



JACEK NOWAK*

Wpływ stopnia termicznego przeobrażenia odpadów powęglowych na ich skład mineralny i petrograficzny

Wprowadzenie

Jedną z najważniejszych gałęzi polskiego przemysłu wydobywczego jest górnictwo węgla kamiennego. Górnictwo to w sposób nierozzerwalny związane jest z wytwarzaniem znacznej ilości odpadów. Obecnie z uwagi na aspekty ekonomiczne, ekologiczne i prawne dąży się do minimalizowania ilości wytwarzanych odpadów oraz do gospodarczego wykorzystania odpadów wytworzonych (Krieger i Sroga 2002; Nowak i Frejowski 2007; Dulewski i in. 2010). Jednakże w XIX i pierwszej połowie XX wieku znaczna część odpadów trafiała na zwałowiska (hałdy). Zwałowiska te często nie spełniały obecnie obowiązujących wymogów ochrony środowiska. Dotyczy to zwłaszcza odizolowania odpadów od wód gruntowych oraz prewencji przeciwpożarowej (zagęszczenia zdeponowanych odpadów, które ogranicza wnikanie tlenu w głąb zwałowiska). Na niezagęszczonych zwałowiskach zawierających odpady z dużą zawartością substancji organicznej często dochodziło do samozagrzewania odpadów, a w konsekwencji do powstawania pożarów endogenicznych. Wzrost temperatury spowodowany pożarami prowadził do znacznych zmian w składzie mineralnym i petrograficznym materiału skalnego, a co za tym idzie do zmiany wielu cech i parametrów tych odpadów.

Przeobrażone termicznie odpady powęglowe są współcześnie na obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) często wykorzystywane jako substytut kruszyw naturalnych. Szczególnie często znajdują one zastosowanie w budownictwie drogowym.

* Dr inż., Instytut Geologii Stosowanej, Politechnika Śląska; e-mail: jacek.nowak@polsl.pl

Decyduje o tym ich dostępność (stare zwałowiska odpadów powęglowych licznie występują na obszarze GZW), niski koszt pozyskania (łatwość rozpoczęcia wydobycia, łatwość urabiania kruszywa, które często ogranicza się do załadunku), niskie koszty transportu (małe odległości pomiędzy budowanymi obiektami a zwałowiskami) oraz dobre parametry geotechniczne pozyskiwanego kruszywa (Porszke 2003).

Największą wadą kruszyw pozyskiwanych na bazie termicznie przeobrażonych (przepalonych) odpadów powęglowych jest ich niejednorodność. Jednym z głównych czynników wpływających na ich zmienność jest stopień termicznego przeobrażenia odpadów. Do pozostałych czynników wpływających na tę niejednorodność należy zaliczyć zróżnicowanie pierwotnego składu petrograficznego odpadów zdeponowanych na zwałowisku oraz zróżnicowanie uziarnienia odpadów.

1. Pierwotny skład petrograficzny odpadów powęglowych

Wydobycie węgla w kopalniach głębinowych wymaga szeregu prac udostępniających i przygotowawczych, takich jak drążenie wyrobisk kapitalnych (szybów i wyrobisk, które mają funkcjonować przez cały czas istnienia kopalni), wyrobisk udostępniających, eksploatacyjnych itp. Prace te prowadzone są głównie w skałach płonnych współwystępujących z pokładami węgla. Są to przede wszystkim okruchowe skały osadowe: piaskowce, mułowce i iłowce. Zdecydowanie rzadziej występują: skały węglanowe (głównie syderyty) czy piroklastyczne (tonsteiny) oraz zlepieńce. Urabianie tych skał, na etapie robót udostępniających odbywa się często z wykorzystaniem materiałów wybuchowych lub kombajnów chodnikowych. Prowadzi to do powstawania głównie odpadów grubookruchowych: gruzów i żwirów, a także bloków i gładów.

Drugim ważnym procesem, w którym wytwarzane są odpady powęglowe, są roboty eksploatacyjne. Obecnie prowadzi się je głównie z zastosowaniem systemów ścianowych; węgiel urabiany jest za pomocą kombajnów, jednak w XIX i XX wieku wykorzystywano także inne systemy (Borecki i Strzeszowski red. 1964; Burtan i in. 2008; Zorychta i Burtan 2008). Wraz z węglem bardzo często urabiane są skały stanowiące przerosty, a także bezpośrednie stropy lub spągi pokładu. Skały te oddzielone zostają od urobku w procesie przerobczym. W trakcie różnych procesów wzbogacania węgla wytwarza się odpady o zróżnicowanej granulacji – od 250 do poniżej 0,5 mm (Twardowska 1981; Szczepańska 1987; Mazurkiewicz 1990). Pod względem petrograficznym największy udział wśród odpadów wykazują iłowce stanowiące przerosty lub bezpośrednie stropy i spągi pokładów węgla (Twardowska 1981; Szczepańska 1987; Chodyniecka i Adamczyk 1997).

Można więc przyjąć, że w pierwotnym składzie petrograficznym odpadów powęglowych na obszarze GZW dominują iłowce. Mułowce i piaskowce występują w zdecydowanie mniejszej ilości. W odpadach występuje także zmienna ilość węgla, zarówno w formie rozproszonej (głównie w iłowcach, łupkach węglowych), w formie laminek i cienkich warstewek w skałach płonnych, jak i w postaci bryłek węgla. Proporcje pomiędzy poszczegól-

gólnymi składnikami petrograficznymi odpadów są zmienne i zależą między innymi od warstw litostratygraficznych z jakich pochodzą odpady (w jakich kopalnia prowadziła eksploatację), rodzaju prowadzonych robót, stosowanych procesów wzbogacania itp.

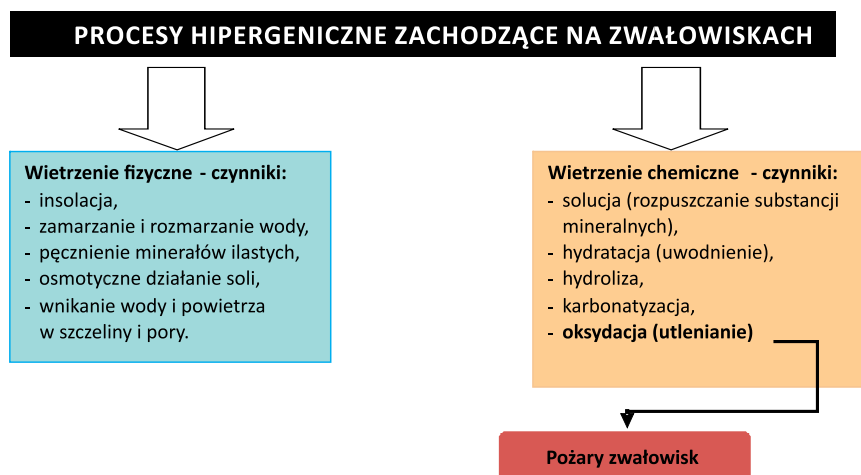
Skład petrograficzny odpadów decyduje o ich składzie mineralnym. W pierwotnym składzie mineralnym odpadów powęglowych przeważają minerały ilaste: kaolinit oraz w mniejszej ilości illit i chloryty. Poza minerałami ilastymi powszechny jest także kwarc. Na etapie deponowania odpadów często występują w nich disiarczki żelaza: piryt i markasyt. Mogą one jednak szybko ulegać procesom wietrzenia z wydzieleniem jonu SO_4^{2-} , który reagując ze składnikami odpadów może krystalizować w formie siarczanów (Twardowska 1981; Szczepańska i Krawczyk 1993). Z minerałów węglanowych najczęściej występuje syderyt, który jest głównym składnikiem mineralnym sferysyderytów lecz może także występować jako spoiwo w piaskowcach czy jako składnik mułowców i iłowców.

