

Wykorzystanie pomiarów mikrotwardości Vickersa do analiz węgla kamiennego pochodzącego z partii F kopalni Borynia-Zofiówka-Jastrzębie, Ruch Zofiówka

KATARZYNA GODYŃ

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

LUCIE KRÁLOVÁ

Institute of Geonics of the CAS, Studentska 1768, 708 00 Ostrava-Poruba, Czech Republic

Streszczenie

W ramach pracy przeprowadzono pomiary mikrotwardości z różnowiekowych pokładów węgla kamiennego rejonu Zofiówki, skupiając się na partii F. Do badań wykorzystano urządzenie Micro Hardness Tester CSM Instruments, czyli zintegrowany system mikroskopu optycznego wraz z analizatorem mikrotwardości Vickersa. Przeprowadzone analizy przy użyciu mikrotwardościomierza pozwoliły na uzyskanie wyników trzech różnych parametrów: mikrotwardości Vickersa H_V [N/mm^2], modułu ścisłościwości E_{IT} [GPa] oraz charakteru spękań powstałych po wciśnięciu węgelnika Vickersa w badany fragment węgla. Na podstawie oceny tych parametrów prześledzono zachowanie się węgla o różnym stopniu uwęglenia. Otrzymane wyniki badań wzbogacają opis węgla o niestandardowe pomiary, a co za tym idzie, rozszerzają wiedzę dotyczącą tej kopaliny w kontekście jej parametrów wytrzymałościowych.

Słowa kluczowe: mikrotwardość Vickersa, węgiel kamienny, GZW

1. Wstęp

Głównym surowcem, na którym opiera się Polska energetyka, jest węgiel. Sytuacja taka utrzyma się prawdopodobnie przez kolejne lata. Kopalina ta stanowi równocześnie bazę do wytwarzania różnorodnych produktów chemicznych, ma też zastosowanie m.in. przy podziemnym zgazowaniu czy sekwestracja CO_2 .

W Instytucie Mechaniki Górniczej, w Pracowni Mikromerytyki, prowadzone są szeroko zakrojone badania poszerzające teoretyczną i praktyczną wiedzę na temat tej kopaliny [m.in. Skoczylas, 2015; Godyń, 2016; Skoczylas i Topolnicki, 2016; Młynarczuk i Skiba, 2017]. Dalsze rozszerzanie zasobów informacji o właściwościach tego surowca może okazać się nadal pożądane.

Jedną z właściwości węgla, która bywa wykorzystywana do oceny cech jakościowych tej kopaliny jest mikrotwardość jego poszczególnych składników (macerałów). Parametr ten jest jednak stosunkowo rzadko stosowany do analiz tej substancji. Pomiary mikrotwardości wykorzystywane są głównie do badania metali [Kaspar, 1988], ceramiki [Dietz i Tietz, 1990], kompozytów, czasem także stosuje się je w mineralogii [Maślankiewicz i Szymański, 1976]. Informacje o badaniach mikrotwardości węgla przedstawili m.in. Eremin i in., [1980] oraz van Krevelen [1993]. Analizowano m.in. węgiel pochodzący z pokładów zlokalizowanych na obszarze dawnej Gondwany [Mukherjee i in., 1989] oraz występujący na obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) [Beneš, 1957; Das, 1968; Martinec i Kožušniková, 2006; Kožušniková, 2009; Bukowska i Ćmiel, 2011].

2. Opis zagadnienia i metodyka

Istnieje kilka sposobów badania mikrotwardości, jednak najpowszechniejsze są metody zaproponowane przez Vickersa oraz Knoppa [Maślankiewicz i Szymański, 1976]. Do analiz węgla wykorzystywane są głównie mikrotwardościomierze Vickersa.

Wykonanie pomiarów mikrotwardości na próbkach węgla wymaga dokładnego doboru obiektu do analizy. Węgiel jest materiałem niejednorodnym, w którym granice między macerałami bywają niewyraźne i niejednoznaczne. Posiada ponadto wtrącenia różnego typu substancji mineralnej. Do analiz należy wybrać miejsce zbudowane z jednego i jednorodnego składnika [Taylor i in., 1998]. W przypadku badań prezentowanych w pracy, dobór materiału był mało skomplikowany, gdyż pomiarom poddawano jedynie te fragmenty węgla, które zbudowane były z czystego wityrynit (kolotelinitu). Niektórzy badacze udowodnili jednak, że pomiarów można dokonywać także i na innych niż wityrynit składnikach petrograficznych węgla [Beneš, 1957; Ducher, 1960; Das, 1968; Taylor, 1998; Kožušniková, 2009, 2010].

W pracy zastosowano urządzenie o nazwie Micro Hardness Tester CSM Instruments, które składa się z diamentowego, stożkowego wgłębnika Vickersa, stolika XY i części mikroskopowej, które dodatkowo wyposażone jest w oprogramowanie do analizy obrazu. Po wykonanym pomiarze każdorazowo następuje komputerowa rejestracja parametrów eksperymentu a załączone oprogramowanie pozwala na obróbkę otrzymanych wyników. W rezultacie otrzymujemy wyniki interesujących nas parametrów (H_v i E_{IT}). W ramach pracy wykonano 12-15 pomiarów dla każdej badanej próbki (w sumie ponad 50 pomiarów). Obciążenie stosowane do analiz węgla wynosiło 0,5 N.

