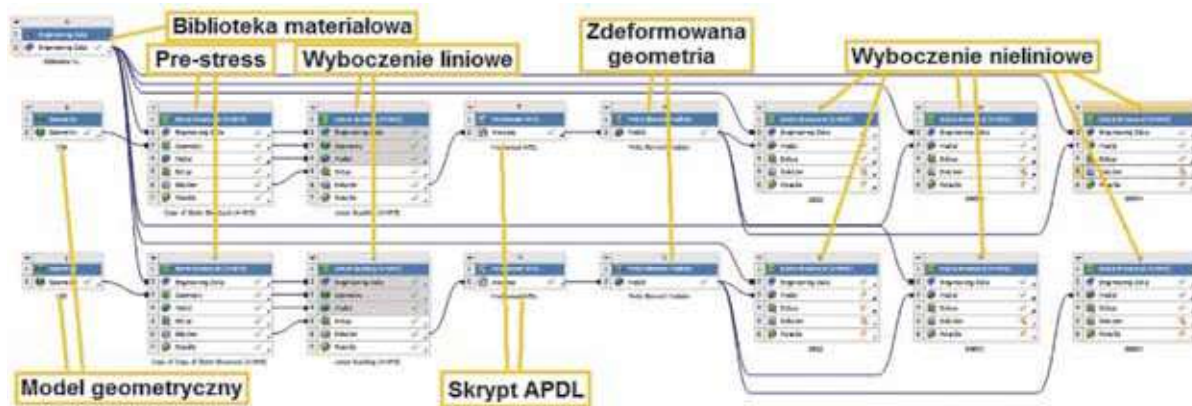
Ze względu na charakter odkształcenia kształtownika typu V zginanego w pozycji „dnem w dół” (rys. 5), zaistniała konieczność prowadzenia obliczeń wytrzymałościowych wieloetapowo, z uwzględnieniem nieliniowego wybočenja kształtownika. Opracowano odpowiedni algorytm badawczy

do zastosowania w oprogramowaniu obliczeniowym ANSYS. Strukturę ciągu obliczeniowego przedstawiono na rys. 6.

Modele geometryczne do obliczeń numerycznych, odzwierciedlające rzeczywistą wielkość i długość prostego kształtownika V29 lub V36 oraz oprzyrządowanie stanowiska badawczego, zbudowano w środowisku 3D opartym na oprogramowaniu SOLIDWORKS firmy Dassault Systemes. Następnie obiekty te wyeksportowano do środowiska obliczeniowego ANSYS, w którym stworzono modele numeryczne, uwzględniające warunki brzegowe wynikające ze specyfiki badania stanowiskowego, a także odpowiednie modele materiałowe.

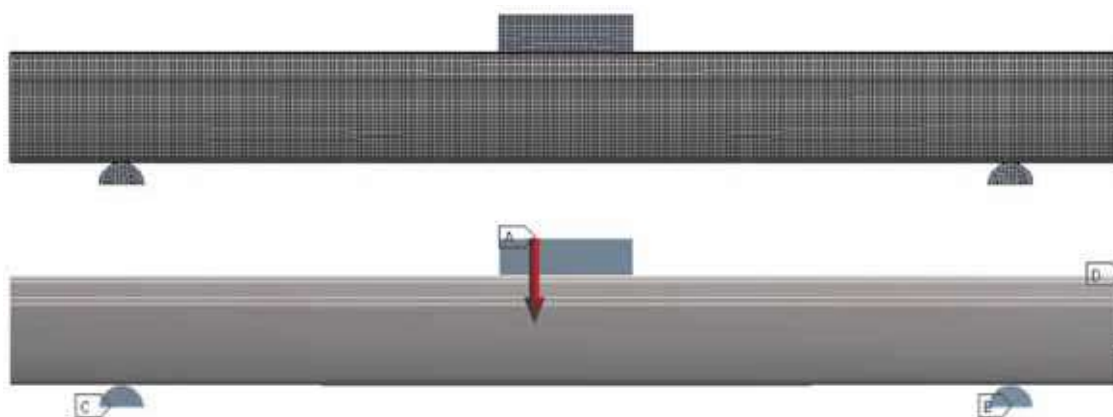
Dyskretyzacji dokonano w oparciu o elementy skończone typu SOLID186. Wielkość elementu została zoptymalizowana pod względem dokładności wyników, poprawnego zachowania kontaktów w modelu oraz czasu obliczeń. Kontakty pomiędzy elementami układu badawczego zdefiniowano jako tarcie (uśredniony współczynnik tarcia „stal o stal” $\mu=0,12$ [8]). Model dyskretny wraz z warunkami brzegowymi przedstawia rys. 7.

