



Piotr WYSZOMIRSKI*, Tadeusz SZYDŁAK**, Tomasz ZAWADZKI***

Kopalina bazaltowa ze złóż Rutki i Ligota Tułowicka (woj. opolskie) oraz możliwości wielokierunkowego jej wykorzystania

Streszczenie: Kopalinę z sąsiadujących ze sobą złóż Rutki i Ligota Tułowicka (okolice Niemodlina) stanowi wyłącznie jedna odmiana petrograficzna bazaltoidów, tj. nefelinit. Charakteryzuje się ona występowaniem w tle skalnym dominującego jasnego składnika mineralnego, którym jest nefelin zaliczany do skaleniowców. W skład tła skalnego obok nefelinu wchodzi drobne kryształy piroksenów i niezbyt liczny magnetyt. Pomiędzy tymi składnikami rozproszone są wyraźnie większe prakryształy piroksenów i oliwinów. Minerale tła skalnego, a także prakryształy piroksenów nie wykazują przejawów wietrzenia chemicznego. Są one natomiast wyraźnie widoczne w prakryształach oliwinów.

Kopalina bazaltowa z omawianych złóż jest głównie wykorzystywana do produkcji różnych asortymentów kruszywa łamanego dla potrzeb budownictwa drogowego i jako składnik betonów. Do tego celu nadają się kruszywa o uziarnieniu >2 mm. Istnieje też perspektywa wykorzystania grubych frakcji kruszywa bazaltowego do produkcji wełny mineralnej. Korzystną w tym względzie cechą skał z Rutek i Ligoty Tułowickiej jest stosunkowo mała zawartość magnetytu i związana z tym niska podatność stopionego bazaltu do krystalizacji.

Proces wietrzenia chemicznego prakryształów oliwinu doprowadził do powstania minerałów ilastych, reprezentowanych w zdecydowanej przewadze przez minerały grupy smektytu. Ich podwyższony udział obserwuje się w najdrobniejszym kruszywie, tj. we frakcji ziarnowej 0–0,85 mm. Drobne uziarnienie, a także podwyższony udział minerałów ilastych stanowią korzystną przesłankę do wykorzystania tego surowca zwłaszcza w przemyśle ceramiki budowlanej jako dodatku poprawiającego parametry fizykomechaniczne i kolorystykę produktów.

Słowa kluczowe: nefelinit, Rutki, Ligota Tułowicka, minerały z grupy smektytów, bazalt w ceramice

* Prof. dr hab. inż., Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa, Tarnów; e-mail: p_wysz@pwszstar.edu.pl

** Dr, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Kraków;
e-mail: szydlak@agh.edu.pl

*** Prezes, mgr inż., Kopalnie Odkrywkowe Surowców Drogowych S.A. Niemodlin;
e-mail: info@kosd-niemodlin.com.pl

The basaltic raw materials from the Rutki and Ligota Tułowicka deposits (Opole Province) and the directions of their possible use

Abstract: The rocks quarried in the neighboring Rutki and Ligota Tułowicka deposits (vicinity of Niemodlin) represent a single petrographic variety of basalt, i.e. nephelinite. The presence of nepheline (the mineral belonging to the group of feldspathoids) that forms the light-colored component of the groundmass is the characteristic feature of these rocks. Nepheline is accompanied by fine crystals of pyroxene and, occasionally, magnetite. Distinctly larger pyroxene and olivine phenocrysts are dispersed within the groundmass. Neither minerals of the groundmass nor the phenocrysts of the pyroxenes reveal any signs of chemical weathering. However, such alterations are clearly visible in the phenocrysts of olivine.

The basalt raw materials of both deposits are utilized mainly for the production of various assortments of crushed road aggregates and as components of concretes. These applications require the aggregates with the grain sizes >2 mm. There is also a possibility to utilize coarse-grained basalt aggregates for the manufacturing of rock wool. This is due to a favorable property of the rocks from Rutki and Ligota Tułowicka that is their relatively low content of magnetite resulting in the low capability of the molten basalt to crystallize.

The chemical weathering of the olivine phenocrysts have proceeded toward the formation of clay minerals, among which those of the smectite group prevail. Their elevated quantities occur in the finest aggregate assortment, i.e. 0–0.85 mm. The fineness of this grain fraction and its elevated quantity of clay minerals are two favorable features to utilize this part of the basalt aggregate by the heavy clay industry as an additive improving the physico-mechanical parameters and providing the required red color of ceramic products..

Keywords: nephelinite, Rutki, Ligota Tułowicka, smectites, basalt in ceramics

Wprowadzenie

Skały bazaltowe występujące w okolicy Niemodlina, m.in. ze złóż Rutki i Ligota Tułowicka, są usytuowane w sąsiedztwie Góry św. Anny stanowiącej najbardziej wysunięty na wschód fragment wielkiej, środkowoeuropejskiej formacji wulkanicznej wieku trzeciorzędowego. Skały te były przedmiotem licznych publikacji o charakterze geologicznym i petrograficznym (m.in. Rode 1934; Kamieński 1946; Kamieński i Skalmowski 1947; Smulikowski 1960; Chodyniecka 1967; Jerzmański i Maciejewski 1968; Birkenmajer 1974; Birkenmajer i Siemiątkowski 1977; Kapuściński i Pozzi 1980; Adamczyk i in. 2000). Większość z nich nie dotyczyła jednak bazaltów z Rutki i Ligoty Tułowickiej, co uzasadnia podjęcie tej tematyki – zwłaszcza w ujęciu surowcowo-technologicznym – przez autorów niniejszej pracy.

1. Materiał do badań

Przedmiotem badań było osiem próbek skały bazaltowej w formie litych fragmentów pochodzących bezpośrednio ze ścian eksploatacyjnych kamieniołomów oraz cztery próbki w postaci wyprodukowanych z nich kruszyw łamanych o uziarnieniu 0–0,85 mm. Zostały one oznakowane n/w symbolami:

- 1290, B – bazalt ze złoża Rutki, III poziom eksploatacyjny, ściana zachodnia,
- 1291, C – bazalt ze złoża Rutki, III poziom eksploatacyjny, ściana północno-wschodnia,
- 1292, A – bazalt ze złoża Rutki, VI poziom eksploatacyjny, ściana wschodnia,
- 1293, D – bazalt ze złoża Ligota Tułowicka, II poziom eksploatacyjny, ściana południowa.

Próbki 1290–1293 zostały pobrane we wrześniu 2016, zaś próbki A–D – w maju 2017 r. Z czterech litych próbek o symbolach 1290–1293 wykonano płytki cienkie do badań mikroskopowych w świetle przechodzącym. Te same próbki reprezentujące kruszywa łamane 00,85 mm przeznaczono – po ich dalszym utarciu w moździerzu agatowym – do analizy chemicznej i rentgenograficznej, do oznaczenia zawartości smektytu metodą TETA Cu(II) oraz wyznaczenia temperatur charakterystycznych metodą mikroskopii wysokotemperaturowej.

