

Wyznaczenie wytrzymałości na zginanie łupków ilastych oraz piaskowców

Lesław Bagiński¹, Irena Bagińska²

¹Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, e-mail: leslaw.baginski@pwr.edu.pl

²Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

Streszczenie

W pracy określono parametry wytrzymałości na zginanie łupków ilastych, piaskowca ze złoża Nowa Wieś Grodziska, piaskowca ze złoża Żerkowice oraz wapienia Morawica. Opisano badania z użyciem próbek foremnych oraz próbek w postaci krążków, dla których wykonano badania na zginanie proste. Celem wykonania badań jest uzyskanie wartości porównawczych pozwalających ocenić zachowanie się skał w warunkach działania obciążenia zginającego. Opisano wyniki wyznaczając korelacje pomiędzy wartościami wytrzymałości na zginanie określonymi z obu technik badawczych.

Wprowadzenie

Zjawisko niszczenia skał na skutek przekroczenia wytrzymałości na zginanie uwidacznia się przy zawale stropów tuneli i sklepień komór. Celem badania wytrzymałości na zginanie jest określenie przydatności skał stropowych do zabudowy kotwowej w zakresie bezpieczeństwa, komunikacji i utrzymania ruchu kopalni (Matuszewski, 2009). Ustalenie wartości wytrzymałości na zginanie jest ważnym parametrem dla projektantów zabezpieczeń stropów wyrobisk kotwami (Skrzypkowski i in., 2020). Może być określana wieloma technikami laboratoryjnymi na próbkach foremnych o różnych kształtach oraz przy różnych układach podparcia (Lim i in., 1994; Amaral i in., 2008; Agioutantis i in. 2016; Aliha i in., 2013). Dla potrzeb niniejszego opracowania poddano badaniu drobnoziarnisty łupek ilasty z domieszką kwarcytu, charakteryzujący się ciemną barwą związaną z obecnością składników organicznych, pochodzący z północno-środkowej części województwa dolnośląskiego, piaskowiec ze złoża zlokalizowanego w miejscowości Nowa Wieś Grodziska w powiecie Złotoryjskim, piaskowiec ze złoża Żerkowice zlokalizowanego w powiecie Lwówek Śląski oraz wapień Morawica ze złoża wapieni Jurajskich z okolic Gór Świętokrzyskich. Do określenia wytrzymałości na zginanie wykonano badania metodą łamania beleczek foremnych oraz zginania prostego próbek foremnych w postaci krążków. Metodyka wykonanych badań była zgodna z normami PN-G-04305:1997 dla zginania z użyciem próbek foremnych oraz PN -G-04306:1998 dla zginania z użyciem próbek w postaci krążka.

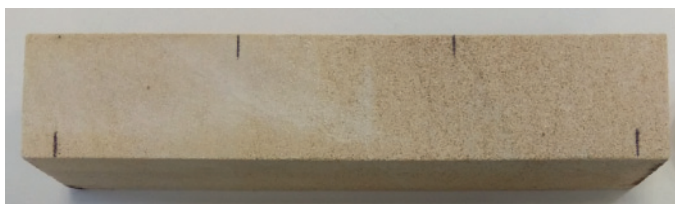
Metodyka i wyniki testów wytrzymałościowych

Wszystkie próby skalne poddane badaniom były wykonane zgodnie z PN-G-04301:1996. W przypadku prób łupka ilastego posiadały widoczny układ laminacji zgodny z poziomym układem zalegania warstwy (Jarczyk, 2019). Wykonanie prób do badań dla tego typu mate-

rialu jest niezwykle trudne. Charakterystyczne laminacje tej skały w znacznym stopniu utrudniają wykonanie próbek w postaci krążków, a już zupełnie uniemożliwiają wykonanie beleczek foremnych o znormalizowanych wymiarach zgodnych z PN-G-04305:1997. Dlatego ocenę wytrzymałości na zginanie łupka ilastego wykonano jedynie na próbkach w postaci plasterków. Dodatkowo, celem odniesienia się do otrzymanych wyników dla łupka ilastego, wykonano badania oceny wytrzymałości na zginanie na próbkach w postaci beleczek i krążków na piaskowcach ze złóż Nowa Wieś Grodziska, Żerkowice oraz wapienia Morawica. W każdym z testów wytrzymałościowych wykonano po sześć badań dla każdego rodzaju próbek skalnych. Wyniki zestawiono w tabelach w rozbiciu na poszczególne testy. Gęstość objętościowa badanego łupka ilastego wynosiła $2,39 \pm 2,40 \text{ g/cm}^3$, piaskowca Nowa Wieś Grodziska $2,04 \pm 2,07 \text{ g/cm}^3$, piaskowca Żerkowice $2,03 \pm 2,07 \text{ g/cm}^3$ oraz wapienia Morawica $2,58 \pm 2,61 \text{ g/cm}^3$.