2. Czynniki powodujące przeobrażenia w odpadach powęglowych

Deponowanie odpadów powęglowych na zwałowiskach stwarza możliwość łatwego ich kontaktu z powietrzem atmosferycznym oraz wodami opadowymi. W efekcie następuje ich wietrzenie fizyczne oraz chemiczne (rys. 1). Wietrzenie biologiczne, ze względu na bardzo trudne warunki wegetacji roślin na zwałowiskach, odgrywa najmniej istotną rolę wśród procesów wietrzenia. Istotną rolę może odgrywać natomiast oddziaływanie mikroorganizmów w procesach chemicznego wietrzenia disiarczków żelaza (Twardowska 1981; Smith i Ward 1984; Szczepańska i Krawczyk 1993).

Intensywność procesów hipergenicznych zależy w głównej mierze od możliwości wnikiwania tlenu atmosferycznego i wody w głąb zwałowiska, co zależy przede wszystkim od struktury zwałowiska. Procesy wietrzenia zachodzą szczególnie intensywnie w starych zwałowiskach, na których odpady powęglowe deponowane były bez zagęszczania (Różański 2003; Gumińska i Różański 2005). Na zwałowiskach odpadów zagęszczonych mechanicznie, wietrzenie fizyczne zachodzi do głębokości około jednego metra, zaś na zwałowiskach niezagęszczonych znacznie głębiej (Twardowska 1981).

Spośród szerokiej gamy procesów hipergenicznych oddziałujących na odpady powęglowe największy wpływ na zmiany składu mineralnego i cech petrograficznych mają pożary zwałowisk (rys. 1). Pożary te powodują lokalny wzrost temperatury w zwałowisku do kilkuset stopni, a nawet powyżej tysiąca czterystu stopni Celsjusza (Urbański 1983; Łączny i in. 2011; Gogola i in. 2012). Innym efektem pożarów jest spadek zawartości tlenu i pojawienie się gazów pożarowych, co może powodować powstanie warunków redukcyjnych w zwałowisku lub jego części (Grapes 2006; Heffer i in. 2007). Z uwagi na fakt, że zwałowiska nie są odizolowane od atmosfery i gazy pożarowe mogą migrować poza ich obręb, nie będzie dochodziło do wzrostu ciśnienia gazów. Dlatego wpływ ciśnienia na przeobrażenia cech petrograficznych i składu mineralnego jest niewielki. Warunki panujące w czasie pożarów odpadów powęglowych na zwałowiskach porównać można do natural-



Rys. 1. Procesy zachodzące w zwałowiskach odpadów powęglowych

Fig. 1. Processes occurring in coal mining waste dumps

nych procesów metamorfizmu kontaktowego, charakteryzującego się wysokimi temperaturami i umiarkowanym ciśnieniem.

3. Charakterystyka odpadów powęglowych termicznie przeobrażonych

3.1. Podział odpadów ze względu na stopień termicznego przeobrażenia

Badania prowadzone przez autora na zlokalizowanych na terenie GZW zwałowiskach odpadów powęglowych (między innymi: Składowisko Nr IV KWK Nowy Wirek w Rudzie Śląskiej, zwałowisko KWK Prezydent i zwałowisko KWK Barbara-Chorzów w Chorzowie, zwałowisko po KWK Pstrowski w Zabrze, składowisko KWK Śląsk w Świętochłowicach i inne) pozwoliły ustalić typowy skład petrograficzny i mineralny odpadów. Skład ten w znacznej mierze zależał od tego, czy na zwałowisku zachodziły procesy termiczne (pożary endogeniczne). Obserwacje terenowe przeprowadzone na zwałowiskach, które w przeszłości wykazywały aktywność termiczną, pozwoliły na wyróżnienie trzech stref o różnym stopniu termicznego przeobrażenia odpadów. Są to:

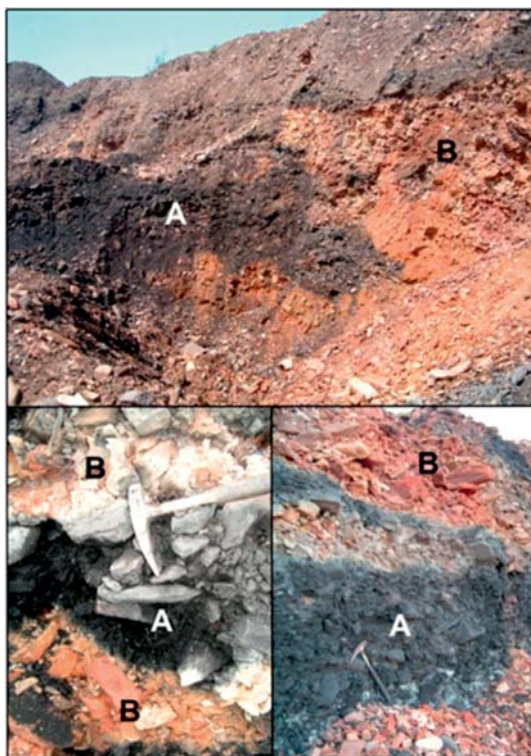
- ◆ strefa nieprzeobrażona termicznie (nieprzepalona) – *thermally untransformed zone*,
- ◆ strefa umiarkowanie przeobrażona termicznie (przepalona) – *moderately thermally transformed zone*,
- ◆ strefa intensywnie przeobrażona termicznie (spieczona) – *intensively thermally transformed zone*.

Strefy te wydzielone zostały na podstawie cech makroskopowych odpadów, zwłaszcza ich barwy oraz charakterystyki strukturalno-teksturalnej. Zróżnicowanie materiału odpadowego w poszczególnych strefach potwierdza także zmiana składu mineralnego odpadów.

