



Beata FIGARSKA-WARCHOŁ\*, Grażyna STAŃCZAK\*

## **Wpływ petrograficznego zróżnicowania piaskowców krośnieńskich na ich właściwości fizyczno-mechaniczne w złożach Górka-Mucharz i Skawce (Beskid Mały)**

Streszczenie: Ze względu na szerokie rozprzestrzenienie i stosunkowo wysoką jakość piaskowce krośnieńskie należą do najczęściej wykorzystywanych materiałów kamiennych Karpat. Leżące we wschodniej części Beskidu Małego złoża Górka-Mucharz i Skawce stały się przedmiotem badań niniejszego artykułu. Po dokonaniu obserwacji terenowych i badań odbojności do dalszych badań wybrano próbki piaskowców, które zaklasyfikowano na podstawie cech makroskopowych do siedmiu typów petrograficznych, przy czym pięć z nich reprezentowało świeże, niezmięcone odmiany, zaś dwa pozostałe objęte były procesami wietrzenia. Kolejne badania polegały na wykonaniu dokładnej charakterystyki mikroskopowej odmian, obejmującej opis składników, ilościową analizę składu oraz granulometrię. Potwierdziły one różnice wykształcenia piaskowców wyróżnionych typów. W trakcie badań laboratoryjnych oznaczono gęstość objętościową, nasiąkliwość wagową oraz wytrzymałość na ściskanie dla próbek nieforemnych, przeliczoną następnie na wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie próbek foremnych. Wykonane następnie badania właściwości fizyczno-mechanicznych wykazały odmienną uzyskiwanych wyników dla poszczególnych typów. Najwyższą jakością odznaczały się piaskowce laminowane skorupowo lub poziomo (typy IV i V), osiągając średnie wartości wytrzymałości na ściskanie odpowiednio 115 MPa i 154 MPa, przy wysokiej gęstości pozornej (2,66–2,67 Mg/m<sup>3</sup>). Wiązało się to z ich drobno- i bardzo drobnoziarnistą teksturą oraz wysokim udziałem spoiwa (20–29% obj.). W jego składzie przeważał węglanowy cement, ale towarzyszyły mu także obwódki regeneracyjne na ziarnach kwarcu i w mniejszym udziale matriks ilasta. Przeciętne wartości parametrów jakościowych, bliskie przedstawianym w literaturze i dokumentacjach złóż, wykazywały drobnoziarniste piaskowce masywne (typ I). Wśród odmian niezwiędzłych najsłabszą odporność na ściskanie (ok. 88 MPa), przy stosunkowo wysokiej nasiąkliwości wagowej (ok. 1,2%), wykazywały piaskowce różnoziarniste (typy II i III), w których spoiwo węglanowe osiągało niewielki udział około 10% obj., zaś cement kwarcowy (1,0% obj.) utworzył zaczątkowe formy obwódek regeneracyjnych. Większe składniki detrytyczne (głównie fragmenty łupków łuszczycowych i skał magmowych) uległy częściowemu lub całkowitemu rozkładowi, rozluźniając szkielet ziarnowy skały zbudowany z okruchów o przeważających wklęsło-wypukłych i prostych kontaktach. W pracy wykazano zasadność wyróżniania typów petrograficznych w złożach piaskowców na podstawie prostych badań makroskopowych, łatwych do wykonania przez geologa górniczego.

Słowa kluczowe: Karpaty, Beskid Mały, piaskowce krośnieńskie, petrografia, właściwości fizyczno-mechaniczne, anizotropia

\* Dr inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; e-mail: figarska@agh.edu.pl, stanczak@agh.edu.pl

## **The effect of petrographic diversity of the Krosno Sandstones on their physico-mechanical properties in the Górka-Mucharz and Skawce deposits (Beskid Mały Mountains)**