2. Metody badań

Próbki poddano następującym badaniom:

- analiza mikroskopowa w świetle przechodzącym, na standardowych preparatach (grubość 0,02 mm), przy użyciu uniwersalnego mikroskopu polaryzacyjnego OLYMPUS BX 51 z kamerą BP12 do wykonywania mikrofotografii techniką cyfrową,
- analiza rentgenograficzna metodą DSH przy użyciu dyfraktometru rentgenowskiego RIGAKU SmartLab, stosując następujące parametry pomiaru: promieniowanie $\text{Cu}_{K\alpha}$, refleksyjny monochromator grafitowy, napięcie lampy 35 kV, prąd lampy 30 mA, rejestracja krokowa: krok = $0,05^\circ 2\theta$, czas zliczania przypadający na jeden krok = 1 sek. Analizę rentgenograficzną przeprowadzono w stanie powietrznie suchym, jak też po nasyceniu próbki glikolem etylenowym i po jej prażeniu w 560°C według metodyki Brindley'a-Browna (1980),
- wielopierwiastkowa analiza składu chemicznego obejmująca 51 składników głównych, podrzędnych i śladowych. Została wykonana w *Activation Laboratories* w Ancaster (Kanada). Składniki główne i podrzędne (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , CaO , MgO , MnO , Na_2O , K_2O , P_2O_5) oraz niektóre pierwiastki śladowe oznaczono metodą FUS ICP AES i TD ICP AES (*Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy*). Zgodnie z ogólnie przyjętym podziałem za pierwiastki główne uznaje się te, które występują w ilości powyżej 1% mas., pierwiastki podrzędne – w przedziale 1–0,1% mas., zaś pierwiastki śladowe – poniżej 0,1% mas. Próbki do powyższych analiz zostały przygotowane poprzez (1) ich stopienie z metaboranem litu i rozpuszczenie stopu w 15%-owym roztworze HNO_3 i/lub (2) rozpuszczenie w mieszaninie kwasów $\text{HCl-HNO}_3\text{-HClO}_4\text{-HF}$ w temperaturze 200°C , a następnie rozcieńczenie wodą królewską. Do oznaczenia zawartości pozostałych, analizowanych pierwiastków śladowych (Au, As, Br, Co, Cr, Cs, Hf, Ir, Mo, Rb, Sb, Se, Ta, W) oraz pierwiastków ziem rzadkich (tj. La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu, Sc) i aktynowców (U, Th) zastosowano metodę INAA (*Instrumental Neutron Activation Analysis*). Stratę prażenia oznaczono klasyczną metodą wagową z różnicy mas próbki wysuszonej w temperaturze 110°C i – następnie – wyprażonej w 1000°C . Analizy chemiczne wykonano z próbek uśrednionych po uprzednim ich rozdrobieniu i utarciu w moździerzu agatowym,
- oznaczenie zawartości minerałów grupy smektytu metodą sorpcji trietylenotetraaminy miedzi (II) TETA Cu(II) zaproponowaną przez Meyera i Kahra (1999). Według niej udział smektytu w odpowiednio przygotowanych próbkach ocenia się na pod-

stawie oznaczenia pojemności wymiany kationów CEC, stosując fotokolorymetryczny pomiar absorpcji światła w wyjściowym i końcowym roztworze kompleksowego połączenia TETA Cu(II). Przyjmuje się, że wartość CEC wyznaczona metodą sorpcji TETA Cu(II) odpowiada rzeczywistemu udziałowi smektytu w analizowanej próbce,

→ wyznaczenie temperatur charakterystycznych metodą mikroskopii wysokotemperaturowej. Temperatury te określono przy użyciu mikroskopu wysokotemperaturowego Misura[®] HSM produkcji włoskiej stosując próbkę o kształcie walca ($\varnothing = 2$ mm, $h = 3$ mm), którą uformowano ze sproszkowanego bazaltu przy użyciu małej prasy laboratoryjnej. Próbkę tę ogrzewano z szybkością wynoszącą $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Pomiar polegał na obserwacji i rejestracji zmian jej konturów, zachodzących wraz ze wzrostem temperatury.

3. Wyniki badań i dyskusja

3.1. Charakterystyka petrograficzna

Skala bazaltowa ze złoża Rutki (próbka 1290)

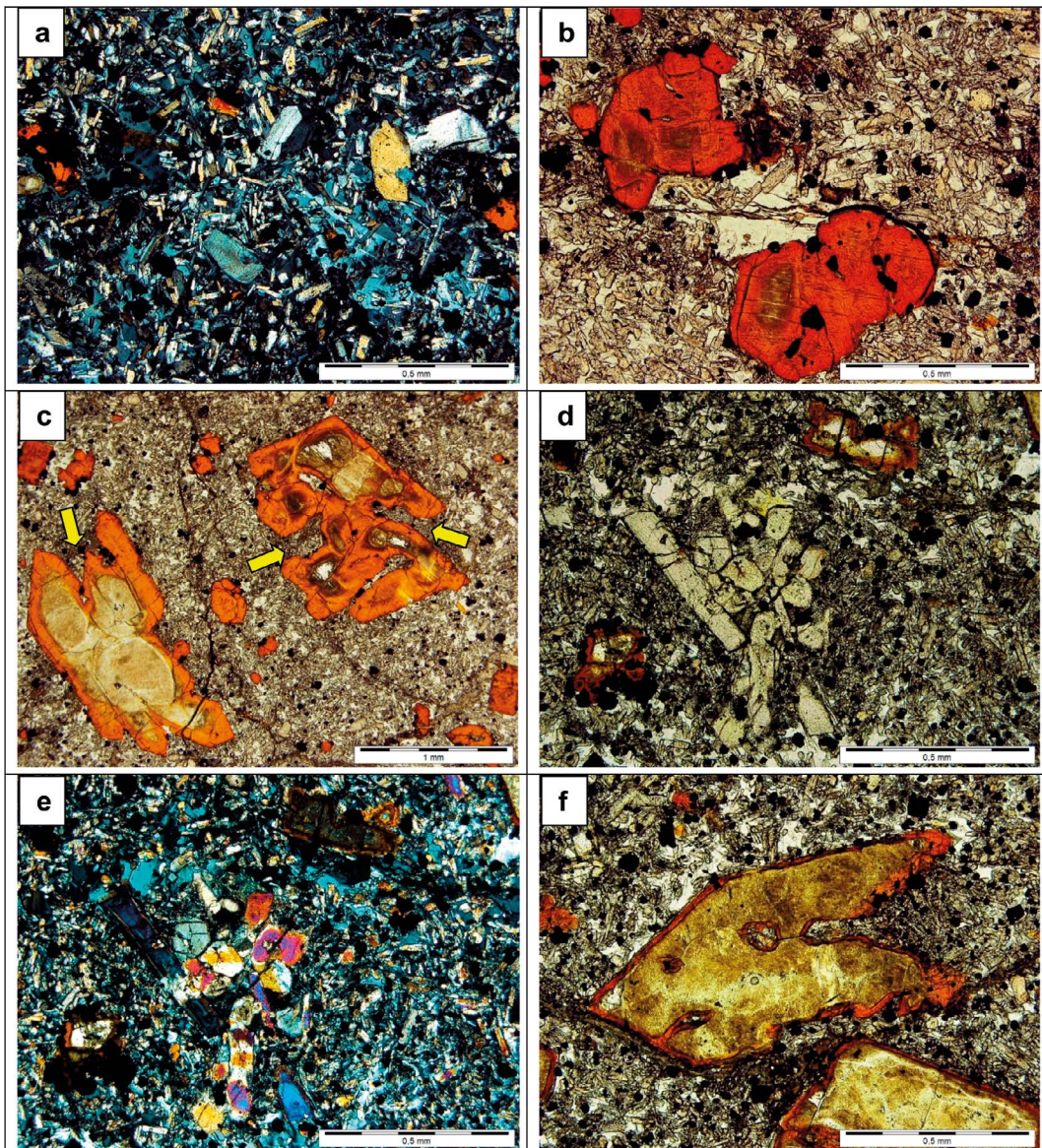
Jest to skała magmowa barwy czarnej, zaś na powierzchni zwietrzałej – jasnobrązowej. Cechuje ją masywna tekstura oraz słabo widoczna makroskopowo struktura porfirowa. W drobnokrystalicznym tle rozproszone są nieliczne pseudomorfozy po prakryształach, które wypełnione są na ogół mikrokryształicznymi agregatami o zabarwieniu brunatnym. Ich wielkość dochodzi do 2 mm. Na powierzchni zwietrzałej są one częściowo puste.

