

ZRÓŻNICOWANIE JAKOŚCI KOPALINY JAKO EFEKT WARUNKÓW DEPOZYCJI I PRZEMIAN DIAGENETYCZNYCH OSADU ORAZ PROCESÓW WIETRZENIA SKAŁY NA PRZYKŁADZIE PIASKOWCÓW MAGURSKICH ZE ZŁOŻA OSIELEC

VARYING STONE QUALITIES AS A COMBINED EFFECT OF DEPOSITION CONDITIONS AND DIAGENETIC CHANGES OF THE SEDIMENT AND WEATHERING ALTERATIONS OF THE ROCK: A CASE OF THE MAGURA SANDSTONES FROM THE OSIELEC DEPOSIT

Marek Rembiś - Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Geologii Złóżowej i Górniczej, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Artykuł dotyczy piaskowców ogniwa popradzkiego, które odsłaniają się w złożu „Osielec” położonym w raczańskiej strefie facjalno-tektonicznej płaszczowiny magurskiej w polskich Karpatach fliszowych. Na podstawie wykonanych badań stwierdzono, że zróżnicowane warunki transportu i depozycji materiału detrytycznego doprowadziły do nagromadzenia osadów charakterystycznych dla subfacji piaskowców masywnych (mS) i uziarnionych frakcjonalnie (gS). Zdeponowany materiał podlegał intensywnym przemianom diagenetycznym, głównie procesom cementacji węglanowej i krzemionkowej, kształtującym fizyczno-mechaniczne właściwości piaskowców, które zmodyfikowane zostały przez późniejsze zjawiska wietrzeniowe. Przy pomocy statystycznego modelu określono wpływ procesów diagenetycznej cementacji na właściwości techniczne piaskowców. Ze względu na różny stopień nasilenia zjawiska wietrzenia składników mineralnych, piaskowce obu subfacji podzielone zostały na trzy grupy reprezentujące kolejne fazy wietrzenia. Stwierdzono, że różnią się one między sobą także wartościami fizyczno-mechanicznych parametrów. Współwystępowanie w profilu złoža różnych odmian facjalnych kopaliny, reprezentujących różny stopień zwietrzenia powoduje, że uzyskiwany surowiec wykazuje zmienną jakość, uzależnioną od miejsca prowadzonej eksploatacji.

Słowa kluczowe: piaskowce magurskie, diagenеза, wietrzenie, fizyczno-mechaniczne właściwości

Sandstones of the Poprad member occur in the Osielec deposit located within the Racza facies-tectonic zone (Magura Series) of the Polish Flysch Carpathians. Varying conditions of transport and deposition of their detrital material resulted in the development of sediments belonging to two subfacies: the massive sandstones (mS) and the sandstones with graded bedding (gS). The material deposited underwent intensive diagenesis, including mainly its cementing with carbonates and silica, responsible for physical and mechanical properties of the rocks, but finally modified by weathering. Applying a statistical model, an impact of diagenetic cementation on the technical properties of the sandstones has been established. Considering the variable extent of the weathering processes, the sandstones of both subfacies have been further divided into three groups depending on differing alterations of their mineral components. Thus, the groups also differ in their physical and mechanical properties. As a result, the stone products have variable technical properties, strongly dependent on the place of their quarrying within the deposit.

Keywords: Magura sandstones, diagenesis, weathering, physical and mechanical rock properties

Wprowadzenie

Złoże „Osielec” zlokalizowane jest w miejscowości Osielec znajdującej się w województwie małopolskim, na terenie gminy Jordanów, w powiecie suskim. Obszar górniczy o nazwie „Osielec II” ma powierzchnię 0,3142 km². Teren górniczy o tej samej nazwie zajmuje powierzchnię 1,4356 km². Koncesja na wydobywanie wydana przez Wojewodę Małopolskiego obowiązuje do roku 2050 [1]. Złoże ma miąższość od 36,0 m w części południowo-wschodniej do 187,5 m w części za-

chodniej, średnio wynosząc 107,2 m. Eksploatacja wyrobiska o charakterze stokowym prowadzona jest pięcioma poziomami eksploatacyjnymi z postępowaniem w kierunku północnym, północno-zachodnim i zachodnim [1]. Piaskowce pozyskiwane w złożu są wykorzystywane między innymi do produkcji: kruszyw do mieszanek mineralno-asfaltowych i powierzchniowych utrwaleń na drogach publicznych, kruszyw do mieszanek niezwiązanych do dróg publicznych, kruszyw do betonu i zapraw oraz stosowane jako kamień do robót hydrotechnicznych i do elementów murowych.



Rys. 1. Widok ogólny północno-zachodniej części wyrobiska kopalni „Osielec”

Fig. 1. NW part of the Osielec quarry – a general view



Rys. 3. Strefa zwietrzenia (faza B) rozwijająca się od brzegów do wnętrza bloku piaskowca

Fig. 3. Weathering zone (B stage) grades into the inner part of a sandstone block

Złoże położone jest w raczańskiej strefie facjalno-tektonicznej płaszczowiny magurskiej Karpat fliszowych. Odsłania się w nim fragment profilu ogniwa piaskowca popradzkiego (eocen-oligocen) należącego do formacji magurskiej i opisanego przez Birkenmajera & Oszczypkę [2], Oszczypkę i in. [3], Bromowicza [4], Oszczypkę [5, 6]. W wyrobisku złoże obserwuje się lokalne, drobne zafałdowania zarówno po rozciągłości, jak i upadzie. W związku z tym w jego części północnej warstwy zapadają w kierunku południowym pod kątem od 50°, poprzez 30° w części środkowej, do kilkunastu stopni w części południowej (rys. 1). Ławice w wielu miejscach uległy spękaniu i rozerwaniu. Obecne są także drobne uskoki o kilkudziesięciocentymetrowych zrzutach.

