

Odkształcalność piaskowców w świetle zmian wilgotności i smukłości próbek

Mirosława Bukowska¹



Deformability of sandstones in view of changes in humidity and slenderness ratio of samples. Prz. Geol., 63: 1230–1236.

Abstract. Natural humidity of rocks in the Upper Silesian Coal Basin results from the influence of mining activities and dewatering the rock mass. The state of humidity which best approximates laboratory rock tests to the conditions in the exploited rock mass is the capillary saturation state. Deformation properties of sandstones (Young's modulus, post-peak failure modulus, critical strain, residual strain) were determined for samples of slenderness ratio of 1 and 2, which were loaded in a servo-controlled testing machine. In the samples of sandstones of different slenderness ratio, values of Young's modulus decreased for the samples in dry-air condition and capillary saturation state. In the samples of rocks of different slenderness ratio, tested in the same state of humidity, an increase in the value of Young's modulus was observed. The increase depends on grain size. Post-peak failure modulus of sandstones shows similar trends of changes depending on slenderness ratio, state of humidity of the samples and their grain size. In the conditions when the samples of sandstones of slenderness ratio of 1, were tested in two states of humidity, values of critical strain decreased by a few per cent. For the samples of greater slenderness ratio, which also were tested in two states of humidity there was an increase in the value of critical strain and in humidity. For the samples of slenderness ratio of 1 and 2 tested in dry-air condition and in capillary saturation state there was a decrease in the value of critical strain by a few tens per cent. The trends of changes in values of residual strain are the same as of critical strain. Based on the conducted tests it was shown that humidity and slenderness ratio of the sandstone samples influence differently their deformability. Humidity has a greater influence on the value of Young's modulus than slenderness ratio of the tested samples. For critical strain and residual strain it was demonstrated that slenderness ratio of the samples has a greater influence than humidity. Moreover, a greater influence of the value of residual strain, in comparison with the values of critical strain, was observed for sandstone samples of lower slenderness ratio.

Keywords: humidity, slenderness ratio, Young's modulus, post-critical modulus, strain, sandstones, Upper Silesian Coal Basin

Badania właściwości geomechanicznych skał, w tym badania ich odkształcalności, były i są nadal przedmiotem eksperymentów wielu badaczy (m.in. Pinińska, 2011; Łukaszewski, 2013; Cieślak, 2013; Bukowska, 2015). Wartości parametrów geomechanicznych zależą od wielu czynników. Do najważniejszych z nich w eksperymentach laboratoryjnych zalicza się dokładność przygotowania próbek do badań w zakresie równoległości powierzchni stykających się z płytami maszyny wytrzymałościowej i prostopadłości oraz warunki prowadzenia badań, a wśród nich:

- sposób obciążania (warunki naprężeniowe),
- wielkość ciśnienia okólnego,
- prędkość odkształcenia/obciążania,
- sposób sterowania maszyną wytrzymałościową,
- temperatura, w której prowadzi się badania,
- kształt próbek i rozmiary, w tym ich wielkość i smukłość,

– wilgotność.

Dwa spośród wymienionych czynników, które wpływają na wartości parametrów geomechanicznych skał poddawanych obciążeniu, w tym skał górnego karbonu w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym (GZW), a mianowicie wilgotność skał i smukłość próbek były przedmiotem badań, których wyniki uzyskane w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania w pełnym zakresie odkształcania się próbek skał karbońskich, przedstawiono w publikacji autorki (Bukowska, 2015). W warunkach jednoosiowego ściskania dotychczas określano jedynie wpływ smukłości próbek na wartość wytrzymałości na ściskanie (Vutukuri i in., 1974).

Jeśli mamy do czynienia z próbką skalną o wielkości boku podstawy lub średnicy i wysokości kilku centyme-

trów wówczas jej niszczenie w wyniku obciążania zachodzi głównie wzdłuż powierzchni międzyziarnowych. W przypadku niszczenia części obciążanego górotworu, w którym są zlokalizowane wyrobiska górnicze, mamy do czynienia w wielkościach rzędu kilkunastu do kilkuset metrów w poziomie i w pionie. Analizowana jest wtedy budowa górotworu z uwzględnieniem defektów strukturalnych w nim występujących. Wynikają one z występowania w górotworze powierzchni osłabienia i powierzchni nieciągłości. Rozpatrując kształt krzywej deformacji, a tym samym właściwości geomechaniczne pewnej objętości górotworu, należy mieć świadomość znaczenia efektu skali przy ich ocenie i uwzględnianiu w modelowaniu numerycznym zarówno procesów geodynamicznych zachodzących w górotworze, jak i w projektowaniu bezpiecznej podziemnej eksploatacji górniczej.

CEL BADAŃ

Celem badań było określenie wpływu wilgotności i smukłości próbek wybranych piaskowców, które budują stropy pokładów warstw rudzkich i siodłowych w jednej z czynnych kopalń, zlokalizowanej w strukturze niecki głównej w GZW, na ich odkształcalność.

Wyniki przeprowadzonych badań odkształcalności skał karbońskich zarówno w konwencjonalnym trójosiowym ściskaniu (Bukowska, 2015), jak i w jednoosiowym ściskaniu, mają znaczenie poznawcze. Ich oryginalność polega na tym, że dotychczas nie prowadzono badań właściwości geomechanicznych skał w stanie nasycenia kapilarnego, odkształcalności skał w stanie nasycenia kapilarnego w próbkach o różnej smukłości, jak również takich badań dla

¹ Zakład Tapań i Mechaniki Górotworu, Główny Instytut Górnictwa, pl. Gwarków 1, 40-166 Katowice; mbukowska@gig.eu.