3.1.1. Strefa nieprzeobrażona termicznie

Odpady w strefie nieprzeobrażonej termicznie cechują się barwą ciemnoszarą do czarnej (fot. 1). Jest to pierwotna barwa odpadów powęglowych związana z obecnością w nich węgla organicznego. Skład petrograficzny odpadów w tej strefie zbliżony jest do pierwotnego składu odpadów z okresu ich deponowania.

Struktury, tekstury oraz skład mineralny odpadów w tej strefie są identyczne lub prawie identyczne jak w momencie ich deponowania. Rozpatrując odpady tej strefy jako całość uznać należy, że mają one teksturę luźną oraz strukturę wynikającą z wielkości okruchów (klasy ziarnowej). Jednak rozpatrując poszczególne okruchy odpadów można zidentyfikować ich tekstury i struktury odpowiadające skałom karbońskim GZW współwystępującym z pokładami węgla. Można bez trudu rozpoznać, czy dany okruch pochodzi z iłowca, mułowca czy piaskowca itd. Niewielkie zmiany strukturalno-teksturalne związane są z wietrzeniem fizycznym prowadzącym do rozpadu ziarnowego lub do rozmakania i rozłaskowywania się części odpadów. W składzie mineralnym dominują niezmienione minerały wystę-



Fot. 1. Fragment eksploatowanego zwałowiska odpadów pogórnich.

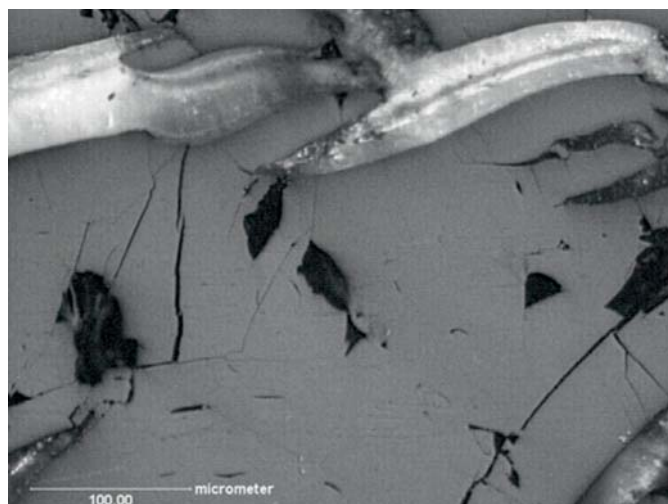
A – strefy nieprzeobrażone termicznie (nieprzepalone),
B – strefy umiarkowanie przeobrażone termicznie (przepalone)

Phot. 1. A part of exploited coal mining dump.

A – thermally untransformed zones (non burnt), B – moderately thermally transformed zone (burnt)

pujące w skałach współwystępujących z pokładami węgla na obszarze GZW. Powszechnie obecny jest kwarc terygeniczny. Z minerałów ilastych przeważa kaolinit, występuje także illit i chloryty. Minerale węglanowe reprezentowane są w głównej mierze przez syderyt. W odpadach powęglowych, które przez wiele lat poddawane były procesom hipergenicznym, obserwuje się zanik obecności disiarczoków żelaza (pirytu, markasytu). Spowodowane jest to ich małą odpornością na wietrzenie. W ich miejsce pojawiają się nowe minerały, które nie występowały w skałach w czasie eksploatacji węgla. Są to między innymi jarosyt, a także gips i inne (Nowak 2006; Gazdecki 2007).

Ważnym składnikiem odpadów powęglowych w strefach nieprzeobrażonych termicznie jest substancja organiczna – węgiel. Badania mikroskopowe pozwoliły wykazać zachodzące w nim zmiany. Stwierdzono obecność charakterystycznych, rozgałęziających się spękań związanych z wietrzeniem węgla (fot. 2) (Hanak i Nowak 2008). Spękania te często wypełnione były wtórnymi minerałami, głównie siarczanowymi.

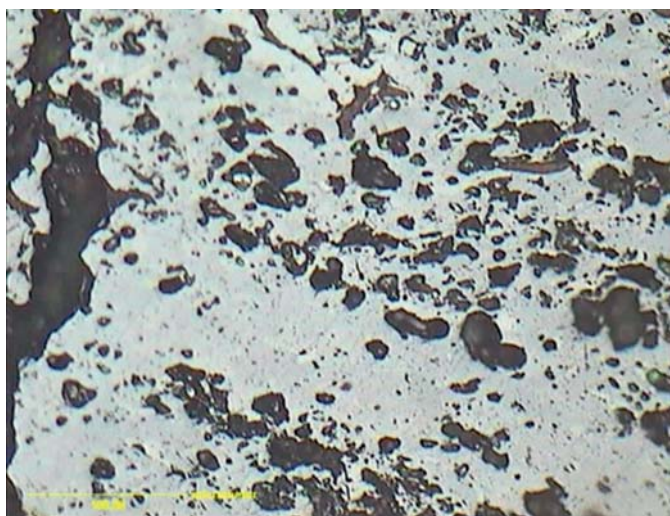


Fot. 2. Węgiel ze strefy nieprzeobrażonej termicznie. Widoczne wykruszenia i spękania wietrzeniowe, częściowo wypełnione wtórną substancją mineralną. Światło odbite, obiektyw imersyjny, pow. 200×

Phot. 2. Coal from the thermally untransformed zone. Visible crushing points and weathering fractures, partly filled with secondary mineral matter. Reflected light, immersion lens, magnification 200×

W przypadku, gdy na odpady w strefie nieprzeobrażonej termicznie oddziaływała podwyższona temperatura ze zlokalizowanych w pobliżu ognisk pożarowych dochodziło do termicznego przeobrażenia węgla. Związane jest to z faktem, że substancja organiczna jest zdecydowanie bardziej czuła na zmiany temperatury niż substancja mineralna. Efekty tych procesów zaznaczają się przede wszystkim w obrazach mikroskopowych poprzez: zmianę refleksyjności, pojawienie się porów różnej wielkości i kształtu, pojawienie się anizotropii optycznej wityritu, zmiany składu petrograficznego (fot. 3).