Analizowane parametry:

- mikrotwardość wg Vickersa (H_v), która obliczana jest ze wzoru:

$$H_v = \frac{F_{\max}}{9,81 * A_c(h_c)} \quad [1]$$

gdzie:

F_{\max} – maksymalna siła (N);

h_c – głębokość wgłębienia (μm);

A_c – powierzchnia powstałego odcisku (μm^2).

- standardowy moduł sprężystości (E_{IT}) liczony na podstawie *Power Law Method* opisanej przez Olivera & Pharra [1992] [za Kožušniková, 2009].

$$E_{IT} = \frac{1 - \nu_s^2}{\frac{1}{E_r} - \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}} \quad [2]$$

gdzie:

E_i – moduł sprężystości wgłębnika (stała 1141 GPa);




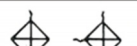
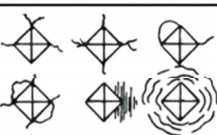

ν_i – współczynnik Poissona wgłębnika (0,07);

E_r – zredukowany moduł sprężystości (obejmuje on wpływ odkształcenia sprężystego wgłębnika przy obciążeniu);

ν_s – współczynnik Poissona badanej próbki.

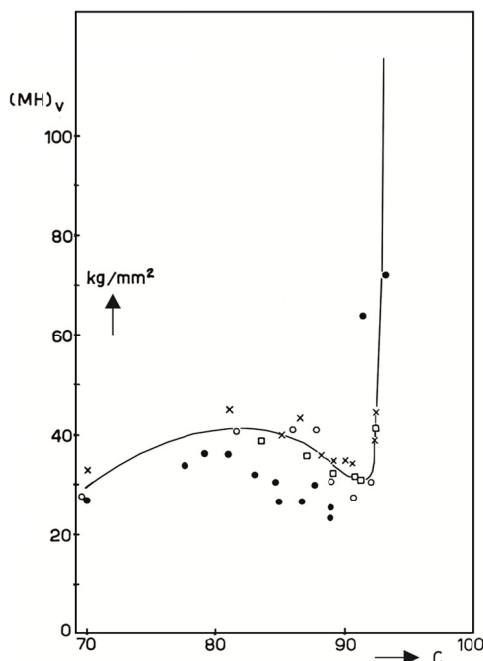
- stopień i charakter spękań oraz innych zniszczeń powstałych po wciśnięciu wgłębnika Vickersa w analizowany materiał. Parametr ten nie jest opisywany żadnym wzorem, a jego wyznaczenie polega na ocenie przez obserwatora deformacji powierzchni badanego materiału. Można na tej podstawie ocenić m.in. stopień kruchości analizowanego materiału (Rys. 1), gdyż po przeprowadzonej analizie próbka wraca na miejsce, pod obiektyw mikroskopu optycznego, co umożliwia dokonanie obserwacji i wykonanie fotografii miejsca wciśnięcia stożka Vickersa w próbkę.

Stopień uwęglenia materii organicznej wpływa na cechy jakościowe węgla. Wraz ze wzrostem stopnia uwęglenia wzrasta też połysk, zmieniają się cechy mikroskopowe (m.in. barwa czy struktura), zmianie ulega także mikrotwardość (Rys. 2). Mikrotwardość (H_v) jest różna dla węgla o różnym stopniu uwęglenia. W literaturze przedstawione są przykłady analiz wityrynit pochodzącego z węgla o różnym stopniu uwęglenia. Węgiel niskouwęglony, zawierający około 70%C (co odpowiada $R_o = \sim 0,2\%$ [van Krevelen, 1993; Stach

Stopień kruchości	Przykłady defektów	Opis defektów
1		brak widocznych defektów
2		jedno pęknięcie na przedłużeniu przekątnej odcisku
3		dwa pęknięcia na przedłużeniu przekątnych wychodzących z sąsiednich naroży lub jedno pęknięcie odchylone od kierunku przekątnej
4		trzy pęknięcia lub dwa położone przy przeciwległych narożach
5		wszelkie defekty w ilości większej niż trzy pęknięcia nie naruszające podstawowego zarysu odcisku piramidki
6		defekty niszczące podstawowy zarys odcisku

Rys. 1. Stopnie kruchości na podstawie stopnia naruszenia struktury powierzchni w okolicy piramidki Vickersa [Heinze, 1958; Maślankiewicz i Szymański, 1976]

i in., 1982]) jest węglem o niskiej twardości i kruchości, w którym odcisk stożka Vickersa jest bardzo słabo lub słabo widoczny. W węglu o średnim stopniu uwęglenia odcisk stożka jest wyraźnie widoczny, wzrasta mikrotwardość i pojawiają się odkształcenia kruche. Wg Heinze [1958 za Stach i in., 1982] do około 88%C (czyli $R_o > 1,2\%$) mikrotwardość węgla rośnie i wartość ta zamyka zakres kruchego pęknięcia wityrynit. W węglu z zawartością pomiędzy 88 a 92%C (R_o wynoszące od $\sim 1,25$ do $\sim 2,7\%$) następuje spadek mikrotwardości wraz z wejściem wityrynit w zakres przemian plastycznych. W węglu powyżej 92%C (antracyt), mikrotwardość wyraźnie wzrasta, a wityrynit staje się elastyczny. W antracycie efekt działania stożka Vickersa widoczny na odcisku jest zbliżony do węgla bardzo nisko uwęglonych, jednak różnica widoczna jest w wartościach mikrotwardości [Stach i in., 1982].