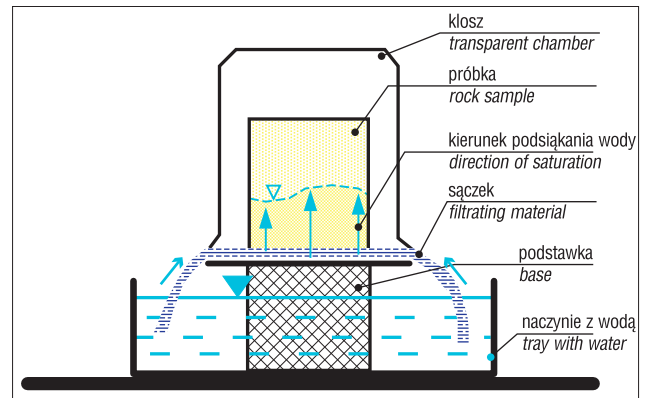
geomechanicznych właściwości pokrywicznych, uzyskiwanych podczas obciążania skał w maszynie wytrzymałościowej w warunkach zmniejszania się naprężenia do wartości naprężenia resztkowego.

Podkreślenia wymaga fakt, że wyniki przeprowadzonych badań mają również znaczenie praktyczne w rozwiązywaniu problemów współczesnej geomechaniki górniczej ze względu na to, że drenaż górotworu karbońskiego w GZW, który wynika z kilkudziesięcioletniej eksploatacji górniczej, w istotny sposób wpływa na zmianę warunków naprężeniowych w eksploatowanym górotworze i na stan bezpieczeństwa prowadzenia robót górniczych. Zawodnienie górotworu karbońskiego wynika natomiast z jego budowy geologicznej oraz warunków zasilania w wodę i jest zróżnicowane w różnych obszarach zagłębia. Dodatkowo, naturalna wilgotność skał budujących górotwór karboński jest modyfikowana jego odwadnianiem i wpływami eksploatacji górniczej. W obszarach, w których warstwy karbonu produktywnego są nie w pełni odizolowane od powierzchni terenu i obficie zasilane w wodę, parametry geomechaniczne skał są zbliżone do tych badanych w warunkach częściowego nasycenia por skały wodą. Stanem wilgotności, który najlepiej przybliża warunki laboratoryjnego skał do warunków panujących w eksploatowanym górotworze karbońskim w GZW, jest stan nasycenia kapilarnego. Tam gdzie występuje pogorszenie warunków zasilania w wodę górotworu, parametry geomechaniczne skał są zbliżone do warunków stanu tzw.: powietrzno-suchego – zbliżonego do pełnego odwodnienia górotworu.

Wobec powyższego, wpływ wody na właściwości skał oraz na stan bezpieczeństwa górniczego i powszechnego powinien być przedmiotem badań w odniesieniu do obszarów o likwidowanej działalności górniczej, zwłaszcza wyrobisk szybowych (Bukowski & Niedbalska, 2013) i wpływu kopalni likwidowanej przez zatopienie wyrobisk górniczych na wyrobiska kopalni czynnej sąsiadującej z kopalnią nieczynną (Bukowski & Bukowska, 2008), a wyniki badania próbek skał o różnej smukłości powinny być brane pod uwagę w projektowaniu wysokości wyrobisk podziemnych w zależności od grubości pokładu (furtki eksploatacyjnej).

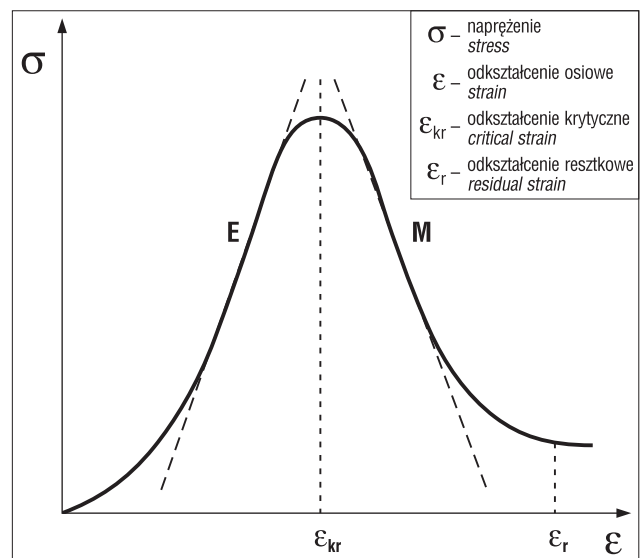
MATERIAŁY I METODY

Badania laboratoryjne przeprowadzono na próbkach piaskowca średnioziarnistego i drobnoziarnistego, które pobrano z wyrobisk górniczych, ze stropu pokładów warstw rudzkich i siodłowych w strukturze niecki głównej GZW. Do badań przygotowano próbki o smukłości 1 (18 próbek) i 2 (18 próbek), przy czym smukłość (s) wyraża iloraz wysokości próbki do jej średnicy. Ogółem przebadano 36 próbek (16 próbek piaskowca średnioziarnistego i 20 próbek piaskowca drobnoziarnistego), które obciążano w serwosterowalnej maszynie wytrzymałościowej MTS-810 NEW, prostopadle do uwarstwienia, z prędkością przemieszczenia tłoka 0,005 mm/s. Badania przeprowadzono w dwóch stanach wilgotności: w stanie powietrzno-suchym (18 próbek) i w stanie nasycenia kapilarnego (18 próbek), co jest związane ze zmianami zawodnienia górotworu karbońskiego w GZW. W warunkach laboratoryjnych, stan nasycenia kapilarnego można uzyskać przez



Ryc. 1. Schemat układu do badania odsączalności skał zwięzłych metodą nasycania kapilarnego (wg Bukowskiego, 2015)

Fig. 1. Device for determination of gravity drainage capacity by capillary saturation method (after Bukowski, 2015)



Ryc. 2. Wyidealizowana krzywa naprężeniowo-odkształceniowa i parametry geomechaniczne

Fig. 2. Idealized stress-strain curve and geomechanical parameters

umieszczenie próbki skały na materiale filtracyjnym (ryc. 1), który charakteryzuje się włoskowatością i pozostaje w kontakcie z próbką oraz wodą dla zapewnienia swobodnego podsiąkania kapilarnego.