**Abstract:** Due to the wide distribution and relatively high quality, Krosno Sandstones are the most commonly used stone materials in the Carpathians. Located in the Eastern part of the Beskid Mały Mountains, the Górka-Mucharz and Skawce deposits are the subject of research of this article. After field observations and Schmidt hammer tests, sandstone samples were selected for further study, classified into 7 petrographic types on the basis of macroscopic characteristics, wherein 5 of them represented fresh, intact varieties, and the other 2 were weathered. Subsequent tests involved microscopic studies including a description of components, quantitative analysis of composition and granulometry. They confirmed differences in the distinguished types of sandstones. Laboratory tests included determining bulk density, water absorption and compressive strength for irregularly shaped samples, then converted to the uniaxial compressive strength of regularly shaped samples. The subsequent of physico-mechanical property tests revealed the diversity of the results for the individual types. Convolute or parallel laminated sandstones (types IV and V) were characterized by the highest quality, achieving average compressive strength values, respectively of 115 MPa and 154 MPa, and a high bulk density (2.66–2.67 Mg/m<sup>3</sup>). It was associated with their fine- and very fine-grained texture and a high proportion of cement and matrix (20–29% by volume). Its composition was dominated by carbonate cement, which was also accompanied by outgrowths on the quartz grains and with a lesser participation of a clay matrix. The average values of quality parameters, close to those presented in literature and documentation of the deposits were found for fine-grained massive sandstones (type I). Among the unweathered varieties, the weakest compressive strength (approx. 88 MPa), with a relatively high water absorption (approx. 1.2%) was found for poorly sorted sandstones (types II and III), in which a small proportion of carbonate cement and matrix reached the level of approx. 10% by volume, and quartz cement (1.0% by volume) created early forms of outgrowths. Larger detrital components (mainly fragments of mica schists and igneous rocks) were partially or completely decomposed, loosening the rock fabric, which was composed of debris with prevailing concave-convex and long contacts. The study demonstrated the validity of distinguishing petrographic types of sandstones in deposits on the basis of simple macroscopic tests, which are easy to perform by a mining geologist.

**Keywords:** Carpathians, Beskid Mały Mountains, Krosno Sandstones, petrography, physical and mechanical properties, anisotropy

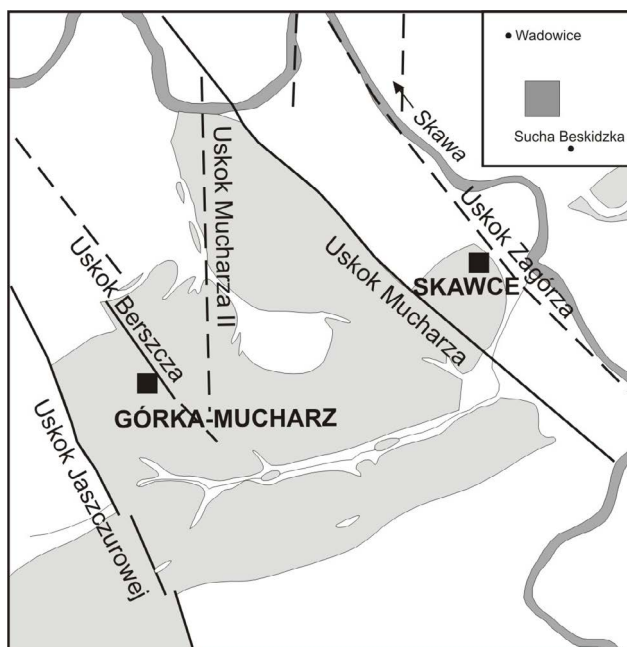
### **1. Przedmiot i cel badań**

Piaskowce krośnieńskie należą do najczęściej eksploatowanych materiałów kamiennych w Karpatach. Szeroki wachlarz ich zastosowań – od płyt okładzinowych, przez materiał używany w robotach hydrotechnicznych, do składnika betonów – wymusza na producentach eksploatację materiału o odpowiednich parametrach technicznych. Rozpoznanie zmienności petrograficznej piaskowców w obrębie złoża i określenie właściwości poszczególnych odmian litologicznych daje możliwość odpowiedniego wykorzystania kopaliny.

Do znanych złóż, w których eksploatuje się tę kopalinę należą Górka-Mucharz i Skawce, leżące we wschodniej części Beskidu Małego w odległości około 10 km na południe od Wadowic (rys. 1). Pierwsze z nich znajduje się w NE zboczu góry Jedlicznik na wysokości około 380–420 m n.p.m. Drugie, oddalone o 2,5 km w kierunku NEE, zlokalizowane jest we wschodnim stoku niewielkiego wzniesienia, stromo opadającym ku Skawie, na wysokości 300–350 m n.p.m. Dokumentacje geologiczne obu złóż wykonano na początku lat siedemdziesiątych XX wieku (Bogacz 1973; Znańska 1974), a w ostatnim czasie odsłaniające się w nich piaskowce krośnieńskie były przedmiotem badań zależności pomiędzy ich właściwościami fizycznymi, wytrzymałościowymi i sprężystymi (Dziedzic 2003; Łukaszewski 2005; Pieczara 2014; Pinińska red. 2003). Celem niniejszej pracy była analiza podstawowo-

wych właściwości, wykorzystywanych w ocenie jakościowej tych surowców, w odniesieniu do zróżnicowanych odmian petrograficznych oraz wykazanie przydatności prostych metod badań petrograficznych w ocenie jakościowej złóż piaskowców.

