

Struktury odmienione węgla kamiennego w strefach zaburzeń tektonicznych – propozycja klasyfikacji

KATARZYNA GODYŃ

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

Streszczenie

W kopalniach węgla kamiennego, w bezpośrednim sąsiedztwie uskoków występują strefy silnie narażone na zaistnienie niekontrolowanych zjawisk gazogeodynamicznych. Jest to spowodowane specyficzną, odmienioną budową wewnętrzną węgla znajdującego się w strefie zaburzonej tektonicznie – przyuskokowej. W pracy dokonano szczegółowego opisu tych wewnętrznych zaburzeń strukturalnych w węglu, rodzaju i stopnia tych zmian. Do badań wykorzystano metody: mikroskopii w świetle spolaryzowanym, odbitym oraz skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM EDX). Dokonano również pomiarów mikrotwardości węgla w różnym stadium degradacji struktury wewnętrznej. Do tego celu posłużono się mikrotwardościomierzem wykonującym pomiary twardości metodą Vickersa. Na podstawie tych badań dokonano ujednolicenia klasyfikacji takiego „odmienionego strukturalnie” węgla a także określono jego podatność na możliwość inicjacji wyrzutów w kopalniach węgla kamiennego.

Słowa kluczowe: węgiel kamienny, uskoki, struktury węgla kamiennego, wyrzuty, analiza stereologiczna

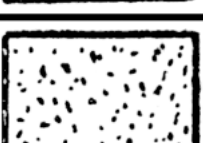
1. Wstęp i cel badań

W węglu pojawiają się różnego rodzaju zaburzenia, które mogą być związane ze zmianami strukturalnymi podczas wzrostu uwęglenia lub też z działaniem zaburzeń tektonicznych na pokład. W efekcie oddziaływania zjawisk tektonicznych na pokład węgla kamiennego może pojawić się w nim tak gęsta sieć spękań, rozdrobnienie, czy też zmielenie materiału, że w skrajnych przypadkach pierwotna struktura węgla będzie całkowicie zmieniona, zatarta (Shepherd et al., 1980; Cao et al., 2000). Literatura światowa, jak i przepisy kopalniane dotyczące bezpieczeństwa w kopalniach opisują mniej lub bardziej szczegółowo te specyficzne struktury węgla kamiennego ze stref zaburzonych tektonicznie. Największymi producentami węgla kamiennego i brunatnego w Europie są Niemcy i Polska. W krajach tych wydobywa się 2/3 całości eksploatowanego w UE węgla (Libicki i Szczepiński, 2007). Mimo tego, w krajowych przepisach oraz w opracowaniach naukowych polskich autorów nie znalazła się, jak dotąd, szczegółowa klasyfikacja i instrukcja ułatwiająca pracownikom kopalń węglowych charakteryzować stopień zmian strukturalnych węgla.

Specyficzne cechy węgla kamiennego z tzw. stref ścinania, tak istotne dla górników, są także tematem wielu opracowań naukowych. Należy jednak zwrócić uwagę na niejednorodność i niejednoznaczność tych opisów. Istnieją rozbieżności w samym nazewnictwie, różne definicje stopnia przeobrażeń, a także zauważalna jest pewna generalizacja pojęć, co powoduje niekiedy błędy w ocenie skali zagrożenia zjawiskami gazogeodynamicznymi. Celem pracy jest sprecyzowanie i ujednolicenie klasyfikacji węgla kamiennego, na przykładzie węgla pobranego z kopalń zlokalizowanych w GZW (Zofiówka, Pniówek, Brzeszcze), poddanego procesom metamorfizmu dyslokacyjnego. Ze względu na to, że w miarę wzrostu destrukcji struktury węgla, zmieniają się także jego parametry, to oprócz analiz mikroskopowych, wykonano także wstępne testy mikrotwardości na wybranych próbkach węgla.

1.1. Węgiel odmieniony strukturalnie w świetle światowych przepisów górniczych

Na całym świecie, gdzie wydobywany jest węgiel kamienny zwraca się uwagę na zagrożenia wyrzutowe, powiązane z węglem o odmienionej strukturze, występującym w strefach przyuskokowych. Obecność zmian w strukturze węgla wpływa niekorzystnie na jego cechy wytrzymałościowe, zwiększa jego pojemność gazową, a co za tym idzie, wpływa to na wzrost ryzyka wystąpienia zjawisk gazogeodynamicznych. Z uwagi na rangę tego zjawiska, niektóre kraje, gdzie istnieją działające kopalnie węgla kamiennego, w swoich przepisach górniczych zwracają na ten problem większą uwagę. Obok takich parametrów, jak szybkość desorpcji gazu, testy wytrzymałościowe Protodiakonova, czy pomiar ciśnienia złożowego, pojawia się także stopień degradacji struktury węgla. Przepisy górnicze takich krajów jak Rosja oraz Chiny traktują identyfikację tego typu węgla z uwagą i tworząc przepisy górnicze zalecają opis takich struktur, dzieląc węgiel na pięć typów strukturalnych. W chińskich przepisach górniczych (Guo et. al) istnieje zdefiniowany opis węgla odmienionego strukturalnie pod wpływem działania tektoniki. Opisywane są w nim takie cechy jak jego połysk, struktura, spękania i szczeliny. Na tej podstawie dokonywany jest ogólny podział węgla na pięć typów: I, II, III, IV i V. Typ I zdefiniowany jest jako niezmieniony strukturalnie węgiel, o błyszczącym lub pół-błyszczącym połysku, z niezaburzoną strukturą uławiconą oraz jednym lub dwoma systemami spękań i szczelin o charakterze pierwotnym. Na drugim biegunie zlokalizowany jest typ V węgla. Jest to węgiel w pełni przemielony, o strukturze pylastej, cechujący się matowym połyskiem (bezstrukturalny), charakteryzujący się małą zwięzłością. Cechy opisujące pozostałe typy odmienionego strukturalnie węgla kamiennego (II, III i IV) wykazują właściwości pośrednie między typem I i V. Jeszcze bardziej szczegółowo węgiel odmieniony strukturalnie definiowany jest w przepisach rosyjskich. Przy opisie makroskopowym węgla zwraca się na uwagę na barwę, połysk, stopień naruszenia, częstotliwość występowania spękań oraz osłabień w budowie wewnętrznej węgla (rys. 1).

Wygląd zewnętrzny węgla	Typ	Tektoniczna struktura węgla	
	I	nienaruszona (laminarna, lekko spękana)	potencjalnie zagrożone-wyrzutowe struktury
	II	zbrekcyjonowana	
	III	soczewkowa	
	IV	ziemisto(pylasto)-drobnoziarnista	
	V	ziemista(pylasta)	

Rys. 1. Podział węgla tektonicznego wg rosyjskich przepisów górniczych (*Instrukcja...*, 1989)

Pozostałe kraje z czynnym górnictwem węglowym, wśród których jest i Polska, nakazują zwracać szczególną uwagę na węgle odmienione, nie definiując jednakże szczegółowo stopnia tych zmian w strukturze.

1.2. Węgiel odmieniony strukturalnie w literaturze

Specyficzne cechy węgla kamiennego z tzw. strefy ścinania (share zone – Bodziony i Lama, 1996), tak istotne dla górników, są także tematem wielu opracowań naukowych. Istnieją rozbieżności w samym nazewnictwie, różne definicje stopnia przeobrażeń, ponadto zauważalna jest pewna generalizacja w rozumieniu rodzaju i skali zjawiska tych przemian, co powoduje niekiedy błędy w ocenie skali zagrożenia zjawiskami gazogeodynamicznymi.

W zależności od pokładu, miejsca, tektoniki oraz stopnia metamorfizmu, pojawiają się struktury węglowe o zróżnicowanych cechach. Najczęściej taki „odmieniony strukturalnie” węgiel nazywany jest *zbrekconowanym, przetartym, zmylonityzowanym* czy *węgłem tektonicznym*. Nie są to precyzyjne opisy, a jedynie zasygnalizowanie problemu istnienia w górotworze nietypowych utworów.

Przy opisie węgla poddanego procesom tektoniki nasuwa się problem związany prawidłowym użyciem terminu **struktura i tekstura**. Obie nazwy są przez różnych autorów (np. Liu et al., 2009) stosowane wymiennie. Wg definicji zawartych w Słowniku Petrograficznym (Ryka i Maliszewska, 1991) **tekstura**, charakteryzuje sposób uporządkowania składników skały i wypełnienia przez nie przestrzeni, natomiast **strukturą** nazywany jest sposób wykształcenia składników skały, tzn. stopień jej krystaliczności, wielkość i kształt składników oraz wzajemne relacje między nimi. Zgodnie z tymi definicjami cechy które służą opisowi węgla odmienionego strukturalnie są zbiorem cech teksturalnych i strukturalnych. Wielu autorów (Li et al., 2003; Jiang et al., 2004; Gentzis, 2006) w tym kontekście mówi o mikrostrukturach (strukturach obserwowanych w skali mikro), jako o cechach węgla pochodzącego ze strefy ścinania i definiuje je na podstawie cech strukturalnych i teksturalnych. Do struktur zalicza się m.in. wielkości poszczególnych fragmentów węgla, ich kształt, wzajemne relacje, a do teksturalnych uporządkowanie pokruszonych, przeobrażonych fragmentów węgla, kierunkowość, wypełnienie przestrzeni itp.

Jednolity podział węgla odmienionego strukturalnie zaproponowany został w 1969 roku przez niemieckich autorów (Jüntgena i in., 1969). Na tej podstawie swoje wnioski wygenerowali czescy naukowcy (Rakowski i in., 1977), w pracy dotyczącej zmian struktur i tekstur w pokładach węgla kamiennego z kopalni Paskov i Staříč (tab. 1). Wg tych badaczy zniszczenie struktury węgla przebiega w fazach: węgiel zbity z niewielką ilością spękań, z podwyższoną ich zawartością oraz gęstą siecią spękań/tektoniczną mikrobrekcją (tab. 1).