Badaniami laboratoryjnymi określono wartości (ryc. 2):

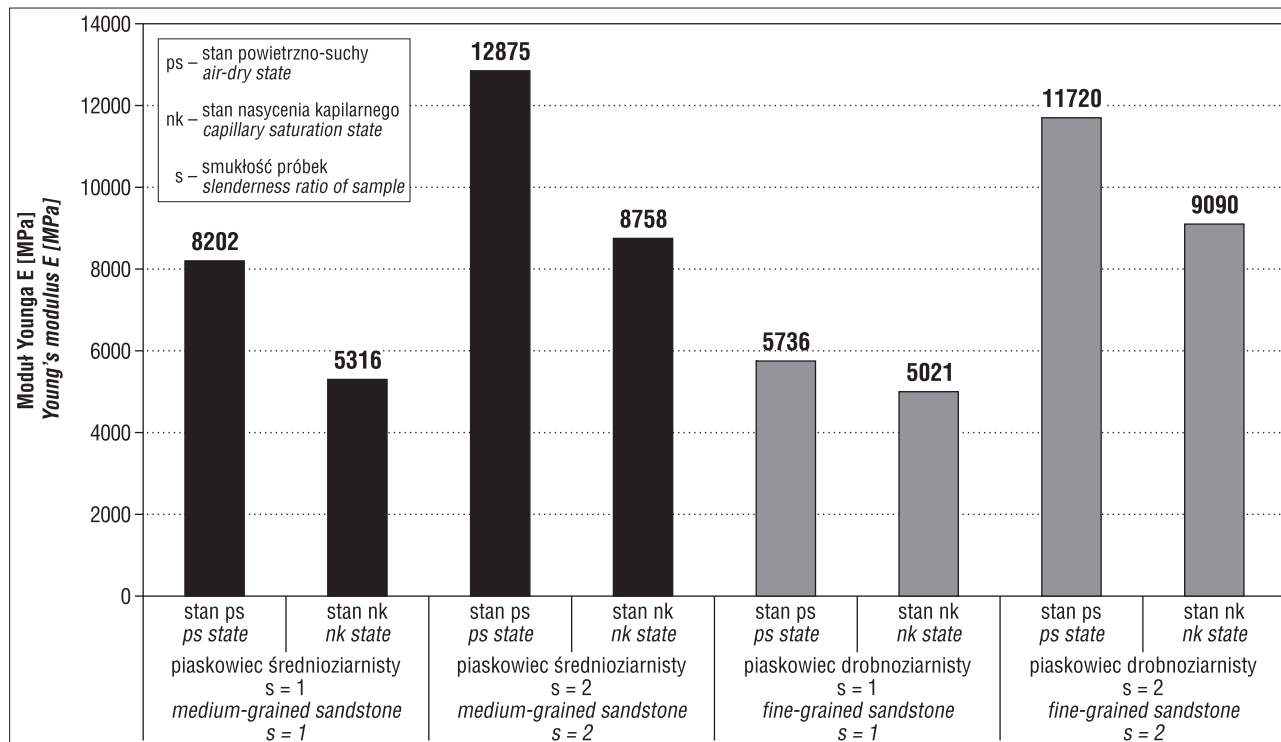
- modułu Younga (E) – tangens kąta nachylenia prostej, która jest aproksymacją liniową krzywej deformacji w obszarze przedkrytycznym,
- modułu pokrywicznego (M) – tangens kąta nachylenia prostej, która jest aproksymacją liniową krzywej deformacji w obszarze pokrywicznym,
- odkształcenia krytycznego (ϵ_{kr}) – odkształcenie względne wyrażone jako iloraz wartości odkształcenia bezwzględnego na granicy wytrzymałości próbki do wysokości próbki przed obciążeniem,
- odkształcenia resztkowego (ϵ_r) – odkształcenie względne wyrażone jako iloraz wartości odkształcenia bezwzględnego na granicy wytrzymałości resztkowej próbki do wysokości próbki przed obciążeniem.

WYNIKI BADAŃ

Z części przedkrytycznej krzywej naprężeniowo-odkształceniowej badanych piaskowców, uzyskanej w próbie jednoosiowego ściskania w maszynie wytrzymałościowej, wyznaczono wartości modułu Younga i odkształcenia krytycznego. Z części pokrytycznej krzywej deformacji wyzna-