W I etapie obliczeń odwzorowano zginanie kształtownika z obciążeniem jednostkowym (pre-stress). Wyniki tych analiz



Rys. 6. Schemat przebiegu przeprowadzonych obliczeń numerycznych w oparciu o środowisko programowe ANSYS WORKBENCH

Fig. 6. Flow diagram of conducted numerical calculations based on the WORKBENCH software



Rys. 7. Model obliczeniowy zginanego kształtownika V29: u góry - widok siatki elementów skończonych, u dołu - schemat podpór i obciążeń: A, E - podpory typu displacement, B, C - podpory typu fixed, D - obciążenie kierunkowe

Fig. 7. Calculation model for bent section V29: top – the finite element mesh, bottom – scheme of supports and loads: A, E – displacement supports; B, C – fixed supports; D – directional load

stanowiły dane wejściowe do określenia pierwszej postaci wyboczeniowej analizowanych modeli w etapie II [1, 2]. Zarówno w etapie I, jak i II użyto podstawowego liniowego modelu materiałowego. Etap III, stanowiący zasadniczą część obliczeń wytrzymałościowych, oparty był na zdeformowanej wstępnie siatce elementów skończonych. W tym celu wykorzystano skrypt wewnętrznego języka programowania ANSYS Parametric Design Language (APDL) - rys. 8 [1]. Deformacja siatki (w skali mikro) wprowadzona była do modelu z II etapu obliczeń tak, aby zainicjować utratę stateczności kształtownika przy obciążeniu powodującym jego wyboczenie. Do obliczeń w etapie III zaimplementowano nieliniowy model materiałowy kształtownika, zmieniono również sposób wymuszenia z obciążenia siłą na kontrolowane przemieszczenie stempla.

```
/prep7
UPGEOM, 1, 1, 1, file, rst
cdwrite, db, file, cdb
```

Rys. 8. Podgląd zastosowanego skryptu APDL - komendy pozwalają na przeniesienie odkształconej geometrii do dalszej analizy z odpowiednim mnożnikiem deformacji

Fig. 8. Applied APDL script – the command that enables to carry out further analysis of the deformed geometry with an appropriate deformation multiplier

3.2. Charakterystyki materiałowe

W początkowym etapie prac modele materiałowe przyjęto jako biliniowe uśrednione charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowe, opracowane na podstawie wyników statycznej próby rozciągania (łącznie 136 przebadanych próbek dla trzech analizowanych gatunków stali - uwzględniono różne wytopy - badania w roku 2013). Jednakże, ze względu na brak satysfakcjonującej zbieżności wyników (różnice nośności dochodzące do 20% w porównaniu do średnich wartości uzyskanych w próbie zginania) zdecydowano się na obniżenie parametrów wytrzymałościowych wszystkich modeli materiałowych. Kalibracji dokonano kilkuetapowo, każdorazowo porównując wyniki obliczeń numerycznych z wynikami badań stanowiskowych. Modele materiałowe wykorzystane do ostatecznych analiz MES przedstawiono w tabelicy 2. Wartości charakterystyczne modeli odpowiadają minimalnym własnościom wytrzymałościowym uzyskanym w statycznej próbie rozciągania.