Piaskowce krośnieńskie należą do najmłodszych, oligoceńskich osadów jednostki śląskiej (Golonka i Waškowska-Oliwa 2007), którą w rejonie złóż Górka-Mucharz i Skawce przecinają liczne uskoki, zrzucające zwykle swoje wschodnie skrzydła (Książkiewicz 1974b; Cieszkowski i in. 2006) (rys. 1). Współcześnie (Wójcik i in. 1995) formacja krośnieńska (fm) odpowiada częściowo wyróżnianemu przez J. Burtan i in. (1937) oraz M. Książkiewicza (1951) dolnemu poziomowi warstw krośnieńskich. Według późniejszego, czterodzielnego podziału tych warstw, zaproponowanego przez M. Moroz-Kopczyńską (1977), utwory te należą do wyższej części II kompleksu litologicznego, w którym dominują piaskowce gruboławicowe, początkowo z wkładkami łupków bitumicznych oraz syderytów, później z cienkimi przerostami łupków zapiaszczonych.



Rys. 1. Lokalizacja omawianych złóż (czarne kwadraty) na tle wychodni warstw krośnieńskich (wg Książkiewicz 1974a; Cieszkowski i in. 2006)

Fig. 1. Location of the deposits (black squares) against the background of the map of the Krosno Beds outcrops (acc. to Książkiewicz 1974a; Cieszkowski et al. 2006)

## 2. Metodyka badań

W trakcie prac terenowych przeprowadzono obserwacje wykształcenia piaskowców krośnieńskich na wszystkich odsłoniętych poziomach złoże Górka-Mucharz oraz na naj-

nizszym, eksploatacyjnym poziomie złoza Skawce. Na miejscu dokonano także pomiarów liczby odbicia przy użyciu młotka Schmidta typu N. Dla uzyskanych pomiarów zastosowano odpowiednie poprawki i przeliczenia opisane w instrukcji obsługi urządzenia, normie PN-EN 12504-2 i literaturze (Pforr 1975), dzięki czemu wstępnie określono wartość wytrzymałości na ściskanie opisywanych skał.

Do dalszych badań pobrano łącznie 104 próbki skał, w tym 72 ze złoza Górka-Mucharz i 32 ze Skawiec, które na podstawie cech makroskopowych zostały zaklasyfikowane do kilku typów petrograficznych. Dla większości z nich wykonano laboratoryjne oznaczenia nasiąkliwości wagowej ( $A_b$ ) (PN-EN 13755:2008), gęstości pozornej ( $\rho_0$ ) (PN-EN 1936:2010) oraz wskaźnika wytrzymałości punktowej dla prób nieforemnych w stanie powietrzno-suchym, który przeliczono następnie na wartość wytrzymałości na ściskanie ( $R_{cs1}$ ), stosując współczynnik empiryczny równy 10,0 (Kidybiński i in. 1974; Pforr 1975; Bromowicz 1997; PN-G-04307:1998).

Wartość wytrzymałości na ściskanie obliczono również w poszczególnych odmianach dla próbek ściskanych prostopadłe ( $R_{cs2\perp}$ ) i równoległe w stosunku do płaszczyzn uławiczenia ( $R_{cs2\parallel}$ ), a następnie określono współczynnik anizotropii tego parametru, jako stosunek powyższych wielkości (ISRM 1981).

Mikroskopowe badania petrograficzne, obejmujące granulometrię składników szkieletu ziarnowego oraz ilościową ocenę składu mineralno-petrograficznego materiału detrytycznego i spoiw, wykonano dla pięciu próbek reprezentujących pięć typów piaskowców krośnieńskich (I–V). Dla każdej próbki sporządzono szlify mikroskopowe zorientowane prostopadłe do płaszczyzn uławiczenia. Badania przeprowadzono w mikroskopie polaryzacyjnym do światła przechodzącego Jenapol (Carl Zeiss Jena) przy tym samym powiększeniu obiektywu ( $20\times$ ).

Pomiaru wielkości okruchów dla trzystu kolejnych składników przeciętych przez linię usytuowaną prostopadłe do uławiczenia dokonywano na cyfrowych obrazach uzyskanych za pomocą kamery Nikon DS-Fi1 sprzężonej z mikroskopem, stosując narzędzia programu NIS-Elements BR (ver. 3.10) do wyznaczania długości maksymalnych średnic ziaren, a także wewnętrznych osi wydłużonych i skompaktowanych blaszek i klastów. W pomiarach nie uwzględniano okruchów mniejszych od  $31\ \mu\text{m}$ , kwalifikowanych do frakcji matriks. Sposób kalibracji obiektywu, a także pomiaru widocznych w szlifie wielkości składników detrytycznych opisano w pracy G. Stańczak i B. Figarskiej-Warchoł (2016).