W profilach litologicznych ogniwa piaskowców popradzkich reprezentujących różne obszary płaszczowiny magurskiej stwierdzono sekwencje o miąższościach w przedziale 10–40 m, reprezentowane przez piaskowce zlepieńcowate oraz piaskowce bezstrukturalne i uziarnione frakcjonalnie, a także przewarstwiałe je mułowce [4, 7]. Spośród nich w niniejszej pracy skoncentrowano się wyłącznie na piaskowcach odsłaniających się w złożu „Osielec”. Próbkę do badań w łącznej ilości 95 pobrano z całej miąższości profilu wyrobiska, poczynając od spągu i opróbowując kolejne ławice piaskowców oddalone od siebie o około 2 metry. Według zastosowanej hierarchicznej kla-



Rys. 2. Bryły piaskowców subfacji mS reprezentujące różne fazy zwietrzenia

Fig. 2. Lumps of the mS subfacies sandstones representing various stages of weathering

syfikacji Ghibaudo [8] pobrane próbki zostały zaliczone do facji piaskowców (S) z subfaccjami: piaskowców masywnych (mS) i uziarnionych frakcjonalnie (gS). Jako podstawę wyróżnienia litofacji przyjęto kryteria litologiczno-sedymentologiczne (frakcja, uławicenie), natomiast subfaccje zostały określone na podstawie zespołu struktur wewnątrzławicowych. Charakterystykę petrograficzną piaskowców wykonano na podstawie 22 preparatów mikroskopowych w świetle przechodzącym, reprezentujących subfaccję mS oraz 19 preparatów reprezentatywnych dla subfacji gS.

Analiza sedymentologiczna i petrograficzna piaskowców popradzkich wskazuje, że są one wynikiem depozycji z prądów o zmiennej energii, transportujących materiał o różnej wielkości ziarna, w mniejszym udziale są produktami osuwisk podmorskich. Materiał detrytyczny pochodził z nasypów litoralnych, pokrywających skłón kordyliery i podmorskich stożków. Dostarczany był on z południa i południowego – wschodu, a następnie transportowany w głębsze strefy basenu prądami zawieszinowymi [4, 9]. Charakter sedymentacji istotnie wpłynął na miąższość ławic, uziarnienie i rodzaj struktur wewnątrzławicowych. Miał też wpływ na zróżnicowane udziały ilościowe składników szkieletu ziarnowego i charakter spoiwa [4]. Zróżnicowany petrograficznie osad został poddany intensywnemu działaniu procesów diagenetycznych, kształtujących fizyczno-mechaniczne cechy piaskowców, które były modyfikowane następnie przez późniejsze zjawiska wietrzeniowe. Do charakterystycznych przejawów tych zmian zaliczono obecność wodorotlenków żelaza oraz spękanych ziaren kwarcu, a także przekształcanie ziaren detrytycznych, głównie skaleni i biotytu poprzez serycytyzację, chlorytyzację, kaolinityzację i kalcyfikację. Ze względu na różny stopień nasilenia wymienionych znamion wietrzenia składników mineralnych, piaskowce obu subfacji podzielone zostały na trzy grupy różniące się między sobą intensywnością obserwowanych w nich przekształceń. Odpowiadają one kolejnym fazom wietrzenia tych skał, którego przejawy w postaci zmiany zabarwienia widoczne są także makroskopowo (rys. 2).

Jako fazę A określono zwarte, niebiesko-szare piaskowce, o mniejszym niż 40% udziale składników mineralnych objętych wymienionymi powyżej procesami wietrzenia. Faza ta stanowi poziom odniesienia dla oceny jakości kopaliny reprezentującej pozostałe fazy wietrzenia. Do fazy B zaliczono piaskowce

nadwietrzałe o barwie szaro-rdzawej, dość zwarte. Udział minerałów objętych procesami wietrzenia kształtuje się w nich w zakresie 40-70%. Jako fazę C zdefiniowano piaskowce zwietrzałe o barwie żółtoszarej, słabo zwarte, osypujące się. Zawierają one powyżej 70% składników mineralnych objętych wietrzeniem. Opisane strefy zwietrzałe (faza B i faza C) obejmują niejednokrotnie dość grube, dochodzące do 40 cm fragmenty ławic, rozwijając się od powierzchni ich stropu i spągu, ku środkowi (rys. 3) oraz wokół spękań.

Rodzaj i intensywność wymienionych procesów diagenetycznych i wietrzeniowych spowodowały, że kopalina występująca w różnych częściach złoża „Osielec” charakteryzuje się zmienną jakością, warunkującą określone możliwości jej surowcowego wykorzystania. Dla określenia wartości najistotniejszych cech fizyczno-mechanicznych piaskowców, wykonano oznaczenie ich gęstości objętościowej (wg PN-EN 1936:2010 [10]), nasiąkliwości wagowej (wg PN-EN 13755:2002 [11]), wytrzymałości na ściskanie (wg PN-EN 1926:2001 [12]) i ścieralności na tarczy Boehmego (wg PN-84/B-04111 [13]). Badania wykonano na 57 próbkach reprezentujących subfację mS oraz 38 próbkach odpowiadających subfacji gS.