3.3. Wyniki obliczeń numerycznych

W wyniku przeprowadzonych obliczeń numerycznych otrzymano szereg standardowych danych wynikowych dla analizowanych modeli. Były to między innymi przemieszczenia w modelu, odkształcenia (sprężyste i plastyczne), na-

Tablica 2. Wartości charakterystyczne modeli materiałowych trzech gatunków stali- 25G2, S480W oraz S550W (po kalibracji)
Table 2. Characteristic values of material models for three types of steel: 25G2, S480W and S550W (after calibration)

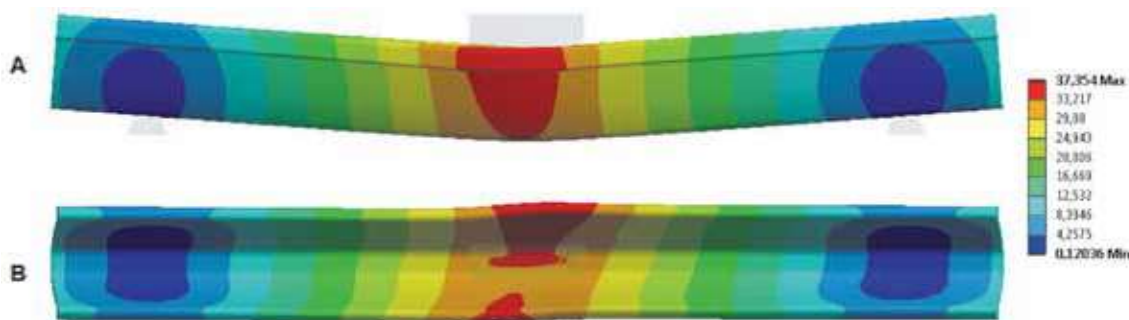
Gatunek stali	Moduł Younga E GPa	Współczynnik Poissona ν [-]	Granica plastyczności Re MPa	Wytrzymałość na rozciąganie Rm MPa	Moduł styczny [GPa]	Odkształcenie ϵ_p [-]	Odkształcenie ϵ_g [-]
25G2	200	0,3	384	583	1,57	0,00192	0,1286
S480W			511	685	1,55	0,00259	0,1101
S550W			570	750	1,82	0,00285	0,1019

prężenia (np. według hipotezy Hubera-Misesa-Hencky’ego), wartości momentów zginających czy reakcje podporowe. Przykładową barwną mapę przemieszczeń modelu, wraz z charakterystycznym przegięciem kształtownika w kierunku poprzecznym (jak na rys. 5), pokazano na rys. 9.

Ze względu na rozpatrywany obszar zagadnienia, tj. kalibrację modeli materiałowych na podstawie danych z przeprowadzonych prób zginania kształtowników, jako główne ana-

lizowane kryterium zbieżności wyników analiz z wynikami doświadczalnymi przyjęto maksymalną siłę przenoszoną przez zginany kształtownik przed utratą jego nośności. Kryterium dodatkowym ustalono ogólne podobieństwo przebiegu wykresów zginania uzyskanych w MES i doświadczalnie.

Porównanie wyników obliczeń MES i badań stanowiskowych przedstawiono w postaci tabelarycznej (tablica 3) i wykresów (rys. 10-12).



Rys. 9. Barwna mapa przemieszczeń całkowitych w modelu zginanego kształtownika V29: A-widok z boku, B-widok z góry (widoczne charakterystyczne przegięcie przy wyboczeniu kolnierzy); rzeczywista skala deformacji [mm]
Fig. 9. A colour map of total displacement for the model bent V29 section: A - side view, B - view from the top (visible characteristic inflection when flanges are buckled); the actual scale of deformation [mm]

