

Naprężenia rezydualne w brykiecie węglowym i ich wpływ na wielkość sorpcji ditlenku węgla

MIROSLAW WIERZBICKI, TOMASZ MURZYN

Instytut Mechaniki Górotworu PAN; ul. Reymonta 27, 30-059 Kraków

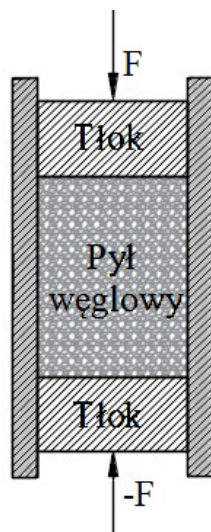
Streszczenie

Brykiety węglowe powstałe metodą prasowania bezlepiszczowego bywają wykorzystywane w eksperymentach naukowych jako substytut litego węgla. W przypadku eksperymentów wyrzutowych lub pomiarów filtracyjnych cenna staje się wiedza dotycząca stanu naprężenia w brykiecie pozostałego po brykietowaniu. Do oceny średniego naprężenia rezydualnego wykorzystano pomiar tensometryczny odkształcenia matrycy. Wykonanie pomiarów izoterm sorpcji na brykietach z tego samego materiału przy różnych wielkościach naprężeń rezydualnych pozwoliło na wyznaczenie relacji pomiędzy stanem naprężenia a sorpcją ditlenku węgla. Naprężenie rezydualne rzędu 1 MPa ogranicza maksymalną sorpcję Langmuira o około 1%.

Słowa kluczowe: brykiet węglowy, stan naprężenia, sorpcja

Wstęp

Do prowadzenia badań laboratoryjnych nad zjawiskami sorpcji gazów na węglu czy przebiegu wyrzutu gazów i skał [Skoczylas, 2014; Skoczylas i in., 2014; Wierzbicki i in., 2014] stosuje się nierzadko brykiety węglowe, których stopień zagęszczenia zależy od szeregu czynników wymienionych w pracy [Drzymała, 1988]. Zaletą brykietów w porównaniu z węglem naturalnym jest ich jednorodność, brak spękań wewnętrznych, łatwość obróbki oraz możliwość ich wykonywania w sposób powtarzalny. Brykiety węglowe wykorzystane w ramach cytowanych prac wykonywane były metodą dwustronnego prasowania, opisanego w pracy [Wierzbicki, 2003] (rys. 1).



Rys. 1. Schemat przygotowania brykietu

Odważona porcja pyłu węglowego umieszczana jest we wnętrzu rury będącej jednocześnie brykociarką, a następnie zostaje sprasowana siłą F_0 , zależną od wymaganej porowatości brykietu. Porowatość brykietu oblicza się na podstawie znajomości jego geometrii oraz masy i gęstości węgla z równania:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{br}}{\rho_{szk}}$$

gdzie:

- ρ_{br} – gęstość brykietu węglowego,
- ρ_{szk} – gęstość szkieletu węglowego (helowa).

W niniejszej pracy postanowiono wykorzystać brykiety węglowe do badań wpływu zmian obciążenia mechanicznego na próbkę na jej zdolności sorpcyjne. Dotychczas niewiele jest wyników badań w tym zakresie co wynikać może z poważnych trudności technicznych w przygotowaniu odpowiednio czułej i szczelnej aparatury [Holl i in., 2011; Dutka i Kudasik, 2012].

2. Naprężenia rezydualne w brykiecie węglowym

Po procesie prasowania brykietu, w jego wnętrzu zostaje pewien stan naprężenia. Naprężenia te, zwane naprężeniami rezydualnymi, są efektem istnienia sił tarcia na poboczniczy rury wyrzutowej. Ich wielkość i rozkład ma ścisły związek ze sposobem przygotowania brykietów. Ze względu na współosiowość siły prasującej i brykociarki rozkład naprężenia w trakcie prasowania brykietu jest rozkładem osiowo-symetrycznym. Ponieważ prasowanie odbywa się metodą dwustronną, to z uwagi na symetrię sił względem płaszczyzny prostopadłej do osi przechodzącej przez środek brykietu, rozkład naprężeń jest symetryczny względem tej płaszczyzny [Wierzbicki, 2003].

Wartość średnią składowej radialnej naprężenia rezydualnego w brykiecie węglowym na granicy z rurą wyrzutową, można ocenić na co najmniej trzy sposoby. Pierwszy opiera się na pomiarach siły koniecznej do wypchnięcia brykietu, drugi to modelowanie numeryczne (np. metoda elementów skończonych). Trzeci wykorzystuje pomiary odkształcenia brykociarki z wykorzystaniem tensometrii.