Zmienność petrograficzna piaskowców jako wynik zróżnicowanych warunków depozycji i diagenety osadu

Subfacja piaskowców masywnych (mS)

Tego typu utwory są odpowiednikiem wydzielonych przez Bromowicza [4] piaskowców bezstrukturalnych. Piaskowce subfacji mS tworzą ławice o miąższości 10–340 cm. Ich powierzchnie stropowe i spągowe są zwykle równe, niekiedy nierówne z wyraźnymi strukturami pogrągowymi, czasem

o płytowej oddzielności i kostkowym rozpadzie. W stropie widoczna jest wyraźna granica między piaskowcem i mułowcem. Ławice nie wykazują gradacji uziarnienia oraz uporządkowanych struktur wewnątrzławicowych. Piaskowce są przeważnie zwarte, drobno- lub średnioziarniste o rozmiarach ziaren od 0,03 mm do 1 mm, zwykle dość dobrze i umiarkowanie wysortowane, co wyraża wartość GSO w zakresie 0,40–0,85. Osady subfacji mS były deponowane prawdopodobnie gwałtownie z wysokogęstościowych, piaszczystych prądów zawieszinowych (por. [14–16]). W szkielecie ziarnowym piaskowców dominuje kwarc, głównie monokrystaliczny (tab. 1).

Jego detrytyczne ziarna są ostrokrawędziste lub półobtoczone (0,1–0,5 według klasyfikacji Krumbeina i Slossa [17]) z przejawami rozpuszczania i regeneracji. W wyraźnym mniejszym udziale obecne są skalenie, łyszczyki oraz większe ziarna nieco lepiej obtoczonych wapieni, mułowców, ilowców, piaskowców, kwarcytów, gnejsów, łupków metamorficznych i granitów. Podrzednymi składnikami są wodorotlenki żelaza i detrytus roślinny. W plagioklazach w różnym stopniu rozwinięta jest serycytyzacja i kalcyfikacja. Skalenie alkaliczne w wielu miejscach uległy kaolinityzacji, chlorytyzacji, rzadziej illityzacji. Łyszczyki ułożone są bezładnie i wykazują różny stopień zachowania oraz zmienne udziały ilościowe. Wśród nich nieznacznie liczniejszy jest muskowić zazwyczaj dość dobrze zachowany, w odróżnieniu od biotytu zwykle silnie chemicznie zmienionego. Miejscami obecne są skupienia piryty oraz wodorotlenków żelaza, a także pojedyncze ziarna cyrkonu i rutyli.

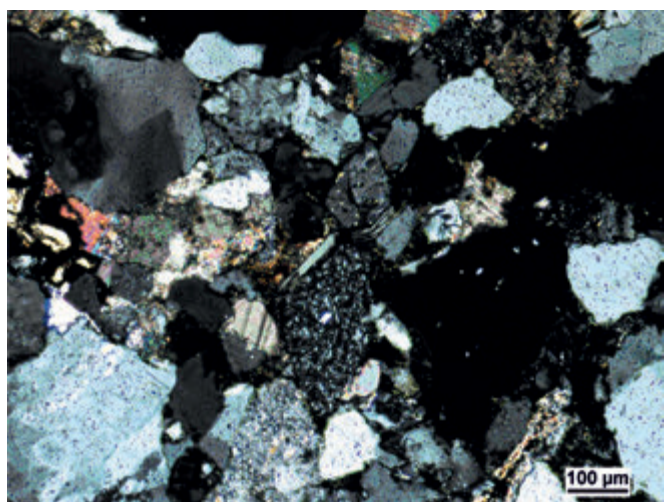
Spoiwo (tab. 1) stanowi mieszaninę składników ilastych, mikrytu kalcytowego, najdrobniejszych frakcji kwarcu oraz

Tab. 1. Skład mineralny piaskowców masywnych (subfacja mS) i uziarnionych frakcjonalnie (subfacja gS) ze złoża „Osielec”

Tab. 1. Mineral composition of the massive sandstones (mS subfacies) and the sandstones with graded bedding (gS subfacies) from the Osielec deposit

Rodzaj składnika	Piaskowce masywne (subfacja mS)	Piaskowce uziarnione frakcjonalnie (subfacja gS)
Kwarc – suma	40,2–53,1	36,2–50,8
- monokrystaliczny	23,5–35,0	11,5–35,9
- polikrystaliczny	5,4–28,6	10,2–26,8
Skalenie – suma	8,2–11,5	6,3–15,2
- alkaliczne	5,1–9,5	4,1–10,5
- plagioklasy	2,1–3,2	2,0–6,9
Miki – suma	1,4–2,3	5,1–15,7
- biotyt	0,2–1,1	1,8–8,6
- muskowić	1,1–1,3	2,3–8,0
Litoklasty – suma	6,2–24,8	5,1–22,8
- skały osadowe	2,7–10,5	0,3–9,0
- skały magmowe	2,1–5,3	0,2–19,6
- skały metamorficzne	0,1–7,8	0,3–3,2
Piryty i wodorotlenki żelaza	0,5–1,4	0,7–2,5
Spoiwo – suma	20,3–26,8	7,2–22,4
- krzemionkowe	9,1–12,8	1,6–6,6
- ilaste	5,6–6,8	1,1–7,8
- węglanowe – suma	5,9–8,3	2,9–15,4
mikrytowe	1,3–3,5	1,1–11,7
sparytowe	3,8–5,2	1,8–13,0