Fot. 1. Skała bazaltowa (nephelinit) z Rutki: a – próbka 1290; słupkowe kryształy piroksenów i ksenomorficzne kryształy nefelinu (szare barwy interferencyjne) w tle skalnym, polaryzatory skrzyżowane; b – próbka 1290; pseudomorfozy po prakryształach oliwinu (iddingsyt). W tle skalnym oraz w pseudomorfozach widoczne są liczne, nieprzezroczyste (czarne) ziarna magnetytu, jeden polaryzator; c – próbka 1290; pseudomorfozy po hipautomorficznych kryształach oliwinu z licznymi zatokami korozyjnymi (strzałki), jeden polaryzator; d, e – próbka 1291; słupkowe kryształy piroksenów i ksenomorficzne kryształy nefelinu w tle skalnym. W środku widoczne skupienie prakryształów piroksenów, w tle skalnym z dużymi ziarnami magnetytu, jeden polaryzator (d) i polaryzatory skrzyżowane (e); f – próbka 1291; pseudomorfozy po hipautomorficznych kryształach oliwinu z widocznymi zatokami korozyjnymi, jeden polaryzator

Phot. 1. Basalt rock (nephelinite) from Rutki: a – sample 1290; prismatic pyroxenes and xenomorphic nepheline crystals (grey interference color) in the groundmass, crossed polars; b – sample 1290; pseudomorphs after olivine crystals (iddingsite). The numerous opaque (black) grains of magnetite are visible in the groundmass and in pseudomorphs, one polar; c – sample 1290; pseudomorphs after hypautomorphic, embayed olivines (arrows), one polar; d, e – sample 1291; prismatic pyroxenes and xenomorphic nepheline crystals in the groundmass. Visible pyroxene phenocrysts in the center and in the groundmass – large magnetite grains, one polar (d) and crossed polars (e); f – sample 1291; pseudomorphs after hypautomorphic, embayed olivines, one polar

Na obrazie mikroskopowym widoczna jest wyraźnie struktura porfirowa. Drobnokry-
staliczne tło skalne składa się głównie ze słupkowych kryształów piroksenów o wielkości
0,05–0,1 mm. Przestrzeń pomiędzy nimi wypełniają stosunkowo duże (do 0,3 mm), kse-
nomorficzne kryształy nefelinu oraz nieprzezroczyste, izometryczne ziarna wielkości
0,03–0,08 mm. Jest to faza spinelowa reprezentowana przez magnetyt (fot. 1a, b).

W tle skalnym rozproszone są dość liczne pseudomorfozy po oliwinie oraz mniej licz-
ne prakryształy piroksenów. Te ostatnie, podobnie jak kryształy występujące w tle skalnym,
reprezentują odmianę jednoskośną o cechach augitu. Wielkość prakryształów piroksenów



wynosi 0,2–0,3 mm. Rozmiary pseudomorfoz po oliwinie są zwykle znacznie większe i mieszczą się w przedziale 0,2–2 mm. Pseudomorfozy te zbudowane są z mikrokryształicznych agregatów barwy czerwonej znanych pod nazwą *iddingsyt* (fot. 1b). Występują w nich minerały grupy smektytu, chloryty oraz nadające im czerwoną barwę tlenkowe minerały żelaza (Borkowska i Smulikowski 1973). Udział tych pierwszych minerałów w pseudomorfozach jest zwykle przeważający (Wyszomirski i Szydłak 2016). Wnętrze większych z nich (1–2 mm) jest często zabarwione na kolor zielonkawy (fot. 1c). Kształt tych form jest bardzo zróżnicowany. Część pseudomorfoz ma zarysy automorficznych kryształów oliwinu, niekiedy z zatokami korozyjnymi (fot. 1c). Udział tej odmiany jest znaczący i wynosi około 15% obj. skały.

Cechy teksturalno-strukturalne oraz przedstawiony skład mineralny są typowe dla **nefelinitu**.

Skala bazaltowa ze złoża Rutki (próbka 1291)

Jest to skała magmowa barwy czarnej, a na powierzchni zwietrzałej – ciemnoszarej. Jest bardzo podobna do próbki 1290, od której różni się jedynie barwą pseudomorfoz po oliwinie. Cechuje ją masywna tekstura oraz słabo widoczna makroskopowo struktura porfirowa. W drobnokryształicznym tle rozproszone są liczne mikrokryształiczne agregaty o zabarwieniu żółtozielonym. Są to pseudomorfozy po prakryształach, niekiedy o regularnych, sześciobocznych zarysach. Ich wielkość mieści się w przedziale 0,5–2 mm.

W obrazie mikroskopowym wyraźnie widoczna jest struktura porfirowa. Drobnokryształiczne tło skalne składa się głównie ze słupkowych kryształów piroksenów (0,05–0,1 mm) oraz podobnej wielkości, izometrycznych ziaren nieprzezroczystego magnetytu (fot. 1d). Przestrzeń pomiędzy nimi wypełniają stosunkowo duże (do 0,3 mm), całkowicie bezkształtne kryształy nefelinu (fot. 1e).

W tle skalnym rozproszone są dosyć liczne pseudomorfozy po oliwinie oraz rzadziej spotykane prakryształy piroksenów. Wielkość tych pierwszych dochodzi do 2 mm. Są one zbudowane z mikrokryształicznych agregatów o barwie zielonkawej z cienką, czerwoną obwódką (fot. 1f). Pseudomorfozy tego typu składają się zwykle z minerału smektytowego (saponitu) i chlorytu (Borkowska i Smulikowski 1973). W przeciwieństwie do pseudomorfoz występujących w próbce 1290 zawierają one zapewne znacznie mniej tlenkowych minerałów żelaza nadających im czerwoną barwę. Kształt pseudomorfoz jest bardzo zróżnicowany. Część z nich ma automorficzne zarysy kryształów oliwinu, często z zatokami korozyjnymi (fot. 1e). Udział pseudomorfoz po oliwinie jest znaczny i wynosi około 13% obj. skały.

Rzadziej od pseudomorfoz oliwinowych spotyka się mniejsze (0,1–0,5 mm) prakryształy piroksenów jednoskośnych (augit). Prakryształy te mają zazwyczaj pokrój słupkowy i – w przeciwieństwie do oliwinów – nie wykazują żadnych wtórnych przemian (fot. 1e).

Cechy teksturalno-strukturalne oraz przedstawiony skład mineralny odpowiadają **nefelinitowi**.

Skala bazaltowa ze złoża Rutki (próbka 1292)

Jest to skała magmowa barwy czarnej, na powierzchni zwietrzałej – barwy szarej. Jest również bardzo podobna do próbki 1290. Cechuje ją masywna tekstura oraz słabo widoczna makroskopowo struktura porfirowa. W drobnokryształicznym tle skalnym widoczne są nie-

liczne, mikrokrystaliczne agregaty o zabarwieniu oliwkowozielonym. Są to pseudomorfozy po prakryształach, niekiedy o regularnych zarysach. Ich wielkość waha się od 0,5 do 2 mm.