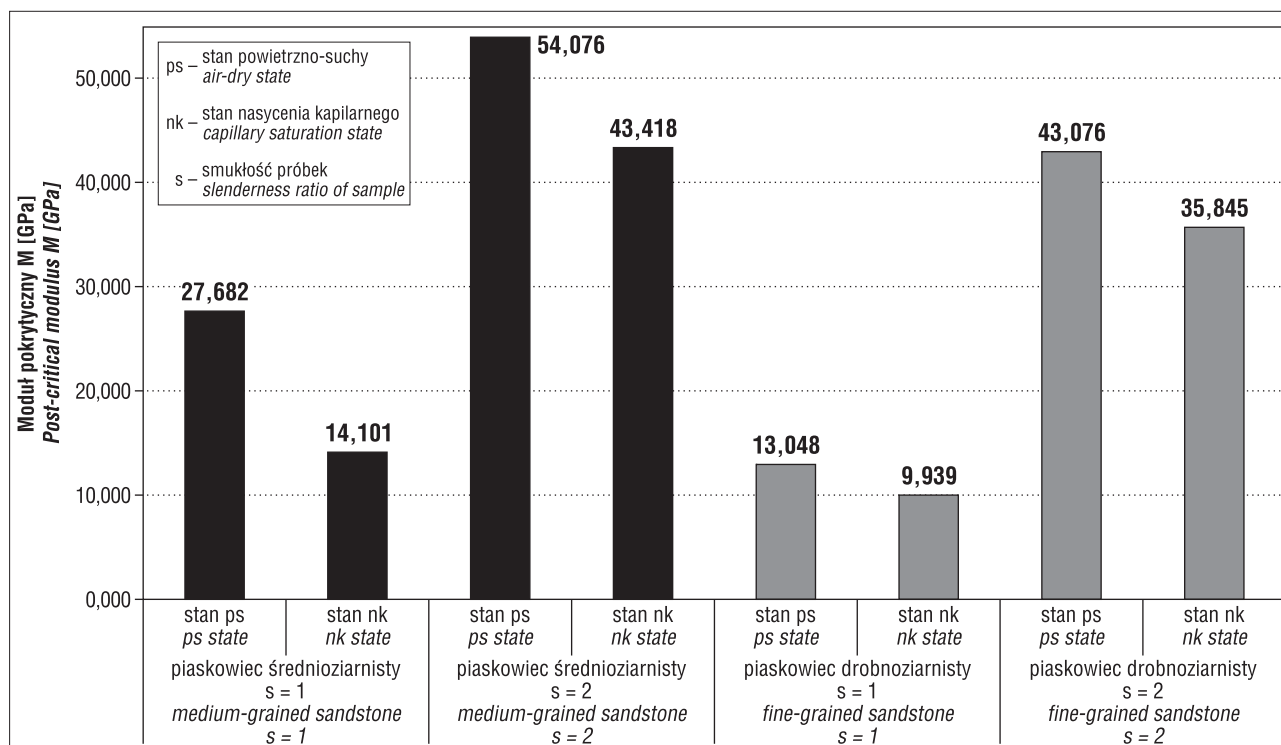
czono wartości modułu pokrytycznego i odkształcenia resztkowego.

Wyniki przeprowadzonych badań odkształcalności piaskowców średnioziarnistego i drobnoziarnistego, które wykonano na próbkach o smukłości 1 i 2 w stanie powietrzno-suchym i w stanie nasycenia kapilarnego, przedstawiono na rycinach 3–6.