cementu kalcytowego, dolomitowego i kwarcowego. Składniki węglanowe są różnie wykształcone. W pierwszym rzędzie jest to mikryt kalcytowy, którego ziarna często przetykane są blaszkami minerałów ilastych. W wielu miejscach sąsiaduje on z kalcytowym sparytem. Granice między oboma typami węglanów są przeważnie rozmyte. Cement węglanowy tworzą współwystępujące ze sobą różne fazy mineralne o zróżnicowanej morfologii. Kalcyt i dolomit obecne są dość powszechnie, tworząc anhedralne formy dopasowane wielkością i kształtem do istniejących przestrzeni międzyziarnowych. Najczęściej wyraźnie koncentrują się w pobliżu rozpuszczanych litoklastów węglanowych. Wykazują zmienne rozmiary od bardzo drobnych do dużych. Cement kalcytowy powszechnie wypełnia mikrospekania tektoniczne obecne w skale, a także zastępuje plagioklasy, natomiast rzadziej obecny jest w korozyjnych zatokach kwarcu i litoklastów magmowych oraz metamorficznych. Składniki ilaste spoiwa, to głównie skupienia drobnych detrytycznych blaszek illitów i chlorytów. Nieliczny kaolinit najczęściej grupuje się wokół mikrospeków w ziarnach skaleni lub obejmuje całą ich powierzchnię, tworząc pseudomorfozy. Wśród składników krzemionkowych dominuje cement kwarcowy. Tworzą go mikrokryształiczne ziarna kwarcu. Wypełniają one w różnym stopniu przestrzenie międzyziarnowe oraz narastają na części ziaren kwarcu detrytycznego (rys. 4). W niektórych częściach próbek kryształły te łączą się tworząc obwódki regeneracyjne na ziarnach kwarcu. W sporadycznych przypadkach detrytyczne ziarna kwarcu przybrały geometryczne kształty albo powstały pomiędzy nimi kontakty zazębiające, będące skutkiem zetknięcia się wzrastających naprzeciw siebie obwódek.



Rys. 4. Obraz mikroskopowy w świetle przechodzącym piaskowca subfacji mS. Polaryzatory skrzyżowane. Cement krzemionkowy i skupienia minerałów ilastych pomiędzy ziarnami detrytycznymi

Fig. 4. A sandstone of the mS subfacies – a transmitted light microphotograph. Crossed polarizers. Siliceous cement and accumulations of clay minerals among detrital grains

Utworki subfacji mS, według klasyfikacji Pettijohna i in. [18], reprezentują arenity lityczne i waki lityczne.

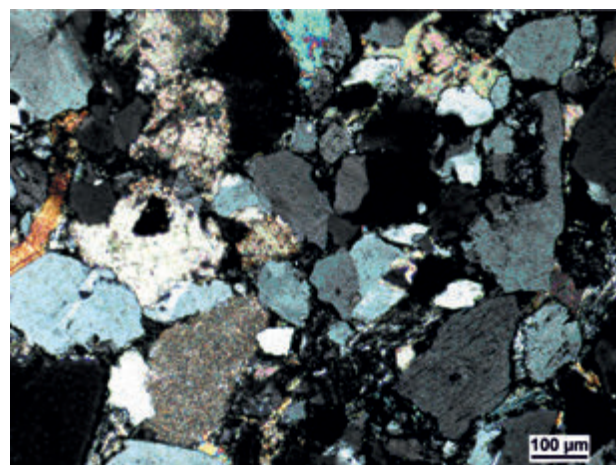
Subfacja piaskowców uziarnionych frakcjonalnie (gS)

Piaskowce odpowiadają pod względem litologii wydzielonemu w formacji magurskiej przez Bromowicza [4] piaskowcom warstwowanym frakcjonalnie o średnim i małym rozsiewie ziarna. Powierzchnie spągowe i stropowe ławic są zwykle równe o ostrych granicach. Większość piaskowców cechuje się zwykle dużą zwięzłością, natomiast tylko niektóre

z nich są kruche i rozsypliwe. Piaskowce tej subfacji tworzą ławice o miąższości 50-250 cm i frakcjonalnym uziarnieniu, polegającym na obecności grubszego (do 1,2 mm) materiału w spągu ławicy, wyżej przechodzącego w drobniejszy (do 0,06 mm) lub istnieniem wielokrotnego uziarnienia frakcjonalnego, związanego prawdopodobnie z amalgamacją ławic. Osady reprezentujące subfację gS powstały prawdopodobnie w wyniku szybkiej depozycji materiału umożliwiającej jego rozfrakcjonowanie (por. [14, 15]).

W szkielecie skały w nieco mniejszym udziale niż w subfacji mS obecne są ziarna kwarcu oraz litoklasty metamorficzne, wśród których wyróżnia się, podobnie jak w innych profilach piaskowców popradzkich [4, 7]: gnejsy, kwarcyty oraz łupki kwarcowo-łyszczykowe. Nieco mniej liczne są także okruchy skał osadowych, głównie wapieni mikrytowych i sparytowych. W znacznie większym udziale niż w subfacji mS występują natomiast litoklasty magmowe reprezentowane przez granity (tab. 1). W stropowych, drobniej uziarnionych częściach ławic, litoklastów jest mniej lub jest ich brak, a przeważają ziarna monokryształicznego kwarcu zwykle ze znamionami korozji oraz ziarna zsercytyzowanych i skalcyfikowanych skaleni. W piaskowcach subfacji gS ziarna szkieletu są ostrokrawędziste i półobtoczone, czasem z kompakcyjnymi wciskami. Kwarce w wielu przypadkach są spękane, a na powierzchniach pojedynczych ziaren zaznaczają się przejawy ich rozpuszczania i regeneracji, prowadzącej do narastania obwódek krzemionkowych. Niekiedy obwódki obecne na dwóch lub trzech sąsiadujących ze sobą ziarnach uległy połączeniu ze sobą i pomiędzy takimi ziarnami powstały proste kontakty. W przypadku niekompletnego rozwinięcia obwódek regeneracyjnych pomiędzy ziarnami obecne są drobne pory o wielobocznych przekrojach. Łyszczyki są w różnym stopniu zmienione, rzadko natomiast kompakcyjnie zdeformowane. Biotyt podlega chlorytyzacji. Oprócz wymienionych składników detrytycznych stwierdzono obecność podrzędnych ilości cyrkonu, rutylu i piryty w wodrotenków żelaza.

W omawianych piaskowcach subfacji gS spoiwo jest węglanowo-ilasto-krzemionkowe o charakterze porowym lub podstawowym, a tylko lokalnie - kontaktowym (tab. 1). Cement kalcytowy wykazuje zróżnicowane rozmiary kryształów osiagające maksymalnie 0,3 mm (rys. 5).