Rys. 2. Wykres mikrotwardości w stosunku do uwęglenia substancji organicznej. Pełne kropki wg Honda&Sanada; puste kropki wg van Krevelen; krzyżyki wg Alpern; kwadraty wg Heinze [Stach i in., 1982]

W ramach prowadzonych prac niezbędne było więc przeprowadzenie pomiarów refleksyjności wityrynit (kolotelinitu). Analizy przeprowadzono zgodnie z normą (PN-ISO 7404-5:2002P).

Pomiary mikrotwardości oraz refleksyjności wityrynitów wykonane zostały w Instytucie Geoniki Czeskiej Akademii Nauk w Ostrawie.

3. Cel badań

Szeroko pojętym celem badań, stanowiących część szerszej pracy, jest ukazanie różnych możliwości wykorzystania twardościomierza Vickersa do analiz węgla kamiennego.

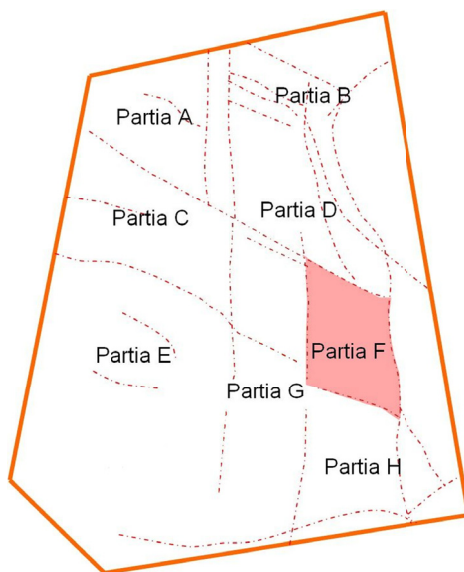
Na tym etapie prac skupiono się na badaniach mikrotwardości węgla z obszaru KWK Zofiówki, z partii F, poprzedzając wszystkie te analizy pomiarem refleksyjności wityrynitów. Badano wyłącznie te fragmenty węgla, które zbudowane były z kolotelinitu, czyli najpowszechniejszego i najbardziej jednorodnego macerału należącego do grupy wityrynitów. Jest to macerał spełniający wg Taylora i in. [1998] wszystkie kryteria standardowych pomiarów mikrotwardości węgla, ponadto służy on także, zgodnie z normą, do wyznaczania stopnia uwęglenia materii organicznej poprzez przeprowadzanie pomiarów refleksyjności wityrynitów (R_o).

Celem tych badań jest przede wszystkim określenie zależności mikrotwardości od stopnia uwęglenia (mikrotwardości Vickersa od wieku pokładu pochodzącego z danej partii złoża) oraz zbadanie prawidłowości i zależności pozwalających lepiej poznać charakter badanych próbek węgla.

4. Charakterystyka obszaru badań oraz materiał do badań

Obszar badań zlokalizowany jest w obrębie GZW. Zagłębie to zostało utworzone podczas orogenezy waryscyjskiej, głównie w fazie asturyjskiej. Jest to zapadlisko przedgórskie wykształcone w postaci synklijinalnej niecki, wypełnionej węglonośnymi utworami karbonu górnego [Gabzdyl, 1994; Osika, 1987]. Obszar Zagłębia podzielono na trzy strefy różniące się stylem tektoniki. Jest to strefa fałdowa, fałdowo-blokowa oraz dysjunktywna [Kotas, 1972]. Obszar badań znajduje się w strefie tektoniki dysjunktywnej, która obejmuje przeważającą część GZW. Geneza tej strefy wiąże się z blokową budową podłoża, a głównym elementem strukturalnym są tam uskoki. Istotny wpływ na budowę tej strefy i całego Zagłębia miała także orogeneza alpejska. Duża liczba uskoków uległa w tym czasie odmłodzeniu. Zwiększyły się ich amplitudy. Obszar należący do KWK Borynia-Zofiówka-Jastrzębie położony jest w tzw. monoklinie Zofiówki [Proberz i in., 2012], która położona jest w całości w strefie tektoniki dysjunktywnej.

Przecinające karbońskie pokłady węgla uskoki podzieliły obszar należący do Ruchu Zofiówka na poszczególne partie (od A do H) (Rys. 3). Ruchy tektoniczne spowodowały, że poszczególne bloki obszarów objętych wpływem tektoniki dysjunktywnej, a co za tym idzie poszczególne pokłady zostały przedzielone uskokami i zalegają obecnie na różnych głębokościach. W tej części prac dotyczących mikrotwardości przedstawiono wyniki badań próbek pochodzących z partii F.