Oszacowanie naprężenia na podstawie pomiaru wielkości siły wypychającej opiera się na znajomości geometrii brykociarki oraz wartości współczynnika tarcia pomiędzy brykietem a stalą. Prowadząc rozważania w cylindrycznym układzie współrzędnych (z, r, ϕ) , siła konieczna do przepchnięcia brykietu o długości L wynosi:

$$F(z) = 2\pi R_b f \int_0^L \sigma_{Cr} dL \quad (1)$$

gdzie:

- R_b – promień brykietu,
- f – współczynnik tarcia na kontakcie brykiet-stal,
- L – długość odcinka brykietu pozostająca we wnętrzu rury,
- $\sigma_{Cr} = \sigma_{Cr}(r = R)$ składowa radialna naprężenia.

Rozważania takie przedstawiono w pracy [Wierzbicki, 2003]. Prowadzą one do wniosku, że wartość naprężenia przyłożonego do czoła brykietu, konieczna do jego przesunięcia może być opisana równaniem kwadratowym w postaci:

$$\sigma_z(0, L) = aL^2 + bL \quad (2)$$

$$a = \frac{4\sigma_{Rr} f^2 \eta}{D^2}, \quad b = \frac{4\sigma_{Rr} f}{D}$$

gdzie:

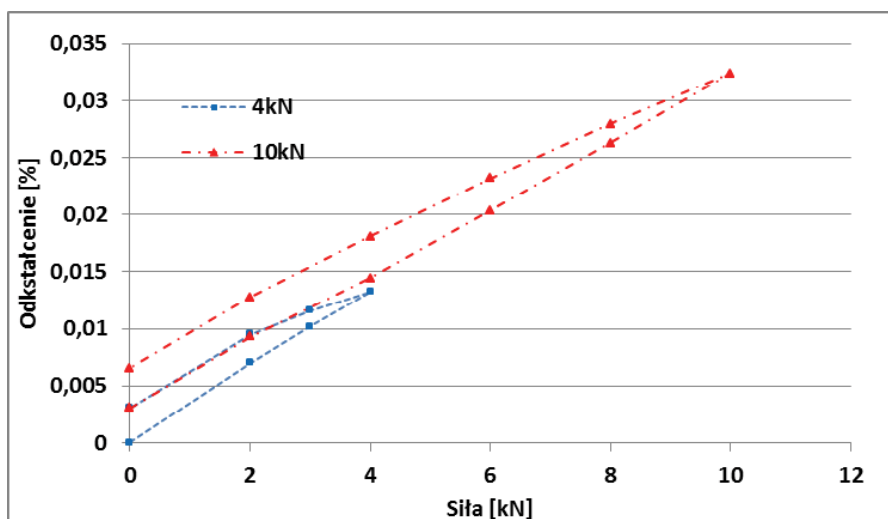
- L – długość brykietu pozostająca w brykociarce,
- σ_{Rr} – składowa radialna naprężenia rezydualnego,
- f – współczynnik tarcia brykiet-stal,
- η – współczynnik rozporu bocznego,
- D – średnica rury.

Wykonując pomiar zależności siły wypychającej brykiet od jego długości we wnętrzu rury $\sigma_z(0, L) = f(L)$ oraz znając współczynnik tarcia na kontakcie węgiel-stal, z równania (2) obliczyć można wartość rezydualnego naprężenia radialnego a następnie wartość współczynnika rozporu bocznego η .

W przypadku brykietów o małych długościach, gdy $L^2 \ll L$, możemy pominąć człon równania (2) zawierający L^2 . Możemy wówczas przyjąć, że, siła jest praktycznie niezależna od współczynnika rozporu bocznego η . W przypadku brykietów o niewielkiej długości wartość składowej radialnej naprężenia rezydualnego można wyznaczyć z liniowego równania $\sigma_{Rr} = \frac{D}{4\sigma_z(0, L)fL}$. Dobre efekty przynieść może również modelowanie numeryczne. Pozawala ono na obliczenie zarówno wartości jak i rozkładu naprężeń we wnętrzu brykietu podczas prasowania jak i naprężeń (i odkształceń) rezydualnych po procesie prasowania.