Rys. 5. Obraz mikroskopowy w świetle przechodzącym piaskowca subfacji gS. Polaryzatory skrzyżowane. Węglanowe składniki spoiwa – mikryt i sparyt w przestrzeni międzyziarnowej

Fig. 5. A sandstone of the gS subfacies – a transmitted light microphotograph. Crossed polarizers. Carbonate cement components, micrite and sparite, in the intergranular space

Kalcyt tworzy ponadto liczne pseudomorfozy zastępując rozpuszczane skalenie, a także intensywnie koroduje ziarna kwarcu oraz litoklasty magmowe i metamorficzne. Minerale ilaste, głównie illit i chloryty, wchodzące w skład spoiwa ilastego piaskowców są podobnie wykształcone jak we wcześniej omówionej subfacji. Wśród składników krzemionkowych dominuje cement mikrokryształiczny, głównie w strefach o dużej zawartości litoklastów magmowych i metamorficznych. Spoiwo o charakterze obwódek regeneracyjnych na detrytycznych ziarnach kwarcu występuje rzadziej, zazwyczaj w stropowych częściach ławic.

Piaskowce uziarnione frakcjonalnie subfacji gS, według klasyfikacji Pettijohna i in. [18], należą głównie do arenitów litycznych. W pojedynczych przypadkach są to waki lityczne i skaleniowe oraz arenity arkozowe.

Wykonane obserwacje petrograficzne wykazały, że utwory obu subfacji: mS i gS różniących się cechami strukturalno-teksturalnymi są wzajemnie podobne pod względem składu petrograficznego, natomiast wykazują różnice w zakresie udziału poszczególnych składników mineralnych. Zdeponowany materiał detrytyczny podlegał intensywnym przemianom diagenetycznym. Wśród nich największy wpływ na silną konsolidację osadu miały procesy cementacji zachodzące na różnych etapach diagenety. Węglanowe, krzemionkowe i ilaste cementy ortochemiczne łącznie z detrytycznymi składnikami spoiwa dość dokładnie wypełniły przestrzeń porową piaskowców, decydując o ich dużej zwięzłości. Nieco mniejsze znaczenie miały procesy dolomityzacji kalcytu, rekrystalizacji mikrytu oraz przeobrażania minerałów ilastych. Ze stosunkowo niewielką intensywnością zachodziło także diagenetyczne rozpuszczanie składników węglanowych i kwarcu.

Wpływ warunków depozycji oraz przemian diagenetycznych i wietrzeniowych na fizyczno-mechaniczne właściwości piaskowców

Wykazany badaniami petrograficznymi dominujący wpływ procesów diagenetycznej cementacji osadu na własności techniczne piaskowców poddano analizie statystycznej. W tym celu dla 15 próbek subfacji mS i 11 próbek subfacji gS reprezentujących słabo zwietrzałe piaskowce (faza A) określono wpływ udziału poszczególnych składników spoiwa ukształtowanych na etapie diagenety na wartość wybranych właściwości technicznych.

Analizę przeprowadzono przy użyciu programu *Statistica* według statystycznego planu sympleksowo-kratowego typu {3,2}. Jako zmienne materiałowe przyjęto udziały trzech głównych rodzajów spoiwa: węglanowego, krzemionkowego i ilastego. Zgodnie z założeniami analizy [19] zostały one przeliczone w ten sposób, że ich suma stanowiła 100%. Jako zmienne zależne przyjęto wartości zbadanych właściwości: wytrzymałości na ściskanie, nasiąkliwości wagowej oraz ścieralności na tarczy Boehmego. Celem badania było dopasowanie do danych takiego modelu, który w zadowalający sposób objaśniałby zachowanie się wyników pomiarów dla zmiennej zależnej. Dla rozpatrywanego zbioru danych zaplanowano model liniowy. Ocena statystycznej istotności współczynników regresji mierzona wartością bezwzględną parametru *t*-Studenta, pozwoliła określić znaczenie wielkości wejściowych (czyli poszczególnych składników spoiwa) oraz efektu ich współdziałania. Analiza tych wielkości, przy