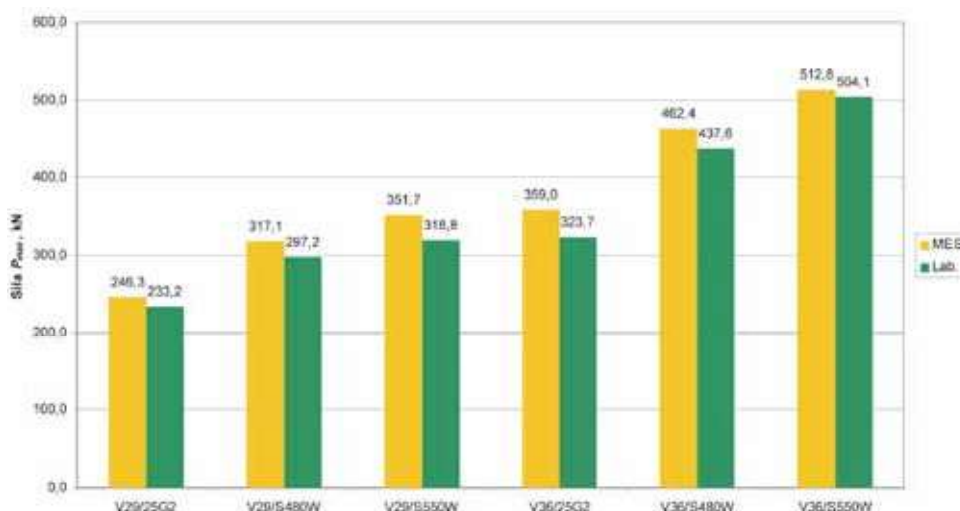
Tablica 3. Porównanie maksymalnych nośności kształtowników V29 i V36 uzyskanych w obliczeniach numerycznych z nośnością wynikającą z badań stanowiskowych - wyniki dla modeli materiałowych stali gat. 25G2, S480W oraz S550W po kalibracji

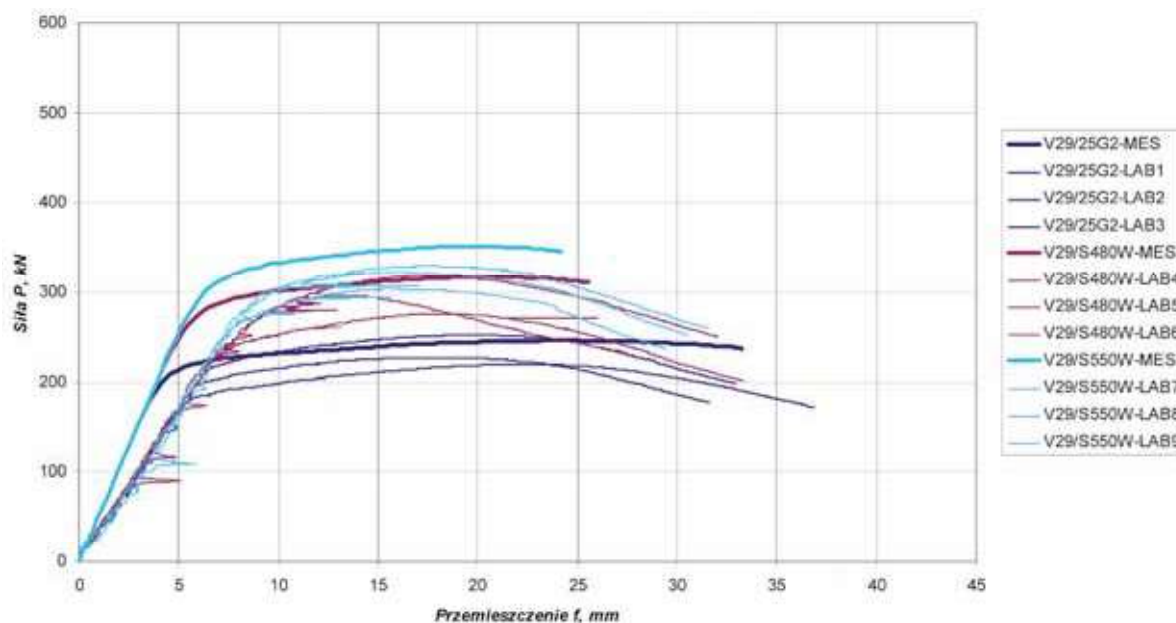
Table 3. Comparison of maximum capacity of V29 and V36 sections obtained through numerical calculations with a load capacity based on the performed bench tests – results for material models of steel type 25G2, S480W and S550W after calibration