Tab. 1. Typy węgla odmienionego strukturalnie w oparciu o klasyfikację Rakowskiego i in (1977) oraz Jüntgena et.al. (1969)

Mikrostrukturalne typy węgla wg Rakowskiego i in (1977)	Charakterystyka spękań	Mikrostrukturalne typy węgla wg Jüntgena i in. (1969)
A	Węgiel zbity z niewielką ilością szczelin, zwykle prostopadłych lub skośnych do uwarstwienia	1. Nieodmienione węgle (Intakte Kohle)
Przechodnie typy	Połączenie typu A +B	2. Słabo spękanne węgle (Schwach rissige Kohle)
B	Węgłe zbite (masywne) ze zwiększoną zawartością szczelin (średni stopień tektoniczny zaburzeń tektonicznych)	3. Silnie spękanne węgle (Stark rissige Kohle)
C	C ₁ – zróżnicowane węgle z gęstą siecią spękań C ₂ – tektoniczna mikrobrekcja (wysoki stopień zaburzeń tektonicznych)	4. Zmylonityzowane węgle (Mylonitisierte Kohle) 5. Węgłe zbrykietowane (Brikettkohle)

Cao et.al (2000, 2001, 2003) obserwując węgiel w dużych powiększeniach (mikroskop optyczny) dokonali podziału na węgiel **normalny**, nie wykazujący podziału na mniejsze fragmenty, węgiel **kataklastyczny**, w którym obserwuje się podział na nieregularne, ostrokrawędziste fragmenty, okruchy, zwykle

większe niż 1mm, węgiel **granulityczny** (granularny), w którym poszczególne fragmenty węgla wygazują mniej ostre krawędzie i mniejszą wielkość poszczególnych, rozkruszonych fragmentów oraz najbardziej zniszczony, przeobrażony węgiel **mylonityczny**.

W innym opracowaniu (Li et al., 2003) autorzy dzielą węgiel na: niezaburzony; kataklastyczny-angularny (kątowy); kataklastyczny-granularny (ziarnisty); foliacyjny (uporządkowany, warstwowany) oraz mylonityczny (zmylonityzowany). Węgiel kataklastyczny powstały w skutek kruszenia materiału węglowego, natomiast w tworzeniu pozostałych struktur wpływ miały także naprężenia powodujące odkształcenia plastyczne.

Szczegółowy opis struktur węgla „odmienionego” został przedstawiony w pracy Jiang i in. (2004). Autorzy węgiel taki dzielą na dwa główne typy: **kataklastyczny** i **mylonityczny**:

- **Węgiel kataklastyczny** tworzy się stopniowo, w miarę zwiększania ciśnienia kierunkowego. Skutkiem tego materiał ulega stopniowym procesom rozkruszania. W zależności od stopnia zaawansowania tego procesu powstaje najpierw węgiel o strukturach pierwotnych kataklastycznych, gdzie pojawiają się nieznaczne spękania, ale struktury pierwotne węgla są rozpoznawalne. Następnie tworzy się węgiel kataklastyczny. W utworach tych sieć spękań jest gęsta, ale spękania nie są zbyt złożone, a pierwotne struktury bywają dostrzegalne. Kolejno powstaje węgiel porfiroklastyczny. Pierwotne struktury są tam praktycznie nierozpoznawalne, co jest wynikiem wysokiego stopnia spękań i przemieszczeń drobnych fragmentów węgla. Charakterystyczną cechą takich struktur jest występowanie dwóch dominujących frakcji okruchów. Na końcu tego szeregu przekształceń wykształca się węgiel granulkowy (granulityczny). Ten typ przekształceń charakteryzuje się całkowitym zniszczeniem pierwotnej struktury i tekstury, sieć spękań jest niezwykle gęsta.
- **Węgiel mylonityczny** (zmylonityzowany) powstaje na drodze odkształceń plastycznych. Jest to długotrwały proces, którego głównym czynnikiem jest ciśnienie kierunkowe, lecz węgiel ulega również wpływowi temperatury. W zależności od zaawansowania tych procesów tworzy się początkowo: węgiel łuseczkowy. Są to utwory z widocznym nałożeniem się procesów rozkruszania oraz przemian plastycznych. W obrazie mikroskopowym można dostrzec słabo zaznaczające się struktury fałdowe. Kolejnym etapem przekształceń mylonitycznych jest powstanie węgla fałdowego. Ten typ przeobrażeń charakteryzuje się powstaniem struktur fałdowych (mikrofałdy) o nieregularnych kształtach, a sieć spękań skutecznie maskuje pierwotne struktury. Końcowym etapem metamorfizmu jest powstanie węgla mylonitycznego. Występują w nim zaawansowane odkształcenia, tworzą się skupienia soczewkowe i oczkowe. Poszczególne fragmenty są drobne i rozmieszczone kierunkowo. W węglu niekiedy uwidacznia się płynięcie plastyczne, w szczególności na okruchach wityritu. Na skutek tego mogą powstać cienkie, wydłużone formy.

Ju Y. et al. (2005) oraz Ming L. et al. (2011) na podstawie wyników badań węgla z kopalń Puhe i Shanchahe w zachodniej prowincji Guizhou wprowadzają nieco inny podział węgla odmienionego strukturalnie na skutek zaburzeń tektonicznych i dzielą jego struktury na: **pierwotne – kataklastyczne; kataklastyczne, móźdierzowe** (mortar structure) oraz **łupkowe** (schistose). Struktury pierwotne kataklastyczne i kataklastyczne, powstałe w skutek odkształceń kruchych, charakteryzują się niezbyt gęstą siecią, często prostopadłych spękań, często o ostrokrawędzistych zakończeniach. Bardziej skomplikowaną sieć spękań posiada węgiel o strukturze móźdierzowej. Sieć spękań w węglu jest dobrze rozwinięta, a dobrze wykształconym spękaniami, powstałym w skutek kruszenia towarzyszą drobniejsze, w których niekiedy zaznacza się słabo widoczna tekstura kierunkowa. Węgiel ze strukturą łupkową powstały w wyniku naprężeń ścinających, kruszy się na cienkie fragmenty, często przesunięte względem siebie.

2. Metodyka

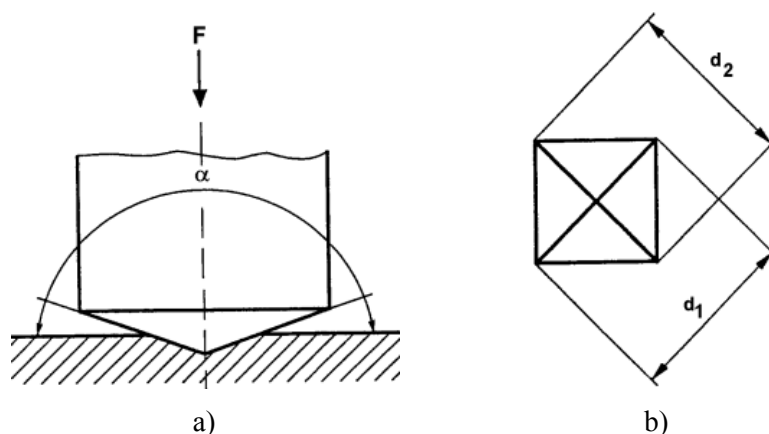
Do realizacji celów badawczych wykorzystano materiał węglowy pochodzący z pokładów przeciętych uskoki z górnośląskich kopalń: Zofiówka, Brzeszcze i Pniówek.

Z materiału węglowego wykonano preparaty (polerowane zgłady) ziarnowe i kawałkowe. Do analiz zastosowano mikroskop polaryzacyjny AXIOPLAN firmy ZEISS oraz sterowany komputerowo stolik mechaniczny XYZ. Obraz spod mikroskopu optycznego przekazywany był za pomocą kamery CCD na monitor. Stosowano powiększenia 320-500X, co jest zgodne z PN-ISO 7404-3: 2001 dotyczącą petrograficznych analiz węgla kamiennego. Zgłady analizowano w świetle odbitym – białym, przy zastosowaniu immersji

olejowej. Wykonano serie fotografii odzwierciedlającą węgiel bez wyraźnych zmian strukturalnych, spękany oraz silnie odmieniony strukturalnie (kataklastyczny i mylonityczny).

Przeprowadzono ponadto analizy mikroskopowe, stosując elektronowy mikroskop scanningowy. Zastawano urządzenie Jeol 5200 z analizatorem chemicznym EDS – Link eXL, przystawką Back Scatter Elektron (BSE), powiększeniem do 50000 $\times$ i zakresem analizowanych pierwiastków: Na-U.

Analizy mikroskopowe uzupełniono o testy mikrotwardości urządzeniem: Micro Hardness Tester CSM Instruments. Wykonano pomiary twardości poszczególnych typów strukturalnych węgla, wykorzystując metodę Vickersa. Polega ona na wciskaniu wgłębnika (foremnego, czworokątnego ostrosłupa diamentowego o kącie dwuściennym α) w płaską powierzchnię elementu badanego pod obciążeniem F , prostopadłym do tej powierzchni (rys. 2). Po zdjęciu obciążenia następuje odczyt przekątnej z powstałego odcisku (kwadratu). Twardość Vickersa (wg PN-EN ISO 6507-1:1999), to stosunek obciążenia F (wyrażonego w niutonach) do pola S (w milimetrach kwadratowych) powierzchni bocznej otrzymanego odcisku (Kupczyk et. al., 2005)



Rys. 2. Schematy: a) wgłębnika stosowanego do pomiaru mikrotwardości metodą Vickersa, b) odcisku wgłębnika w materiale; $\alpha = 136^\circ$; d_1 , d_2 – przekątne odcisku (za Kupczyk et. al., 2005)

Wybrane próbki węgla badano pod obciążeniem 0,5 N, które najlepiej sprawdza się przy analizie mikrotwardości węgla kamiennego na polerowanych zgładach (Kožušniková, 2009).

3. Przegląd struktur i klasyfikacja węgla pochodzącego z pociętych uskoki pokładów kopali: Zofiówka, Brzeszcze, Pniówek

3.1. Węgiel nieodmieniony strukturalnie z naturalną siecią spękań

Prowadzone obserwacje makro- i mikroskopowe węgla kamiennego z różnych miejsc i pokładów (m.in. Bodziony i in., 1990) ujawniały fakty, że w węglu nieodmienionym zawsze występują mniej lub bardziej rozbudowane systemy spękań, szczelin, porów. Węgiel nieodmieniony, w świetle badań mikroskopowych, to taki, w którym nie obserwuje się znacznego wzrostu spękań, a te które są obecne mają pochodzenie pierwotne (endogeniczne). Istnieją dwa mechanizmy powstawania spękań/szczelin, czyli te odpowiedzialne za spękania pierwotne (diagenetyczne, endogeniczne), powstające podczas procesów torfotwórczych, i uwęglenia oraz postdiagenetyczne (egzogeniczne), związane z metamorfizmem dyslokacyjnym (wpływ ciśnienia kierunkowego). Endomikrospękania najczęściej i najliczniej występują w macerałach grupy witrinitu – kolinitu (gł. w telokolinitie) (Yan-bin i Dameng, 2009).