W obrazie mikroskopowym struktura porfirowa tej skały jest już wyraźnie zaznaczona. Drobnokrystaliczne tło składa się głównie ze słupkowych kryształów piroksenów i nieprzezroczystego magnetytu o podobnej wielkości nieprzekraczającej 0,08 mm. Przestrzeń pomiędzy tymi ziarnami wypełniają całkowicie ksenomorficzne kryształy nefelinu oraz podrzędnie plagioklasy o wielkości do 0,3 mm (fot. 2a).

W tle skalnym rozproszone są liczne prakryształy piroksenów jednoskośnych o cechach augitu. Minerale te tworzą izometryczne bądź krótkosłupkowe kryształy wielkości od 0,1 do 0,3 mm. Nieco rzadziej niż w pozostałych próbkach spotyka się pseudomorfozy po oliwinie. Ich wielkość dochodzi maksymalnie do 2 mm. Pseudomorfozy te mają niekiedy regularny kształt automorficznych kryształów oliwinu (fot. 2b). Są zbudowane z mikrokrystalicznych agregatów barwy czerwonej (*iddingsyt*). Jednak w przypadku dużych ziaren (1–2 mm) ich wnętrza wypełniają agregaty o zielonkawym zabarwieniu (fot. 2b, 2c), reprezentowane przez minerały smektytowe i chloryty. We wnętrzu niektórych pseudomorfoz widoczne są relikty niezmienionego oliwinu (fot. 2c). Udział pseudomorfoz po oliwinie jest w tej próbce nieco mniejszy i wynosi około 11% obj. skały.

Podobnie jak w poprzednich przypadkach badana próbka reprezentuje **nefelinit**.

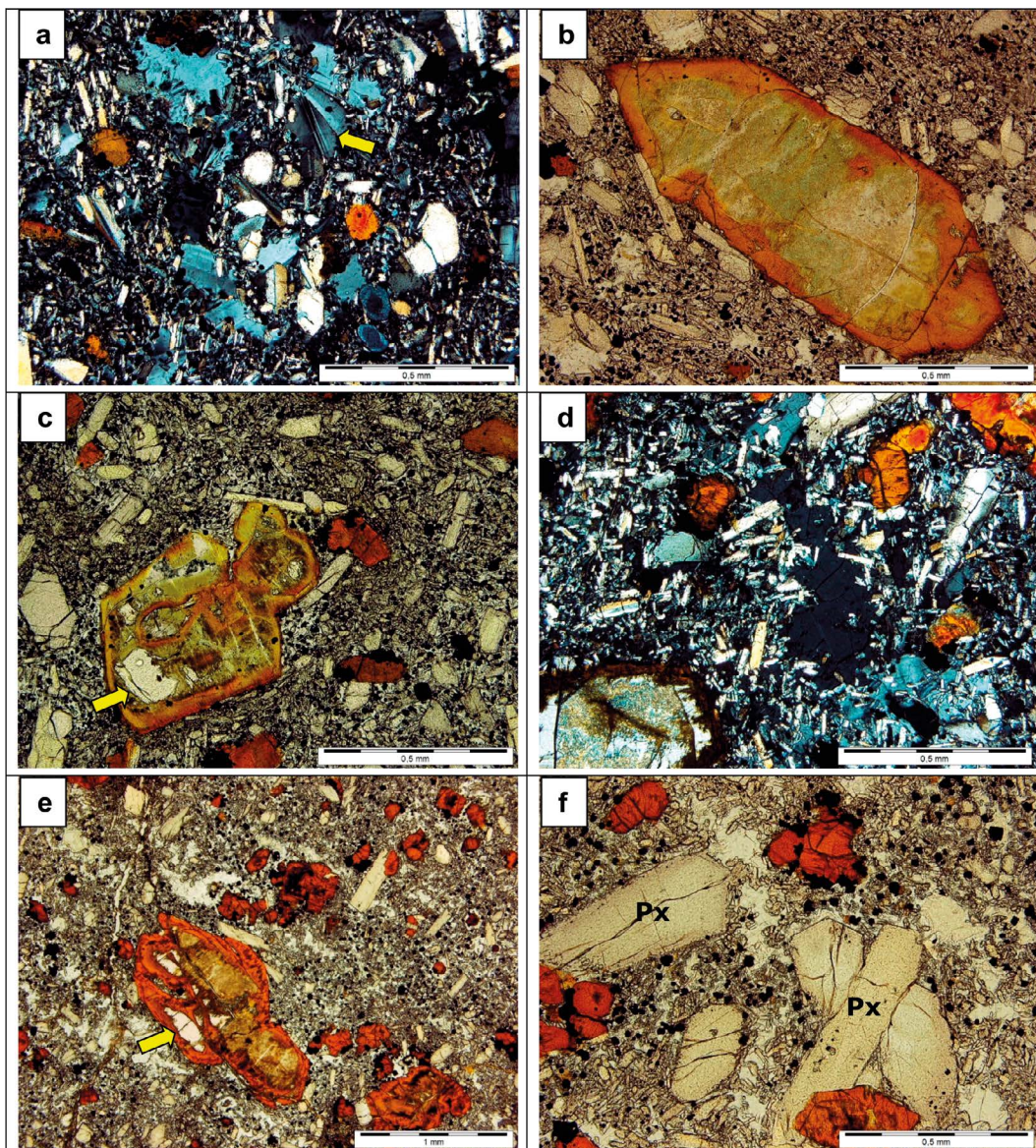
Skała bazaltowa ze złoża Ligota Tułowicka (próbka 1293)

Jest to skała magmowa barwy czarnej, zaś na powierzchni zwietrzałej – jasnobrązowo-żółtej. Jest bardzo podobna do poprzednio opisanych próbek. Cechuje ją masywna tekstura oraz słabo widoczna makroskopowo porfirowa struktura. W drobnokrystalicznym tle rozproszone są liczne mikrokrystaliczne agregaty o barwie żółtobrunatnej. Są to pseudomorfozy po prakryształach, niekiedy o regularnych, sześciobocznych zarysach. Ich wielkość zmienia się od 0,5 do 2 mm.

W obrazie mikroskopowym widoczna jest wyraźnie struktura porfirowa. Drobnokrystaliczne tło skalne składa się głównie ze słupkowych kryształów piroksenów wielkości 0,05–0,1 mm, którym towarzyszą mniej liczne, podobnych rozmiarów izometryczne nieprzezroczyste ziarna magnetytu. Przestrzeń pomiędzy tymi składnikami wypełniają stosunkowo duże (nawet do 0,3 mm), całkowicie bezkształtne kryształy nefelinu (fot. 2d) oraz sporadycznie plagioklazu.

W tle skalnym rozproszone są liczne pseudomorfozy po oliwinie oraz mniej rozprosznione prakryształy piroksenów. Wielkość pseudomorfoz po oliwinie dochodzi do 2 mm. Prakryształy piroksenów są wyraźnie mniejsze – maksymalnie do 0,6 mm. Pseudomorfozy zbudowane są z mikrokrystalicznych agregatów barwy czerwonej, niekiedy z zielonkawym wnętrzem (fot. 2e). Są to minerały smektytowe i chloryty oraz nadające im czerwoną barwę tlenkowe minerały żelaza. We wnętrzu większych pseudomorfoz widoczne są niekiedy relikty niezmienionego oliwinu (fot. 2e). Udział pseudomorfoz po oliwinie jest w tej próbce największy i wynosi około 16% obj. skały.

W przeciwieństwie do oliwinu prakryształy piroksenów nie wykazują przejawów wietrzenia chemicznego. Reprezentują one odmianę jednoskośną o cechach augitu. Prakryształy te mają zazwyczaj pokrój słupkowy ze słabo zaznaczoną łupliwością (fot. 2f).