W ramach niniejszej pracy do oceny średniej wartości naprężenia rezydualnego wykorzystano tensometrię oporową. Przykładowe zmiany odkształcenia rury podczas prasowania brykietu pokazano na rys. 2. Krzywa koloru niebieskiego pokazuje odkształcenia podczas prasowania siłą 4 kN. Maksymalne odkształcenie rury wynosiło 0.0121%. Następnie brykiet odciążono. W wyniku prasowania w brykiecie pozostały naprężenia rezydualne przejawiające się odkształceniem na poziomie 0.0028%. Kolejnym krokiem było zwiększenie siły prasującej do wartości 10 kN i ponowne zdjęcie obciążenia. Odkształcenie rury na skutek prasowania brykietu siłą 10 kN wynosiło 0.006%. Znając wartość odkształcenia, modułu Younga dla stali ($E = 210$ GPa), średnicę wewnętrzną rury (r_r) i grubość jej ścianki (d) obliczyć możemy wartość naprężenia radialnego w brykiecie z równania:

$$\sigma_{Rr} = E\epsilon d/r_r \tag{3}$$



Rys. 2. Zależność pomiędzy siłą a odkształceniem rury dla sił prasujących 4 kN i 10 kN

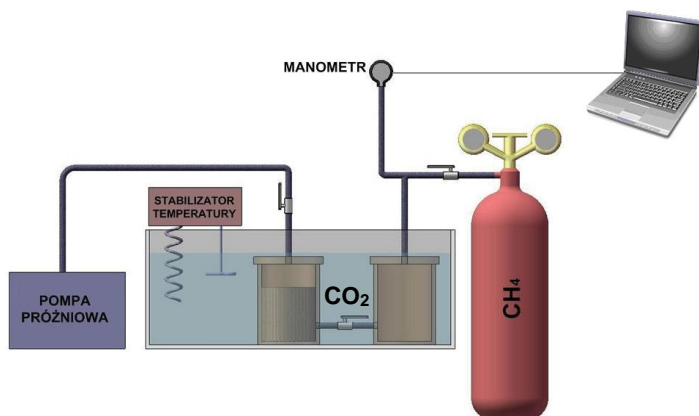
Wartości rezydualnych naprężeń radialnych, wyznaczone z pomiarów tensometrycznych oraz porowatości brykietów zestawiono w tab. 1. W tabelicy podano wartość siły prasującej F , naprężenia prasującego σ_z , odkształcenia pozostałego po procesie prasowania ϵ oraz obliczonej składowej rezydualnej naprężenia radialnego. Maksymalna wartość naprężenia rezydualnego σ_{Rr} , pozostała po prasowaniu siłą 40 kN wynosiła 18.0 MPa.

Tab. 1. Zestawienie porowatości brykietów i odpowiadających im wartości rezydualnych naprężeń radialnych

F , kN	σ_z , MPa	ϵ , %	σ_{Rr} , MPa
4	22,6	32,8	5,9
10	56,6	29,8	10,4
20	113,1	23,2	12,9
40	226,1	16,6	18,0

3. Wpływ obciążenia mechanicznego na sorpcję

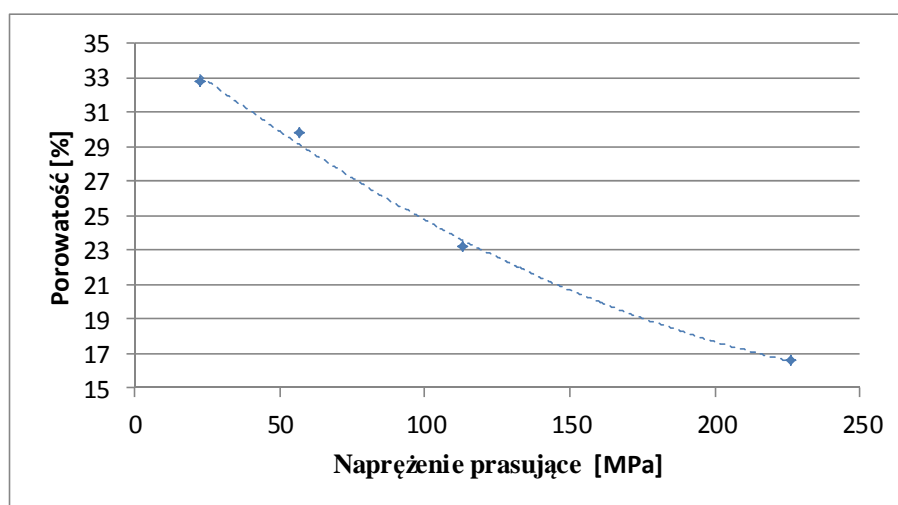
Brykiety wykonane przy różnych wartościach naprężeń prasujących posiadały różne porowatości oraz różne wartości naprężeń rezydualnych. Dla określenia wpływu wartości naprężenia rezydualnego w brykiecie na wielkość sorpcji ditlenku węgla wykonano pomiary sorpcyjne metodą wolumetryczną. Wykonane brykiety wraz z formą umieszczane były w szczelnym zbiorniku. Przed pomiarami układ był odgazowany przy ciśnieniu 5×10^{-2} Pa. Wielkość sorpcji liczono na podstawie znajomości objętości zbiorników sorpcyjnych oraz masy i objętości węgla. Zmiany ciśnienia w pojemnikach mierzono przetwornikami ciśnienia z częstotliwością 0.5 Hz. Całość znajdowała się w temperaturze 298 ± 0.05 K. Stanowisko pomiarowe pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Stanowisko do badań sorpcyjnych metodą wolumetryczną