Spękania endogeniczne charakteryzują się kilkoma specyficznymi cechami: są izolowane, zwykle liniowe, przecinające się pod kątem prostym, przeplatają się i mogą tworzyć uporządkowaną, dwukierunkową sieć. Przykłady takich systemów spękań przedstawia rysunek 3.



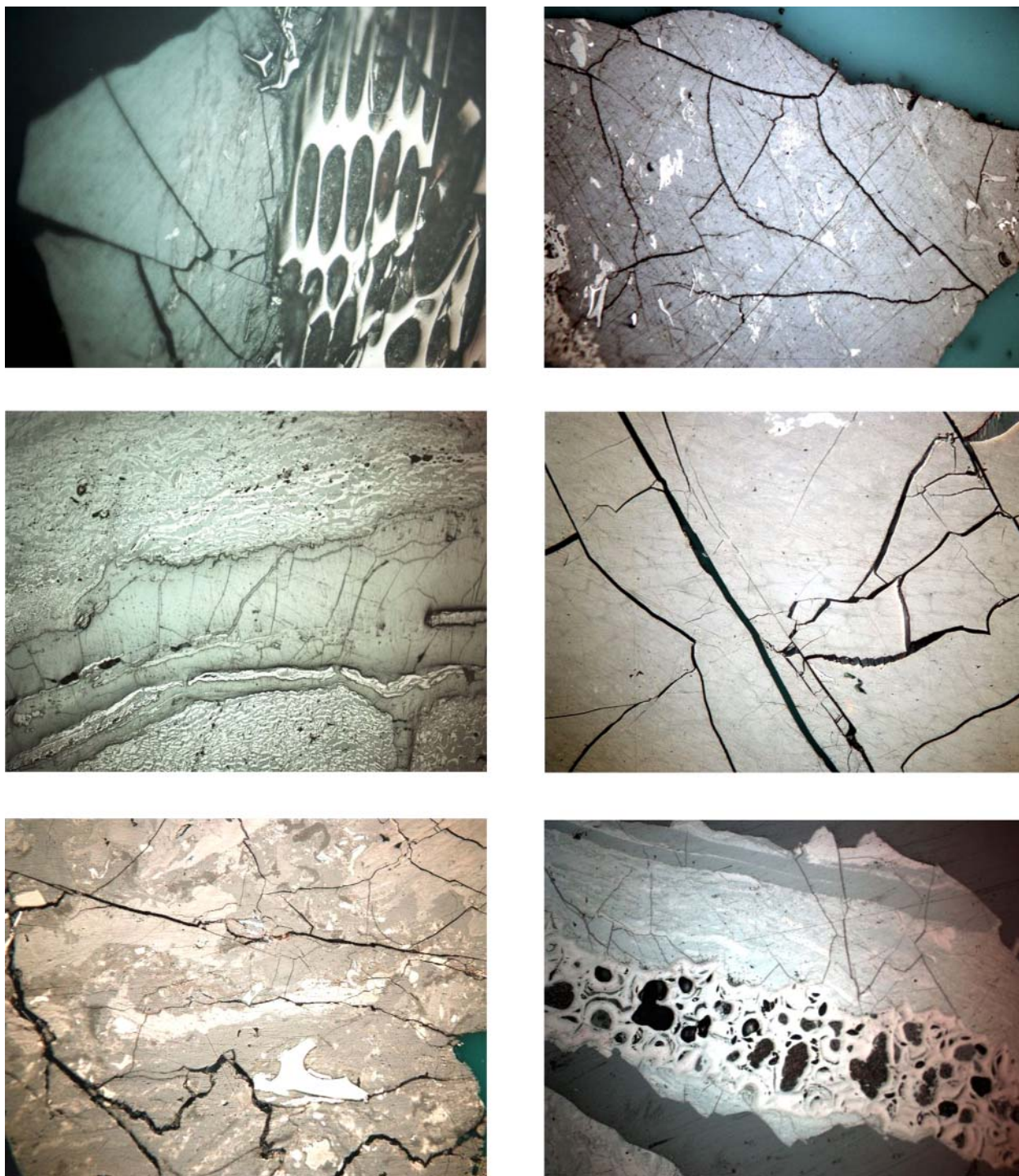
Rys. 3. Spękania o charakterze pierwotnym – endogenicznym. Próbkę węgla pobrano z KWK Borynia-Zofiówka pokład 406/1, KWK Pniówek pokład 403/3. Pow. 500×, światło odbite, immersja

3.2. Węgiel spękany – egzogeniczny (postdiagenetyczny)

Na rozwój sieci szczelinowo-porowej węgla wpływ mają także procesy egzogeniczne (nie związane z pokładami węgla). Siły zewnętrzne działające na pokład węgla, mogą w znacznym stopniu powiększyć ilość spękań. Przemiany egzogeniczne obejmują wpływ tektoniki, zmiany ciśnienia oraz kompaktację w różnych okresach czasu. Podwyższona zawartość tego typu spękań może dawać sygnał o bliskości deformacji tektonicznej. W przeciwieństwie do endomikrospękań, egzomikrospękania tworzą nieregularną sieć, zbudowaną z „kolankowych” wygięć, niekiedy dendrytową lub mozaikową. W przeciwieństwie do naturalnych spękań, te tektoniczne są przypadkowe, bezładne i usytuowane dość losowo, co ma wpływ na zwiększenie anizo-

tropii węgla. Endo- i egzomikrospękania różnią się także częstością występowania. Te drugie są zazwyczaj liczniejsze. Nierzadko endo- i egzospękania nakładają się na siebie w tym samym węglu. Zestaw spękań pochodzenia tektonicznego przedstawiono na rysunku 4.

Węgiel spękany pod wpływem procesów postdiagenetycznych, na skutek wzrastających sił ścinających, powodujących kruszenie, rozdrabnia się coraz mocniej, tworząc w kolejnych etapach węgiel kataklastyczny.



Rys. 4. Spękania o charakterze wtórnym – egzogenicznym. Próbki węgla pobrano z KWK Borynia-Zofiówka pokład 406/1, KWK Pniówek pokład 403/3. Pow. 500×, światło odbite, immersja

4. Kataklaza

Istnieje płynna granica między węglem silnie spękanym w skutek działania procesów egzogenicznych, a węglem ogólnie nazywanym KATAKLAZĄ. W miarę wzrostu ciśnienia kierunkowego wzrastają naprężenia w pokładzie, co wpływa na podwyższenie zawartości spękań i silniejsze rozkruszanie fragmentów węgla. Jest to możliwe do zaobserwowania w obrazie mikroskopowym. Gdy spękania te zaczynają tworzyć nieregularną sieć, która ulega zagęszczeniu, wtedy powstaje węgiel o strukturze kataklastycznej. Struktura ta posiada szereg charakterystycznych cech, a ponadto, w miarę zaawansowania metamorfizmu na skutek dyslokacji tektonicznych ulega coraz intensywniejszym przemianom. Podział i opis poszczególnych etapów tworzenia kataklazy przedstawiono poniżej:

Prekataklaza

Prekataklaza (wg Jiang et al., 2004 to węgiel pierwotny kataklastyczny), to węgiel w początkowej fazie tworzenia kataklazy. W pracy przyjęto, że węgiel cechujący się takimi własnościami musi posiadać, widoczną pod mikroskopem, zwiększoną w stosunku do egzomikrospękanego węgla sieć spękań. Charakterystyczną cechą węgla o strukturze prekataklastycznej jest możliwość rozpoznania przy mikroskopowych obserwacjach, pierwotnej, niezaburzonej tektonicznie, struktury. Widoczna może być laminacja, wyraźnie rozgraniczone kontakty międzymacerałowe, brak przemieszczenia się poszczególnych fragmentów węgla względem siebie, a same spękania cechują się małym skomplikowaniem, prostymi lub łamanymi. Przykłady takich prekataklastycznych struktur przedstawiono na rysunku 5.

Mezokataklaza

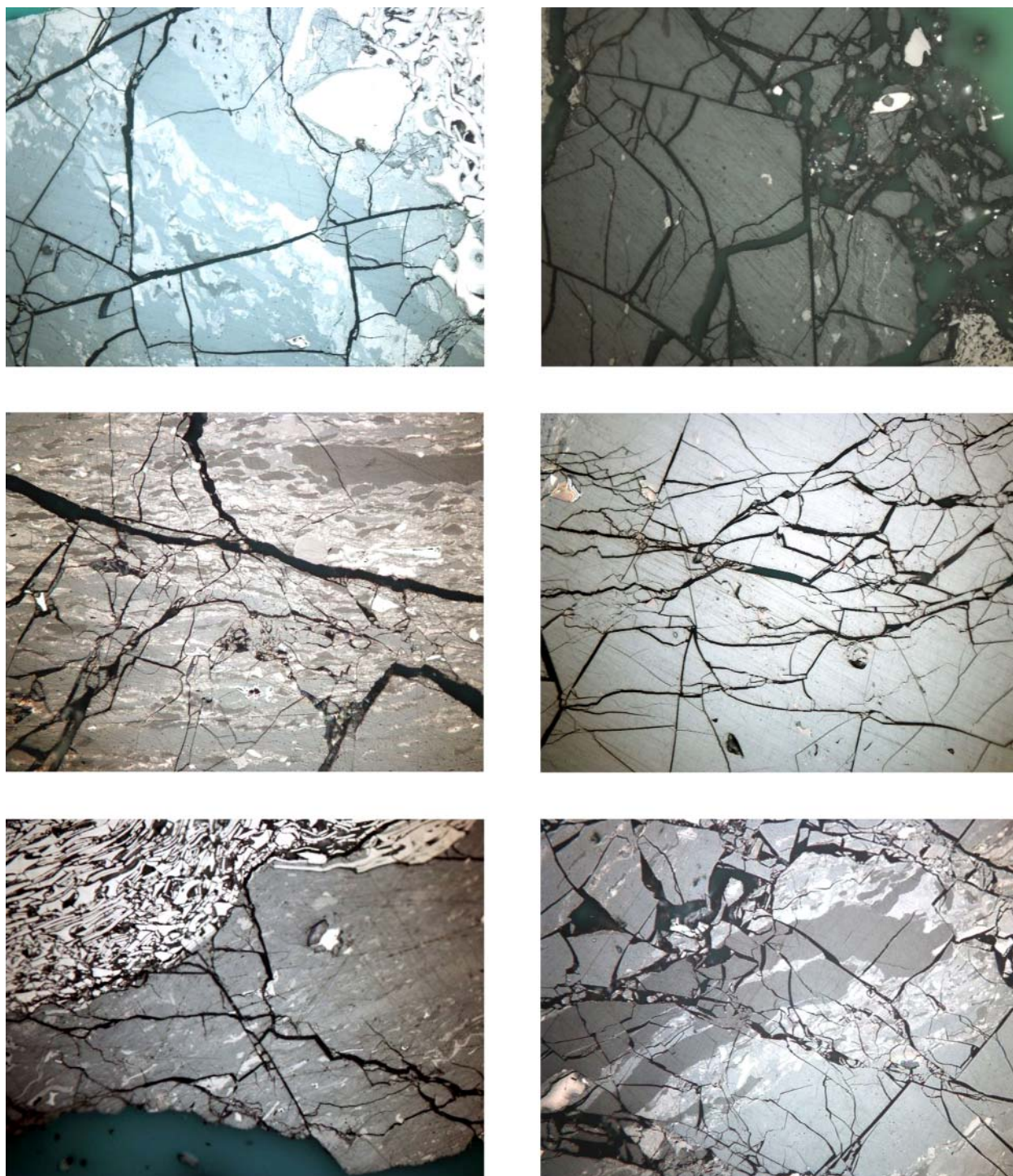
Kolejnym etapem zmian węgla odmienionego strukturalnie jest utworzenie mezokataklazy (Jiang et al., 2004 nazywa takie struktury kataklastycznymi). Siły działające na pokład powodują powstanie gęstej sieci spękań, ich zliczenie jest bardzo skomplikowane, gdyż spękania nakładają się na siebie, powodując niekiedy nieczytelność obrazu mikroskopowego. W węglu mezokataklastycznym widoczne są zwykle, przynajmniej częściowo zachowane pierwotne struktury, jednak możliwe są nieznaczne przemieszczenia nowo utworzonych okruchów/fragmentów pokruszonego węgla. Charakteryzują się też często ostrokrawędzistymi fragmentami pokruszonego węgla. Przykłady takich struktur przedstawiono na rysunku 6.