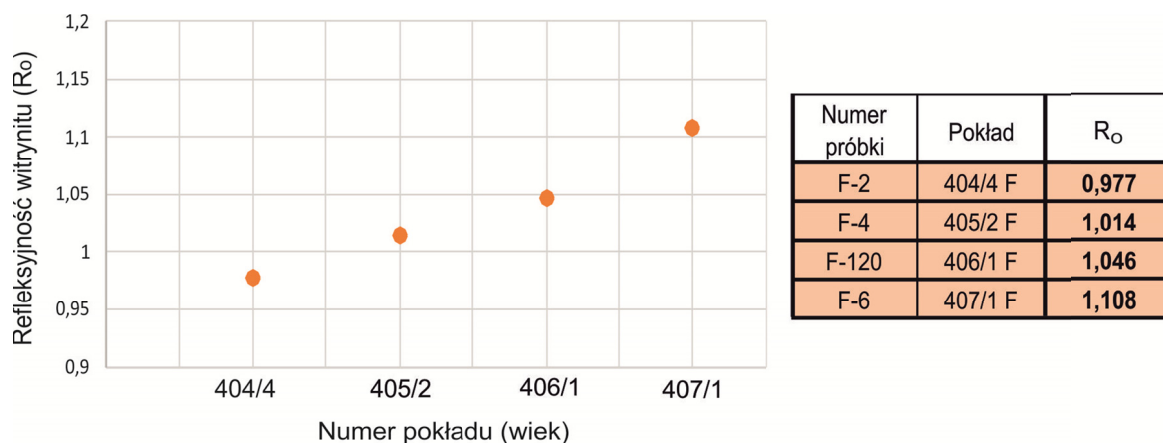


Rys. 3. Obszar górniczy Ruchu Zofiówka z naniesionymi partiami złoża. Partię F, z której pochodzą próbki, zaznaczono kolorem [materiały udostępnione przez Jastrzębską Spółkę Węglową]

5. Wyniki badań

5.1. Mikrotwardość a stopień uwęglenia

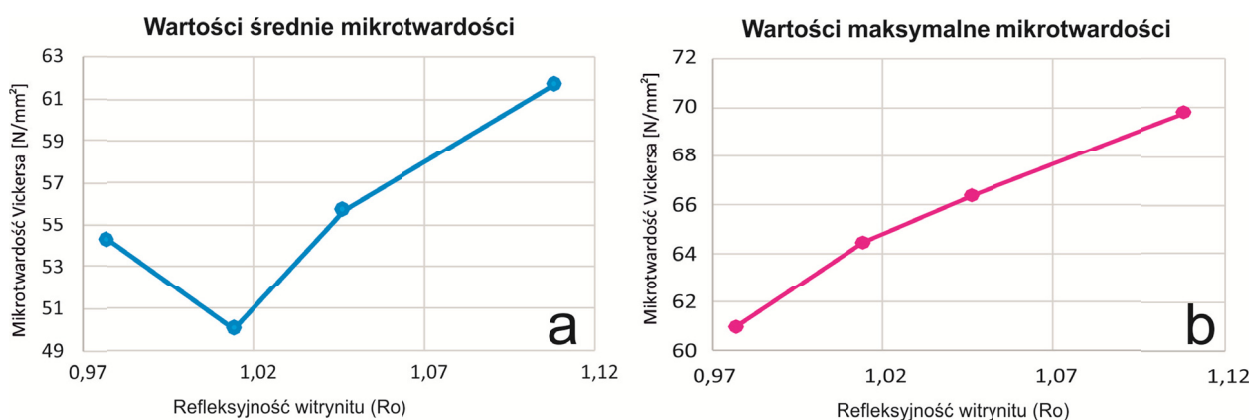
Przeprowadzono pomiary stopnia uwęglenia próbek węgla z partii F. Stwierdzono, że stopień uwęglenia zwiększa się niemal liniowo, zgodnie z wiekiem pokładu, a analizowane próbki cechują się refleksyjnością od 0,98 do 1,11% (Rys. 4).



Rys. 4. Stopień uwęglenia próbek z pokładów należących do partii F

Węgiel o takim stopniu uwęglenia, jak pomierzony na próbkach z partii F, należy do zakresu, w którym przy pomiarach mikrotwardości, wityrynit pęka w sposób kruchy [m.in. Heinze, 1958; Stach i in., 1982]. Na rysunku nr 2 przedstawiono ogólny wykres mikrotwardości w stosunku do uwęglenia substancji organicznej. Analizowane w pracy próbki o refleksyjności od 0,98 do 1,11 posiadają uwęglenie wg van Krevelen [1993] około 86-87%*C*. Wynika stąd, że analizowane próbki z partii F powinny wraz ze wzrostem R_o wykazywać także zwiększającą się H_v .

Po przeanalizowaniu średnich wartości mikrotwardości próbek z partii F okazało się, że zasada przedstawiona na rysunku nr 2 jest zachowana dla F-4, F-120 i F-6, natomiast próbka F-2 odbiega od tego schematu (Rys. 5a, Tab. 1). Mimo iż jest to próbka niżej uwęglona (F-2 o $R_o = 0,98\%$), to ma nieco wyższą mikrotwardość średnią niż wyżej uwęglona próbka (F-4 $R_o = 1,01\%$). Pozostałe próbki posiadają mikrotwardość zgodną z ogólną tendencją wzrostu mikrotwardości wraz z wzrostem uwęglenia w fazie kruchego pęknięcia.