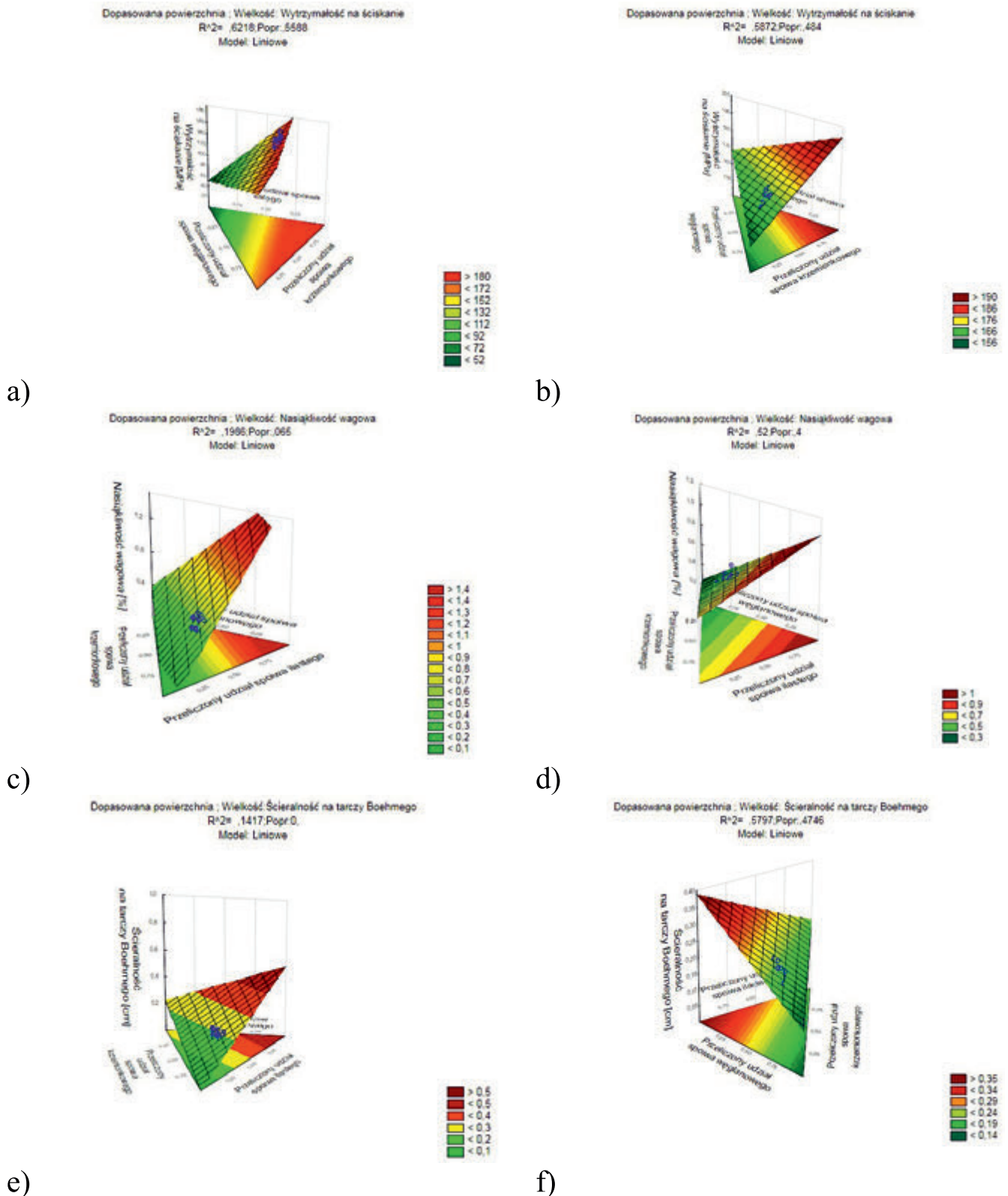
założonym poziomie istotności $p=0,05$ umożliwiła wskazanie tych, które są statystycznie znaczące i powinny być włączone do modelu. Dało to podstawę do sformułowania wniosków dotyczących wpływu poszczególnych składników spoiwa oraz efektów synergicznych pomiędzy nimi na cechy techniczne piaskowców. Uzyskane wyniki dla poszczególnych właściwości przedstawiono na rysunku 6.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że w przypadku piaskowców subfacji mS wzrost wytrzymałości na ściskanie jest wyraźnie związany z synergicznym oddziaływaniem dużej ilości spoiwa krzemionkowego w połączeniu z niewielkim udziałem spoiwa ilastego (rys. 6a). Minerale węglanowe spoiwa mają mniejszy, chociaż statystycznie istotny wpływ na wartość tego parametru, co wynika z faktu, że reprezentowane są one przez składniki różniące się cechami mechanicznymi, czyli dość liczny, odporny mechanicznie sparyt kalcytowy i dolomitowy oraz rzadziej występujący, nieodporny mikryt kalcytowy (tab. 1). W przypadku piaskowców subfacji gS rola udziału składników ilastych i krzemionkowych w kształtowaniu wielkości wytrzymałości na ściskanie jest analogiczna (rys. 6b), natomiast mało wyraźny jest wpływ węglanów, co wynika ze wzajemnie porównywalnych ilości mikrytu i sparytu w tych skałach (tab. 1).

Odmienne jest sytuacja dla nasiąkliwości wagowej, bowiem głównymi czynnikami decydującymi o wzroście tego parametru jest w obu odmianach piaskowców (mS i gS) duży udział spoiwa ilastego oraz mała zawartość spoiwa węglanowego (rys. 6c,d). Różnicę natomiast zauważa się w przypadku spoiwa krzemionkowego. Jego kilkukrotnie większy udział w piaskowcach subfacji mS aniżeli w subfacji gS (tab. 1), powoduje w tych pierwszych uszczelnienie porów i decyduje o mniejszym wpływie tego składnika na wzrost nasiąkliwości.

Wzrost ścieralności na tarczy Boehmego, podobnie jak nasiąkliwości wagowej, jest silnie zależny od synergicznej relacji pomiędzy dużym udziałem spoiwa ilastego oraz małą ilością węglanów (rys. 6e,f). Duża zawartość spoiwa krzemionkowego ma natomiast, z oczywistych względów, istotny wpływ na obniżanie ścieralności, przy czym w subfacji mS występuje to w synergii z niewielką ilością spoiwa ilastego, natomiast w subfacji gS, raczej z dużym udziałem spoiwa węglanowego, w którym znaczny udział ma nieodporny mechanicznie mikryt.

Badania właściwości piaskowców obu subfacji reprezentujących poszczególne fazy wietrzenia wykazały, że w próbkach nadwietrzalnych (faza B) dochodzi do niewielkiego wzrostu gęstości objętościowej oraz obniżenia nasiąkliwości w stosunku do poziomu odniesienia, jaki stanowi faza A (tab. 2). Może to być związane z nieznacznym uszczelnieniem przestrzeni porowej skały między innymi przez powstające wodorotlenki żelaza. Pogorszeniu natomiast ulegają właściwości mechaniczne: wytrzymałość na ściskanie i ścieralność na tarczy Boehmego. W próbkach reprezentujących fazę C obserwuje się natomiast zjawiska typowe dla skał zwietrzalnych, czyli obniżenie gęstości objętościowej oraz wzrost nasiąkliwości, przy jednoczesnym obniżeniu wytrzymałości na ściskanie i wzroście ścieralności na tarczy Boehmego (tab. 2). Jednocześnie zauważa się ogólną prawidłowość wyrażającą się tym, że piaskowce uziarnione frakcjonalnie (subfacja gS) zarówno w stanie niezmiennym, jak też na różnym etapie wietrzenia, posiadają nieco gorszy poziom parametrów fizyczno-mechanicznych od piaskowców masywnych (subfacja mS).