Do badań przeznaczono próbę węgla z kopalni „Brzeszcze” o następujących właściwościach. Skład macerałowy: wityrynit – 63.2%, inertynit – 26.1%, liptynit – 10.7%. Zawartość popiołu 6.0%, zawartość części lotnych 33.1%. Gęstość helowa szkieletu węglowego wynosiła 1.38 g/cm^3 .

Pierwszy pomiar izotermy sorpcji wykonano na materiale niesprasowanym (pyle węglowym). Kolejne brykiety wykonywano z jednej i tej samej próbki węgla, która po wykonanym pomiarze sorpcyjnym była prasowana siłą wyższą od poprzedniej. Porowatość brykietów w funkcji naprężenia prasującego pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Relacja pomiędzy wartością naprężenia prasującego a porowatością brykietu

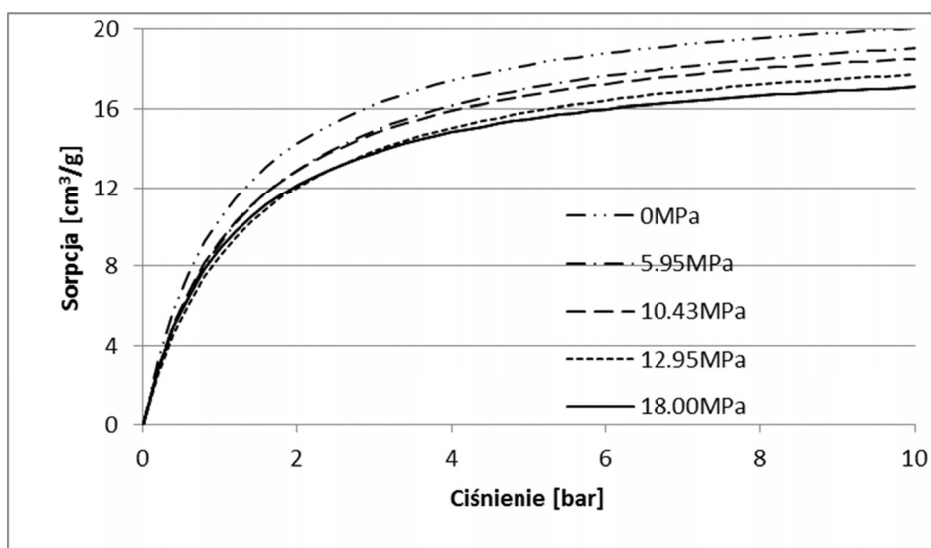
Dla każdego z brykietów (o różnych wartościach porowatości oraz naprężeń rezydualnych) wykonano izotermę sorpcji w zakresie do 1 MPa, opartą na co najmniej 5 punktach pomiarowych. Do tak otrzymanych wyników dopasowano równania sorpcji Langmuira:

$$a = a_m bp / (1 + bp) \tag{4}$$

gdzie

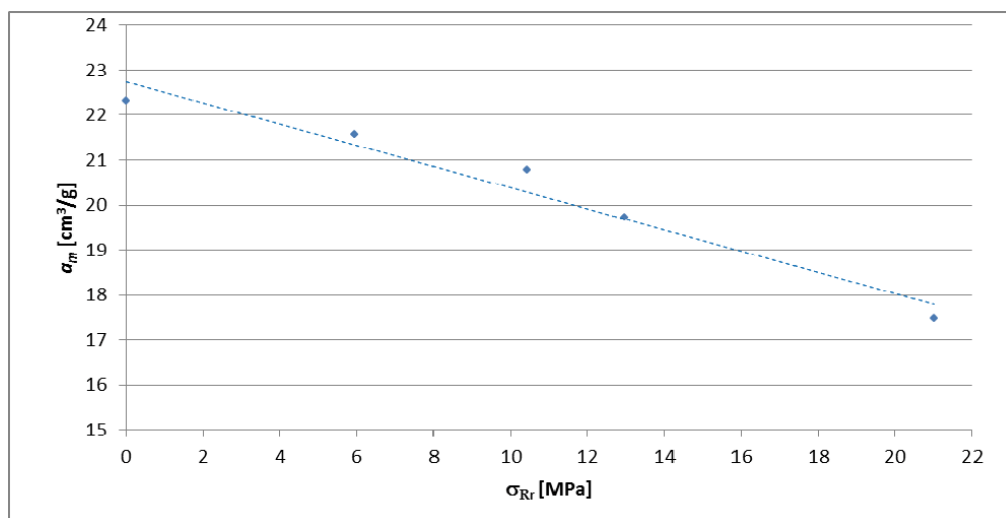
- a – wielkość sorpcji przy ciśnieniu p , cm^3/g ,
- a_m – maksymalna sorpcja Langmuira dla $p \rightarrow \infty$, cm^3/g ,
- b – stała charakterystyczna dla układu węgiel-gaz, bar^{-1} ,
- p – ciśnienie gazu wolnego, bar.