Rys. 5. Zmiany średniej (a) oraz maksymalnej (b) wartości mikrotwardości Vickersa wraz ze wzrostem refleksyjności wityryny

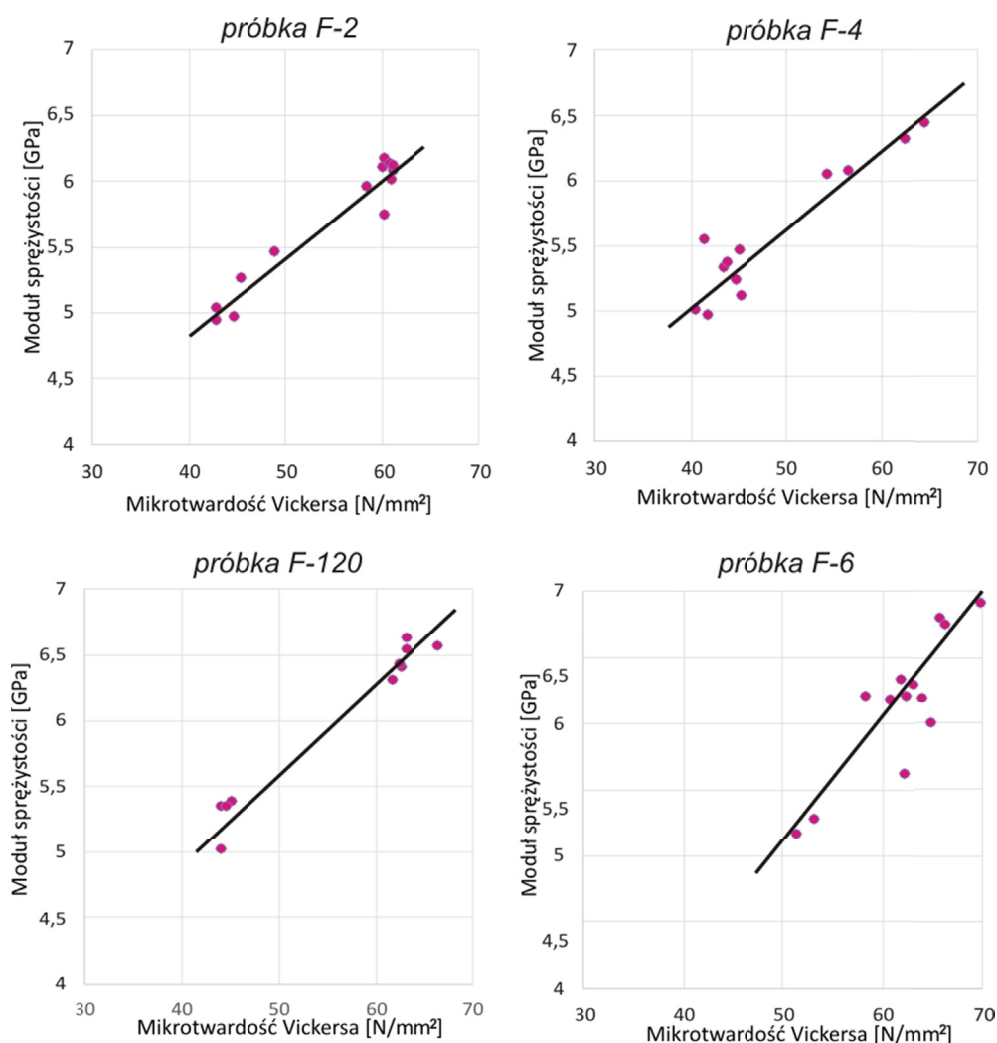
Po przeanalizowaniu wartości maksymalnych mikrotwardości, okazało się, że tendencja wzrostu mikrotwardości z uwęgleniem jest zachowana także w próbce F-2 (Rys. 5b, Tab. 1).

Tab. 1. Wartości średnie oraz maksymalne mikrotwardości Vickersa (H_V) oraz modułu sprężystości (E_{IT}) dla wszystkich analizowanych próbek z partii F

Numer próbki	Pokład	R_o [%]	H_V śr. [N/mm ²]	E_{IT} śr. [GPa]	H_V max [N/mm ²]	E_{IT} max [GPa]
F-2	404/4 F	0,98	54,32	5,70	61,00	6,17
F-4	405/2 F	1,01	50,04	5,65	64,49	6,44
F-120	406/1 F	1,05	55,71	6,00	66,40	6,63
F-6	407/1 F	1,11	61,75	6,15	69,79	6,91

5.2. Mikrotwardość a moduł sprężystości

Im wyższa wartość modułu, tym wyższa siła potrzebna do uzyskania tego samego odkształcenia. Moduł sprężystości to parametr pozwalający ocenić jednorodność materiału. Im większe odchylenie modułu, tym większe prawdopodobieństwo, że analizowany materiał nie jest zbudowany z tej samej substancji. W materiale w miarę jednorodnym (jakim jest analizowany macerał – kolotelinit) w zakresie odkształceń kruchych, wraz ze wzrostem mikrotwardości powinien wzrastać też moduł sprężystości. W większości analizowanych w pracy próbek potwierdzono tą tendencję. Analizowane fragmenty węgla zbudowane z wityrynytu, różnią się między sobą mikrotwardością, gdyż wzrasta ich stopień uwęglenia, a za tym podąża również wzrost modułu sprężystości. Zależność tych parametrów przedstawiona jest na rysunku 6. Przedstawiono tam wyniki poszczególnych pomiarów mikrotwardości Vickersa (H_V) w stosunku do modułu sprężystości (E_{IT}) dla wszystkich analizowanych próbek z partii F. Im wyższa wartość H_V tym wzrasta również wartość E_{IT} . Punkty pomiarowe są skupione wokół linii trendu, co świadczy o dość jednorodnym materiale, na którym pomierzono parametry mikrotwardości.