Oddziaływanie podwyższonej temperatury wpływa także na zmiany parametrów technologicznych węgla, zwłaszcza zawartości części lotnych V^{daf} (Ćmiel i Misz 2005; Hanak



Fot. 3. Węgiel przeobrażony termicznie pod wpływem pożaru zwalowiska. Widoczne liczne pory powstałe w wyniku odgazowania. Światło odbite, obiektyw imersyjny, pow. 200×

Phot. 3. Coal thermally transformed under influence of dump fire. Numerous visible pores originated as an effect of degassing. Reflected light, immersion lens, magnification 200×

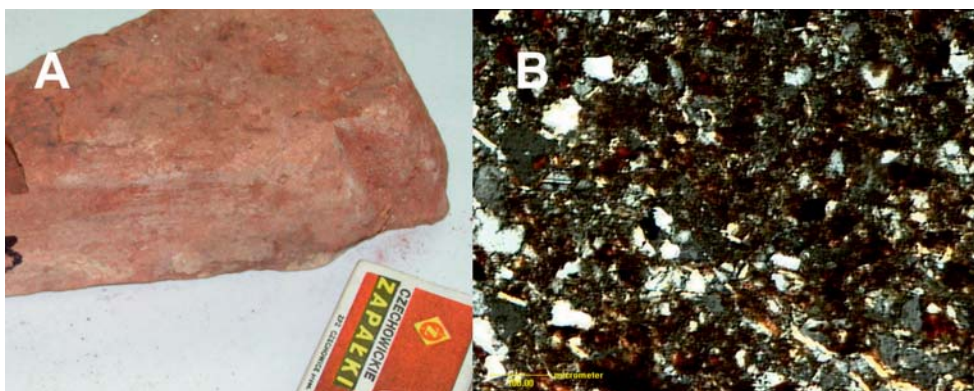
i Nowak 2008, 2010). Makroskopowo przeobrażenia termiczne węgla obserwowane są rzadko. Sporadycznie spotyka się jedynie spękania węgla lub jego skoksowanie.

3.1.2. Strefa umiarkowanie przeobrażona termicznie

W wyniku wypalenia się substancji organicznej zanika szara/czarna barwa odpadów powęglowych. W związku z tym odpady w strefie umiarkowanie przeobrażonej termicznie (przepalanej) wykazują barwę cegląstą, różową, pomarańczową, czasami kremową (fot. 1). Zabarwienie to zależne jest w głównej mierze od zawartości w odpadach minerałów zawierających żelazo, w których w wyniku pożaru uległo ono utlenieniu (Grapes 2006; Nowak 2006). Fragmenty skał w strefie umiarkowanie przeobrażonej termicznie zachowały pierwotne struktury skał współwystępujących z pokładami węgla – bez trudu można ustalić, czy dany fragment pochodził z iłowca, mułowca czy piaskowca. W niektórych fragmentach skał pojawia się tekstura kierunkowa – zaznacza ją zmiana intensywności zabarwienia wynikająca z obecności w skale warstewek różniących się zawartością żelaza.

Odpady powęglowe ze strefy umiarkowanie przeobrażonej termicznie – zwłaszcza iłowce i mułowce – mogą wykazywać właściwości zbliżone do klinkieru (Grapes 2006). Parametry geotechniczne tych odpadów odpowiadają wymaganiom stawianym materiałom do budowy nasypów drogowych (Porszke 2003). Z uwagi na to odpady ze stref umiarkowanie przeobrażonych termicznie (przepalonych) często znajdują zastosowanie jako substytut naturalnych kruszyw w budownictwie drogowym.

Przemiany, jakie zaszły w odpadach ze stref umiarkowanie termicznie przeobrażonych, spowodowały także wyraźne zmiany ich składu mineralnego. Badania mikroskopowe pozwoliły wykazać całkowite lub znaczne wypalenie się węgla. W odpadach z tej strefy nie stwierdza się także obecności kaolinitu, który jest jednym z głównych składników mineralnych odpadów w strefie nieprzeobrażonej termicznie. Brak w odpadach kaolinitu jest efektem oddziaływania temperatury z zakresu 360–720°C, w której następuje jego dehidroksylacja i przejście w metakaolinit (fot. 4). Także minerały węglanowe, jeżeli występowały pierwotnie w odpadach, mogą ulec termicznemu rozpadowi. Produktem rozpadu syderytu jest hematyt lub maghemit, które nadają odpadom ze strefy umiarkowanie termicznie przeobrażonej ceglaste zabarwienie.



Fot. 4. Mułowiec ze strefy umiarkowanie przeobrażonej termicznie
A – widok makroskopowy, B – mikrofotografia w świetle przechodzącym; widoczne ziarna kwarcu pomiędzy którymi znajduje się izotropowy metakaolinit i skupienia hematytu. Powiększenie 100×, nikole skrzyżowane

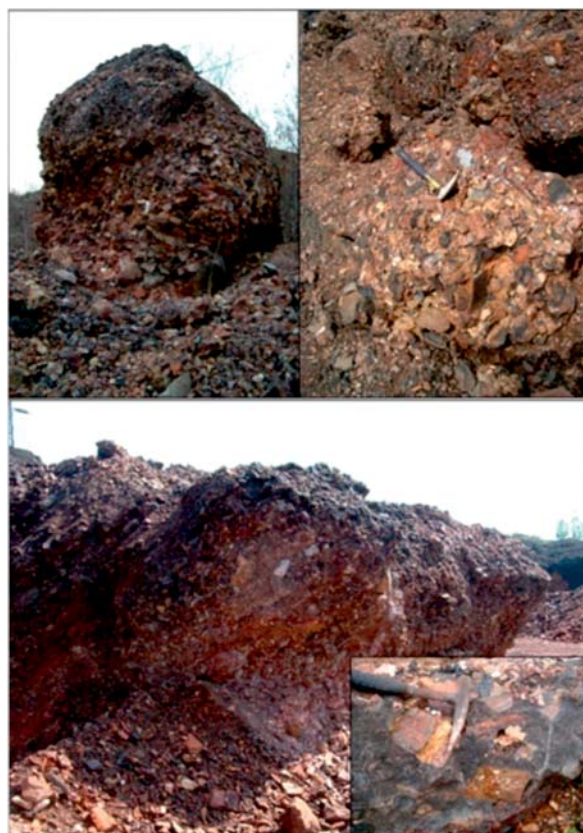
Phot. 4. Mudstone from moderately thermally transformed zone

A – macroscopic view, B – microphotography in reflected light; visible quartz grains and between them isotropic metakaolinite and concentrations of hematite. Magnification 100×, crossed nicols

3.1.3. Strefa intensywnie przeobrażona termicznie

Najsilniejsze zmiany występują w odpadach ze stref intensywnie przeobrażonych termicznie. Ich cechy petrograficzne zdecydowanie odbiegają od cech skał, które pierwotnie zostały zdeponowane na zwałowisku. Zmiany te dotyczą nie tylko zabarwienia czy składu mineralnego, ale także struktur i tekstur.

Odpady w strefie intensywnie przeobrażonej termicznie nie wykazują, jak miało to miejsce w strefach: nieprzeobrażonej termicznie i umiarkowanie przeobrażonej termicznie, tekstury luźnej. Poszczególne odłamki i okruchy skalne są ze sobą w mniejszym lub większym stopniu połączone – spieczone lub sklezione. Pustki pomiędzy odłankami skalnymi są czasami w różnym stopniu wypełnione przez materiał, który uległ stopieniu i zastygł pomiędzy okruchami skalnymi w formie szkliwa lub żuźla (fot. 5). W najsilniej zmienionych miejscach nie jest możliwe rozróżnienie poszczególnych okruchów skalnych, odpady tworzą



Fot. 5. Strefy intensywnie termicznie przeobrażone (spieki) pominięte w czasie eksploatacji kruszywa

Phot. 5. Intensively thermally transformed zones (sinters) omitted during exploitation of aggregates

jednorodną przetopioną i zastygłą masę. Masa ta najczęściej ma teksturę porowatą, która upodabnia ją do zastygłych potoków lawowych; określana bywa w literaturze angielskiej jako paralawa (Masalehdani i in. 2007; Vapnik i in. 2007).