Skala z Ligoty Tułowickiej reprezentuje ten sam typ petrograficzny jak poprzednio opisane i jest **nefelinitem**.

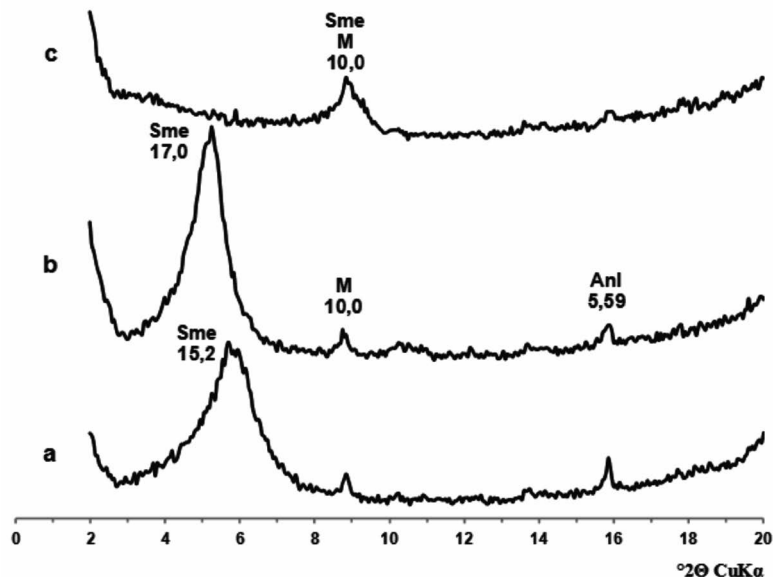
Wszystkie opisane wyżej nefeliny charakteryzują się dobrym zachowaniem prakryształów piroksenów, wyraźnymi przejawami wietrzenia chemicznego prakryształów oliwinowych i umiarkowaną zawartością stosunkowo dużych ziaren magnetytu.

-
- Fot. 2. Skała bazaltowa (nefelinit) z Rutki (próbka 1292) i Ligoty Tułowickiej (próbka 1293):
a – próbka 1292; słupkowe kryształy piroksenów, ksenomorficzne kryształy nefelinu oraz plagioklasy (strzałka) w tle skalnym, polaryzatory skrzyżowane; b – próbka 1292; pseudomorfoza po automorficznym kryształach oliwinu, jeden polaryzator; c – próbka 1292; pseudomorfoza po kryształach oliwinu z widocznym reliktem tego minerału (strzałka), jeden polaryzator; d – próbka 1293; słupkowe kryształy piroksenów oraz ksenomorficzne kryształy nefelinu (szare) w tle skalnym, polaryzatory skrzyżowane; e – próbka 1293; pseudomorfozy po kryształach oliwinu. W największej z nich widoczne relikty niezmiennego oliwinu (strzałka), jeden polaryzator; f – próbka 1293; prakryształy piroksenów (Px) oraz pseudomorfozy po kryształach oliwinu (czerwone), jeden polaryzator
- Phot. 2. Basalt rock (nephelinite) from Rutki (sample 1292) and Ligota Tułowicka (sample 1293):
a – sample 1292; prismatic pyroxenes, xenomorphic nepheline crystals and plagioclase (arrow) in the groundmass, crossed polars; b – sample 1292; pseudomorph after automorphic olivine crystal, one polar; c – sample 1292; pseudomorph after olivine crystal with relics of this mineral (arrow), one polar; d – sample 1293; prismatic pyroxenes and xenomorphic nepheline crystals (grey) in the groundmass, crossed polars; e – sample 1293; pseudomorphs after olivine crystals. Visible relics of unaltered olivine (arrow) in the largest of them, one polar; f – sample 1293; pyroxene phenocrysts (Px) and pseudomorphs after olivine crystals (red), one polar

3.2. Analiza rentgenograficzna

Analizę rentgenograficzną jednej, reprezentatywnej próbki nefelinitu ze złoża *Rutki* (próbka 1290) przeprowadzono na przykładzie najdrobniejszej frakcji ziarnowej kruszywa łamanego 0–0,85 mm. Wybór ten był podyktowany prawdopodobieństwem podwyższonego w niej udziału produktów wietrzenia chemicznego reprezentowanych przez minerały ilaste. Jak wiadomo, analiza rentgenograficzna jest podstawową metodą identyfikacji i dokładnej charakterystyki fazowej tych minerałów.

Analiza rentgenograficzna potwierdziła obecność w badanej próbce faz mineralnych, które zostały stwierdzone w analizie mikroskopowej. Są to pirokseny, nefelin, a także występujące w podrzędnej ilości: oliwiny (forsteryt $Mg_2[SiO_4]$), skalenie (zbliżone do anortytu $Ca[Al_2Si_2O_8]$), zeolity (analcyt $Na[AlSi_2O_6] \cdot H_2O$) i minerały ilaste. Pirokseny występują w kilku odmianach, które różnią się składem chemicznym (augit, diopsyd). Dokładna zaś identyfikacja minerałów ilastych stanowiących produkty wietrzenia chemicznego prakryształów, występujących w analizowanej próbce nefelinitu, możliwa była na podstawie testu Brindley'a-Browna (1980) (rys. 1). Wykazał on obecność minerałów grupy smektytu, a także śladowe ilości minerałów grupy mik. Te ostatnie wykazują w teście Brindley'a-Browna (1980) niezmiennie położenie pierwszego, najsilniejszego refleksu o wartości około 10Å. Dotyczy to zarówno analizy przeprowadzonej w stanie powietrznie suchym, jak też po nasyceniu próbki glikolem etylenowym i po jej prażeniu w 560°C (rys. 1). W przeciwieństwie do tego pierwszy, najsilniejszy refleks smektytu, wykazuje zmienną wartość wynoszącą około 15Å w stanie powietrznie suchym oraz około 17Å po nasyceniu glikolem etylenowym. Rozpatrywany refleks rentgenowski, widoczny na dyfraktogramie próbki wyprażonej w 560°C,



Rys. 1. Zakres niskokątowy dyfraktogramów rentgenowskich nefelinitu ze złoża Rutki (próbka 1290, frakcja kruszywowa 0–0,85 mm): a – próbka w stanie powietrznie suchym, b – próbka nasycona glikolem etylenowym, c – próbka po prażeniu w temperaturze 560°C. Objasnienia: Anl – analcym, M – minerały z grupy mik, Sme – smektyt; wartości d_{hkl} podano w Å

Fig. 1. Low-angle part of XRD patterns of the nephelinite of the Rutki deposit (sample 1290, grain fraction 0–0.85 mm): a – air-dried sample, b – glycolated sample, c – sample after heating at 560°C. Key to the symbols: Anl – analcime, M – minerals of mica group, Sme – smectite; d_{hkl} in Å

uległ natomiast przesunięciu w kierunku wyraźnie wyższej wartości kąta 2θ CuK α , odpowiadającej około 10Å (rys. 1). Związane jest to z rozpadem struktury smektytu w temperaturze prażenia, tj. w 560°C.

Omawiany, niskokątowy refleks smektytu charakteryzuje się stosunkowo dużą intensywnością. Świadczy to o tym, że udział tego minerału w badanej próbce znacznie przekracza rentgenograficzny próg jego wykrywalności, który – według Pawloskiego (1985) – wynosi 5% mas. Dokładne oznaczenie zawartości smektytu jest możliwe przy zastosowaniu metody sorpcji TETA Cu(II), co zostanie omówione w rozdziale 3.4.