Gatunek stali	V29			V36		
	Pmax średnia (lab.) kN	Pmax (MES) kN	Różnica %	Pmax średnia (lab.) kN	Pmax (MES) kN	Różnica %
25G2	233,2	246,3	5,62	323,7	359,0	10,92
S480W	297,2	317,1	6,70	437,6	462,4	5,67
S550W	318,8	351,7	10,32	504,1	512,8	1,73

Rys. 10. Maksymalna siła P przenoszona przez zginany kształtownik typu V dla trzech badanych gatunków stali (25G2, S480W i S550W); porównanie MES i badań stanowiskowych (lab.)

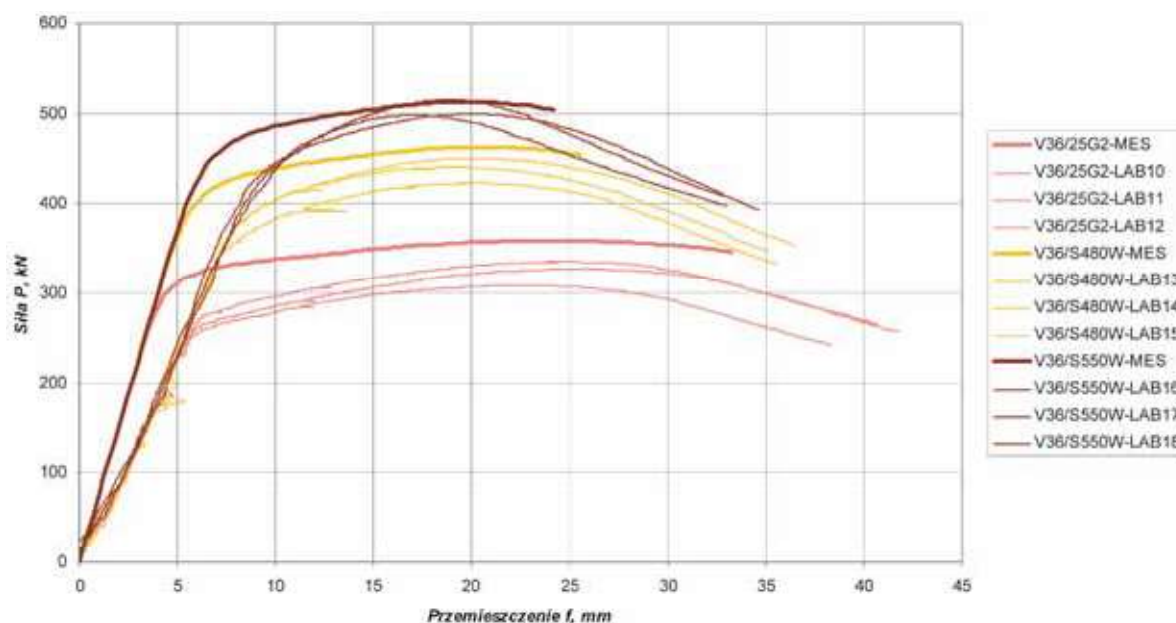
Fig. 10. Maximum P force transferred by bent section V for three tested types of steel (25G2, S480W and S550W); comparison of MES and bench tests (lab.)