Barwa odpadów w tej strefie wykazuje znaczne zróżnicowanie. Może ona być brunatna, ciemnowiśniowa, a także grafitowo-szara. Barwa odpadów powęglowych intensywnie przeobrażonych jest ciemniejsza niż odpadów powęglowych umiarkowanie termicznie przeobrażonych. Jest to związane z występującymi w tej strefie w czasie pożarów warunkami redukcyjnymi, które wpływają na skład mineralny odpadów. Warunki redukcyjne powstają lokalnie w wyniku całkowitego wypalenia się tlenu i obecności gazów pożarowych: wodoru, tlenu węgla, siarkowodoru, metanu i innych (Grapes 2006; Hoffer i in. 2007).

W badanych fragmentach skał ze strefy intensywnie termicznie przeobrażonej przeważa tekstura porowata. Pory mają zróżnicowany, najczęściej owalny lub okrągły kształt i wielkość dochodzącą do kilkunastu milimetrów. Pierwotne tekstury skał okruchowych uległy przeobrażeniu, nie jest możliwe stwierdzenie, czy dany fragment skały powstał w wyniku przeobrażenia iłowca, mułowca czy piaskowca.

Bardzo wielkie zmiany zaszły także w składzie mineralnym odpadów. Spośród minerałów, które występowały w odpadach w momencie ich deponowania na składowisku, w strefie intensywnie przeobrażonej termicznie występuje jedynie kwarc. Inne minerały, w tym minerały ilaste, węglany czy substancja organiczna (węgiel) uległy termicznemu rozpadowi lub przeobrażeniom. Kwarc występujący w odpadach w strefie intensywnie termicznie przeobrażonej może być zarówno pozostałością po kwarcu pierwotnie występującym w skałach jak również końcowym produktem termicznych przeobrażeń glinokrzemianów (np. cristobalit jest jednym z końcowych produktów rozpadu kaolinitu). Kwarc w odpadach intensywnie termicznie przeobrażonych cechuje się obtopieniami krawędzi ziaren, a także występowaniem spękań powstałych w wyniku naprężeń w czasie przeobrażenia fazowego niskotemperaturowego kwarcu- β w wysokotemperaturowy kwarc- α w temperaturze 573°C. Dla składu mineralnego odpadów ze strefy intensywnie termicznie przeobrażonej charakterystyczna jest obecność szkliwa. W obrazach mikroskopowych jest ono brunatne lub beżowe (fot. 6). Bardzo często szkliwo stanowi masę podstawową, w której znajdują się ziarna kwarcu oraz minerały wysokotemperaturowe, które wykrytalizowały w czasie pożaru zwałowiska. Zalicza się do nich (rys. 2): kordieryt, indialit, sekaninait, mullit, sillimanit, magnetyt, hercynit, magnezjoferryt i pirokseny: hipersten, klinoferrosyllit, żelazo rodzime, wollastonit (Hanak i Porszke 2006; Nowak 2006, 2008; Jonczy i in. 2012).



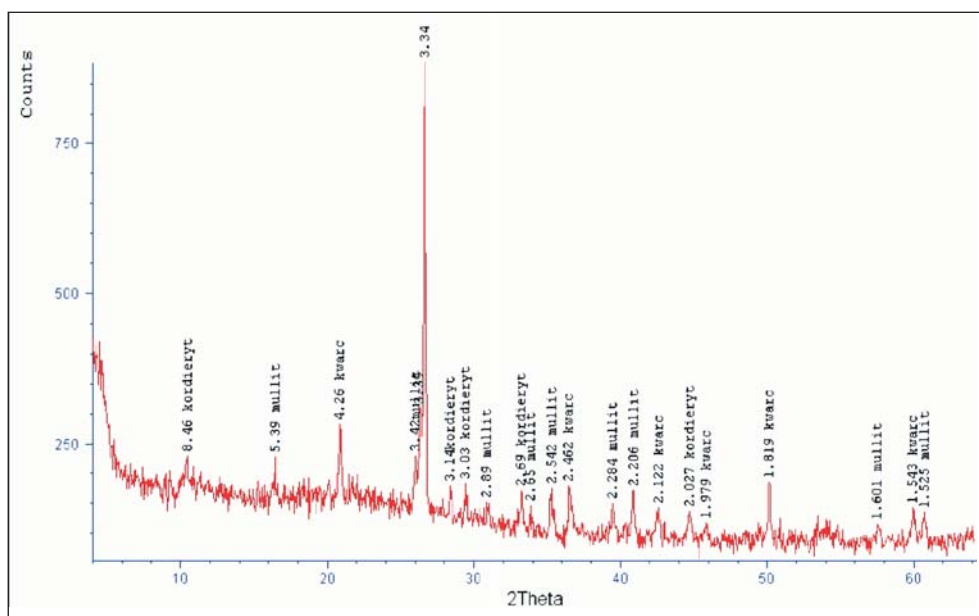
Fot. 6. Odpad ze strefy intensywnie termicznie przeobrażonej (spiek)

A – obraz makroskopowy z widocznymi porami, B – mikrofotografia w świetle przechodzącym; widoczne brunatne szkliwo z licznymi kryształami magnetytu (czarne kostki) i kordierytu (przezroczyste słupki), z lewej pory. Powiększenie 100×, jeden nikol

Phot. 6. Waste from the intensively thermally transformed zone (sinter)

A – macroscopic view with visible pores; B – microphotography in reflected light, visible brown glaze with numerous crystals of magnetite (black cubes) and cordierite (transparent columns) forming the left sides pores. Magnification 100×, one nicol

Minerały te w warunkach naturalnych mogą powstawać w wyniku oddziaływania metamorfizmu kontaktowego, charakteryzującego się wysoką temperaturą i umiarkowanym lub niskim ciśnieniem.



Rys. 2. Przykładowy dyfraktogram odpadu ze strefy intensywnie termicznie przeobrażonej

Fig. 2. Example of diffractogram of waste from intensively thermally transformed zone

Odpady powęglowe intensywnie termicznie przeobrażone wykazują większe skłonności do uwalniania substancji do środowiska wodno-gruntowego niż ma to miejsce w przypadku odpadów umiarkowanie termicznie przeobrażonych lub starych odpadów termicznie nieprzeobrażonych. Jest to związane z obecnością w nich szkliwa, które może ulegać dewitryfikacji i uwalniać zawarte w nim metale (Nowak 2011).