W celu ograniczenia wpływu kształtu ziaren (wydłużone i płaskie blaszki mik i okruchy skał kwarcowo-lizyzykowych lub zbliżone do kształtu izometrycznego ziarna kwarcu czy fragmenty granitoidów) analizę granulometryczną przeprowadzono w dwóch wariantach: (i) dla wszystkich składników z wyłączeniem mik (materiał bezlisyzykowy) oraz (ii) łącznie dla ziaren kwarcu i skaleni (materiał kwarcowo-skaleniowy).

Na podstawie szeregów kumulacyjnych wyznaczono odpowiednie wartości percentyli ( $\Phi$ ), które posłużyły do wyliczenia statystycznych parametrów uziarnienia według formuł R.L. Folka i W.C. Warda (1957), takich jak graficzna średnia wielkość ziaren (GSS,  $\Phi$ ), graficzne odchylenie standardowe (GSO,  $\Phi$ ) oraz graficzna skośność (GSK) (Stańczak i Figarska-Warchoł 2016).

Ilościowy skład mineralno-petrograficzny piaskowców określano metodą punktową przy użyciu stolika integracyjnego Eltinor. W każdym szlifie mikroskopowym w odstępach równym  $0,4\ \text{mm}$  rejestrowano 300 punktów pomiarowych, w których oznaczano rodzaj składnika ziarnowego oraz spoiwa.

### 3. Wyniki

#### 3.1. Typy petrograficzne

Podstawą klasyfikacji pobranych próbek były cechy makroskopowe, takie jak: barwa, wielkość i wysortowanie ziaren, obecność charakterystycznych składników okrucowych (np. blaszek łyszczyków, litoklastów) oraz struktur sedimentacyjnych (np. laminacja pozioma, konwolutowa, masywność).

Przedmiotem eksploatacji w obu złożach są przede wszystkim związane **piaskowce o niebieskoszarej barwie i węglanowo-krzemionkowo-ilastym spoiwie**, wśród których ze względu na różnice strukturalno-teksturalne opisano pięć odmian (typy I–V).

**Typ I** reprezentują **masywne, drobnoziarniste piaskowce**, zawierające drobne blaszki łyszczyków. Wśród składników detrytycznych sporadycznie obserwuje się bezładnie rozmieszczone większe ziarna kwarcu (1–2 mm) oraz ciemnoszare, płaskie litoklasty (2–5 mm).

**Typ II** to **masywne, nierównoziarniste piaskowce**, zawierające składniki okrucowe frakcji od drobnoziarnistego piasku do drobnoziarnistego żwiru z licznymi równomiernie rozproszonymi większymi blaszkami łyszczyków (do 1,5 mm) i czarnymi okrucami skalnymi (1–4 mm). Sporadycznie obserwuje się płaskie jasnoszare, niekiedy lekko rdzawe lub srebrzyste litoklasty (do 30 mm) oraz wydłużone, zwęglone fragmenty detrytu roślinnego (ok. 5 mm).

Próbki piaskowców **typu III** pod względem składu i tekstury są takie same jak próbki typu II, ale płaskie litoklasty o średnicach do 10 mm, przeważnie 1,5–5 mm, układają się **linijnie**, zwykle równoległe do uławicenia, choć nie tworzą odrębnych lamin.

**Typ IV** odróżnia od powyższych odmian **bardzo drobnoziarnista tekstura i laminacja skorupowa**. Pojedyncze ziarna są niewidoczne, jedynie na powierzchniach oddzielności obserwuje się nagromadzenia bardzo drobnych blaszek łyszczyków, które powierzchniom tym nadają srebrzysty połysk. Brak widocznych litoklastów i detrytu roślinnego.

Do **typu V** zakwalifikowano próbki **bardzo drobnoziarnistych piaskowców z laminacją równoległą** z wyraźnie rozróżnialnymi ciemno- i jasnoszarymi laminami. Podobnie jak w próbkach typu IV ziarna są nierozróżnialne i brak jest większych litoklastów. Drobne łyszczyki gromadzą się na powierzchniach lamin, które przebiegają poziomo lub lekko ukośnie w stosunku do uławicenia.

Podrzędny składnik profilu obu omawianych złóż stanowią piaskowce **żółtawoszare lub rdzawoszare o zazwyczaj niższym stopniu zwięzłości** w porównaniu do dominujących piaskowców niebieskoszarych (typy I–V). Wśród zwietrzałych, bezwapnistych lub słabo wapnistych piaskowców wyróżniono: zbite (typ VI) oraz porowate i nierównoziarniste (typ VII). W typie VII pory osiągają średnice 1–2 mm, a ich wielkość i kształt odpowiadają najgrubszym frakcjom ziaren i klastów widocznych w świeżych odmianach piaskowców. W zależności od charakteru materiału wyjściowego próbki takie mogą przyjmować różną teksturę i strukturę. Obecność tych odmian wiąże się zarówno z płaszczyznami poziomej oddzielności, zwłaszcza w stropowych partiach obu złóż, jak i z ciosowymi spękaniem i pionowej orientacji, przecinającymi ławice.