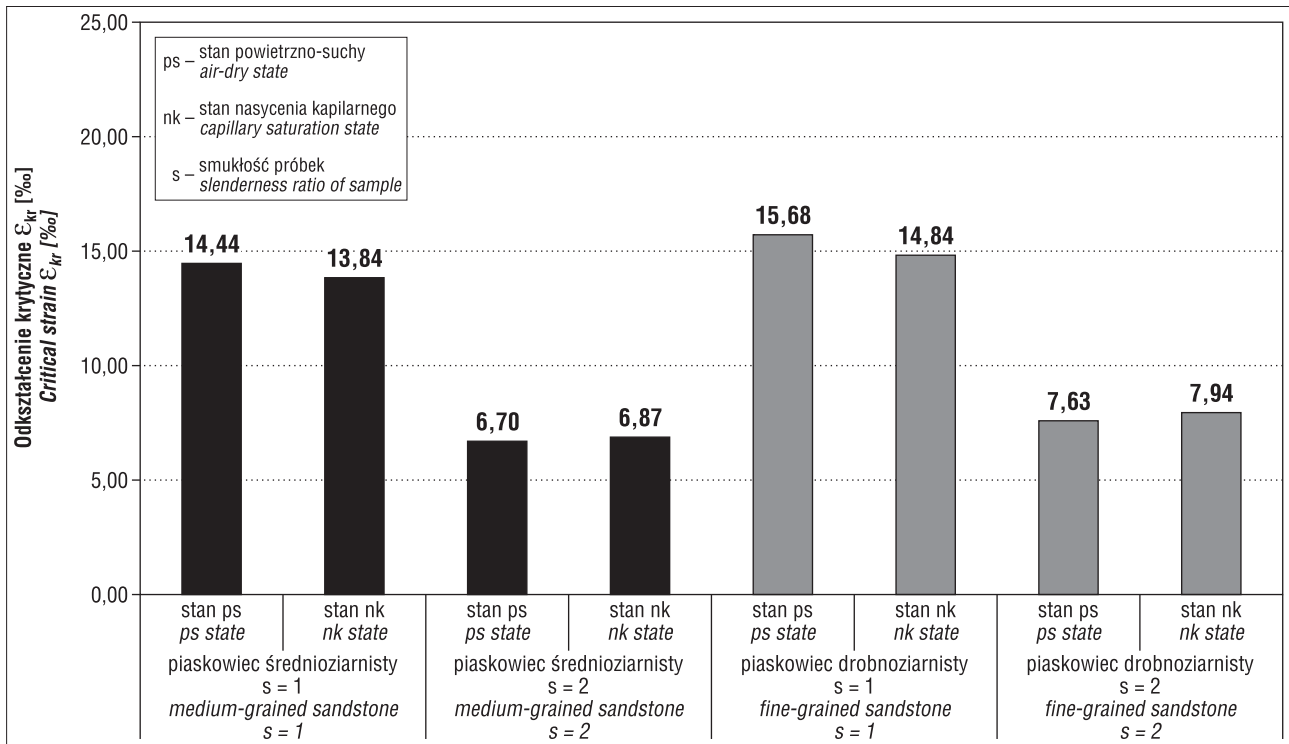
Ryc. 3. Moduł Younga piaskowców

Fig. 3. Young's modulus of sandstones

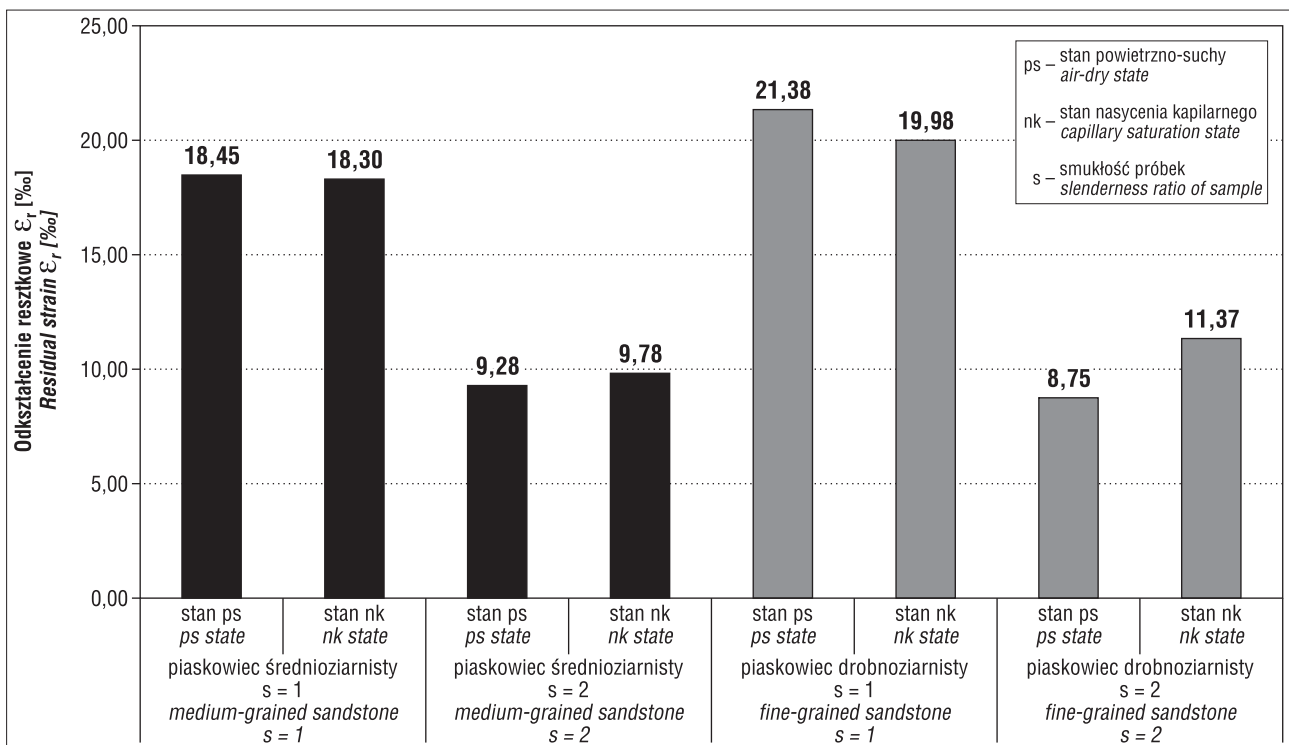


Ryc. 4. Moduł pokrytyczny piaskowców

Fig. 4. Post-critical modulus of sandstones



Ryc. 5. Odształcenie krytyczne piaskowców
Fig. 5. Critical strain of sandstones



Ryc. 6. Odształcenie resztkowe piaskowców
Fig. 6. Residual strain of sandstones

DYSKUSJA WYNIKÓW

Badania wpływu wilgotności (stan nasycenia kapilarnego i stan powietrzno-suchy) oraz wpływu smukłości (smukłość 1 i 2) na odształcalność próbek piaskowców były przeprowadzone po raz pierwszy. Dyskusja wyników w tym zakresie opiera się więc wyłącznie o własne doświadczenia badawcze.

Zmiany wartości modułu Younga, w zależności od smukłości próbek i stanu nasycenia wodą, są wyraźne w obu grupach piaskowców. Wzrost wilgotności spowodował zmniejszenie się wartości modułu Younga zarówno w próbkach o smukłości 1, jak i o smukłości 2. Wpływ wzrostu wilgotności w próbkach o tej samej smukłości na wartość modułu Younga jest większy w piaskowcu średnioziarnistym niż w piaskowcu drobnoziarnistym i wynosi ponad 30% (tab. 1).