3.2. Minerály wtórne

Oprócz wymienionych powyżej minerałów charakterystycznych dla odpadów powęglowych w różnym stopniu termicznie przeobrażonych, na składowiskach odpadów stwierdzono także obecność minerałów, które nie zostały zdeponowane wraz z odpadami i nie są także wynikiem przeobrażeń wysokotemperaturowych zachodzących w odpadach. Geneza tych minerałów związana jest z:

- ◆ procesami hipergenicznymi,
- ◆ procesami pseudohydrotermalnymi,
- ◆ resublimacją z gazów pożarowych.

Procesy hipergeniczne oddziałują zarówno na odpady świeże bezpośrednio po ich zdeponowaniu, jak i w czasie pożaru zwałowiska oraz po ustaniu procesów termicznych. W efekcie tych procesów powstają wspomniane już siarczany: gips i jarosyt będące produktami wietrzenia siarczków, ale także anhydryt, kopiafit, heksahydryt czy hydromagnezyt (Nowak 2006; Gazdecki 2007).

Warunki pseudohydrotermalne mogą powstawać okresowo na zwałowisku aktywnym termicznie. Wody opadowe infiltrując w głąb zwałowiska ogrzewają się w wyniku oddziaływania ognisk pożarowych lub – po wygaśnięciu pożaru – od rozgrzanych skał. Jednocześnie wody te rozpuszczają niektóre składniki odpadów. W wyniku infiltracji tych pseudohydrotermalnych roztworów może dochodzić do przemieszczania jonów w obrębie składowiska, a nawet poza jego granice. Mineralami, które powstają na zwałowiskach w wyniku tych procesów są głównie wtórne węglany: kalcyt, aragonit i ankeryt.

Na zwałowiskach zidentyfikowano także minerały będące produktami resublimacji z gazów pożarowych. Badania składu tych gazów na czynnych termicznie zwałowiskach wykazały obecność: ditlenku węgla CO_2 , tlenku węgla CO , ditlenku siarki SO_2 , siarkowodoru H_2S , amoniaku NH_3 , chloru Cl_2 oraz pary wodnej H_2O . Stężenie tych gazów zależy w głównej mierze od intensywności procesów pożarowych zachodzących wewnątrz zwałowiska (Buchta i Molenda 2007). Gazy te, migrując przez zwałowisko do atmosfery, ulegają ochłodzeniu, w wyniku czego dochodzi do resublimacji zawartych w nich substancji. Na zwałowiskach, w miejscach ulatniania się gazów do atmosfery, stwierdzono obecność salmiaku rodzimego (Nowak 2006), a także siarki rodzimej i selenu rodzimego (Wagner 1980) oraz różnych związków organicznych.

Zestawienie minerałów występujących na termicznie przeobrażonych zwałowiskach odpadów powęglowych przedstawiono w tabeli 1.

Podsumowanie

Odpady powęglowe termicznie przeobrażone wykazują silne zróżnicowanie. Jednym z najistotniejszych czynników wpływających na to zróżnicowanie jest stopień ich termicznego przeobrażenia. Oddziaływanie wysokiej temperatury związanej z pożarami składowisk odpadów powęglowych prowadzi bowiem do zmiany ich struktur, tekstur i składu mineralnego.

Badania mineralogiczno-petrograficzne prowadzone na termicznie przeobrażonych odpadach powęglowych pozwoliły wydzielić na zwałowiskach odpadów trzy strefy o zróżnicowanym stopniu termicznego przeobrażenia. Podstawą wydzielenia stref są zmiany strukturalno-teksturalne oraz zmiany składu mineralnego.

W strefie nieprzeobrażonej termicznie odpady zachowały pierwotne struktury i tekstury skał, zaś ich skład mineralny zmienił się jedynie w niewielkim stopniu – disiarczki żelaza uległy wietrzeniu, w wyniku czego powstały minerały siarczanowe, np. gips i jarosyt. Odpady w tej strefie zawierają substancję organiczną (węgiel), która powoduje ich ciemnoszare zabarwienie.

W strefie umiarkowanie przeobrażonej termicznie nastąpiło wypalenie substancji organicznej (węgla). Kaolinit uległ dehydroksylacji, w wyniku której powstał metakaolinit. Rozpadowi termicznemu uległy także minerały węglanowe. W wyniku przeobrażeń termicznych syderytu powstał maghemit i/lub hematyt. Obecność tych minerałów przy jednoczes-

Tabela 1. Występowanie minerałów w strefach o różnym stopniu przeobrażenia termicznego odpadów

Table 1. Occurrence of minerals in the zones of differing thermal transformation of waste

Składnik	Pierwotne składniki mineralne okruszków skał w odpadach			Minerały powstałe w wyniku termicznego przeobrażenia skał w odpadach			Minerały procesów pseudohydrotermalnych, hipergenicznych i resublimacji		
Strefa nieprzeobrażona termicznie	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Strefa umiarkowanie przeobrażona termicznie	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
Strefa intensywnie przeobrażona termicznie									
	Substancja organiczna (węgiel)	+	+	+	+	+	+	+	+
	Kwarc	+	+	+	+	+	+	+	+
	Min. ilaste: kaolinit, illit, chloryt	+	+	+	+	+	+	+	+
	Muskowit	+	+	+	+	+	+	+	+
	Skalenie	+	+	+	+	+	+	+	+
	Syderyt	+	+	+	+	+	+	+	+
	Metakaolinit								
	Szkliwo								
	Maghemit, hematyt								
	Trydymit, cristobalit								
	Spinel: magnetyt, hercynit, magnetoferyt								
	Kordieryt, indialit, sekaninait								
	Mullit								
	Silimanit								
	Pirokseny: hipersten, klinkinoferrosylit								
	Wolastonit								
	Zelazo rodzime								
	Jarosyt	+	+	+	+	+	+	+	+
	Gips i anhydryt	+	+	+	+	+	+	+	+
	Heksahydryt	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
	Kopiapit	+	+	+	+	+	+	+	+
	Kalcyt i aragonit	+	+	+	+	+	+	+	+
	Ankeryt	+	+	+	+	+	+	+	+
	Hydromagnezyt	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
	Salmiak rodzimy	+	+	+	+	+	+	+	+
	Szarka rodzima	+	+	+	+	+	+	+	+

++ Występuje bardzo często, + występuje powszechnie, (+) występuje sporadycznie lub w niewielkich ilościach

nym wypaleniu substancji organicznej spowodowała zmianę zabarwienia odpadów z szarej na cegląstą.