Porfirokataklaza

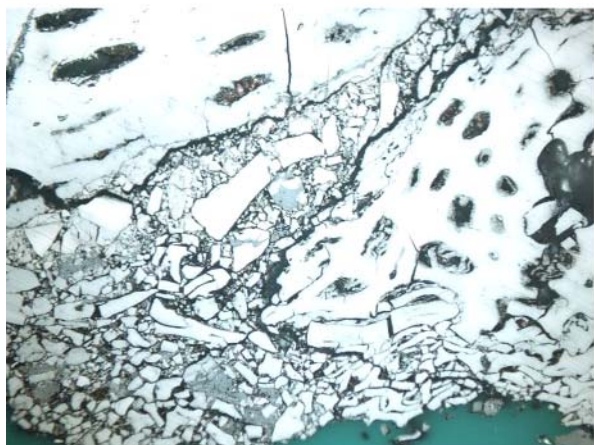
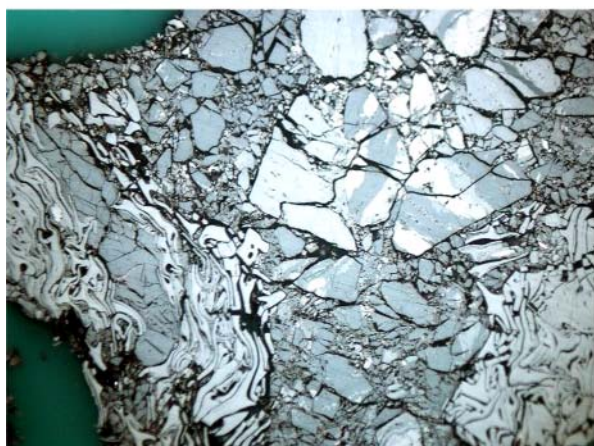
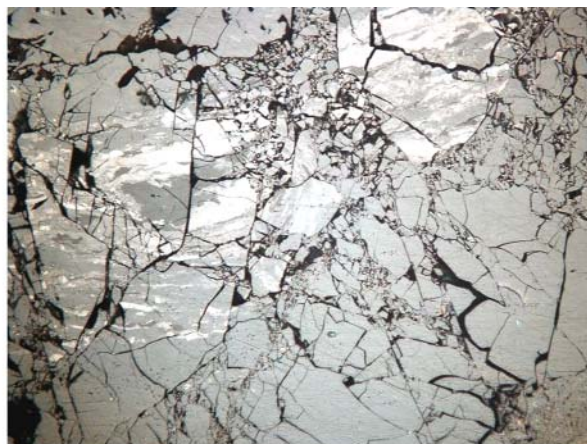
Gdy węgiel osiąga kolejną, wyższą fazę przeobrażeń tworzy się porfirokataklaza (wg Jiang et al., 2004, jest to węgiel kataklastyczny). Jej charakterystyczną cechą jest obecność dwóch generacji okruchów. Widoczne są wyraźnie duże, 50-200 μm fragmenty węgla (porfiroklasty), otoczone drobnym silnie zmielonym i poprzemieszczanym względem siebie materiałem kataklastycznym. Pierwotne struktury węgla widoczne są jedynie w większych okruchach, a w pyłe węglowym są one całkowicie nieczytelne, zatarte. Wielkość tych drobnych, silnie zmielonych fragmentów nie przekracza 50 μm , a zazwyczaj kształtuje się w granicach 10-20 μm . Przykłady takich struktur są przedstawione na rysunku 7.

Kataklaza właściwa

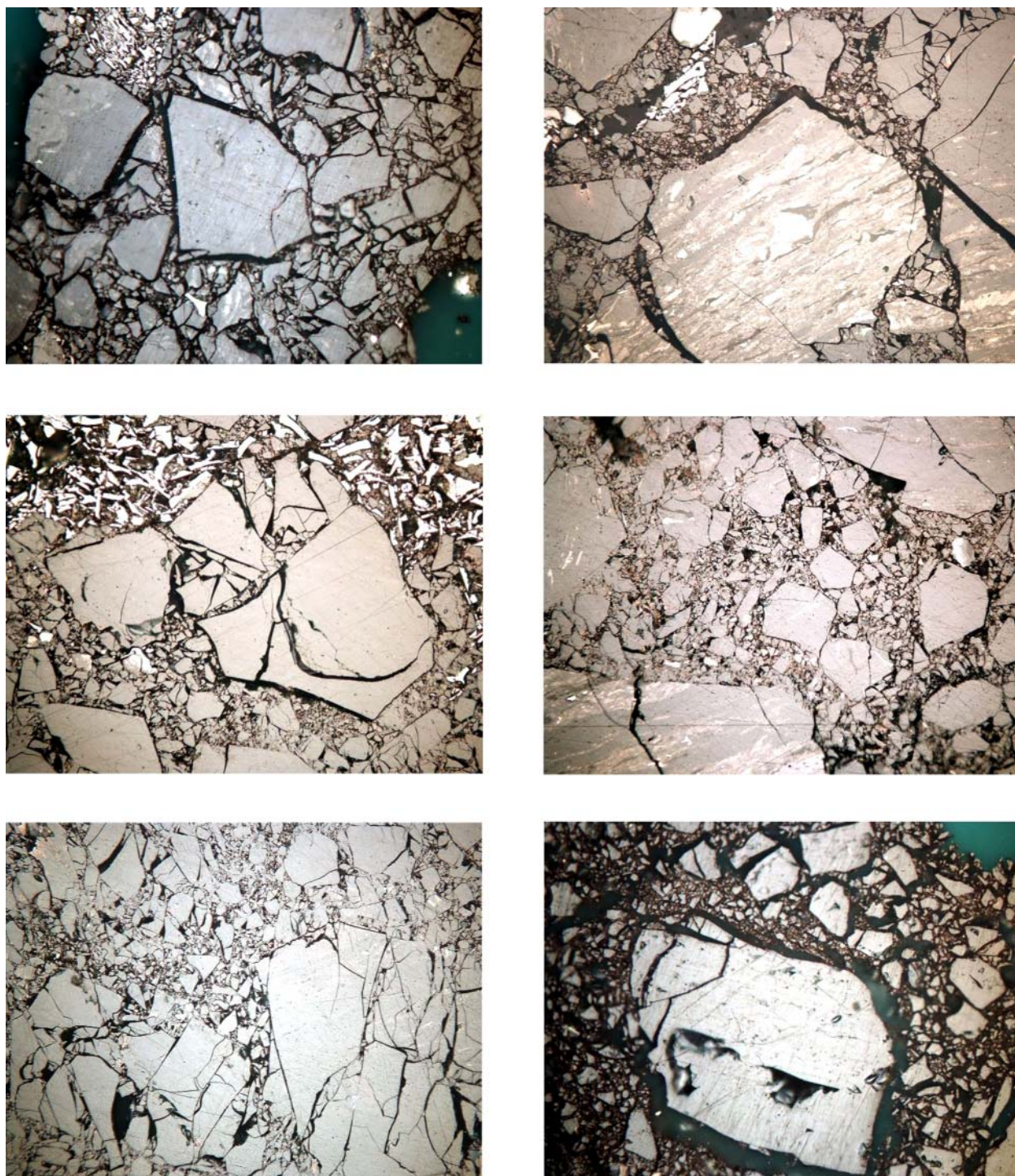
Końcowym etapem przemian kataklastycznych jest **kataklaza właściwa** (Jiang et al., 2004 nazywa ją granulitic structure – granulityczna, ziarnista). Ten typ przekształceń charakteryzuje się całkowitym zniszczeniem pierwotnej struktury i tekstury węgla. Posiadają bardzo gęstą sieć spękań, w której poszczególne okruchy są przemieszczone względem pierwotnej struktury i względem siebie. Silnie zmielone okruchy węgla wykazują równocześnie bardzo duży stopień obtoczenia. Przedstawiono ją na rysunku 8.