3.3. Analiza chemiczna

Analizie chemicznej na zawartość składników głównych poddano próbki nefelinitów pobranych zarówno w formie litej, jak i reprezentujących kruszywo o uziarnieniu 0–0,85 mm. To ostatnie poddano też analizie na zawartość pierwiastków podrzędnych i śladowych. Wyniki te zestawiono odpowiednio w tabelach 1 i 2.

TABELA 1. Składniki główne nefelinitów [% mas.] z Rutek (próbki 1290, 1291, 1292, A, B, C) i Ligoty Tułowickiej (próbki 1293, D)

TABLE 1. Main components of nephelinites [wt. %] of Rutki (samples 1290, 1291, 1292, A, B, C) and Ligota Tułowicka (samples 1293, D) deposits

Składnik	Materiał drobnziarnisty 0–0,85 mm				Materiał lity			
	1290	1291	1292	1293	A	B	C	D
SiO ₂	41,5	42,7	41,8	42,2	44,3	44,1	44,8	43,6
Al ₂ O ₃	11,4	11,7	11,6	11,7	12,0	12,3	12,2	11,9
Fe ₂ O ₃	13,9	13,3	13,2	13,9	13,1	13,1	12,7	12,9
TiO ₂	2,7	2,7	2,5	2,6	2,6	2,7	2,6	2,5
MnO	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
CaO	12,1	12,3	12,0	11,6	13,0	13,4	12,8	12,7
MgO	7,8	7,8	9,0	8,9	8,7	7,8	8,3	9,4
K ₂ O	0,7	0,8	0,8	0,8	0,7	0,9	0,8	1,2
Na ₂ O	3,0	3,4	3,2	3,1	3,0	2,9	3,1	3,2
P ₂ O ₅	0,8	0,9	0,8	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8
Strata prażenia	4,8	4,1	4,6	4,6	1,9	2,0	1,9	1,6
Suma	98,9	99,9	99,7	100,5	100,3	100,2	100,2	100,0

Analiza chemiczna w odniesieniu do składników głównych wykazała m.in. zdecydowane zróżnicowanie wielkości straty prażenia (tab. 1). Przekraczają one wyraźnie 4% mas. w przypadku kruszywa o uziarnieniu 0–0,85 mm, natomiast są wyraźnie mniejsze w próbkach pobranych w formie litej. Świadczy to o koncentracji produktów wietrzenia chemicznego – którymi są zwłaszcza minerały grupy smektytu – w najdrobniejszej frakcji ziarnowej. Podwyższona zawartość produktów wietrzenia chemicznego w tej frakcji powinna być brana pod uwagę w ocenie możliwości przemysłowego jej wykorzystania.

Wyniki niektórych przeprowadzonych analiz pierwiastków śladowych (Ba, Cr, Ni, Sr, V, Zr oraz La, Ce, Nd; tab. 2) porównano jedynie z przedziałami zmienności ich zawartości w zasadowych skałach magmowych, które zostały podane przez Kabatę-Pendias i Pendiasa (1993). W krajowej literaturze petrograficznej brak jest bowiem syntetycznych opracowań nt. pierwiastków śladowych w bazaltach Dolnego Śląska i Opolszczyzny.

W analizowanych bazaltach największą zawartość pierwiastków śladowych stwierdzono w odniesieniu do takich pierwiastków jak: Ba, Cr, Ni i Sr oraz – w mniejszym stopniu – V i Zr. Dla pierwszej grupy (Ba, Cr, Ni, Sr) udziały te są wyraźnie większe w porównaniu z przedziałami ich zawartości w zasadowych skałach magmowych, które – według Kabaty-Pendias i Pendiasa (1993) – są następujące: Ba: 250–400 ppm; Cr: 170–200 ppm; Ni: 130–160 ppm; Sr: 140–460 ppm; V: 200–250 ppm; Zr: 20–800 ppm.

TABELA 2. Pierwiastki podrzędne i śladowe [ppm] w nefelinitach z Rutek i Ligoty Tułowickiej

TABLE 2. Subordinate and trace elements [ppm] in nephelinites of the Rutki and Ligota Tułowicka deposits

Składnik	1290	1291	1292	1293	Składnik	1290	1291	1292	1293
Au*	< 5	< 5	< 5	< 5	Sc	22,1	22,0	21,3	20,2
Ag	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	Se	< 3	< 3	< 3	< 3
As	< 2	< 2	< 2	< 2	Sr	818	873	945	865
Ba	628	638	619	626	Ta	< 1	< 1	< 1	< 1
Be	2	2	2	2	Th	5,9	6,5	6,6	6,5
Bi	< 2	< 2	< 2	< 2	U	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Br	< 1	< 1	< 1	< 1	V	263	261	241	242
Cd	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	W	< 3	< 3	< 3	< 3
Co	66	60	60	62	Y	22	22	22	23
Cr	464	441	414	397	Zn	104	115	105	92
Cs	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	Zr	208	212	210	204
Cu	71	98	67	68	REE:				
Hf	6	4	3	5	La	54,1	55,1	56,1	56,7
Hg	< 1	< 1	< 1	< 1	Ce	74	82	73	86
Ir	< 5	< 5	< 5	< 5	Nd	37	50	28	29
Mo	< 2	< 2	< 2	< 2	Sm	7,6	8,1	7,6	7,8
Ni	307	304	315	305	Eu	2,9	2,6	3,4	3,1
Pb	< 5	< 5	< 5	< 5	Tb	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Rb	< 20	< 20	< 20	< 20	Yb	1,4	1,7	1,6	1,3
S	50	70	50	40	Lu	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Sb	0,2	0,2	< 0,2	< 0,2					

* ppb.

Podwyższony udział Ba i Sr w badanych bazaltach należy wiązać przede wszystkim z występowaniem skalenicowców (nefelin) i sporadycznie stwierdzonych w analizie mikroskopowej zasadowych plagioklazów. Z kolei wyraźnie większy w analizowanych próbkach udział Cr i Ni oraz mieszczący się w przedziale zmienności udział V jest spowodowany obecnością fazy spinelowej (magnetytu). W badanych skałach bazaltowych stwierdzono ponadto podwyższony udział lekkich pierwiastków ziem rzadkich. Jak wynika z danych przedstawionych w tabeli 2 jest on wyraźnie większy w porównaniu z oceną podaną przez Kabatę-Pendias i Pendiasa (1993), która jest następująca: La: 2–27 ppm; Ce: 4–50 ppm; Nd: 5–30 ppm.

Z danych przedstawionych w tabeli 2 wynika, że zróżnicowanie zawartości pierwiastków śladowych w badanych próbkach nefelinitów ze złóż Rutki i Ligota Tułowicka jest wybitnie małe i najczęściej mieści się w przedziale błędu ich oznaczenia.

3.4. Oznaczenie zawartości smektytu metodą TETA Cu(II)

Oznaczenie zawartości minerałów grupy smektytu w surowcach mineralnych, zwłaszcza ilastych, tradycyjnie przeprowadza się jedną z metod spektrofotometrycznych, tj. metodą sorpcji błękitu metylenowego. Metoda ta jednak często zawodzi w przypadku zawartości tych minerałów poniżej 40% mas. W takim przypadku bardziej wiarygodne i powtarzalne wyniki daje metoda sorpcji trietylenotetraaminy miedzi (II), która została wprowadzona do szerszej praktyki analitycznej na początku tego wieku.

Na podstawie przeprowadzonych analiz uzyskano następujące wyniki oznaczenia zawartości smektytu w najdrobniejszym kruszywie łamanym, tj. we frakcji ziarnowej 0–0,85 mm:

- próbka 1290: (14,7 +/- 1,4)% mas.
- próbka 1291: (11,4 +/- 2,2)% mas.
- próbka 1292: (12,4 +/- 1,4)% mas.
- próbka 1293: (12,3 +/- 2,2)% mas.