Odpady w strefie intensywnie termicznie przeobrażonej cechują się zanikiem struktur i tekstur, jakie występowały w odpadach w chwili ich deponowania; często spotykana jest tekstura porowata. W odpadach występuje szkliwo oraz minerały wysokotemperaturowe: mullit, sillimanit, kordieryt, wollastonit, pirokseny, magnetyt, spinele i inne. Skład mineralny odpadów powęglowych w tej strefie odpowiada składowi skał powstałych w wyniku metamorfizmu kontaktowego.

Ponadto, na termicznie przeobrażonych zwałowiskach odpadów powęglowych, stwierdzono także występowanie minerałów powstałych w wyniku procesów pseudohydrotermalnych oraz resublimacji z gazów pożarowych.

Z uwagi na silne zróżnicowanie termicznie przeobrażonych odpadów powęglowych wskazane jest, by w przypadku stosowania ich jako substytutu naturalnych kruszyw oceniać parametry kruszywa z każdej ze stref oddzielnie, gdyż zróżnicowanie cech petrograficznych i składu mineralnego będzie prawdopodobnie wpływało także na zróżnicowanie właściwości pozyskiwanych kruszyw.

LITERATURA

- Borecki, M. i Strzeczowski, W. red., 1964. *Systemy eksploatacji węgla kamiennego*. Katowice: Wydawnictwo Śląsk.
- Buchta, D. i Molenda, T. 2007. Minerały stref ekshalacyjnych termicznie czynnych składowisk odpadów górnictwa węgla kamiennego. *WUG: bezpieczeństwo pracy i ochrona środowiska w górnictwie*. Nr 4.
- Burtan i in. 2008 – Burtan, B., Rak, Z. i Stasica, J. 2008. Priorytety rozwoju systemów wybierania złóż w polskim górnictwie węgla kamiennego. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* t. 24, z. 1/2.
- Chodyniecka, L. i Adamczyk, Z. 1997. Zmienność mineralogiczna odpadów powęglowych z KWK „Jankowice”. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Górnictwo*, z. 235.
- Ćmiel, S. i Misz, M. 2005. Zmiany petrograficzne węgla spowodowane pożarami hałd odpadów węglowych. *Geologia i zagadnienia ochrony środowiska w regionie Górnośląskim LXXVI Zjazd Naukowy Polskiego Towarzystwa Geologicznego Rudy k/Rybnika 14–16 września 2005 r.*
- Dulewski i in. 2010 – Dulewski, J., Madej, B. i Uzarowicz, R. 2010. Zagrożenia procesami termicznymi obiektów zagospodarowania odpadów z górnictwa węgla kamiennego. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* t. 26, z. 3.
- Gazdecki, Ł. 2007. Wpływ przeobrażeń termicznych na skład mineralny oraz wybrane właściwości fizykomechaniczne odpadów KWK Mikulczyce. *Kwartalnik Górnictwo i Geologia* z. 1, t. 2.
- Gogola i in. 2012 – Gogola, K., Bajerski, A. i Smoliński, A. 2012. Modyfikacja metody oceny zagrożenia pożarowego na terenach lokowania odpadów powęglowych. *Prace Naukowe GiG Górnictwo i Środowisko* 2.
- Grapes, R.R. 2006. *Pyrometamorphism*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Gumińska, J. i Różański, Z. 2005. *Analiza aktywności termicznej śląskich składowisk odpadów powęglowych*. KARBO Nr 1.
- Hanak, B. i Nowak, J. 2008. Thermal altered coals in self-combusted mine dump from Upper Silesia Coal Basin. *International Conference on Coal and Organic Petrology*. Materiały konferencyjne. Oviedo.
- Hanak, B. i Nowak, J. 2010. Charakterystyka węgla ze zmienionych termicznie odpadów powęglowych KWK „Nowy Wirek”. *Przegląd Górniczy* 1–2.

- Hanak, B. i Porszke, A. 2006. Kierunki przeobrażeń minerałów w starych zwałowiskach odpadów powęglowych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Górnictwo* z. 272.
- Heffer i in. 2007 – Heffer, E., Reiners, P., Naeser, C. i Coates, D. 2007. Geochronology of clinker and implications for evolution of the Powder River Basin landscape, Wyoming and Montana. *Geology of Coal Fires: Case Studies from Around the World*. The Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology, Volume XVIII.
- Jonczy i in. 2012 – Jonczy, I., Nowak, J., Porszke, A. i Strzałkowska, E. 2012. *Składniki fazowe wybranych mineralnych surowców odpadowych w obrazach mikroskopowych*. Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- Krieger, W. i Sroga, C. 2002. Odpady z górnictwa i przeróbki kopalni w Krajowym Planie Gospodarki Odpadami. *Przegląd Geologiczny* vol. 50, nr 12.
- Łączny i in. 2011 – Łączny, M. J., Olszewski, P., Gogoła, K. i Bajerski, A. 2011. Czynniki wpływające na wybór technologii prewencyjnych, profilaktycznych i gaśniczych stosowanych na obiektach uformowanych z odpadów powęglowych. *Prace Naukowe GiG Górnictwo i Środowisko* 4.
- Masalehdani i in. 2007 – Masalehdani, M., Black, P. i Kobe, H. 2007. Mineralogy and petrography of iron-rich slags and paralavas formed by spontaneous coal combustion, Rotowaro coalfield, North Island, New Zealand. *Geology of Coal Fires: Case Studies from Around the World*. The Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology, Volume XVIII.
- Mazurkiewicz, M. 1990. Technologiczne i środowiskowe aspekty stosowania stałych odpadów przemysłowych do wypełniania pustek w kopalniach podziemnych. *Zeszyty Naukowe AGH* nr 152.
- Nowak, J. 2006. Zmienność składu mineralnego odpadów pod wpływem procesów zachodzących na składowisku nr IV KWK Nowy Wirek. *Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej*.
- Nowak, J. 2008. Skład mineralny samoczynnie spieczonych odpadów powęglowych ze Zwałowiska Nr IV KWK „Nowy Wirek”. Materiały konferencyjne. Pierwszy Polski Kongres Geologiczny, Kraków.
- Nowak, J. 2011. Wpływ stopnia przeobrażeń termicznych odpadów powęglowych na ługowanie substancji do środowiska. *Kwartalnik Górnictwo i Geologia* z. 4, t. 6, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- Nowak, J. i Frejowski, A. 2007. Mine waste management in Upper Silesian Coal Basin (USCB). *Zapiski Gornowo Instytutu*, Petersburg.
- Porszke, A. 2003. Wpływ zmienności parametrów geotechnicznych odpadów powęglowych ze składowiska KWK „Siemianowice” na możliwość ich wykorzystania w budownictwie drogowym. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Górnictwo* z. 257.
- Różański, Z. 2003. Pozyskiwanie ciepła ze składowisk odpadów powęglowych podlegających naturalnym procesom utleniania. Praca doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice.
- Smith, A. i Ward, A. 1984. Pollution potential from the reclamation of coal washery discard and waste dumps. Symposium on the Reclamation Treatment and Utilization of Coal Mining Wastes. Durham.
- Szczepańska, J. i Krawczyk, J. 1993. Zanieczyszczenie środowiska wodnego siarczanami tworzącymi się na składowiskach odpadów górnictwa węgla kamiennego. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* t. 9, z. 3.
- Szczepańska, J. 1987. Zwałowiska odpadów węgla kamiennego jako ogniska zanieczyszczenia środowiska wodnego. *Zeszyty Naukowe AGH, Geologia* nr 35.
- Twardowska, I. 1981. *Mechanizm i dynamika ługowania odpadów karbońskich na zwałowiskach*. Polska Akademia Nauk, Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska.
- Urbański, H. 1983. *Rekultywacja techniczna usypisk odpadów kopalnianych ze szczególnym uwzględnieniem zwalczania pożarów*. Materiały szkoleniowe. Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Górnictwa, Zarząd Oddziału w Katowicach.
- Vapnik i in. 2007 – Vapnik, Y., Sharygin, V., Sokol, E. i Shagam, R., 2007 – Paralavas in combustion metamorphic complex: Hatrurim Basin, Israel. *Geology of Coal Fires: Case Studies from Around the World*. Reviews in Engineering Geology XVIII, The Geological Society of America.
- Wagner, M. 1980. Przemiany termiczne węgla kamiennego w strefach pożarów hałd kopalnianych. *Geologia* t. 6, z. 2.
- Zorychta, A. i Burtan, Z. 2008. Uwarunkowania i kierunki rozwoju technologii podziemnej eksploatacji złóż w polskim górnictwie węgla kamiennego. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* t. 24, z. 1/2.