Rys. 6. Wykresy zależności pomiędzy udziałem cementu węglanowego, krzemionkowego i ilastego spoiwa piaskowców a ich fizyczno-mechanicznymi właściwościami

a) zależność pomiędzy udziałem składników spoiwa a wytrzymałością na ściskanie w piaskowcach subfacji mS; b) zależność pomiędzy udziałem składników spoiwa a wytrzymałością na ściskanie w piaskowcach subfacji gS; c) zależność pomiędzy udziałem składników spoiwa a nasiąkliwością wagową w piaskowcach subfacji mS; d) zależność pomiędzy udziałem składników spoiwa a nasiąkliwością wagową w piaskowcach subfacji gS; e) zależność pomiędzy udziałem składników spoiwa a ścieralnością na tarczy Boehmego w piaskowcach subfacji mS; f) zależność pomiędzy udziałem składników spoiwa a ścieralnością na tarczy Boehmego w piaskowcach subfacji gS

Fig. 6. Graphs showing dependencies between the contents of carbonate, siliceous and clay cements of the Osielec sandstones and their physical and mechanical properties

a) the content of cement versus the compression strength – the sandstones of the mS subfacies; b) the content of cement versus the compression strength – the sandstones of the gS subfacies; c) the content of cement versus water absorbability – the sandstones of the mS subfacies; d) the content of cement versus water absorbability – the sandstones of the gS subfacies; e) the content of cement versus the Boehme disc grindability – the sandstones of the mS subfacies; f) the content of cement versus the Boehme disc grindability – the sandstones of the gS subfacies

Tab. 2. Fizyczno-mechaniczne właściwości piaskowców masywnych (subfacja mS) i uziarnionych frakcjonalnie (subfacja gS) reprezentujących różne fazy wietrzenia

Tab. 2. Physical and mechanical properties of the massive sandstones (mS subfacies) and the sandstones with graded bedding (gS subfacies) representing various stages of weathering

Odmiana piaskowca	Stopień zwietrzenia piaskowca	Gęstość objętościowa [g/cm ³]	Nasiąkliwość wagowa [%]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	Ścieralność na tarczy Bohmego [cm]
Piaskowce masywne (subfacja mS) n = 57	Faza A (n = 15)	2,60-2,63	0,38-0,65	168-180	0,16-0,22
	Faza B (n = 18)	2,61-2,64	0,33-0,62	155-170	0,20-0,46
	Faza C (n = 24)	2,45-2,62	2,21-3,12	98-158	0,44-0,56
Piaskowce uziarnione frakcjonalnie (subfacja gS) n = 38	Faza A (n = 11)	2,56-2,61	0,41-0,66	162-171	0,18-0,25
	Faza B (n = 13)	2,57-2,62	0,40-0,65	145-165	0,20-0,50
	Faza C (n = 14)	2,31-2,35	2,93-3,65	86-150	0,48-0,69

Objaśnienia: n – liczba próbek. Stopień zwietrzenia piaskowców określono jako udział składników mineralnych objętych procesami wietrzenia, w fazie A: poniżej 40%, w fazie B: 40-70% i w fazie C: powyżej 70%.

Podsumowanie

Wykonane badania wykazały, że piaskowce masywne (subfacji mS) oraz frakcjonalnie uziarnione (subfacji gS) obecne w profilu litologicznym złoża Osielec, różnią się między sobą udziałem detrytycznych składników szkieletu ziarnowego oraz spoiwa powstałego w wyniku procesów diagenetycznych, zdominowanych przez zjawisko cementacji. Skały te różnią się także wartościami fizyczno-mechanicznymi właściwościami ukształtowanymi na etapie diagenety i wietrzenia. Stwierdzono, że korzystniejsze wartości tych parametrów, zarówno w odmianach świeżych, jak też zwietrzałych, posiadają piaskowce masywne, charakteryzujące się drobnym i średnim uziarnieniem i dość dobrym wysortowaniem, a także znacznym udziałem spoiwa krzemionkowego. Ten składnik spoiwa w połączeniu z niewielkim udziałem minerałów ilastych wpływa istotnie na wzrost wytrzymałości na ściskanie oraz zmniejszenie ścieralności i nasiąkliwości piaskowców obu odmian. Wpływ minerałów węglanowych spoiwa, na fizyczno-mechaniczne właściwości omawianych skał jest zróżnicowany, w zależności od udziału sparytu i mikrytu, różniących się między sobą stopniem odporności mechanicznej.

W odniesieniu do stosunkowo dobrze zachowanych piaskowców subfacji mS i gS (faza A), w próbkach nadwietrzonych, reprezentujących fazę B, nieznacznie wzrasta wartość ich gęstości objętościowej oraz maleje nasiąkliwość, wskutek uszczelnienia porów skały przez tworzące się wodorotlenki żelaza. Jednocześnie w niewielkim stopniu obniża się wytrzymałość na ściskanie i wzrasta ścieralność na tarczy Bohmego. W bardziej zaawansowanym stadium wietrzenia (faza C) obserwuje się typowe dla tego etapu, wyraźnie pogorszenie wszystkich fizyczno-mechanicznych właściwości tych skał.