### 3.2. Mikroskopowe badania petrograficzne

W trakcie pomiarów granulometrycznych oraz ilościowej oceny składu mineralno-petrograficznego piaskowców wśród składników szkieletowych wyróżniano kwarc, skalenie, okruchy skał obcych, łyszczyki, glaukonit, minerały ciężkie oraz piryt i detryt roślinny. W grupie okruchów skalnych wydzielono fragmenty skał magmowych (głębinowych i wylewnych), metamorficznych (głównie okruchy łupków serycytowych, kwarcowo-serycytowych, muskowitowych, chlorytowych, a także gnejsów) oraz osadowych. Wśród tych ostatnich wyróżniono okruchy skał węglanowych (wapieni mikrytowych, organogenicznych, monokryształy i polikryształy węglanowe), krzemionkowych (chalcedonity, piaskowce), a także klasty ilaste. Ponadto, w ilościowej ocenie składu mineralno-petrograficznego zidentyfikowano również spoiwo, rozróżniając jego składnik węglanowy (cement węglanowy), kwarcowy (obwódki regeneracyjne) oraz ilasty (matriks ilasta).

#### 3.2.1. Uziarnienie składników okruchowych

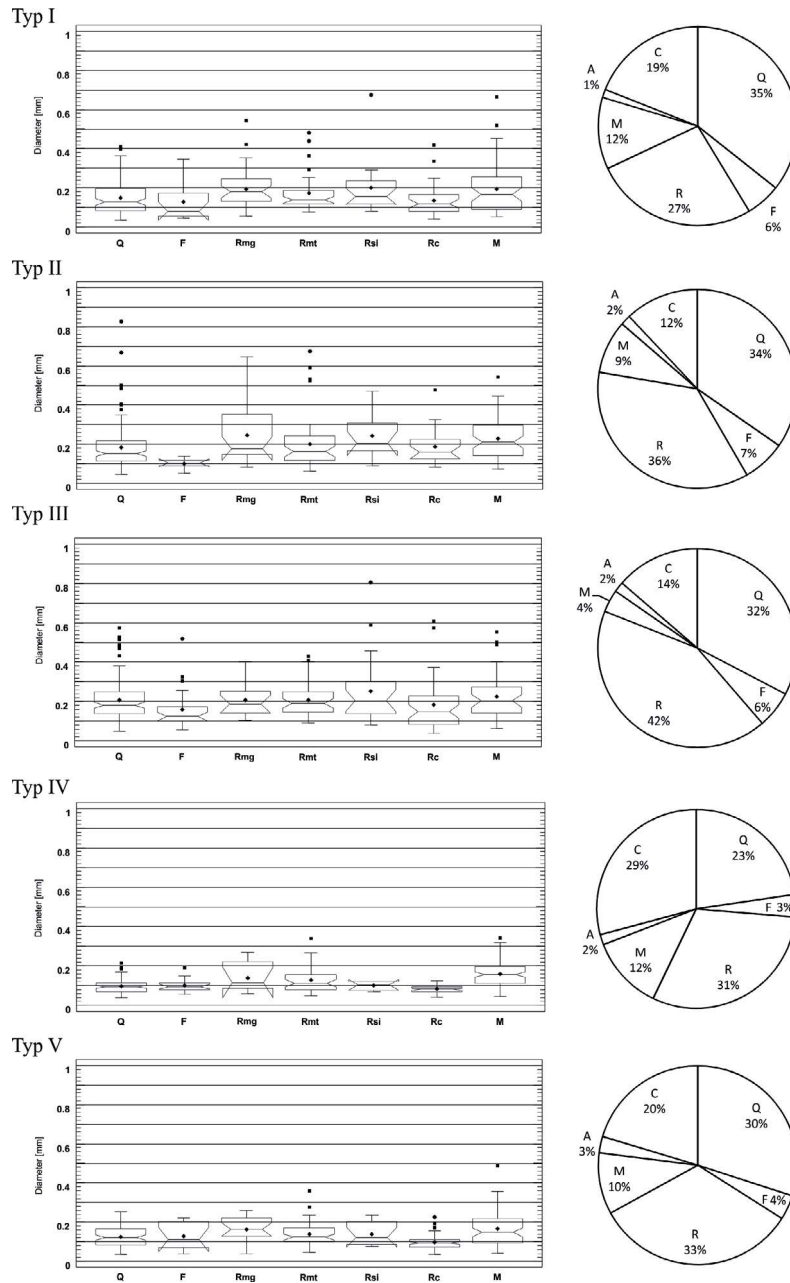
W analizie granulometrycznej wśród pomierzonych składników detrytycznych pięciu badanych próbek piaskowców (typy I–V) dominują ziarna kwarcu i łyszczyki, a także okruchy skał metamorficznych i węglanowych. Natomiast okruchy skał magmowych i silikoklastycznych (tj. piaskowce, mułowce, chalcedonity) oraz skalenie reprezentowane są w wyraźnie mniejszych udziałach, zaś minerały ciężkie, piryt i detryt organiczny wraz z glaukonitem stanowią podrzędny składnik oceniany w pomiarach granulometrycznych.