Wyniki te stanowią średnią arytmetyczną z sześciu pomiarów, zaś miarą dokładności jest odchylenie standardowe. Wskazują one na znaczący – dochodzący do 15% mas. – udział minerałów grupy smektytu, co stanowi potwierdzenie wcześniej przedstawionych wyników analizy mikroskopowej i rentgenograficznej oraz – pośrednio – analizy chemicznej.

3.5. Wyznaczenie temperatur charakterystycznych metodą mikroskopii wysokotemperaturowej

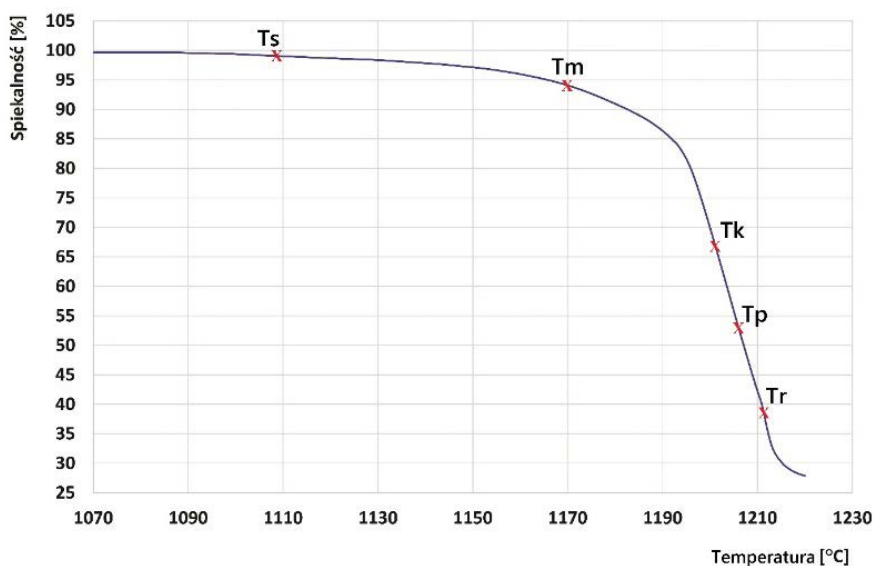
Badania metodą mikroskopii wysokotemperaturowej mają na celu określenie charakterystycznych cech termicznych danego surowca, których znajomość jest niezbędna m.in. do właściwego zaprojektowania składu tworzyw ceramicznych. Badania te przeprowadzono stosując jedną, reprezentatywną próbkę kruszywa łamanego 0–0,85 mm pochodząca ze złoża Rutki (próbka 1290).

TABELA 3. Temperatury charakterystyczne surowca bazaltowego ze złoża Rutki (próbka 1290)

TABLE 3. Characteristic temperatures of basalt raw material of the Rutki deposit (sample 1290 analyzed using hot stage microscope. Symbol explanations are given in the Table 3)

Parametr	Temperatura [°C]
Temperatura spiekania T_s	1 109
Temperatura mięknięcia T_m	1 170
Temperatura kuli T_k	1 201
Temperatura półkuli T_p	1 206
Temperatura rozplywu T_r	1 209

Wyniki pomiaru wartości temperatur charakterystycznych zamieszczono w tabeli 3, natomiast wykres spiekalności przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Surowiec bazaltowy ze złoża Rutki (próbka 1290) w analizie metodą mikroskopii wysokotemperaturowej. Objasnienia symboli podano w tabeli 3

Fig. 2. The basalt raw material of the Rutki deposit (sample 1290) analyzed using a hot stage microscope. Symbol explanations are given in the Table 3

Przebieg zmian termicznych badanej próbki surowca bazaltowego ze złoża Rutki jest bardziej łagodny w porównaniu z innym – opisanym w krajowej literaturze – dolnośląskim surowcem bazaltowym z Krzeniowa (Gacki i in. 2013). Z wartości podanych w tabeli 3 najbardziej charakterystyczną jest temperatura półkuli, którą przyjmuje się za temperaturę topnienia badanego surowca.

4. Kierunki wykorzystania

Podstawowym kierunkiem wykorzystania kopalni bazaltowych jest produkcja kruszyw łamanych. Dotyczy to także nefelinitów z Rutek i Ligoty Tułowickiej. Podstawowe ich cechy fizykomechaniczne odpowiadają wymaganiom norm PN-EN 13043:2004 i PN-EN 12620+A1:2010, które odnoszą się do kruszyw stosowanych w budownictwie drogowym i kolejowym, w produkcji betonów oraz w celach hydrotechnicznych. Dla tych celów używane są w zasadzie kruszywa łamane o uziarnieniu powyżej 2 mm. W procesie produkcji kruszyw w KOSD Niemodlin – a więc z kopalni bazaltowych z Rutek i Ligoty Tułowickiej – otrzymywane są też drobniejsze frakcje ziarnowe, a zwłaszcza frakcja 0–0,85 mm.

Jak wykazano w niniejszej pracy jest ona wyraźnie wzbogacona w minerały ilaste z grupy smektytu. Na ogół minerały te są niekorzystnym czy wręcz szkodliwym składnikiem kruszyw łamanych. Nie stanowi to jednak przeszkody w przypadku wykorzystania tych frakcji w przemyśle ceramicznym, a zwłaszcza do produkcji niektórych wyrobów ceramiki budowlanej. Najdrobniejsza frakcja kruszywowa 0–0,85 mm sprzyja m.in. poprawie parametrów fizykomechanicznych i kolorystyki wyrobów ceglarskich. Dotyczy to zwłaszcza wyrobów produkowanych z wapnistych – tj. zawierających >10% CaCO₃ – surowców ilastych. Dodatek drobnego pyłu bazaltowego powoduje, że ich plastyczność wzrasta, a barwa po wypaleniu staje się intensywnie czerwona. Ta ostatnia cecha jest często wymagana przez potencjalnych użytkowników finalnych wyrobów. Bardziej jednak istotną cechą, którą powinny wykazywać drążone wyroby ceramiki budowlanej, jest izolacyjność akustyczna. Murowane przegrody muszą bowiem zapobiegać przenikaniu hałasu, zarówno tzw. dźwięków powietrznych, jak i uderzeniowych. Z izolacyjnością akustyczną wiąże się także izolacyjność termiczna. Dodatek najdrobniejszej frakcji kruszywowej bazaltu z Rutki i Ligoty Tułowickiej do zestawów surowcowych przeznaczonych do produkcji specjalnych typów pustaków ceramicznych, oferowanych przez niektórych krajowych producentów, sprzyja poprawie tych parametrów. Jak dotąd jest to jedynie fenomenologiczna obserwacja. Mechanizm tego zjawiska jest zapewne złożony i wymaga przeprowadzenia dalszych, specjalistycznych badań.

Najdrobniejsza frakcja kruszywowa 0–0,85 mm może być też stosowana w produkcji wyrobów klinkierowych. Wynika to z faktu, że temperatura mięknięcia tego surowca wynosi 1170°C i niemal dokładnie pokrywa się z temperaturą wypalania wyrobów klinkierowych w krajowej technologii ich produkcji metodą prasowania (1175°C). Wyniki analizy surowca bazaltowego ze złoża Rutki – uzyskane w niniejszej pracy metodą mikroskopii wysokotemperaturowej – wskazują zatem na możliwość jego wykorzystania w tej dziedzinie przemysłu ceramicznego.