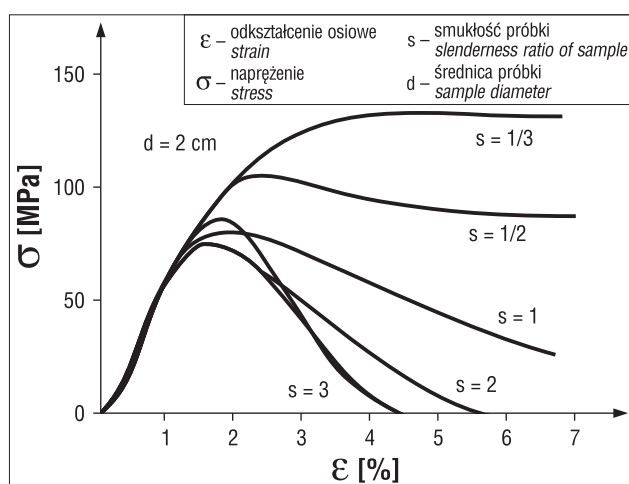
Tab. 1. Wpływ smukłości i wilgotności na moduł Younga i moduł pokrytyczny piaskowców
Table 1. Influence of slenderness ratio of sample and its humidity on Young's modulus of sandstones and post-critical modulus

Skala Rock	Wpływ smukłości próbek lub wilgotności Influence of slenderness and humidity	Smukłość próbek i stan nasylenia wodą Slenderness ratio of a sample and humidity	Zmiana wartości modułu Younga Change of Young's modulus	Zmiana wartości modułu pokrytycznego Change of post-critical modulus
Piaskowiec średnioziarnisty Medium-grained sandstone	wpływ wilgotności influence of humidity	s = 1	spadek wartości o 35% decrease the value of 35%	spadek wartości o 49% decrease the value of 49%
		s = 2	spadek wartości o 32% decrease the value of 32%	spadek wartości o 20% decrease the value of 20%
	wpływ smukłości influence of slenderness ratio	stan powietrzno-suchy air-dry state	wzrost wartości o 57% increase the value of 57%	wzrost wartości o 95% increase the value of 95%
		stan nasycenia kapilarnego capillary saturation state	wzrost wartości o 65% increase the value of 65%	wzrost wartości o 208% increase the value of 208%
Piaskowiec drobnoziarnisty Fine-grained sandstone	wpływ wilgotności influence of humidity	s = 1	spadek wartości o 13% decrease the value of 13%	spadek wartości o 24% decrease the value of 24%
		s = 2	spadek wartości o 22% decrease the value of 22%	spadek wartości o 17% decrease the value of 17%
	wpływ smukłości influence of slenderness ratio	stan powietrzno-suchy air-dry state	wzrost wartości o 104% increase the value of 104%	wzrost wartości o 230% increase the value of 230%
		stan nasycenia kapilarnego capillary saturation state	wzrost wartości o 81% increase the value of 81%	wzrost wartości o 261% increase the value of 261%

Z badań przeprowadzonych na próbkach piaskowców o smukłościach 1 i 2 w stanie powietrzno-suchym i na takich samych próbkach w stanie nasycenia kapilarnego wynika kilkudziesięcioprocentowy wzrost wartości modułu Younga, który wynosi około 60% dla piaskowca średnioziarnistego i ponad 80% w przypadku piaskowca drobnoziarnistego.

Tendencje zmian wartości modułu pokrytycznego piaskowców średnioziarnistych i drobnoziarnistych w zależności od smukłości próbek i stanu ich wilgotności (tab. 1) są podobne do zmian wartości modułu Younga.

Wzrost wilgotności spowodował zmniejszenie się wartości modułu pokrytycznego zarówno w próbkach o smukłości 1, jak i w próbkach o smukłości 2. Wpływ wzrostu wilgotności w próbkach o tej samej smukłości na wartość modułu pokrytycznego był większy w piaskowcu średnioziarnistym w porównaniu z piaskowcem drobnoziarnistym i wyniósł 20–49% (tab. 1). Z badań przeprowadzonych na próbkach piaskowców o smukłościach 1 i 2 w stanie powietrzno-suchym i o smukłościach 1 i 2 w stanie nasycenia kapilarnego wynika, na ogół, kilkusetprocentowy wzrost wartości modułu pokrytycznego, który wyniósł 95–208% dla piaskowca średnioziarnistego i 230–261% dla piaskowca drobnoziarnistego. Jednakże zaobserwowane zmiany wartości modułu pokrytycznego są wyraźnie mniejsze w przypadku próbek o tej samej smukłości (1 lub 2), które były badane w stanie nasycenia kapilarnego oraz w stanie powietrzno-suchym w porównaniu z wartościami modułu pokrytycznego oznaczonego w próbkach piaskowców o wilgotności powietrzno-suchej i o smukłości 1 lub 2, a także w próbkach nasyconych kapilarnie o smukłości 1 lub 2. Podkreślić należy, że tendencje zmian wartości modułu pokrytycznego ze zmianą smukłości próbek są zgodne z badaniami Hudsona i in. (1971), którzy wykazali, że zmniejszenie smukłości próbki marmuru powoduje zmniejszenie kąta nachylenia krzywej pozniszczeniowej (ryc. 7).



Ryc. 7. Wpływ smukłości na krzywą pozniszczeniową marmuru (Hudson i in., 1971)

Fig. 7. Influence of slenderness ratio on post-critical curve of marble (Hudson et al., 1971)

Wartości odkształceń krytycznego i resztkowego wyznaczono, podobnie jak wartości modułu Younga i modułu pokrytycznego, na podstawie eksperymentów jednoosiowego ściskania próbek skał w maszynie wytrzymałościowej, w pełnym zakresie ich odkształcania się.