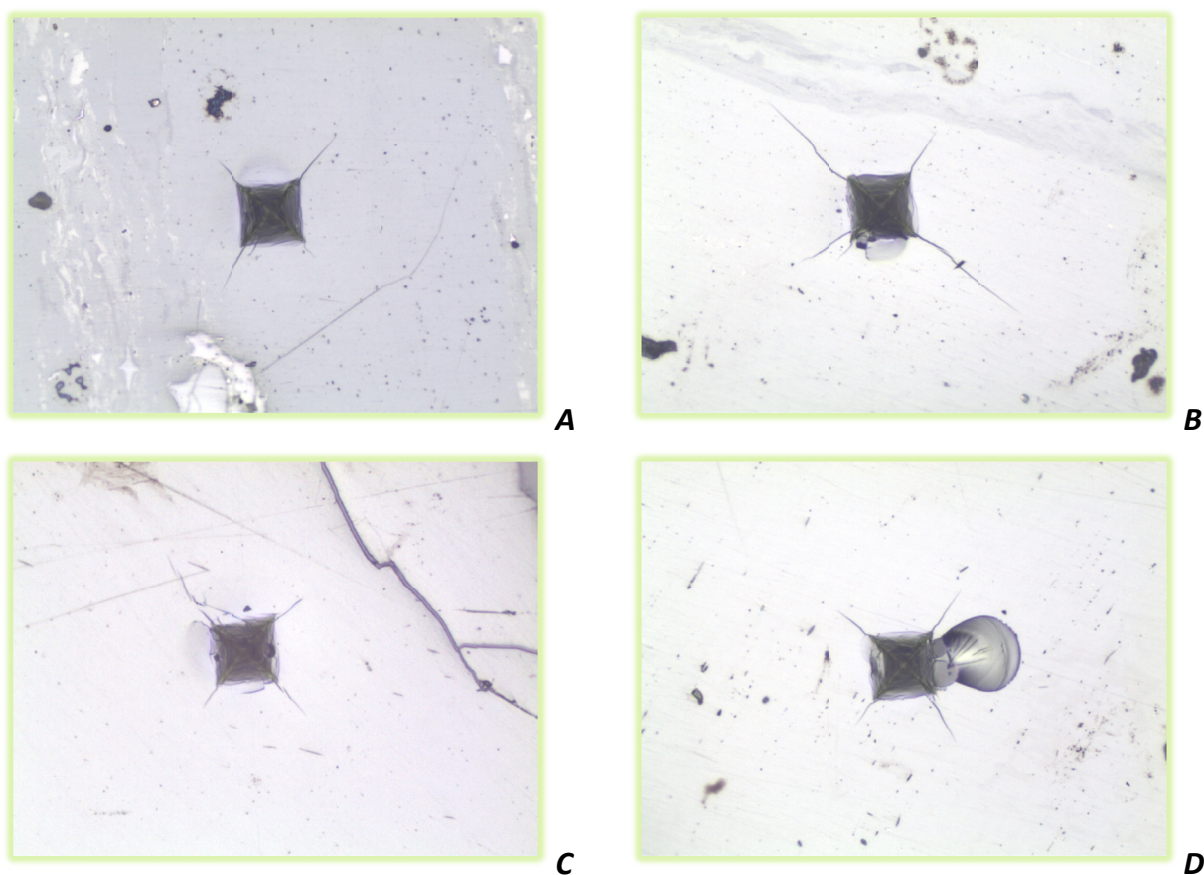


Rys. 6. Zależność modułu sprężystości od mikrotwardości Vickersa próbek z partii F

5.3. Charakter spękań powstałych po wgłębniku Vickersa

Stopień uwęglenia determinuje również sposób pęknięcia analizowanych fragmentów wityritu. Charakter zmian pojawiających się po wciśnięciu piramidy Vickersa we fragmenty węgla daje informacje o tym, czy dana substancja posiada zdolność do akumulowania energii, czy zachowuje się w sposób plastyczny [Das, 1968]. Węgiel, w którym, po zastosowaniu określonej siły nacisku pojawiają się deformacje typu kruchego (spękania, szczelinki, odspojone fragmenty powierzchni), posiada zdolność do akumulowania pewnej energii, która po przełamaniu określoną siłą nacisku, zostaje uwolniona w postaci kruchych deformacji. Jeśli po zastosowaniu wgłębnika Vickersa nie zostaną zaobserwowane inne niż sam stożek lub krzyż deformacje powierzchni, wówczas można zakładać, że substancja ta odkształca się w sposób plastyczny bądź elastyczny (antracyt).