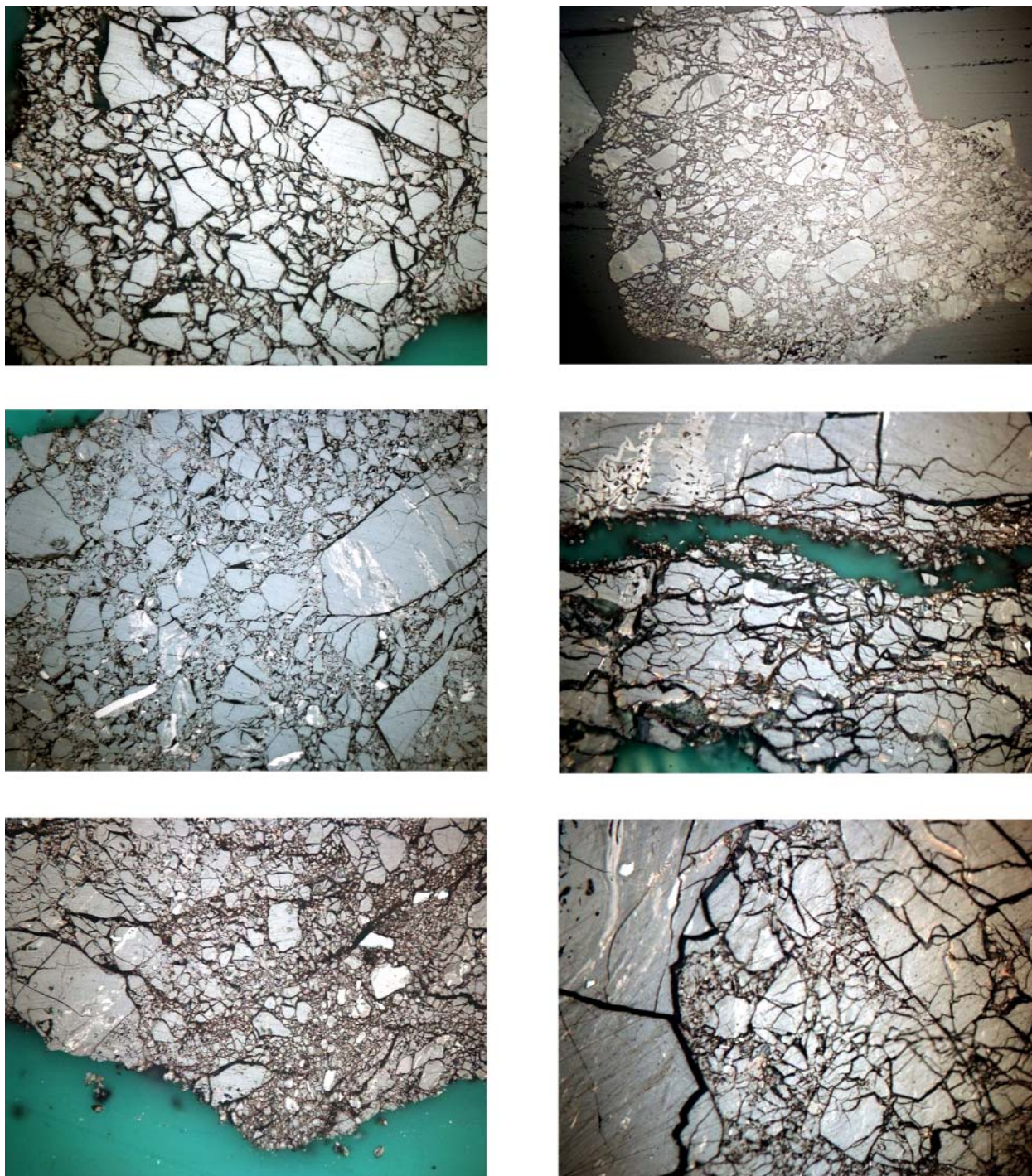
Rys. 5. Węgiel kataklastyczny – prekataklaza. Próbki węgla pochodzą z KWK Borynia-Zofiówka pokład 406/1 oraz 412 Ig+Id, KWK Pniówek pokład 403/3. Pow. 500×, światło odbite, immersja



Rys. 6. Węgiel kataklastyczny – mezokataklaza. Próbkę węgla pobrano z KWK Borynia-Zofiówka pokład 406/1, KWK Pniówek pokład 403/3, KWK Brzeszcze pokład 352 Zachód, Pow. 500×, światło odbite, immersja



Rys. 7. Węgiel kataklastyczny – porfirokataklaza. Przyuskokowe próbki węgla pobrano z KWK Pniówek pokład 403/3, KWK Brzeszcze pokład 352 Zachód, KWK Borynia-Zofiówka 406/1. Pow. 500×, światło odbite, immersja

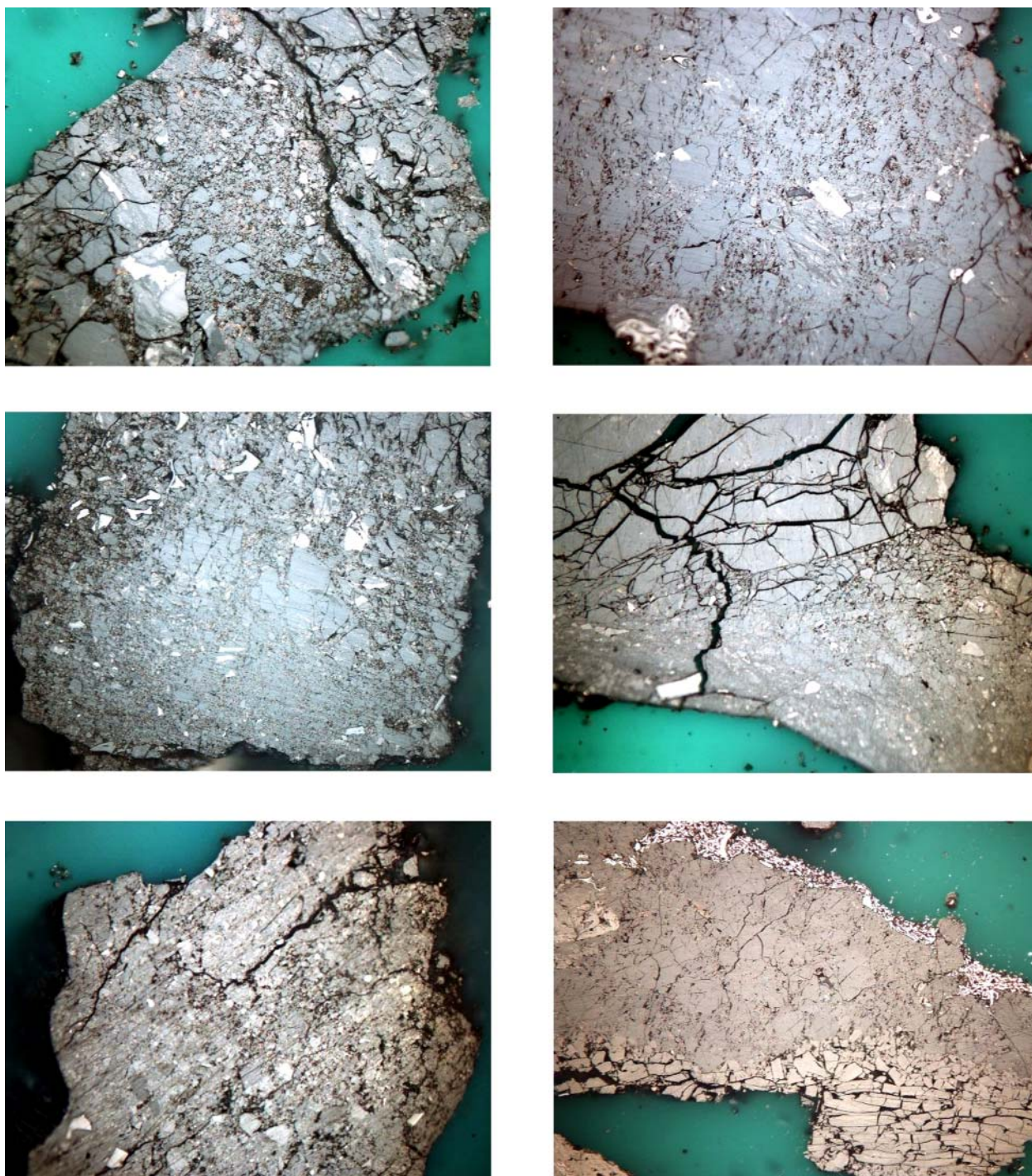


Rys. 8. Węgiel kataklastyczny – kataklaza właściwa, próbki pochodzą z KWK Borynia-Zofiówka pokład 406/1, KWK Pniówek pokład 403/3, Pow. 500×, światło odbite, immersja

5. Mylonit

Podczas analizowania próbek z licznych pokładów węgla kamiennego, pochodzących z GZW uważano znaczną przewagę węgla spękanego i kataklastycznego, w porównaniu z mylonitem. Niemniej jednak taki węgiel również występuje, a co za tym idzie posiada inne właściwości niż kataklaza. Gdy procesy kruszenia osiągną swoje maksimum, a siły działające na górotwór są na tyle duże, to w pobliżu uskoku może (choć nie musi) powstać węgiel mylonityczny. Ich tworzenie uzależnione jest od wielkości ciśnienia kierunkowego oraz także, lecz w mniejszym stopniu, temperatury. Efektem tego są odkształcenia posiadające znamiona plastyczności.