Zróżnicowane wartości fizyczno-mechanicznych właściwości piaskowców masywnych (mS) i uziarnionych frakcjonalnie (gS), uzależnione od warunków ich depozycji, diagenety i wietrzenia, decydują o jakości kopaliny eksploatowanej w złożu „Osielec”. Nierównomierne rozmieszczenie w profilu złoża poszczególnych odmian kopaliny różniących się parametrami technicznymi może wpływać na zmienną jakość kruszywa produkowanego w zakładzie przeróbczym, uzależnioną od miejsca prowadzonej eksploatacji. Zjawisku temu można przeciwdziałać prowadząc wydobywanie równocześnie w kilku obszarach złoża, a następnie dokonując homogenizacji pozyskanego surowca (rys. 7).

sztyw produkowanych w zakładzie przeróbczym, uzależnioną od miejsca prowadzonej eksploatacji. Zjawisku temu można przeciwdziałać prowadząc wydobywanie równocześnie w kilku obszarach złoża, a następnie dokonując homogenizacji pozyskanego surowca (rys. 7).



Rys. 7. Kruzywo złożone z ziaren reprezentujących obie odmiany facjalne piaskowców (mS i gS) oraz różny stopień zwietrzenia

Fig. 7. A crushed product composed of grains belonging to both facies varieties (mS and gS sandstones) and revealing various stages of weathering

Oddzielnym problemem, powszechnym także w innych złożach [20, 21] jest tendencja do łatwiejszego rozdrabniania mniej odpornych mechanicznie odmian kopaliny i liczniejszego gromadzenia się ich w drobniejszych frakcjach produkowanego kruszywa. W takich sytuacjach kruszywa drobniej uziarnione mogą charakteryzować się nieco gorszymi parametrami od kruszyw grubszych frakcji.

Praca została zrealizowana w Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska. Badania finansowane były ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego przeznaczonych na naukę, w ramach realizacji prac statutowych nr 11.11.140.320.

Literatura

- [1] Plan Ruchu sporządzony w formie uproszczonej dla odkrywkowego zakładu górniczego, Kopalnia kamienia „Osielec” na okres 05.08.2008-04.08.2013
- [2] Birkenmajer K., Oszczypko N.: *Cretaceous and Palaeogene lithostratigraphic units of the Magura Nappe, Krynica Subunit, Carpathians*. Annales Societatis Geologorum Poloniae, 1989, 59: 145–181
- [3] Oszczypko N., Dudziak J., Malata E.: *Stratygrafia osadów płaszczowiny magurskiej (kreda - paleogen) w Beskidzie Sądeckim*, Karpaty zewnętrzne. Studia Geologica Polonica, 1990, 47: 109–163
- [4] Bromowicz J.: *Basen sedymentacyjny i obszary źródłowe piaskowców magurskich*. Zeszyty Naukowe AGH, 1992, 54, s. 120
- [5] Oszczypko N.: *Rozwój basenu magurskiego w górnej kredzie i paleogenie*. Przegląd Geologiczny, 1992, 7: 397–404
- [6] Oszczypko N.: *Tabela stratygraficzna Polski. Karpaty. Paleogen i neogen*. Państwowy Instytut Geologiczny. Wyd. Ministerstwo Środowiska, Warszawa, 2008
- [7] Rembiś M.: *Społwa piaskowców ropianieckich i magurskich między Rabką a Grybowem na tle ich warunków sedymentacji i przemian diagenetycznych*. Prace Geologiczne. 2002, 149: s. 78
- [8] Ghibaudo G.: *Subaqueous sediment gravity flow deposits: particular criteria for their field description and classification*. Sedimentology, 1992, 39 (3): 423–454
- [9] Cieszkowski M., Oszczypko N., Zuchiewicz W.: *Upper Cretaceous siliciclastic - carbonate turbidites at Szczawa, Magura Nappe, West Carpathians, Poland*. Bull. Pol. Acad. Sci., Earth Sci., 1989, 37 (3–4): 231–246
- [10] PN-EN 1936:2010. *Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie gęstości i gęstości objętościowej oraz całkowitej i otwartej porowatości*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2010
- [11] PN-EN 13755:2002. *Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie nasiąkliwości przy ciśnieniu atmosferycznym*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2002
- [12] PN-EN 1926:2001. *Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie wytrzymałości na ściskanie*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2001
- [13] PN-84/B-04111 *Materiały kamienne. Oznaczenie ścieralności na tarczy Boehmego*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 1984
- [14] Lowe D. R.: *Sediment gravity flows, II. Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents*. Jour. Sedim. Petrology, 1982, 52: 279–297
- [15] Słomka T.: *Głębokomorska sedymentacja silikoklastyczna warstw godulskich Karpat*. Prace Geol., 1995. 139: 1–132
- [16] Surlyk F.: *Fan-delta to submarine fan conglomerates of the Volgian - Valanginian Wollaston Foreland Group, East Greenland* (In) Koster E. H., Steel R. J. [red.], *Sedimentology of Gravels and Conglomerates*. Can. Soc. Petrol. Geol. Mem., 1984, 10: 359–382
- [17] Krumbein W. C., Sloss L. L.: *Stratigraphy and Sedimentation, 2nd edition*. Freeman, San Francisco, 1963
- [18] Pettijohn F. J., Potter P. E., Siever R.: *Sand and Sandstone*. Springer - Verlag. Berlin-Heidelberg-New York, 1972, 618 p
- [19] StatSoft. *Elektroniczny Podręcznik Statystyki PL*, Krakow, 2006, WEB: <http://www.statsoft.pl/textbook/stathome.html>
- [20] Bromowicz J.: *Zakres zmian właściwości fizyczno-mechanicznych skał w procesie przeróbki kruszyw łamanych*. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej. Konferencje. 2001, 90, 30: 13-32
- [21] Rembiś M.: *Mineralno-teksturalna zmienność wybranych skał bazaltowych Dolnego Śląska i jej rola w kształtowaniu fizyczno-mechanicznych właściwości produkowanych kruszyw*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi. 2011, 27: 29-49