W szlifach piaskowców typu I oraz II na „granulometrycznej” linii w ogólnej liczbie pomierzonych okruchów zdecydowanie przeważają ziarna kwarcu nad łyszczykami, okruchami skał metamorficznych, węglanowych i magmowych.

W piaskowcu **typu I** największe rozmiary osiągają okruchy skał silikoklastycznych (mułowce, skały krzemionkowe i piaskowce) oraz blaszki łyszczyków (0,67 mm). Nieco mniejsze są maksymalne wielkości fragmentów skał magmowych (0,54 mm) i metamorficznych (0,48 mm), węglanowych (0,42 mm) oraz ziaren kwarcu (0,41 mm). Jednak przeciętne rozmiary (średnia arytmetyczna) dla pierwszych trzech składników są zbliżone i osiągają wielkość 0,19–0,20 mm, a nieco mniejsze są dla kwarcu (0,15 mm) i okruchów skał węglanowych (0,13 mm) (rys. 2).

W piaskowcu **typu II** największymi rozmiarami wyróżniają się ziarna kwarcu (0,83 mm), okruchy skał metamorficznych (0,68 mm), magmowych (0,65 mm) oraz blaszki łyszczyków (0,54 mm), a nieznacznie mniejsze są maksymalne wielkości litoklastów węglanowych (0,48 mm) i krzemionkowych (0,47 mm). Natomiast średnia wielkość jest najwyższa dla okruchów skał magmowych, silikoklastycznych i łyszczyków (odpowiednio: 0,25, 0,24 i 0,23 mm), podczas gdy dla litoklastów metamorficznych, węglanowych oraz kwarcu jest niższa (odpowiednio: 0,20, 0,19 i 0,18 mm). Średnie rozmiary wymienionych składników są wyraźnie wyższe w porównaniu z odpowiednimi przeciętnymi wielkościami ziaren zmierzonymi dla piaskowca typu I (rys. 2).

W szlifie piaskowca **typu III** wśród zarejestrowanych na „granulometrycznej” linii pomiarowej okruchów dominuje kwarc nad fragmentami skał metamorficznych, węglanowych, blaszkami mik oraz skaleniami. Największymi rozmiarami odznaczają się kolejno okruchy skał silikoklastycznych (0,81 mm), węglanowych (0,61 mm), ziarna kwarcu (0,58 mm),



Rys. 2. Wykresy typu „pudełko z wąsami” przedstawiające zmienność wielkości składników okruchowych w badanych typach piaskowców (I–V) oraz ich skład mineralno-petrograficzny (% obj.). Skróty składników objaśniono w tabeli 2

Fig. 2. Box-whisker plots depicting the grain-size variability of detrital components measured in types of sandstones (I–V) and their mineral composition (% vol.). Abbreviations of detrital components explained in table 2

łyszczyki (0,55 mm) oraz skalenie (0,52 mm), a nieco mniejsze maksymalne wielkości osiągają klasty skał metamorficznych (0,43 mm) i magmowych (0,40 mm). Jednak średnia wielkość jest najwyższa dla okruchów skał silikoklastycznych (0,25 mm) i blaszek łyszczyków (0,22 mm), zaś dla kwarcu i litoklastów magmowych i metamorficznych jest nieco niższa i osiąga 0,21 mm. Z kolei przeciętne rozmiary okruchów skał węglanowych i skaleni są znacznie niższe (odpowiednio: 0,18 i 0,16 mm) (rys. 2). Porównując średnie wielkości składników detrytycznych w typach I, II i III należy zauważyć, że dla ziaren kwarcu i skaleni, a także okruchów skał metamorficznych i silikoklastycznych osiągają one najwyższy poziom w piaskowcach typu III (rys. 2).