Ostatnio zostały opublikowane prace dotyczące możliwości zastosowania pyłu bazaltowego jako substytutu piasku kwarcowego w zaprawach i betonach cementowych (m.in. [Dobiszewska 2016](#)). Wskazano w nich, że dodatek pyłu bazaltowego poprawia wytrzymałość mechaniczną oraz mrozoodporność kompozytu betonowego. Częściowa zamiana piasku kwarcowego na ten pył powoduje doszczelnienie struktury matrycy cementowej, przyczynia się też do zmniejszenia całkowitej objętości porów, ich średnicy, a także porowatości zaprawy cementowej. Zdaniem Dobiszewskiej (2016) powoduje to wzrost wytrzymałości mechanicznej i poprawę odporności zapraw na działanie mrozu. W pracy tej autorki nie podano jednak pochodzenia surowca bazaltowego, z którego powstał omawiany pył. To zaś jest istotne z punktu widzenia obecności minerałów ilastych w tym drobnoziarnistym materiale, która – jak wykazano w niniejszej pracy – może być wyraźnie podwyższona. Wiadomo zaś, że obecność substancji ilastej w kompozytach betonowych jest wybitnie niepożądana ([Kazimir 1977](#); [Neville 2000](#)). Z tego względu pyły bazaltowe powinny być badane na jej zawartość.

Specyficznym kierunkiem wykorzystania grubego kruszywa bazaltowego jest produkcja wełny mineralnej. Z surowca stosowanego do tego celu powinno uzyskiwać się w wyniku obróbki termicznej stop o niskiej podatności krystalizacyjnej. Wiadomo zaś, że niepożądanymi w tym przypadku centrami krystalizacji są liczne, drobne ziarna fazy spinelowej, tj.

magnetytu, obecne w wielu bazaltach dolnośląskich. Na podstawie badań przedstawionych w rozdziale 3.1 stwierdzono, że udział stosunkowo grubych ziaren magnetytu jest niewielki. Stanowi to więc korzystną cechę surowca bazaltowego z Rutek i Ligoty Tułowickiej z punktu widzenia produkcji wełny mineralnej.

Podsumowanie i wnioski

- Bazalty z Rutek i Ligoty Tułowickiej stanowią wyłącznie jedną z odmian petrograficznych tych skał, tj. nefelinity. Ich niemal jedynym, jasnym składnikiem mineralnym w tle skalnym jest nefelin.
- W przeciwieństwie do tła skalnego niektóre prakryształy opisywanych bazaltów są dotknięte intensywnym procesem wietrzenia chemicznego. Odnosi się to do oliwinów, podczas gdy prakryształy piroksenów są z reguły dobrze zachowane.
- Proces wietrzenia chemicznego doprowadził do powstania minerałów ilastych, reprezentowanych w zdecydowanej przewadze przez minerały grupy smektytu. Ich ilość w najdrobniejszej frakcji kruszywowej (0–0,85 mm) dochodzi niemal do 15% mas.
- Najdrobniejsza frakcja kruszywa bazaltowego powinna być stosowana do produkcji niektórych wyrobów przemysłu ceramiki budowlanej (specjalne typy pustaków, wyroby klinkierowe). Obecność w niej minerałów grupy smektytu nie jest szkodliwa, a nawet przyczynia się do poprawy takich właściwości technologicznych, jak plastyczność.
- Dodatkowym kierunkiem wykorzystania grubego kruszywa bazaltowego z Rutek i Ligoty Tułowickiej może być produkcja wełny mineralnej. Przemawia za tym m.in. niewielki w nim udział fazy spinelowej (magnetytu), co przyczynia się do wymaganej, małej zdolności krystalizacyjnej stopionego surowca.

Literatura

- Adamczyk i in. 2000 – Adamczyk, Z., Komraus, J. i Mączyński, T. 2000. Chemical and mineralogical alteration in the Rutki-Ligota basalts: Tertiary Volcanic Formation, Lower Silesia. *Geological Quarterly* 44 (4), s. 405–413.
- Birkenmajer, K. 1974. Tertiary volcanoes of Gracze, Lower Silesia, and inferred fault pattern. *Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego* 44(4), s. 557–575.
- Birkenmajer, K. i Siemiątkowski, I. 1977. Geological, petrographical and mineralogical characteristics of Tertiary basaltic rocks from Góra św. Anny and Ligota Tułowicka. *Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc. C-3* (111), s. 19–30.
- Borkowska, M. i Smulikowski, K. 1973. *Minerały skalotwórcze*. Warszawa: Wyd. Geologiczne.
- Brindley, G.W. i Brown, G. 1980. X-ray diffraction procedures for clay minerals identification. In: Brindley G.W., Brown G. (Eds.): *Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification*. *Mineralogical Society* s. 305–356.
- Chodyniecka, L. 1967. Bazalt z Góry Świętej Anny. *Prace Mineralogiczne* 8. Warszawa: Wyd. Geologiczne.
- Dobiszewska, M. 2016. Zastosowanie pyłu bazaltowego jako substytutu piasku w zaprawie i betonie cementowym. *Budownictwo i Architektura* 15 (4), s. 75–85.
- Gacki i in. 2013 – Gacki, F., Feliks, J. i Wyszomirski, P. 2013. Badania możliwości wykorzystania odpadowego pyłu bazaltowego. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 52(44) Nr 3, s. 174–175.
- Jerzmański, J. i Maciejewski, S. 1968. Tertiary basalts in Lower Silesia. *Biul. Inst. Geol.* 227, s. 247–260.

- Kabata-Pendias, A. i Pendias, H. 1993. *Biogeochemia pierwiastków śladowych*. Warszawa: Wyd. Naukowe PWN.
- Kamiński, M. 1946. *Skaly użyteczne Dolnego i Górnego Śląska*. Katowice: Instytut Śląski.
- Kamiński, M. i Skalmowski, W. red. 1947. *Kamienie budowlane i drogowe*. Warszawa: Wyd. Geologiczne.
- Kapuściński, I. i Pozzi, M. 1980. Wpływ budowy petrograficznej bazaltów na ich własności technologiczne w procesie włókien mineralnych. *Szkło i Ceramika* R. 31, s. 76–79.
- Kazimir, J. 1977. Rozkład kruszywa dolomitowego a trwałość betonów. *Cement-Wapno-Gips* 31/44, Nr 5, s. 114–119.
- Meyer, L. i Kahr, G. 1999. Determination of the cation exchange capacity (CEC) of clay minerals using the complexes of copper(II) ion with triethylenetetraamine and tetraethylenepentaamine. *Clays and Clay Minerals* 47, 3, s. 386–388.
- Neville, A.M. 2000. *Właściwości betonu*. Kraków: Wyd. Polski Cement Sp. z o.o.
- Pawloski, G.A. 1985. Quantitative determination of mineral content of geological samples by X-ray diffraction. *American Mineralogist* 70, s. 663–667.
- Rode, K. 1934. Der Annaberg-Vulkan. Veröffent. *Schles. Ges. Erdk. Breslau* 21, s. 367–378.
- Smulikowski, K. 1960. Wulkanity trzeciorzędowe [W:] *Regionalna geologia Polski. Sudety* 3(2), s. 321–334.
- Wyszomirski, P. i Szydłak, T. 2016. Drobne frakcje ziarnowe z przeróbki bazaltów i ich przydatność w ceramice. *Mining Science* 23, z. specjalny 1, s. 201–213.

Normy:

- PN-EN 13043:2004. Kruszywa do mieszanek bitumicznych i powierzchniowych utwaleń stosowanych na drogach, lotniskach i innych powierzchniach przeznaczonych do ruchu.
- PN-EN 12620+A1:2010. Kruszywa do betonu.