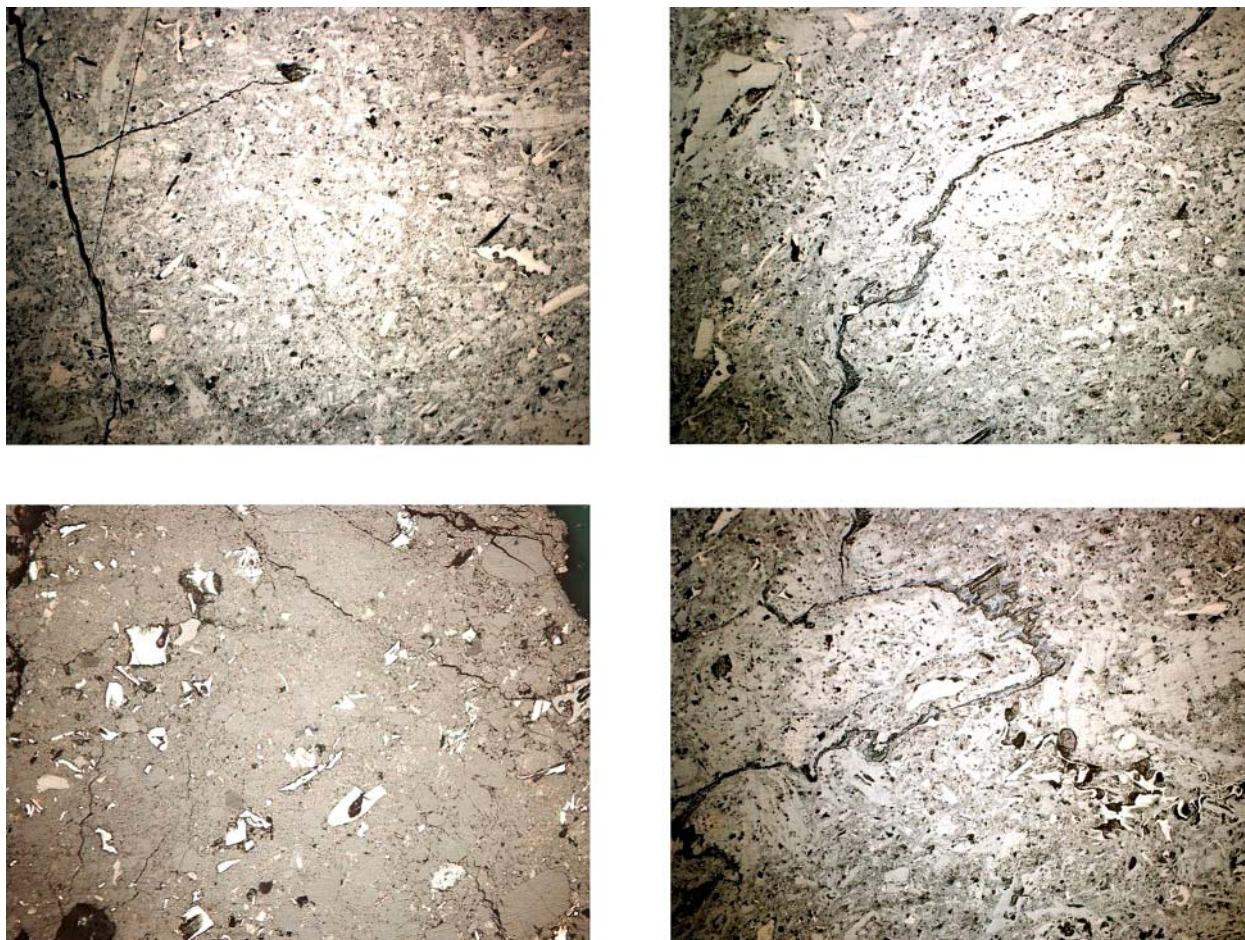
Tak jak w przypadku węgla kataklastycznego, tak i w mylonicie można dostrzec różny stopień zaawansowania odkształceń w węglu.



Rys. 9. Węgiel mylonityczny – premylonit, próbki pochodzą z KWK Pniówek pokład 306/1 oraz KWK Borynia-Zofiówka 406/1. Pow. 500×, światło odbite, immersja

Premylonity

Węgiel w pierwszej fazie procesu mylonityzacji tworzy *premylonit* (w literaturze nazywany również węglem łusczkowym – Jiang et al., 2004). Węgiel tak odmieniony posiada cechy kruszenia oraz przemian plastycznych. Uwidaczniają się tam cechy przynależne do kataklazy, czyli fragmenty pokruszonego i przemieszczonego względem siebie węgla, jednakże jest on mocno sprasowany, ściśle upakowany. Część granic pomiędzy okruskami węgla zaciera się i tworzy się zbita, niemal jednolita masa, w której niekiedy dostrzegalne (szczególnie przy znacznych powiększeniach mikroskopowych) są struktury mikrofałdowe, które niekiedy podkreślone są domieszką substancji mineralnej. Przykłady premylonitu przedstawione zostały na rysunku 9



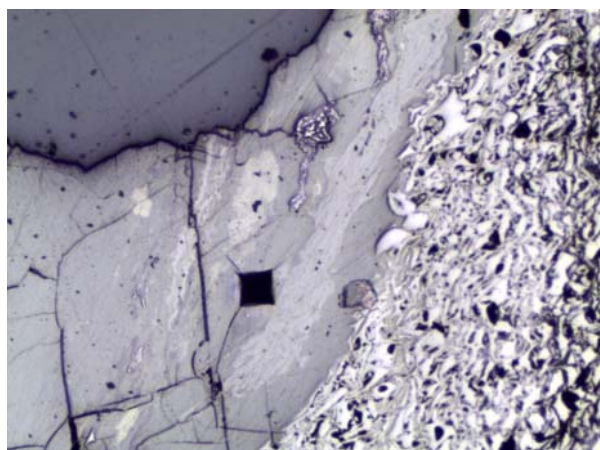
Rys. 10 Węgiel mylonityczny – mylonit właściwy. Próbkę pochodzą z KWK KWK Borynia-Zofiówka 406/1.
Pow. 500×, światło odbite, immersja

Mylonity właściwe

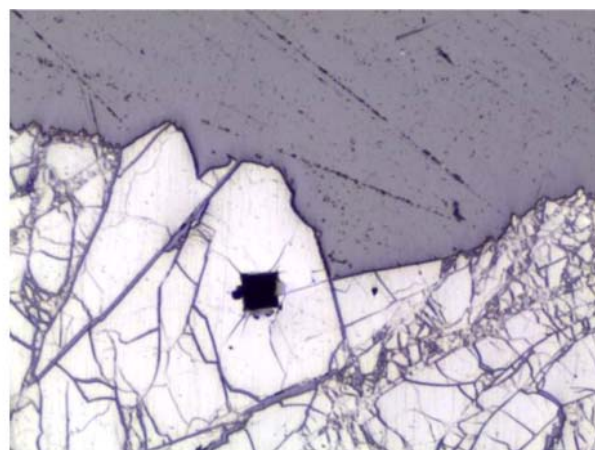
Są to najsilniej przeobrażone fragmenty węgla przyuskokowego. Praktycznie niedostrzegalne są w nich poszczególne okruchy i fragmenty materiału węglowego, a w ich miejscu tworzy się całkowicie nowa, jednolita struktura, często sfałdowana. Ponadto węgiel taki jest wtórnie spękany, co w jeszcze większym stopniu maskuje pierwotną strukturę. Tego typu struktury są w górnośląskich pokładach węgla najsłabiej rozpowszechnione i najtrudniejsze do interpretacji. Przykładowe fotografie mylonitu właściwego są przedstawione na rysunku 10.

Karbomineryty i mineryty

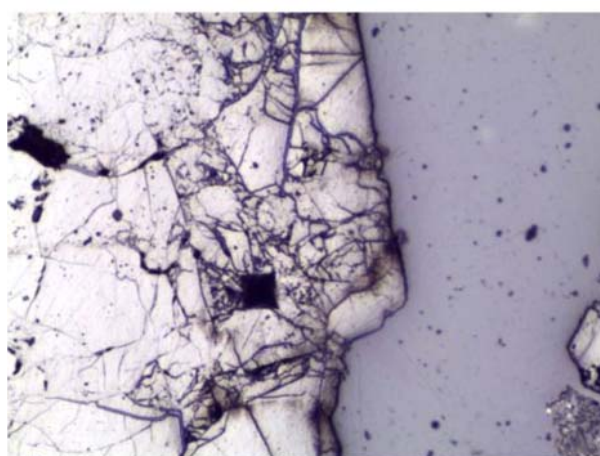
W niektórych przypadkach należy interpretację węgla przyuskokowego maskują występujące w rejonach uskoków domieszki substancji mineralnej. Węgiel kataklastyczny z domieszką (20-50%) materiału mineralnego to kataklaza karbominerytowa, gdy jego zawartość jest większa niż 50% jest to kataklaza minerytowa. Podobnie sytuacja wygląda w mylonicie. Węgiel mylonityczny z 20-50-cio % domieszką minerałów to mylonit karbominerytowy, lub gdy domieszka minerałów przekracza 50% jest to kataklaza minerytowa.