Sposób pęknięcia wityritu po wykonanych analizach w niemal wszystkich próbkach pozwala zauważyć, że posiadają one zdolność do pęknięcia kruchego (Rys. 7). Mamy więc do czynienia z węglem posiadający zdolność kumulowania energii. Efektem pojawiającym się po przeprowadzeniu analizy mikrotwardości Vickersa są spękania i pewne defekty na niektórych ziarnach, jednak ich forma nie zaburza samego wgłębienia powstałego w wityrnicie po wciśnięciu stożka Vickersa. Na rysunku nr 7 zaprezentowano różne efekty uzyskane po zastosowaniu miernika Vickersa. W przypadku 7a efekt ten występuje jedynie w postaci pojedynczych, krótkich spękań, biegnących od wierzchołka powstałej figury. Na rysunku 7b pojedyncze spękania odchodzą z wszystkich wierzchołków i są wyraźnie wydłużone. Na rysunku 7c deformacje mają bardziej skomplikowany charakter, są niesymetryczne, nieregularnie rozmieszczone na obrzeżach powstałego odcisku. Na obrazku 7d oprócz spękań pojawiają się także odłupane fragmenty powierzchni. Na podstawie stopnia naruszenia struktury powierzchni materiał ten zakwalifikowano do 5-go stopnia kruchości, a tylko pojedyncze pomiary skutkują 4-tym stopniem kruchości (wg podziału z Rys. 1).



Rys. 7. Różne efekty deformacji powstałe po przeprowadzeniu pomiarów mikrotwardości Vickersa na fragmentach zbudowanych z wityritu

6. Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki badań dokonanych przy użyciu mikrotwardościomierza Vickersa. Wykonano analizy: mikrotwardości, modułu sprężystości oraz oceny charakteru spękań powstałych po wciśnięciu stożka Vickersa we fragmenty wityrynytu.

Badaniom poddano próbki węgla pochodzące z obszaru górniczego należącego do Ruchu Zofiówka z pokładów zlokalizowanych w partii złoża F.

Z uwagi na to, że stopień uwęglenia materii organicznej w znacznym stopniu determinuje cechy jakościowe węgla, takie jak m.in. mikrotwardość, dokonano pomiarów tego parametru. Wyniki tych analiz ukazały, że zakres refleksyjności wityrynytu badanego węgla wynosi od 0,98-1,11% (~86-87% C [van Krevelen 1993]). Wartości te wskazują na to, że analizowany węgiel mieści się w zakresie kruchego pęknięcia wityrynytu. Wzrastający stopień uwęglenia w pomierzonym zakresie refleksyjności, pociąga za sobą zwykle również wzrost mikrotwardości analizowanej substancji.

Przeprowadzone badania wykazały że:

- we wszystkich analizowanych partiach uwęglenie zwiększa się wraz z wiekiem pokładu, oraz widoczna jest tendencja do wzrostu mikrotwardości wraz z uwęgleniem. Tendencja ta jest zachowana szczególnie gdy analizujemy wartości maksymalne mikrotwardości Vickersa.
- w materiale w miarę jednorodnym, jakim jest kolotelinit, w zakresie odkształceń kruchych, wraz ze wzrostem mikrotwardości wzrasta też moduł sprężystości. W większości analizowanych próbek pochodzących z partii F, tak się właśnie dzieje. Analizowane fragmenty węgla zbudowane z wityrynytu, różnią się między sobą mikrotwardością, gdyż wzrasta ich stopień uwęglenia, a za tym podąża również wzrost modułu sprężystości.
- sposób pęknięcia wityrynytu po wykonanych analizach w niemal wszystkich analizowanych próbkach pozwala zauważyć, że próbki te posiadają zdolność do pęknięcia kruchego. Jest to węgiel posiadający zdolność kumulowania energii. Efektem pojawiającym się po przeprowadzeniu analizy mikrotwardości Vickersa są spękania i pewne defekty na niektórych ziarnach, jednak ich forma nie zaburza samego wgłębienia powstałego w wityrynicie po wciśnięciu stożka Vickersa. Na podstawie stopnia naruszenia struktury powierzchni w okolicy piramidki Vickersa zakwalifikowano ten materiał do 4 i 5 stopnia kruchości.

Podsumowując, w pracy wykazano możliwości i korzyści z wykorzystania pomiarów mikrotwardości przy użyciu mikrotwardościomierza Vickersa do węgla. Zauważono, że analizy te ukazują niektóre właściwości i cechy węgla, które nie są możliwe do zaobserwowania stosując tradycyjne, szeroko stosowane analizy. Otrzymane wyniki badań wzbogacają opis węgla o niestandardowe pomiary, a co za tym idzie, rozszerzają wiedzę dotyczącą tej kopaliny w kontekście jej parametrów wytrzymałościowych.

Praca powstała w ramach prac statutowych IMG PAN oraz polsko-czeskiego wspólnego projektu badawczego na lata 2017-2019

Literatura

- Beneš K., 1957: *Měření mikrotvrdosti uhelně-petrografických složek a mikrolitotypů Hanemanovým mikrotvrdoměrem*. Sbor. věd. prací VŠB v Ostravě, Geol., 3, 3, 47-51.
- Bukowska M., Ćmiel S.: *Charakterystyka zmian właściwości skal karbońskich w strefach tektoniki nieciągłej w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym*. *Górnictwo i Geoinżynieria*, 2011, rok 35, zeszyt.
- Das B., 1968: *Microhardness study of coal with special reference to mechanism of dust genesis*. MS Disertační práce, Vysoká Škola Báňská, Ostrava. 1968
- Dietz M., Tietz H.-D., 1990: *Characterization of engineering ceramics by indentation methods*. *J. Mat. Sci.*, 25, 3731-3738.
- Dutcher, R.R., 1960: *Physical, chemical, and thermal properties of selected vitrinitic substance*. Unpublished PhD dissertation Thesis, Pennsylvania State University, 190 pp.
- Eremin I.V., Lebedev V.V., Cikarev A.D., 1980: *Petrografija i fizičeskije svojstva uhlej*. Nedra, Moskva.
- Gabzdyl W., 1994: *Geologia złóż węgla: złoża świata*. Warszawa: Polska Agencja Ekologiczna
- Godyń K., 2016: *Structurally altered hard coal in the areas of tectonic disturbances – an initial attempt at classification*. *Arch. Min. Sci.* Vol. 61, No. 3.
- Heinze G., 1958: *Harte- und Festigkeitsuntersuchungen an Kohlen, insbesondere an Ruhrkohlen*. *Bergbau-Arch.* 19, 1-23