Badania próbek foremnych metodą łamania beleczek

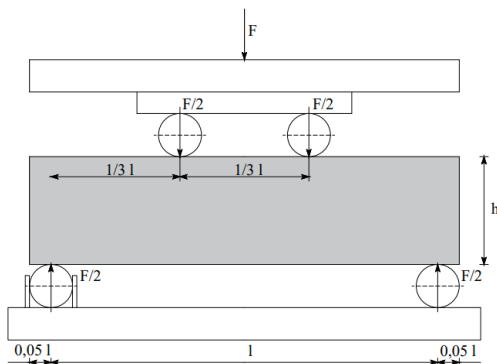
Oznaczenie wytrzymałość mechanicznej na zginanie skał oznacza się na podstawie badania próbek foremnych metodą łamania beleczek w kształcie prostopadłościanu lub walca PN-G-04305:1996. Siły przekrojowe w belkach wynikają z działania na nie obciążeń w postaci sił czynnych i biernych (metoda czteropunktowa). Metoda beleczek jest stosowana najczęściej przy pobieraniu prób w postaci brył, a następnie wycinaniu z nich minimum pięciu próbek prostopadłościennych o długości l w przedziale 200–250 mm z odchyłką do ± 2 mm, natomiast przekrój poprzeczny prostokątny lub kwadratowy z zakresu długości boków 40–50 mm. Orientacja prób standardowo powinna być równoległa do płaszczyzn osłabienia. W przypadku próbek foremnych w kształcie walca powinny one mieć średnicę od 42 do 54 mm i długości l z przedziału 200–250 mm z odchyłką do ± 2 mm. Próby walcowe docinane są np. z rozpoznawczych rdzeni wiertniczych. W niniejszej pracy badania wykonano dla próbek prostopadłościennych o przekroju poprzecznym kwadratowym (rys. 1), a dokładne wymiary wszystkich prób zamieszczono w tabeli 1.



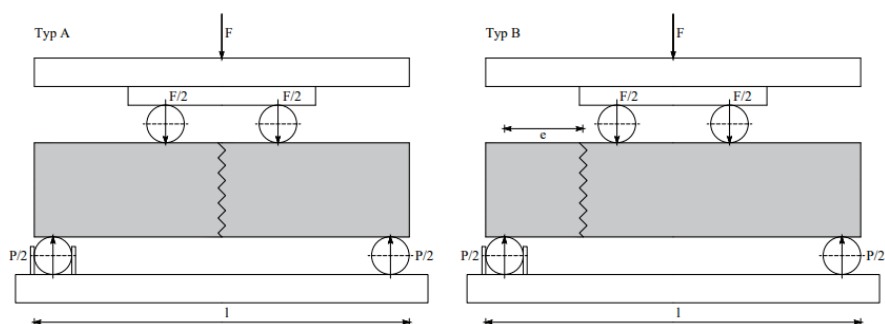
Rys. 1. Próbką foremną w postaci beleczki

Metoda badania polega na zadaniu obciążenia na próbkę ze stałym przyrostem siły rzędu 100 N/s powodując czyste zginanie próbki zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 2. Siła jest przenoszona na próbkę poprzez rozmieszczone odpowiednio stalowe podpory. Rejestracji podlega maksymalna siła F_{\max} , przy której próbka ulega zniszczeniu.

Z uwagi na charakter podparcia oraz obciążania beleczek możliwe są do zaobserwowania dwa charakterystyczne, potencjalne miejsca zniszczenia próbek (rys. 3). W zależności od typu zniszczenia algorytm obliczania wytrzymałości na zginanie jest dwójaki.