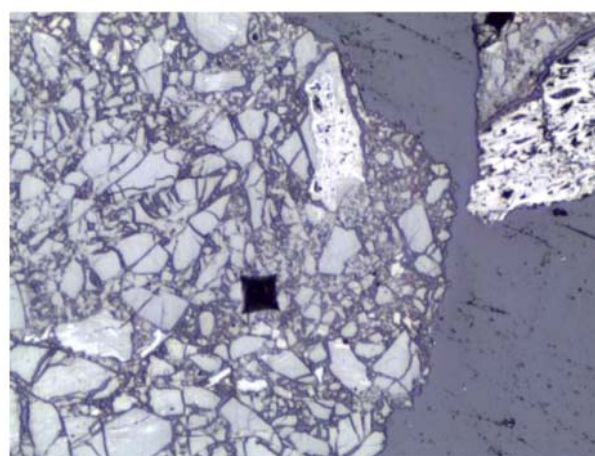
węgiel nieodmieniony



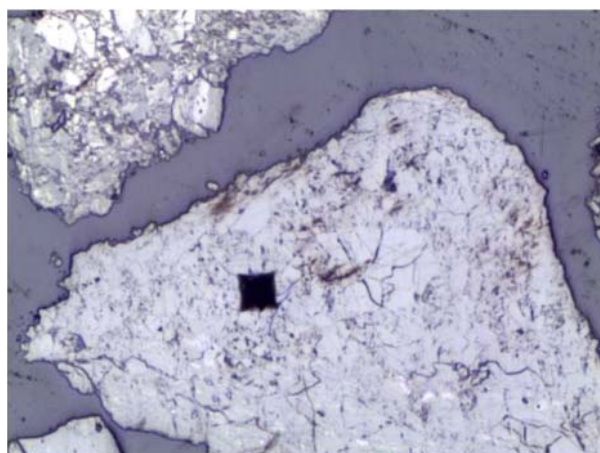
węgiel spękany



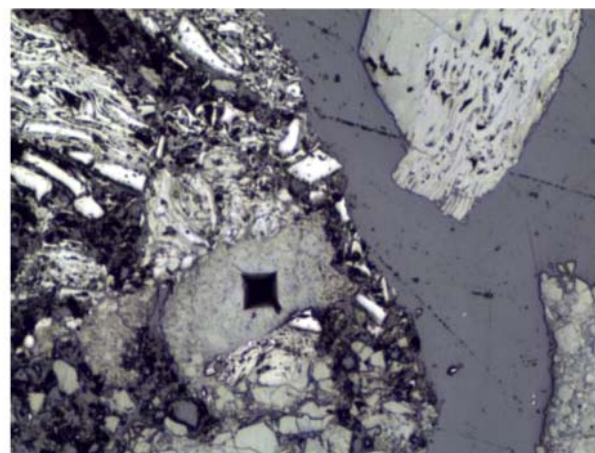
prekataklaza



mezokataklaza



premylonit



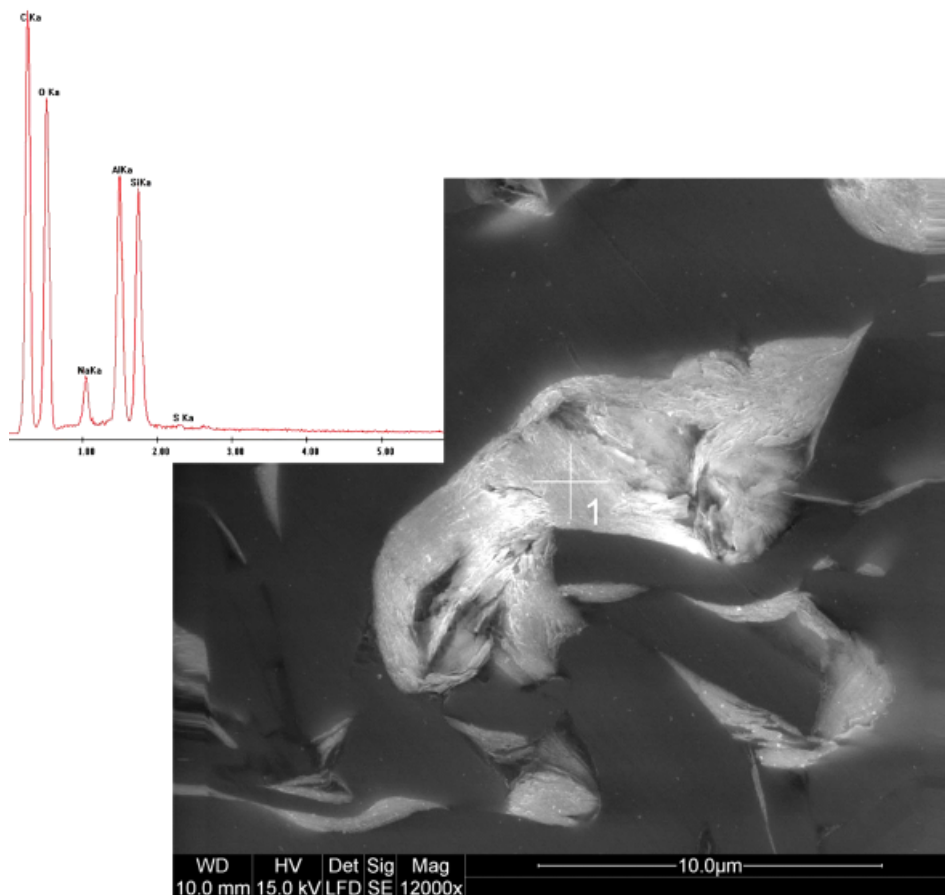
mylonit właściwy

Rys. 11. Efekt przeprowadzenia analizy mikrotwardości węgla charakteryzującego się różnym stopniem odmienienia strukturalnego z przyśkokowych pokładów GZW. Pozostałość po próbniku – stożku Vickersa – kwadratowy odcisk zaznaczony strzałką. Próbkę do analiz pochodzą z KWK Borynia-Zofiówka pokład 406/1, KWK Pniówek pokład 403/3. Pow. 500×, światło odbite, immersja

6. Wstępne analizy mikrotwardości węgla odmienionego strukturalnie

Badania mikrotwardości węgla są wykonywane na sprzęcie zintegrowanym z mikroskopem polaryzacyjnym, stąd użytkownik sam decyduje, które miejsce na próbce mikroskopowej poddawane jest analizie. Dzięki temu przebadano węgiel nieodmieniony; spękany; kataklastyczny oraz mylonit. Metoda Vickersa jest

mało inwazyjna, gdyż w jej rezultacie pozostaje na próbce (zgładzie polerowanym) jedynie niewielki (nie-wiele większy niż $0,01 \text{ mm}^2$) odcisk stożkowego próbnika. Fotografie przedstawiające efekt oddziaływania diamentowego stożka Vickersa na wybranych próbkach przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 12. Fotografia scanningowa (SEM/EDX) ilastej substancji w węglu kataklastycznym

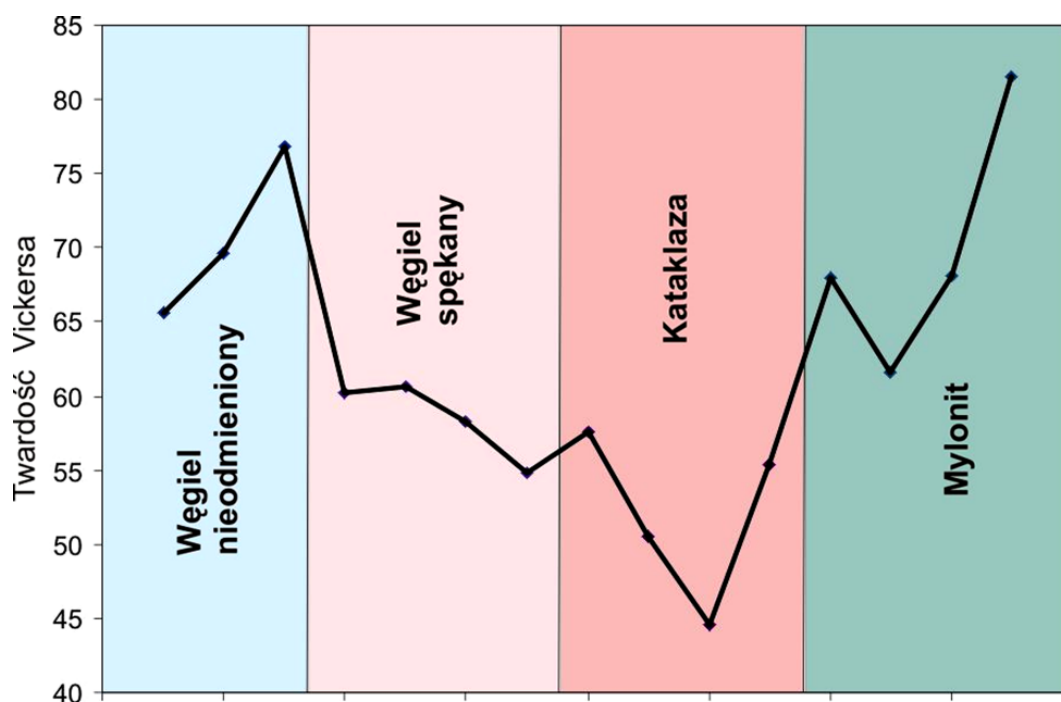
Ze względu na to, że mikrotwardość jest uzależniona od stopnia uwęglenia, to analizy zostały wykonane na próbkach węgla o zbliżonych wartościach R_0 (Tab. 2).

Tab. 2. Parametry mikrotwardości i refleksyjności witrinitu R_0 dla analizowanych próbek węgla przyuskokowego pobranych z kopalń Górnośląskiego Zagłębia Węglowego

Numer próbki	Refleksyjność witrinitu $[R_0]$	Twardość Vickersa $[N/mm^2]$	Nazwa wg zaproponowanej w pracy klasyfikacji
120/11 (Brzeszcze)	1,04	65,58	węgiel nieodmieniony
117/7/4 (Pniówek)	0,97	69,65	węgiel nieodmieniony
F-3 (Zofiówka)	1,17	76,80	węgiel nieodmieniony
120/5 (Brzeszcze)	1,04	60,16	węgiel nieznacznie spękany
120/8 (Brzeszcze)	1,04	60,59	węgiel spękany
120/1 (Brzeszcze)	1,04	58,31	węgiel spękany
117/7/3 (Pniówek)	0,97	54,86	węgiel spękany
120/2 (Brzeszcze)	1,04	57,53	mezokataklaza
117/7/6 (Pniówek)	0,97	50,54	prekataklaza
117/7/5 (Pniówek)	0,97	44,58	kataklaza właściwa
120/7 (Brzeszcze)	1,04	55,40	kataklaza karbominerytowa
120/4 (Brzeszcze)	1,04	67,94	premylonit
120/3 (Brzeszcze)	1,04	61,57	premylonit
120/10 (Brzeszcze)	1,04	68,12	premylonit
120/6 (Brzeszcze)	1,04	81,56	mylonit właściwy

Analiza wyników wykazała zależność mikrotwardości węgla od jego struktury (tab. 2, rys. 13). Węgiel o strukturze nieodmienionej, pocięty jedynie pojedynczymi spękaniami wykazywał wartości mikrotwardości Vickersa rzędu 65-76 [N/mm²]. Spękania, a przede wszystkim pojawianie się kataklazy powodowało osłabienie struktury poprzez zmniejszenie mikrotwardości. Węgiel spękany posiadał mikrotwardość rzędu 55-60 [N/mm²]. W kataklazie wartości twardości Vickersa zmniejszyły się do 57-45 [N/mm²]. Sytuacja ulegała zmianie w miarę mylonityzacji badanych próbek węgla. Obecność, mylonitu przesądziła o zwiększeniu mikrotwardości. Wartości tego parametru wyniosła od 62 do 68 dla premylonitu, aż do 82 [N/mm²] w mylonicie właściwym. Co interesujące, ten ostatni wynik charakteryzuje się na tyle dużą mikrotwardością, że przekroczył nawet wartości cechujące węgiel nieodmieniony.

Obecność substancji mineralnej, ilastej (rys. 12) nie wpłynęła znacząco na wyniki analizy. Jej dokładny wpływ nie został jednak szczegółowo przeanalizowany w niniejszej pracy.



Rys. 13. Mikrotwardość wg Vickersa na przykładzie próbek węgla ze stref przyukokowych z kopalń Górnoląskiego Zagłębia Węglowego

6. Wnioski

Powyższy artykuł składa się z dwóch zasadniczych części: obejmuje studium literaturowe oraz mikroskopowe badania struktur węgla odmienionego pod wpływem zaburzeń tektonicznych, w kontekście jego zmian strukturalno-teksturalnych oraz wpływu tych zmian na parametry węgla.

Na podstawie informacji zaczerpniętych z literatury wynika, że węgiel odmieniony strukturalnie, przyuskokowy wymaga precyzyjnego opisu, zwrócenia uwagi na niejednoznaczność niektórych „zwykajowych” określeń, które pojawiają się cyklicznie w artykułach.