- Kašpar P., 1988: *Rudní mikroskopie*. Academia, Praha.
- Kotas A., 1972: *Ważniejsze cechy budowy geologicznej GZW na tle pozycji tektonicznej i budowy głębokiego podłoża utworów produktywnych*. [W:] Problemy geodynamiki i tąpnięć, 1. Kom. Górnictwa PAN, Kraków: 5-55.
- Kožušniková A., 2009: *Determination of microhardness and elastic modulus of coal components by using indentation method*. Geolines 22.
- Kožušniková A., 2010: *Mikrotvrđost a indentační modul pružnosti vitrinitu různých typů uhlí z Hornoslezské pánve*. Sborník konference Nové poznatky v oblasti výzkumu a netradičního využití geomateriálů. Ostrava, ISBN: 978-80-248-2315-7
- Krevelen D.W. van, 1993: *Coal – Typology – Physics – Chemistry – Constitution*. Elsevier, Amsterdam.
- Martinec P., Kožušniková A., 2006: *Mikrotvrđost černých uhlí ostravsko-karvinského revíru – dosa-vadní stav a možnosti dalšího rozvoje problematiky*. Documenta Geonica, Ostrava, Proceedings of the 6th Czech-Polish Conference of the Upper Silesian Coal basin, pp. 111-119
- Maślankiewicz K., Szymański A., 1976: *Mineralogia Stosowana*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa
- Młynarczuk M., Skiba M., 2017: *The application of artificial intelligence for the identification of the maceral groups and mineral components of coal*. Computers & Geosciences, Vol. 103, p. 133-141
- Mukherjee A.K., Alam M.M., Ghose S., 1989: *Microhardness characteristics of Indian coal and lignite*. Fuel, Vol. 68, Iss. 5, May 1989, p. 670-673.
- Oliver W.C., Pharr G.M., 1992. *An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments*. J. Mat. Res., 7(6): 1564-1583.
- Osika R., red. 1987: *Budowa geologiczna Polski, T VI. Złoža surowców mineralnych*. Instytut Geologiczny Warszawa Wydawnictwa Geologiczne.
- PN-ISO 7404-5:2002P: *Metody analizy petrograficznej węgla kamiennego (bitumicznego) i antracytu -- Część 5: Metoda mikroskopowa oznaczania refleksyjności wityrinitu. Methods for the petrographic analysis of bituminous coal and anthracite - Part 5: Method of determining microscopically the reflectance of vitrinite*.
- Probiez K., Marcisz M., Sobolewski A., 2012: *Rozpoznanie warunków geologicznych występowania węgla koksowego w rejonie Jastrzębia dla potrzeb projektu „Inteligentna koksownia”*. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego 2012, nr 452, s. 245-256.
- Skoczylas N., 2015: *Analyzing the parameters of the coal-gas system by means of a low-cost device based on a flow meter*. Adsorption Science & Technology, Iss. 9.
- Skoczylas N., Topolnicki J., 2016: *The coal-gas system – the effective diffusion coefficient*. Int. J.Oil, Gas and Coal Technology, Vol. 12, No. 4, p. 412-424.
- Stach E., Mackowsky M.-Th., Teichmuller M., Taylor G.H., Chandra D., Teichmuller R., 1982: *Stach's Textbook of Coal Petrology Gebruder Borntraeger*. Berlin, Stuttgart.
- Taylor G.H., Teichmuller M., Davis A., Diessel C.F.K., Littke R., Robert P., 1998: *Organic Petrology*. Gebruder Borntraeger, Berlin. 614 p.

Application of Vickers micro hardness measurements for hard coal analysis focusing on the F part of the Borynia-Zofiówka-Jastrzębie mine, Zofiówka Section

Abstract

Microhardness measurements of the different age coal deposits of the Zofiówka area, focusing on the F part were carried out. The studies were performed on the Micro Hardness Tester CSM Instruments, which is an integrated optical microscope system with a Vickers microhardness analyzer. The analyzes carried out allowed to obtain three different parameters: the Vickers microhardness H_V [N/mm²], elastic modulus E_{IT} [GPa], and the nature of cracks caused by pressing the Vickers indenter into the tested coal fragment.

Based on the evaluation of these parameters, the behavior of coal of different degrees of metamorphism was investigated. The results of the study have enriched the description of hard coal with non-standard measurements and, as a result, extend the knowledge of this fossil fuel in the context of its strength parameters.

Keywords: Vickers microhardness, hard coal, Upper Silesian Coal Basin (USCB)