Rys. 2. Schemat mocowania beleczki pomiędzy płytami dociskowymi prasy



Rys. 3. Obraz możliwego zniszczenia beleczek podczas badania

Dla Typu A zgodnie z rys. 3, czyli zginania próby prostokątnej z rozłamem w „połowie” długości:

$$R_g = \frac{F_{\max} \cdot l}{b \cdot h^2} \quad (1)$$

Dla Typu B zgodnie z rys. 3, czyli zginania próby prostokątnej z rozłamem w innym miejscu:

$$R_g = \frac{3 \cdot F_{\max} \cdot e}{b \cdot h^2} \quad (2)$$

gdzie:

F_{\max} – wartość siły niszczącej, [MN];

l – odległość pomiędzy podporami dolnymi, [m];

b – szerokość poprzecznego przekroju próbki, [m];

h – wysokość próbki, [m];

e – odległość miejsca pęknięcia próbki od osi bliższej podpory dolnej (patrz rys. 3), [m].

Podczas analizowanych badań obserwowano jedynie zniszczenia Typu A zgodnie z rys. 3, co pokazano na rys. 4. Rozstaw pomiędzy podporami dolnymi wyniósł $l = 225$ mm.



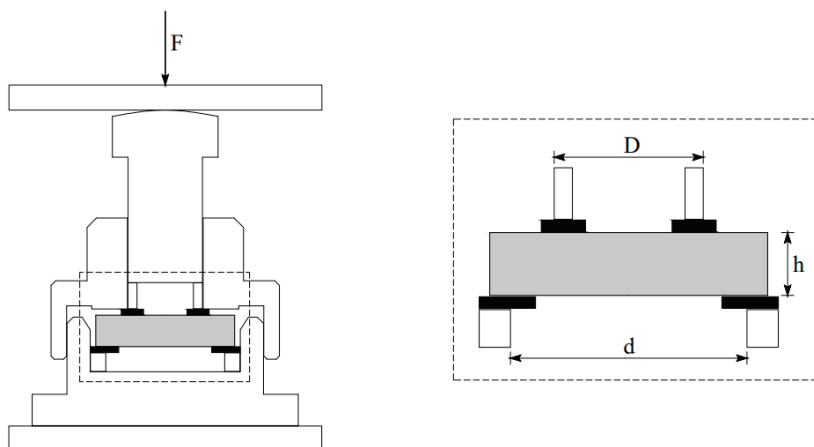
Rys. 4. Materiał zdjęciowy typu zniszczenia w teście zginania prób prostokątnych

Tabela 1. Wyniki testu wytrzymałości na zginanie próby prostokątnej z rozłamem w „połowie” długości

Rodzaj skały	b [mm]	h [mm]	d [mm]	F_{max} [kN]	R_g [MPa]
Piaskowiec (Nowa Wieś Grodziska)	49,60	49,60	249,90	2,46	4,54
	49,60	49,60	249,90	2,51	4,63
	49,60	49,60	249,90	2,42	4,46
	49,60	49,60	249,90	2,52	4,65
	49,60	49,60	249,90	2,48	4,57
	49,60	49,60	249,90	2,55	4,70
Piaskowiec (Żerkowice)	49,60	49,60	249,90	2,73	5,03
	49,60	49,60	249,90	2,69	4,96
	49,60	49,60	249,90	2,77	5,11
	49,60	49,60	249,90	2,80	5,16
	49,60	49,60	249,90	2,73	5,03
	49,60	49,60	249,90	2,72	5,02
Wapień (Morawica)	49,90	49,90	249,90	7,11	12,88
	49,90	49,90	249,90	7,23	13,09
	49,90	49,90	249,90	6,98	12,64
	49,90	49,90	249,90	7,43	13,45
	49,90	49,90	249,90	7,29	13,20
	49,90	49,90	249,90	7,01	12,69