Dokonano, bazując na istniejących w literaturze światowej klasyfikacjach węgla przyuskokowego, podziału i opisu węgla z polskich kopalń: Borynia-Zofiówka, Pniówek oraz Brzeszcze, pod kątem zmian strukturalnych.

Zwrócono uwagę na problem rozróżnienia spękań endo- i egzogenicznych, jako początkowego symptomu zmian strukturalnych węgla, pod wpływem zmian tektonicznych w pokładzie. Opisano poszczególne etapy destrukcji struktury i zaproponowano polską klasyfikację węgla odmienionego strukturalnie pod wpływem deformacji tektonicznych, co przedstawiono w tabeli nr 3. Ponadto zwrócono uwagę na występowanie w zuskokowanym pokładzie szczególnych typów struktur odmienionych cechujących się znaczną domieszką substancji mineralnej. Są to kataklazy i mylonity karbominerytowe (20-50% domieszki substancji mineralnej) i minerytowe (powyżej 50% substancji mineralnej)

Tab. 3. Klasyfikacja węgla kamiennego odmienionego strukturalnie na podstawie węgla przyuskokowego z górnoląskich pokładów Zofiówki, Pniówka i Brzeszcze

Typ struktury węgla		Charakterystyczne cechy
Węgiel nieodmieniony strukturalnie		Węgiel lity, brak spękań egzogenicznych, możliwa obecność endo-mikrospękań wynikających z naturalnych procesów uwęglania
Węgiel odmieniony strukturalnie	Węgiel spękany – egzomikrospękany	Sieć nieregularnych spękań o postdiagenetycznym pochodzeniu
	Kataklaza	Prekataklaza Gęsta sieć nieregularnych spękań. Struktury pierwotne wyraźnie dostrzegalne
		Mezokataklaza Bardzo gęsta sieć spękań, część okruchów pokruszona, przemieszczona. Struktury pierwotne częściowo zatarte
		Porfirokataklaza Silne spękania, częściowe roztarcie materiału. Dominacja dwóch wielkości populacji osobników (drobne i duże – 50-200µm okruchy). Struktury pierwotne dostrzegalne tylko w dużych fragmentach (porfiroklastach).
		Kataklaza właściwa Zmielone i przemieszczone względem siebie okruchy. Struktura pierwotna całkowicie zatarta
	Mylonit	Premylonit Etap przejściowy między kataklazą a mylonitem. Nakładanie się deformacji kruchych i plastycznych (cechy kataklazy właściwej i mylonitu właściwego)
		Mylonit właściwy Niemał całkowity brak okruchów, powstanie nowej, przeobrażonej struktury, często z mikrofałdami i wtórnymi spękaniem

Na podstawie wyników badań mikrotwardości wg Vickersa, dokonano wstępnych pomiarów twardości węgla w różnych fazach przemian strukturalnych, powstałych pod wpływem sił ścinających. Najmniejsza mikrotwardość występowała w węglu kataklastycznym oraz spékanym. W mylonicie natomiast była ona porównywalna do węgla nieodmienionego, a nawet niekiedy wyższa. Efekt zwiększenia parametru mikrotwardości w mylonicie może być rezultatem bardzo silnego sprasowania materiału, zmniejszenia jego przestrzeni porowej oraz zwiększenia stopnia uwęglania. Analizy ilościowe węgla strukturalnie odmienionego z pokładów, gdzie nastąpiły zjawiska gazogeodynamiczne (Zofiówka 2005 rok oraz Pniówek 2010 rok) – (Młynarczuk i Wierzbicki, 2009; Godyń, 2011, 2012) wykazały, że w węglu tym występowała zdecydowana dominacja materiału kataklastycznego i spékanego, natomiast mylonit praktycznie się tam nie pojawiał. Z uwagi na cechy mylonitu (specyficzne własności strukturalne i większą twardość), jego obecność może przekładać się na mniejszą skłonność do wyrzutu w pokładzie węgla kamiennego, a przeważająca zawartość silnie rozdrobnionej i słabej kataklazy, znacznie osłabia węgiel (Jiang et al., 2004). Tak więc cechy strukturalne, w powiązaniu z mikrotwardością węgla mogą dać pewne, ogólne informacje o wyrzutowości danego pokładu. Ponadto, na podstawie testów mikrotwardości węgla, które są wykonywane w skali mikro, można będzie próbować wyestymować cechy w skali makro. Analiza jednoosiowa służąca pomiarom wytrzymałości węgla, jest przeprowadzana w zbliżony sposób, jak to ma miejsce w pomiarach mikrotwardości.

Praca została wykonana w roku 2011 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

7. Literatura

- Bodziony J., Kraj W., Ratajczak T., 1990: *Zastosowanie stereologii w badaniach struktury węgla dolnośląskich*, w: Górotwór jako ośrodek wielofazowy – wyrzuty skalno-gazowe, red. J. Litwiniszyn, Wyd. AGH Kraków.
- Bodziony J., Lama R.D., 1996: *Sudden outburst of gas and coal in underground coal mines*. Publisher Lama & Associates, 130 Brokers Road, Mt. Pleasant, NSW 2519, Australia.
- Cao Y, Mitchell G.D., Davis A., Wang D., 2000: *Deformation metamorphism of bituminous and anthracite coals from China*. International Journal of Coal Geology, 43, 227-242.
- Cao Y., Davis A., Liu R., Liu X., Zhang Y.: 2003: *The influence of tectonic deformation on some geochemical properties of coals-a possible indicator of outburst potential*. International Journal of Coal Geology, 53 (2003), 69-79.
- Cao Y., He D., Gluck D. 2001: *Coal and gas outbursts in footwalls of reverse faults*. International Journal of Coal Geology, 48 (2001), 47-63.

- Gentzis T., 2006: *Economic coalbed methane production in the Canadian Foothills: Solving the puzzle*. International Journal of Coal Geology, 65 (2006), 79-92.
- Godyń K., 2011: *Advancement of structural changes of near-fault coals as a parameter useful in predicting the possibility of gas-geodynamic phenomena*. Dokumenta Geonica. 8 czesko-polska konferencja „Geologia Zagłębi Węglonośnych” 2001/1. 8 Ustav Geonoky AV CR, v.v.I. Ostrava 2011.
- Godyń K., 2012: *Wpływ nieciągłości tektonicznych na strukturę wewnętrzną węgla kamiennego pochodzącego z wybranych pokładów KWK Pniówek, Borynia-Zofiówka i Brzeszcze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego*. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego 448: 215-228, 2012 R.
- Guo H., Xue S., Reece D., Yarlagadda S., Identify and Collate Leading Safety Technologies: <http://www.mirmgate.com/>.
- Instrukcja dotycząca bezpiecznego wydobywania węgla...* 1989: Инструкция По Безопасному Ведению Горных Работ На Пластах, Опасных По Безопасным Выбросам Угля, Порода И Газа. Moskwa 1989.
- Jiang B., Ju Y., Quin Y., 2004: *Textures of tectonic coals and their porosity*. Mining and Science technology. Taylor&Group, London, 317-320.
- Ju Y., JIANG B., HOU Q. & WANG G., 2005: *Relationship between nano- scale deformation of coal structure and metamorphic- deformed environments*. Chinese Science Bulletin Vol. 50, No. 16 (1784-1795), 2005.
- Kožušniková A., 2009: *Determination of microhardness and elastic modulus of coal components by using indentation method*. Geolines 22, 2009.
- Kupczyk M., Jakrzewski D., Libuda P., Cieszkowski P., 2005: *Problematyka oceny mikrotwardości cienkich powłok wytworzonych metoda łukowo-plazmowa*. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Nr 2, Budowa Maszyn i Zarządzania Produkcją, 2005.
- Li H., Ogawa Y., Shimada S. 2003: *Mechanism of methane flow through sheared coals and its role on methane recovery*. Fuel, 82 (2003), 1271-1279.
- Libicki J., Szczepiński J., 2007: *Promocja „czystego” węgla w działaniach Europejskiego Stowarzyszenia Węgla Kamiennego i Brunatnego (EURACOAL)*. Węgiel Brunatny, nr 1/58, 2007.
- Liu D., Yao Y., Tang D., Tang S., Che Y., Huang W., 2009: *Coal reservoir characteristics and coalbed methane resource assessment in Huainan and Huaibei coalfields*. Southern North China International Journal of Coal Geology, 79 (2009), 97-112.
- Ming L., Bo J., Shoufa L., Jilin W., Mingjun J., Zhenghui Q., 2011: *Tectonically deformed coal types and pore structures in Puhe and Shanchahe coal mines in western Guizhou*. Mining Science and Technology (China), 21 (2011), 353-357.
- Młynarczuk M., Wierzbicki M., 2009: *Stereological and profilometry methods in detection of structural deformations in coal samples collected from the rock and outburst zone in the „Zofiówka” colliery*. Arch. Min. Sci., vol. 54, issue 2 (2009), p. 189-201.
- Shepherd, J., Rixon, L.K., Creasey, J.W., 1980: *Analysis and prediction of geological structures associated with outbursts at Collinsville, Queensland*. The Occurrence, Prediction and Control of Outbursts in Coal Mines Symposium, Australian Institute of Mining and Metallurgy, Parkville, Victoria, Australia, 159-171.
- Yan-bin Y. and Dameng L., 2009: *Microscopic characteristics of microfractures in coals: an investigation into permeability of coal*. Procedia Earth and Planetary Science, 1 (2009), 903-910.

Changes in the internal structure of hard coal originated in the areas of tectonic disturbances, and the possibility of occurrence of gas-geodynamic events

Abstract

In hard coal mines, in the direct vicinity of faults, there exist areas particularly prone to occurrence of uncontrollable gas-geodynamic events. The existence of these areas is due to a specific, nonstandard internal structure of coals present in a tectonically disturbed (i.e., near-fault) zone. The paper provides a detailed description of these internal distortions in coal, as well as of the type and degree of these alterations. For the purpose of the research, the following methods were used: polarized light microscopy, reflected light microscopy, and scanning electron microscopy (SEM) with an EDX adapter. Also, measurements of microhardness of coal were performed, for various stages of its internal structure damage. To this end, a microhardness tester making use of the Vickers method was applied. The results of the studies served as a basis for standardizing “structurally altered” coals, and helped to determine their susceptibility to a possibility of outburst initiation in hard coal mines.

Keywords: hard coal, faults, hard coal structures, outbursts, stereological analysis