Odształcenie krytyczne wyznacza się przy maksymalnym naprężeniu, a odkształcenie resztkowe jako wartość odpowiadająca naprężeniu resztkowemu w pokrytycznej części krzywej naprężeniowo-odkształceniowej. W przypadku badanych piaskowców tendencje zmian wartości odkształcenia krytycznego wskazują na zmniejszenie się wartości tego parametru w warunkach badania, gdy smukłość próbek wynosiła 1 oraz w przypadku badania próbek o smukłości 1 i 2 w stanie powietrzno-suchym, a także próbek o smukłości 1 i 2, które były badane w stanie nasycenia kapilarnego (tab. 2). W tych warunkach ekspery-

Tab. 2. Wpływ smukłości i wilgotności na odkształcenie krytyczne i resztkowe piaskowców
Table 2. Influence of slenderness ratio of sample and its humidity on critical strain and residual strain of sandstones

Skala Rock	Wpływ smukłości próbek lub wilgotności <i>Influence of slenderness and humidity</i>	Smukłość próbek i stan nasylenia wodą <i>Slenderness ratio of a sample and humidity</i>	Zmiana wartości odkształcenia krytycznego <i>Change of critical strain</i>	Zmiana wartości odkształcenia resztkowego <i>Change of residual strain</i>
Piaskowiec średnioziarnisty <i>Medium-grained sandstone</i>	wpływ wilgotności <i>influence of humidity</i>	s = 1	spadek wartości o 4% <i>decrease the value of 4%</i>	spadek wartości o 0,8% <i>decrease the value of 0.8%</i>
		s = 2	wzrost wartości o 2,5% <i>increase the value of 2.5%</i>	wzrost wartości o 5% <i>increase the value of 5%</i>
	wpływ smukłości <i>influence of slenderness ratio</i>	stan powietrzno-suchy <i>air-dry state</i>	spadek wartości o 50% <i>decrease the value of 50%</i>	spadek wartości o 50% <i>decrease the value of 50%</i>
		stan nasycenia kapilarnego <i>capillary saturation state</i>	spadek wartości o 50% <i>decrease the value of 50%</i>	spadek wartości o 47% <i>decrease the value of 47%</i>
Piaskowiec drobnoziarnisty <i>Fine-grained sandstone</i>	wpływ wilgotności <i>influence of humidity</i>	s = 1	spadek wartości o 5% <i>decrease the value of 5%</i>	spadek wartości o 6,5% <i>decrease the value of 6.5%</i>
		s = 2	wzrost wartości o 4% <i>increase the value of 4%</i>	wzrost wartości o 30% <i>increase the value of 30%</i>
	wpływ smukłości <i>influence of slenderness ratio</i>	stan powietrzno-suchy <i>air-dry state</i>	spadek wartości o 51% <i>decrease the value of 51%</i>	spadek wartości o 58% <i>decrease the value of 58%</i>
		stan nasycenia kapilarnego <i>capillary saturation state</i>	spadek wartości o 47% <i>decrease the value of 47%</i>	spadek wartości o 35% <i>decrease the value of 35%</i>

mentu zaobserwowano zmniejszenie się wartości odkształcenia krytycznego, w pierwszym przypadku maksymalnie o 5%, a w drugim – o ok. 50%. W próbkach o smukłości 2, które były badane w stanie wilgotności powietrzno-suchej i w stanie nasycenia kapilarnego nastąpił wzrost wartości odkształcenia krytycznego wraz ze wzrostem wilgotności piaskowców, który wyniósł do 4%.

Tendencje zmian wartości odkształcenia resztkowego są takie same jak odkształcenia krytycznego. Różnicę stanowi jedynie większy wpływ wilgotności (o 30%), zaobserwowany w próbkach piaskowca drobnoziarnistego o smukłości 2 w porównaniu z piaskowcem średnioziarnistym, który był badany w tych samych warunkach (tab. 2).

WNIOSKI

W rozpatrywaniu takich zagadnień jak:

- możliwość występowania niektórych zagrożeń naturalnych w górotworze karbońskim w GZW,
- projektowanie wysokości wyrobisk podziemnych w zależności od grubości pokładu,
- ocena wpływu kopalni likwidowanej przez zatopienie wyrobisk górniczych na wyrobiska kopalni czynnej sąsiadującej z kopalnią likwidowaną w aspekcie zmiany właściwości geomechanicznych górotworu i skłonności do tąpnięć środowiska skalnego

ważnymi problemami badawczymi są:

- osłabiający wpływ wody na właściwości geomechaniczne skał,
- wpływ smukłości badanych próbek na wartości parametrów geomechanicznych.

Na podstawie badania właściwości odkształceniowych przeprowadzonych na próbkach piaskowców średnioziarnistych i drobnoziarnistych o smukłości 1 i 2, w stanie powietrzno-suchym i w stanie nasycenia kapilarnego, w serwosterowalnej maszynie wytrzymałościowej, można stwierdzić, że:

1. Próbki piaskowców o smukłości 1 i 2 wykazują zmniejszenie się wartości modułu Younga zarówno dla próbek badanych w stanie powietrzno-suchym, jak i w stanie nasycenia kapilarnego. Zmniejszenie się wartości modułu Younga jest większe dla piaskowca o większym uziarnieniu (ponad 30%), podczas, gdy dla piaskowca drobnoziarnistego zmiany te wyniosły 22%. W próbkach piaskowców o smukłości 1 i 2, które były badane w stanie nasycenia kapilarnego i w stanie wilgotności powietrzno-suchej, zaobserwowano zwiększenie się wartości modułu Younga generalnie o ok. 60%, a nawet do 100%, przy czym wzrost ten jest zależny od wielkości uziarnienia. Ponadto stwierdzono, że większy wpływ na wartość modułu Younga ma wilgotność niż smukłość badanych próbek.