W szlifach bardzo drobnziarnistych piaskowców o laminacji skorupowej i poziomej (odpowiednio: **typ IV** i **V**) wśród składników pomierzonych na „granulometrycznej” linii udział częstościowy kwarcu spada, zaś łyszczyków wzrasta. Natomiast częstości okruchów skał węglanowych i metamorficznych są zbliżone. Maksymalne oraz przeciętne wielkości składników stwierdzone w szlifach obu tych typów (IV i V) są wyraźnie mniejsze w porównaniu do największych i średnich rozmiarów odpowiednich okruchów mierzonych w piaskowcach typu I, II i III. I tak, maksymalne rozmiary ziaren skaleni, okruchów skał magmowych i metamorficznych mierzone w piaskowcu typu IV (odpowiednio: 0,19, 0,27 i 0,34 mm) są wyższe niż odpowiednie wielkości tych składników rejestrowane w piaskowcu typu V (odpowiednio: 0,18, 0,22 i 0,31 mm). Natomiast największe okruchy skał silikoklastycznych i węglanowych oraz najdłuższe blaszki łyszczyków pomierzone w piaskowcu typu IV (odpowiednio: 0,12, 0,13 i 0,34 mm) są mniejsze niż te wielkości odpowiednich składników piaskowca typu V (odpowiednio: 0,16, 0,19 i 0,45 mm), podczas gdy maksymalne średnice ziaren kwarcu w obu tych typach osiągają ten sam poziom (0,22 mm) (rys. 2). Przeciętne rozmiary analizowanych składników detrytycznych stwierdzone w szlifie piaskowca typu IV są niższe w porównaniu do średnich wielkości odpowiednich okruchów piaskowca typu V. W piaskowcu typu IV największe przeciętne wielkości osiągają blaszki łyszczyków (0,16 mm), okruchy skał magmowych i metamorficznych (odpowiednio: 0,14 i 0,13 mm). Natomiast ziarna kwarcu, skaleni i fragmenty skał silikoklastycznych osiągają średnio wielkość 0,10 mm, podczas gdy średnia dla litoklastów węglanowych jest nieco niższa (0,08 mm). Z kolei w piaskowcu typu V przeciętne rozmiary są najwyższe dla blaszek łyszczyków (0,17 mm) i fragmentów skał magmowych (0,16 mm), zaś dla okruchów skał metamorficznych i silikoklastycznych sięgają do 0,14 mm; nieco niższe są dla ziaren kwarcu i skaleni (0,13 mm) oraz litoklastów węglanowych (0,10 mm) (rys. 2).

### 3.2.2. Graficzne parametry uziarnienia

Statystyczne parametry uziarnienia uzyskane metodą graficzną dla zastosowanych dwóch wariantów analizy granulometrycznej (materiał bezłyszczykowy i kwarcowo-skaleniowy) przedstawiono w tabeli (tab. 1).

Stwierdzono, że próbki piaskowców **typu I, II i III** odznaczają się najgrubszym uziarnieniem, gdyż przeciętna średnica ziarna (GSS) wyliczona dla materiału bezłyszczykowego osiąga najniższe wartości w zakresie piasku drobnziarnistego (GSS odpowiednio: 2,92, 2,58 i 2,54  $\Phi$ ), a ponadto wysortowanie materiału okrucowego jest najgorsze spośród badanych próbek, ponieważ wartości parametru GSO są najwyższe (GSO odpowiednio: 0,86, 0,78 i 0,82  $\Phi$ ) (tab. 1). Rozkłady uziarnienia materiału bezłyszczykowego są symetryczne



TABELA 1. Graficzne parametry uziarnienia wyliczone dla: (1) wszystkich składników z wyłączeniem łyszczyków oraz (2) tylko dla kwarcu i skaleni

TABLE 1. Grain-size statistical parameters obtained by graphical methods and calculated for all grains excluding micas (1), and confined to the quartz and feldspar particles (2)

Typ	I	II	III	IV	V
Wariant 1: materiał bezłyszczykowy					
L. ziaren	243	240	264	205	227
GSS ( $\Phi$ )	2,92	2,58	2,54	3,48	3,12
GSO ( $\Phi$ )	0,86	0,78	0,82	0,54	0,702
GSK	0,06	-0,14	-0,06	-0,11	0,03
Wariant 2: materiał kwarcowo-skaleniowy					
L. ziaren	121	122	133	102	106
GSS ( $\Phi$ )	3,03	2,72	2,56	3,45	3,03
GSO ( $\Phi$ )	0,88	0,73	0,84	0,47	0,703
GSK	0,01	-0,06	-0,05	0,08	0,25

w przypadku piaskowców typu I i III (GSK odpowiednio: 0,06 i -0,06), natomiast dla piaskowca typu II jest on skośny ujemnie (GSK: -0,14), co oznacza obecność grubszych ziaren w przeważającej masie drobnoziarnistej.