Oznaczenie wytrzymałości na zginanie próbek w postaci krążków

Metoda krążków (zginanie proste) zgodnie z PN-G-04306:1996 wykonano na krążkach o średnicy 44,4 mm w przypadku łupka ilastego oraz o średnicy 43,1 mm dla prób piaskowców Nowa Wieś Grodziska i Żerkowice oraz wapienia Morawica. Wysokość h wszystkich prób wynosiła 10 mm. Badanie polega na obciążaniu próbki umieszczonej w specjalnym uchwycie do zginania, siłą ze stałym przyrostem siły rzędu 100 N/s. Próbką podparta jest na pierścieniu stalowym dolnym, a siła przekazywana jest poprzez pierścień stalowy górny, ale o mniejszej średnicy niż pierścień dolny. Pomiędzy próbką a pierścieniami stalowymi umieszczono zgodnie z zaleceniami normowymi pierścienie gumowe. Rejestracja polega na odczytaniu maksymalnej siły niszczącej w chwili pęknięcia. Schemat mocowania próbki pomiędzy pierścieniami stalowymi i gumowymi prezentuje rys. 5.



Rys. 5. Schemat mocowania krążka w uchwycie

Wytrzymałość skał na zginanie określa się na podstawie maksymalnej siły niszczącej ze wzoru ogólnego:

$$R_g = k \cdot \frac{F_{\max}}{h^2} \quad (3)$$

gdzie:

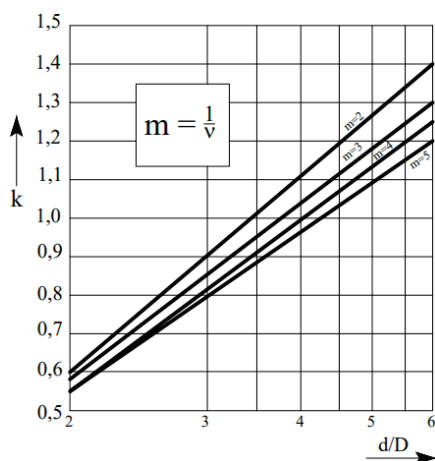
F_{\max} – siła niszcząca, [MN];

h – wysokość próbki, [m];

k – mnożnik będący funkcją liczby Poissona i ilorazu wymiarów średnic pierścieni d/D , [-],

d – średnica wewnętrzna pierścienia stalowego dolnego, [mm], (rys. 5),

D – średnica zewnętrzna pierścienia stalowego górnego, [mm], (rys. 5).

Rys. 6. Nomogram do ustalenia mnożnika k (Kidybiński, 1982)

Wartość mnożnika k można ustalić na podstawie nomogramu (rys. 6) lub stosując wzór:

$$k = \frac{3}{4 \cdot \pi \cdot m} \cdot \left[2 \cdot (m+1) \cdot \ln\left(\frac{d}{D}\right) + (m-1) \cdot \left(1 - \left(\frac{D}{d}\right)^2 \right) \right] \quad (4)$$

gdzie:

m – odwrotność współczynnika Poissona $m = \frac{1}{\nu}$, [-];

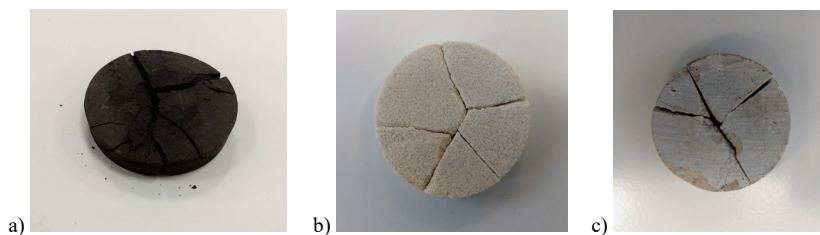
ν – współczynnik Poissona, [-].

W analizie mnożnik k określono na bazie równania (4) z uwzględnieniem rzeczywistych wymiarów przyrządu do zginania próbek w postaci krążka (rys. 5). Do obliczeń wartości współczynnika Poissona przyjęto na bazie wcześniejszych autorskich badań. Wszystkie wyniki zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki testu wytrzymałości na zginanie próby w postaci krążków