Wyniki przeliczono na czystą substancję węglową (daf) i pokazano graficznie na rysunku 5. Liniami ciągłymi oznaczono izotermy Langmuira. Ułożenie izoterm pokazuje, że wzrost wartości naprężenia radialnego skutkuje obniżeniem sorpcji CO_2 na badanych węglach.



Rys. 5. Izotermy sorpcji na węglu „Brzeszcze” w temp. 298 K

Na rysunku 6 pokazano zmienność maksymalnej sorpcji Langmuira a_m w funkcji radialnego naprężenia rezydualnego.



Rys. 6. Zależność maksymalnej sorpcji Langmuira od wartości rezydualnego naprężenia radialnego

Obniżenie zdolności sorpcyjnych wywołane występowaniem naprężenia rezydualnego wynosi około $0.235 \text{ cm}^3/(\text{gMPa})$, co stanowi około 1% maksymalnej sorpcji zmierzonej na niesprasowanym materiale węglowym.

Wnioski

Wykonanie brykietów metodą prasowania bezpośredniego powoduje, że po procesie prasowania w brykietach występuje osiowo-symetryczny stan naprężenia.

Pomiar odkształcenia brykieciarki metodą tensometryczną pozwala na wyznaczenie średniej wartości składowej radialnej naprężeń rezydualnych.

Występowanie rezydualnych naprężeń w brykiecie węglowym wpływa na obniżenie własności sorpcyjnych węgla względem ditlenku węgla. Dla badanego węgla ograniczenie sorpcji wynosiło około $0.01 a_m/\text{MPa}$.

Praca została wykonana w roku 2015 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- Drzymala Z.: *Podstawy inżynierii procesu zagęszczania i prasowania materiału*. Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warszawa, 1988.
- Dutka B., Kudasik M.: *Izotermy sorpcji gazu przy różnych obciążeniach okólnych węgla*. Prace IMG PAN, T. 14, Nr 1-4, 2012.
- Hol S., Peach C.J., Spiers C.J.: *Applied stress reduces the CO₂ sorption capacity of coal*. International Journal of Coal Geology, Vol. 85, Iss. 1, 1 January 2011.
- Skoczylas N.: Estimating gas and rock outburst risk on the basis of knowledge and experience - the expert system based on fuzzy logic. Arch. Min. Sci., Vol. 59, No 1, 2014.
- Skoczylas N., Dutka B., Sobczyk J.: *Mechanical and gaseous properties of coal briquettes in terms of outburst risk*. Fuel, Vol. 134, 15, 2014.
- Wierzbicki M., Konečný P., Kožušniková A.: *Permeability changes of coal cores and briquettes under tri-axial stress conditions*. Arch. Min. Sc., Vol. 59, No 4, 2014.
- Wierzbicki M.: *Zmiany stanu naprężenia i wyteżenia materiału w trakcie prowokowania i inicjacji laboratoryjnego wyrzutu skalno-gazowego*. Instytut Mechaniki Górotworu PAN, Rozprawy, monografie, Nr 4, 2003.

The residual stress in the coal briquette and their impact on the of carbon dioxide sorption

Abstract

Coal briquettes formed in the pressing processes without the use of binders are widely used in experimental research as substitutes of coal rock. In the case of experiments involving outbursts or filtration measurements, of particular importance is the state of stress in briquettes after the briquette-forming process. The assessment of residual stress is based on strain measurements of the matrix. Measurements of sorption isotherms on briquettes made from the same material and under variable levels of residual stress are used to establish the relationship between the state of stress and carbon dioxide sorption. It is found out that residual stresses of the order of 1 MPa limit the maximal Langmuir sorption by about 1%.

Keywords: coal briquette, state of stress, sorption