2. Wartości modułu pokrytycznego piaskowca średnioziarnistego i drobnoziarnistego, podobnie jak modułu Younga, wykazują tendencje zmian w zależności od smukłości, stanu wilgotności próbek i ich uziarnienia. W przypadku zmian wartości modułu pokrytycznego w próbkach o smukłościach 1 i 2, które badano w tym samym stanie wilgotności – stan powietrzno-suchy lub stan nasycenia kapilarnego – zwiększenie się wartości tego parametru wyniosło od 95 do 260%. Oznacza to dużo większy wzrost wartości modułu pokrytycznego w porównaniu z modułem Younga, którego wartości oznaczono w tych samych warunkach wilgotnościowych.

3. W warunkach, gdy próbki piaskowców o smukłości 1, były badane w dwóch stanach wilgotności, wartości odkształcenia krytycznego zmniejszyły się o 4–5%. W przypadku próbek o smukłości 2, badanych również w dwóch stanach wilgotności, nastąpił wzrost wartości odkształcenia krytycznego wraz ze wzrostem wilgotności piaskowców do 4%. W próbkach o smukłości 1 i 2, badanych w stanie powietrzno-suchym i w stanie nasycenia kapilarnego, zmniejszenie się wartości odkształcenia krytycznego wyniosło ok. 50%.

4. Tendencje zmian wartości odkształcenia resztkowego ze zmianą smukłości próbek i wilgotności są takie same jak tendencje zmian wartości odkształcenia krytycznego. Różnicę stanowi jedynie większy wpływ wilgotności (o 30%) na zmianę wartości odkształcenia resztkowego zaobserwowany w próbkach piaskowca drobnoziarnistego o smukłości 2 w porównaniu z piaskowcem średnioziarnistym, który był badany w takich samych warunkach. Może to wynikać ze składu mineralnego piaskowca drobnoziarnistego i z większego udziału odkształceń plastycznych w procesie deformacji w obszarze pokrytycznym. Badania te wykazują również większy wzrost wartości odkształcenia resztkowego w porównaniu z wartością odkształcenia krytycznego dla próbek piaskowców o mniejszej smukłości, który wynosi (4,00–5,70%), podczas gdy różnice te dla próbek o smukłości 2 wyniosły 1,12–3,43%.

5. Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano, że wilgotność i smukłość próbek piaskowców wpływają w różnym stopniu na ich odkształcalność. Większy wpływ na wartość modułu Younga ma wilgotność niż smukłość badanych próbek. Większy wpływ smukłości próbek niż wilgotności wykazano dla odkształcenia krytycznego i odkształcenia resztkowego. Ponadto, stwierdzono większy wzrost wartości odkształcenia resztkowego w porównaniu do wartości odkształcenia krytycznego dla próbek piaskowców o mniejszej smukłości.

Badania wpływu wilgotności skał i smukłości próbek na właściwości geomechaniczne skał karbońskich w jednoosiowym ściskaniu, w pełnym zakresie odkształcania się skał pod obciążeniem, były realizowane w latach 2008–2011 w projekcie badawczym pt.: „Opracowanie metodyki badań geomechanicznych dla potrzeb oceny zagrożenia wodnego w kopalniach węgla kamiennego

go w GZW” (N N524 467036) i rozwinięte w późniejszym okresie. Autorka dziękuje Recenzentom za cenne uwagi, a Redakcji Przeglądu Geologicznego za przygotowanie artykułu do druku.

LITERATURA

- BUKOWSKA M. 2015 – Influence of grain size, humidity and state of stress on the mechanical properties of sandstones. *Acta Geodyn. Geomater.*, 12, 2 (178): 187–195. DOI: 10.13168/AGG.2015.0015.
- BUKOWSKI P. & BUKOWSKA M. 2008 – Changes in geomechanical properties of carboniferous rocks under the influence of water and their possible consequences in the areas of abandoned mines of the Upper Silesian Coal Basin (Poland). [W:] Rapantova N. & Hrkal Z. (red.), *Mine Water and Environment Proc.* 10th International Mine Water Association Congress, Karlove Vary, Czech Rep.: 123–126.
- BUKOWSKI P. & NIEDEBALSKA K. 2013 – The analysis of select properties of solid rock materials designed for shafts liquidation. 13th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, Albena, Bulgaria, *SGEM 2013*, vol. II: 467–474.
- BUKOWSKI P. 2015 – Evaluation of water hazard in hard coal mines in changing conditions of functioning of mining industry in Upper Silesian Coal Basin – USC B (Poland). *Arch. Min. Sci.*, 60 (2): 465–485.
- CIEŚLIK J. 2013 – Plastyczność i uszkodzenie wybranych skał w testach jednoosiowego i trójosiowego ściskania. *Wyd. AGH, Kraków*, s. 149.
- HUDSON J.A., BROWN E.T. & FAIRHURST C. 1971 – Shape of the complete stress-strain curve for rock. *Proc. 13th Symp. Rock Mech.*, Illinois: 773–795.
- ŁUKASZEWSKI P. 2013 – Odkształcalność piaskowców fliszowych w złożonym stanie naprężenia. *Wyd. UW, Warszawa*, s. 221.
- PINIŃSKA J. (red.) 2011 – Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał Polski na dużych głębokościach w warunkach wysokiego ciśnienia i temperatury. *Wyd. Geol. UW, Warszawa*, s. 193.
- VUTUKURI V.S., LAMA R.D. & SALUJA S.S. 1974 – *Handbook on Mechanical Properties of Rocks – Testing Techniques and Results – Vol. I. Series on Rock and Soil Mechanics*, 2 (1974/75), 1. *Trans Tech Publications*: 33–38.

Praca wpłynęła do redakcji 24.07.2015 r.
Akceptowano do druku 4.09.2015 r.