Rodzaj skały	ν [-]	k [-]	F_{max} [kN]	R_g [MPa]
Piaskowiec (Nowa Wieś Grodziska)	0,20	0,34	1,29	4,36
	0,20	0,34	1,24	4,21
	0,20	0,34	1,22	4,13
	0,20	0,34	1,28	4,35
	0,20	0,34	1,25	4,23
	0,20	0,34	1,26	4,26
Piaskowiec (Żerkowice)	0,20	0,34	1,41	4,79
	0,20	0,34	1,39	4,70
	0,20	0,34	1,46	4,94
	0,20	0,34	1,40	4,74
	0,20	0,34	1,45	4,91
	0,20	0,34	1,43	4,86
Wapień (Morawica)	0,23	0,34	3,37	11,47
	0,23	0,34	3,46	11,76
	0,23	0,34	3,45	11,72
	0,23	0,34	3,51	11,93
	0,23	0,34	3,48	11,84
	0,23	0,34	3,28	11,16
Łupek ilasty (Dolny Śląsk)	0,23	0,34	3,10	10,55
	0,23	0,34	3,31	11,28
	0,23	0,34	3,23	10,99
	0,23	0,34	3,70	12,59
	0,23	0,34	3,47	11,81
	0,23	0,34	3,54	12,05

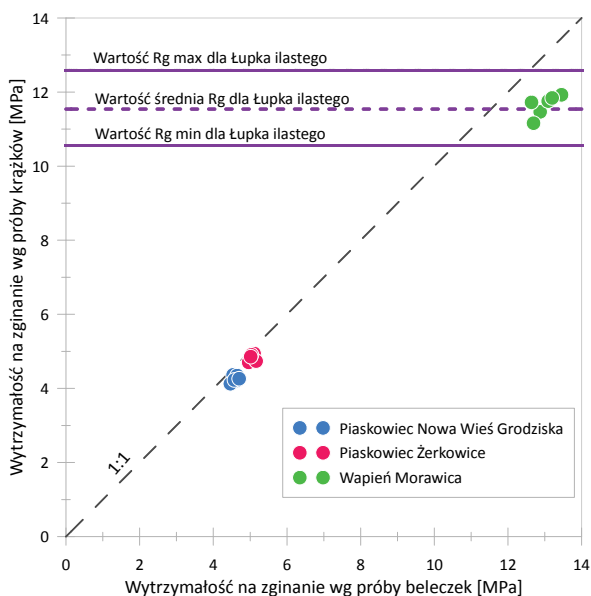
Przykładowe obrazy próbek po zniszczeniu zamieszczono na rys. 7.



Rys. 7. Zdjęcia przykładowych próbek: a) łupek ilasty; b) piaskowiec Żerkowice; c) wapień Morawica w postaci krążków po badaniu wytrzymałości na zginanie

Analiza wyników oceny wytrzymałości na zginanie

Dla wykonania pełnej analizy otrzymanych wyników zestawiono je na wykresie zbiorczym na rys. 8. Zestawienie wyznaczonych wartości wytrzymałości na zginanie podano w tabeli 3.



Rys. 8. Graficzne zestawienie wyznaczonych wartości wytrzymałości na zginanie

Tabela 3. Zestawienie wyznaczonych wartości wytrzymałości na zginanie

Rodzaj skały	Wytrzymałość na zginanie R_g			
	próbki w postaci krążków		próbki w postaci beleczek	
	wartość średnia [MPa]	odchylenie standardowe [MPa]	wartość średnia [MPa]	odchylenie standardowe [MPa]
Piaskowiec (Nowa Wieś Grodziska)	4,27	0,08	4,59	0,08
Piaskowiec (Żerkowice)	4,84	0,09	5,05	0,07
Wapień (Morawica)	11,64	0,26	12,99	0,29
Łupek ilasty (Dolny Śląsk)	11,54	0,68	–	–