Rys. 11. Wykresy próby zginania kształtownika V29 dla trzech badanych gatunków stali (25G2, S480W i S550W); wykresy uzyskane w obliczeniach MES - linie pogrubione, wykresy z badań stanowiskowych (lab.) - linie cienkie

Fig. 11. Charts for bending test of V29 section for three tested types of steel (25G2, S480W and S550W); charts obtained through MES calculation – bold lines; charts for bench tests (lab.) – thin lines



Rys. 12. Wykresy próby zginania kształtownika V36 dla trzech badanych gatunków stali (25G2, S480W i S550W); wykresy uzyskane w obliczeniach MES - linie pogrubione, wykresy z badań stanowiskowych (lab.) - linie cienkie

Fig. 12. Charts for bending test of V36 section for three tested types of steel (25G2, S480W and S550W); charts obtained through MES calculation – bold lines; charts for bench tests (lab.) – thin lines

Jak można zauważyć, wykresy obrazujące próbę zginania kształtownika V uzyskane w wyniku obliczeń numerycznych charakteryzują się podobnym przebiegiem do wykresów z badań laboratoryjnych. Duże podobieństwo wykazuje zarówno nachylenie początkowego odcinka wykresu w zakresie sprężystym, jak i przebieg krzywej przy postępującym odkształceniu plastycznym w przekroju zginanym. Uzyskano również dużą zbieżność wartości maksymalnych siły P (średnio około 6,8% dla wszystkich badanych przypadków), przy czym we wszystkich przypadkach obliczeń numerycznych

maksymalna wartość siły P była wyższa od wartości uzyskanej doświadczalnie.

Warto zaznaczyć, iż obliczenia numeryczne wykonano dla nominalnego przekroju kształtowników V29 i V36, natomiast zawarte w normie PN-H-93441-3:2004 [7] tolerancje wykonania tych profili dopuszczają takie odchyłki wymiarowe, dla których znacznie zmienia się charakterystyka wytrzymałości na zginanie tych przekrojów. Dla badanych kształtowników wartość współczynnika W_x może odbiegać od nominalnego o około $\pm 4\%$ w stosunku do wartości nominalnej [9], co może

mieć wpływ na rzeczywistą wartość procentowej różnicy pomiędzy MES a wynikami uzyskanymi w laboratorium.

5. Podsumowanie

W pracy określono biliniowe modele materiałowe dla trzech gatunków stali (25G2, S480W, S550W) stosowanych na wybrane wyroby górnicze (m.in. kształtowniki typu V). Dane wejściowe do opisu modeli materiałowych stanowiły uśrednione wartości dla punktów charakterystycznych wykresów ze statycznej próby rozciągania płaskich próbek normowych, wyciętych z kształtowników V29 i V36 (łącznie 136 próbek, trzy gatunki stali, różne wytopy).

Kalibracji modeli materiałowych dokonano w oparciu o porównanie wyników przeprowadzonej doświadczalnie statycznej próby zginania kształtowników V29 i V36 z wynikami tej próby odwzorowanej numerycznie, w oparciu o metodę elementów skończonych (środowisko obliczeniowe ANSYS).

Wartości charakterystyczne modeli materiałowych po kalibracji odpowiadają minimalnym własnościom wytrzymałościowym uzyskanym w statycznej próbie rozciągania. Uzyskana zbieżność wyników zasyulowanej próby zginania z wynikami laboratoryjnymi, w zależności od gatunku stali i wielkości kształtownika typu V, waha się pomiędzy 1,73% a 10,92% (średnio 6,8%). We wszystkich przypadkach obliczeń uzyskano nieznacznie wyższą wartość maksymalnej siły P przenoszonej przez zginany kształtownik niż średnia wartość tej siły uzyskanej w próbach laboratoryjnych. Istnieje możliwość, iż jest to związane z różnicami wymiarowymi przekroju kształtowników przebadanego numerycznie i laboratoryjnie, co wynikać może z hutniczych tolerancji wykonania. W badaniach nie zweryfikowano wpływu tolerancji wykonania kształtownika na wyniki badań statycznej próby zginania, natomiast do obliczeń numerycznych przyjęto nominalne wymiary przekroju kształtowników. Przyjęta metodyka nie przewidywała bowiem szczegółowych pomiarów badanych laboratoryjnie kształtowników, sprawdzono jedynie zgodność kilku charakterystycznych grubości z zakresami wymiarowymi podanymi w normie PN-H-93441-3:2004 w formacie „zgodny-niezgodny”.