WPLYW STOPNIA TERMICZNEGO PRZEOBRAŻENIA ODPADÓW POWĘGLOWYCH NA ICH SKŁAD MINERALNY I PETROGRAFICZNY

Słowa kluczowe

odpady powęglowe, odpady pogórnice, pożary zwałowisk, przeobrażenia termiczne,
kruszywa sztuczne

Streszczenie

Wydobycie węgla kamiennego nierozzerwalnie związane jest z wytwarzaniem odpadów. Wiele z nich zdeponowanych zostało na zwałowiskach (hałdach) i stanowi z jednej strony źródło uciążliwości dla środowiska, z drugiej zaś potencjalne źródło kruszywa.

Odpady powęglowe zdeponowane na zwałowiskach narażone są na oddziaływanie czynników hipergenicznych. W wyniku oddziaływania tlenu atmosferycznego może dojść do samozagrzewania tych odpadów, a nawet do powstania pożarów endogenicznych. Spalanie substancji organicznej oraz oddziaływanie ciepła będącego efektem tego procesu powoduje zmiany składu mineralnego odpadów, a także ich struktur i tekstur.

Badania przeprowadzone na zwałowiskach odpadów pogórnich, które w minionych latach wykazywały aktywność termiczną, a także analiza danych literaturowych pozwoliły stwierdzić, że stopień termicznego przeobrażenia odpadów powęglowych jest zróżnicowany. Na zwałowiskach wydzielono strefy: nieprzeobrażoną termicznie, umiarkowanie przeobrażoną termicznie oraz intensywnie przeobrażoną termicznie. Odpady powęglowe z tych stref różnią się barwą, stopniem zachowania pierwotnej struktury skał oraz składem mineralnym. Barwa stref nieprzeobrażonych termicznie jest szara do czarnej, odpady zachowały pierwotne struktury skał, z których powstały, skład mineralny uległ jedynie niewielkim zmianom związanym z procesami wietrzenia. Strefy umiarkowanie przeobrażone termicznie cechują się barwą pomarańczowo-czerwoną, wynikającą z wypalenia substancji organicznej i utlenienia związków żelaza. Pomimo oddziaływania wysokiej temperatury pierwotne struktury skał są dobrze zachowane. Skład mineralny uległ wyraźnej zmianie, część minerałów uległa przeobrażeniom termicznym (rozpadowi termicznemu uległy minerały węglanowe, w minerałach ilastych nastąpiła dehydroksylacja). Odpady w strefach intensywnie termicznie przeobrażonych cechują się częściowym lub całkowitym przetopieniem materiału skalnego. W wyniku tego doszło do przeobrażeń pierwotnych struktur i tekstur, całkowitej zmianie uległ także skład mineralny – powstały zupełnie nowe minerały, które nie występowały w odpadach w chwili ich deponowania na zwałowisku. Dla odpadów ze stref intensywnie termicznie przeobrażonych charakterystyczne jest występowanie szkliwa, a także minerałów wysokotemperaturowych (np. mullitu, kordierytu, sillimanitu, spineli i innych), które w warunkach naturalnych powstają najczęściej w wyniku metamorfizmu kontaktowego.

**THE INFLUENCE OF THERMAL TRANSFORMATION OF COAL MINING WASTES ON THEIR
PETROGRAPHIC AND MINERALOGICAL COMPOSITION**

Key words

coal wastes, mining wastes, fires at dumps, thermal transformations, artificial aggregates

Abstract

The excavation of hard coal is inseparably connected with the production of wastes. Many of these wastes are disposed of in waste dumps (tips). On the one hand this is a nuisance to the environment, while on the other hand – it represents a potential source of aggregates.

Coal mining wastes disposed of in the dumps are exposed to hypergenic factors. In particular cases, self-ignition of these wastes may occur, even becoming the cause of endogenous fires. The combustion of organic substances and interaction with heat, which is an effect of this process, causes changes in the mineral composition of wastes and their structures and textures.

Examinations conducted on coal mining waste dumps – which in previous years showed thermal activity – as well as an analysis of existing data allowed for the conclusion that the grade of thermal transformation of coal mining wastes is differentiated.

The waste dumps were assigned the following zones: thermally untransformed zone, moderately thermally transformed zone, and intensively thermally transformed zone.

Coal mining wastes from these zones vary in colour, the grade of conservation of the primary rock structure, and mineral composition. The colour of the thermally untransformed zone is grey and black, the wastes have preserved the primary structures of the rocks from which they originated, and the mineral composition indicated small changes connected with weathering processes. Moderately thermally transformed zones are characterized by an orange-red colour, implying the combustion of organic substances and oxidation of iron compounds. In spite of the influence of high temperature, the primary structures of the rocks are well preserved. Mineral composition distinctly changed; a part of the minerals (carbonates, clay minerals) were thermally altered.

The wastes in intensively thermally transformed zones are characterized by partial or total melting of the rock material. As a result, transformations of the primary structures and textures occurred. The mineral composition has also been totally changed – new minerals originated which did not occur in the wastes at the time of their disposal in the waste dump. The occurrence of glaze as well as high-temperature minerals is characteristic for the wastes from intensively thermally transformed zones, most often originating under natural conditions as an effect of contact metamorphism.