Średnią wartość wytrzymałości na zginanie łupka ilastego w badaniu na krążkach określono na poziomie 11,54 MPa, przy odchyleniu standardowym 0,68 MPa. Większe wartości odchylenia standardowego świadczą o dużej zmienności badanego materiału. We wszystkich podanych przypadkach wytrzymałość na zginanie uzyskana na próbach w postaci beleczek jest większa od wytrzymałości na zginanie dla próbek w postaci krążków. Różnica średnich wartości wytrzymałości na zginanie R_g pomiędzy badaniami próbek foremnych metodą łamania beleczek w kształcie prostopadłościanu a wytrzymałością na zginanie próbek w postaci krążków piaskowca Nowa Wieś Grodziska wyniosła 0,32 MPa, odpowiednio dla piaskowca Żerkowice 0,21 MPa oraz wapienia Morawica 1,35 MPa. Stwierdzono, że w przypadku łupka ilastego wykonanie badania na beleczkach foremnych również dostarczyłoby ocenę niewiele wyższą od oceny R_g z badania na próbach w postaci krążków. Zawsze jednak warto zwiększyć skalę wykonania wyżej opisanych badań o nowe wyniki z zastosowaniem innych technik oceny wytrzymałości na zginanie (Lim i in., 1994; Amaral i in., 2008; Agioutantis i in., 2016; Aliha i in., 2013). Różnice w sposobie wykonania badań wytrzymałości na zginanie mogą wpływać na otrzymywane wyniki szczególnie w kontekście porównania efektu skali badania do skali pracy górotworu w naturze. Zdaniem autorów zaprezentowane w pracy techniki mogą być stosowane zamiennie w zależności od możliwości pozyskania porób do badań.

Podsumowanie

Przedstawione w opracowaniu wyniki dla łupka ilastego są porównywalne z wynikami badań geomechanicznych wykonanych przez Przedsiębiorstwo Geologiczne PROXIMA SA na zlecenie Centrum Badawczo-Projektowego Sp. z o.o. w celu stworzenia dokumentacji geologicznej szybu SW-4 obejmujące również łupki ilaste zalegające w warstwach pstrego piaskowca dolnego, gdzie wytrzymałości na zginanie wykonane metodą krążków ustalono na poziomie 11,3–12,1 MPa (Cuprum, 2005). Należy przypuszczać, że w przypadku oceny wytrzymałości na zginanie R_g łupka ilastego metodą łamania beleczek w kształcie prostopadłościennych beleczek zostałyby uzyskane również niewiele większe wartości R_g od uzyskanych w badaniu na próbkach w kształcie krążków.

Literatura

- AGIOUTANTIS Z., KAKLIS K., MAVRIGIANNAKIS S., VERIGAKIS M., VALLIANATOS F., SALTAS V., 2016. *Potential of acoustic emissions from three point bending tests as rock failure precursors*, International Journal of Mining Science and Technology, 26(1), 155–160.
- ALIHA M.R.M., HOSSEINPOUR G.R., AYATOLLAHI M.R., 2013. *Application of cracked triangular specimen subjected to three-point bending for investigating fracture behavior of rock materials*, Rock Mechanics and Rock Engineering, 46(5), 1023–1034.
- AMARAL P.M., FERNANDES J.C., ROSA L.G., 2008. *Weibull statistical analysis of granite bending strength*, Rock Mechanics and Rock Engineering, 41(6), 917–928.
- CUPRUM, 2005. *Badania geomechanicznych właściwości skał formacji permsko-triasowej dla potrzeb dokumentacji geologicznej szybu SW-4*, Sprawozdanie z badań.
- JARCZYK P., 2019. *Impact of confining pressure and orientation of discontinuities on the behaviour of jointed rock mass*. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 261, No. 1, p. 012014), IOP Publishing.
- KIDYBIŃSKI A., 1982. *Podstawy geotechniki kopalnianej*, Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice.

- LIM I.L., JOHNSTON I.W., CHOI S.K., BOLAND J.N., 1994. *Fracture testing of a soft rock with semi-circular specimens under three-point bending, Part 1 – mode I*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts (Vol. 31, No. 3, pp. 185–197), Pergamon.
- MATUSZEWSKI K., 2009. *Zapobieganie katastrofom górniczym w kopalniach węgla kamiennego*. Czasopismo Bezpieczeństwo Pracy: Nauka i Praktyka, 20–23.
- PN-G-04301:1996. *Skały zwięzłe, Pobieranie i przygotowanie próbek do badań własności mechanicznych i technologicznych*.
- PN-G-04305:1997. *Skały zwięzłe. Oznaczenie wytrzymałości na zginanie z użyciem próbek foremnych*.
- PN-G-04306:1998. *Skały zwięzłe, Oznaczanie wytrzymałości na zginanie z użyciem próbek w postaci krążka*.
- SKRZYPKOWSKI K., KORZENIOWSKI W., ZAGÓRSKI K., ZAGÓRSKA A., 2020. *Modified Rock Bolt Support for Mining Method with Controlled Roof Bending*, Energies, 13(8), 1868.