Jak wynika z porównania wykresów próby zginania kształtowników V29 i V36 (MES i laboratorium), w przypadku obliczeń numerycznych opartych na modelach materiału po kalibracji, dla obciążeń kształtownika zbliżonych do nośności maksymalnych, można uzyskać wyniki nieznacznie mniej krytyczne, niż rzeczywiste. Jednakże, szczególnie w aspekcie optymalizacji odrzwi obudowy chodnikowej, uzyskane wyniki obliczeń numerycznych z tak zdefiniowanymi materiałami będą zdecydowanie lepiej odpowiadać wynikom prób stano-

wiskowych niż w przypadku stosowania liniowego modelu materiałowego, czy uogólnionego podejścia spotykanego w literaturze (tj. moduł Younga $E=200$ GPa, moduł styczny $ET=1,45$ GPa i granica plastyczności Re nominalna z karty materiałowej danego gatunku stali [1]).

Ze względu na rozległość zagadnienia, a także wiele nowych kwestii wynikłych podczas przeprowadzonych prac nad rozszerzeniem biblioteki materiałowej wykorzystywanej w GIG, planuje się dalsze prace związane z niniejszą tematyką. Opracowane modele materiałowe będą aktualizowane w oparciu o stale poszerzającą się bazę wyników prób laboratoryjnych. Dodatkowo, szczególnej uwagi wymagać będzie zweryfikowanie wpływu tolerancji wykonania kształtowników na ich nośność, a także wpływ współczynnika tarcia pomiędzy poszczególnymi elementami badanych układów na wyniki obliczeń. Rozważana jest również możliwość wykorzystania modeli materiałowych opisanych w układzie rzeczywistym [10], tj. σ - ϵ ln. Wymagać to jednak będzie uzyskania pełnych numerycznych przebiegów krzywych rozciągania w powszechnie stosowanym układzie inżynierskim, tj. σ - ϵ eng, co wiąże się z wykonaniem statycznych prób rozciągania z pełną, cyfrową rejestracją ich przebiegu.

Literatura

1. ANSYS Modeling and Meshing Guide. Ansys, Inc. USA 2013.
2. *Jakubowicz A., Orłoś Z.*: Wytrzymałość materiałów. WNT. Warszawa 1968.
3. PN-EN ISO 6892-1:2010P: Metale. Próba rozciągania. Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej.
4. PN-G-15000-09:1998P: Obudowa chodników odrzwiami podatnymi z kształtowników korytkowych. Kształtowniki korytkowe proste. Próba statyczna zginania.
5. PN-H-84042:2009 – Stale mikrostopowe na kształtowniki i akcesoria górnicze.
6. PN-H-93441-1:2004 – Kształtowniki stalowe walcowane na gorąco dla górnictwa. Część 1: Ogólne wymagania i badania.
7. PN-H-93441-3:2004 - Kształtowniki stalowe walcowane na gorąco dla górnictwa. Część 3: Kształtowniki typu V. Wymiary.
8. Praca zbiorowa: Mały poradnik mechanika. WNT. Warszawa 2000
9. *Rotkegel M. i zespół*: Analiza wpływu tolerancji wykonania obudowy na jej nośność. Dokumentacja prac wykonanych w ramach działalności statutowej. Główny Instytut Górnictwa, Katowice 2013 (niepublikowana).
10. *Świniarski J., Królak M., Kowal-Michalska K.*: Schematyzacja charakterystyki materiału a charakterystyka rzeczywista w analizie porównawczej modelu MES i badań doświadczalnych stateczności dźwigarów cienkościennych. Acta Mechanica et Automatica, vol.2 no. I. Białystok 2008.