Próbki piaskowców laminowanych skorupowo i poziomo **typu IV i V** wykazują wyższe wartości parametru GSS w wariacie bezłyszczykowym (odpowiednio 3,48 i 3,12  $\Phi$  – klasa piasku bardzo drobnoziarnistego) oraz niższe wielkości GSO (odpowiednio 0,54 i 0,702  $\Phi$ ), co oznacza, że analizowany materiał detrytyczny jest stosunkowo najlepiej wysortowany (odpowiednio: umiarkowanie dobrze oraz umiarkowanie) (tab. 1). Natomiast w wariacie bezłyszczykowym rozkład uziarnienia dla piaskowca laminowanego skorupowo (typ IV) jest skośny ujemnie (GSK: -0,11), a dla laminowanego poziomo (typ V) symetryczny (GSK: 0,03).

W drugim wariacie analizowano rozkłady dla dwóch składników kwarcu i skaleni, przy czym w jednym przypadku, z uwagi na zbyt niską sumę zliczeń tych ziaren, uwzględniono dodatkowo okruchy skał magmowych, których wahania wielkości odpowiadały zakresowi rozmiarów ziaren kwarcu (typ V). I w tej analizie rozkłady uziarnienia piaskowców **typu I, II i III** stają się symetryczne (GSK odpowiednio: 0,01, -0,06 i -0,04), a wysortowanie materiału kwarcowo-skaleniowego jest umiarkowane (GSO odpowiednio: 0,88, 0,73 i 0,84  $\Phi$ ), przy czym tylko w przypadku piaskowca typu I średnia średnica ziaren należy już do klasy piasku bardzo drobnoziarnistego (GSS: 3,03  $\Phi$ ), a pozostałe dwie próbki typu II i III pozostają w zakresie frakcji piasku drobnoziarnistego (GSS odpowiednio: 2,72 i 2,56  $\Phi$ ) (tab. 1).

Rozkład wielkości materiału detrytycznego, ograniczonego do ziaren kwarcu i skaleni oraz okruchów magmowych (głównie o składzie granitoidowym), dla piaskowca laminowanego poziomo (**typ V**) jest dodatnio skośny ku frakcjom drobniejszym (GSK: 0,25), przy umiarkowanym wysortowaniu składników (GSO: 0,703  $\Phi$ ) (tab. 1). Natomiast materiał

kwarcowo-skaleniowy piaskowca laminowanego konwolutnie (**typ IV**) jest dobrze wysortowany (GSO: 0,47  $\Phi$ ), a jego rozkład staje się symetryczny (GSK: 0,08).

W pomiarach granulometrycznych wykonanych dla piaskowców krośnieńskich jednostki śląskiej z rejonu Mucharza i Skawiec nie uwzględniono blaszek łyszczyków jak również okruchów łupków łyszczykowych (Moroz-Kopczyńska 1977). Zastosowana w niniejszej pracy analiza w wariancie kwarcowo-skaleniowym daje najbardziej zbliżone wartości graficznych parametrów uziarnienia do publikowanych przez wspomnianą Autorkę.

### 3.2.3. Skład mineralno-petrograficzny

W składzie mineralno-petrograficznym próbek piaskowców (typy I–V) wśród składników szkieletu ziarnowego dominują ziarna kwarcu (22,7–35,7%) oraz okruchy skał obcych (26,7–42,3%), nad łyszczykami (3,7–12,0%) i skaleniami (3,7–7,0%), podczas gdy wśród spoiw (12,0–29,2%) cement węglanowy (10,0–27,2%) znacznie przeważa nad kwarcowym (0,3–1,7%) czy matriks ilastą (0,3–2,7%) (tab. 2). W grupie litoklastów dominują fragmenty skał metamorficznych (10,3–18,0%) nad okruchami skał węglanowych (6,3–12,3%), magmowych (4,0–10,3%), czy silikoklastycznych (2,3–7,0%). Marginalny składnik stanowią ziarna glaukonitu (0,0–0,3%), minerałów ciężkich (0,0–1,0%) oraz piryty i detrytu roślinny (1,0–1,7%).

Proporcje ilościowe wymienionych składników stwierdzone w badanych typach piaskowców krośnieńskich (tab. 2) odbiegają nieco od publikowanych składów mineralno-petrograficznych piaskowców krośnieńskich z obszaru Mucharz-Skawce (Moroz-Kopczyńska 1977). Udziały kwarcu, skaleni i łyszczyków mieszczą się w odpowiednich zakresach podawanych w cytowanej pracy, natomiast zawartości okruchów skał obcych w trzech typach (II, III i V) są wyższe (33–42% obj.) od podawanych przez wspomnianą Autorkę maksymalnych udziałów (2–32% obj.). Z kolei zawartości spoiw w czterech typach (I, II, III i V) są niższe (na poziomie 12–14% obj. – typ II i III), bądź zbliżone (19–20% obj. – typ I i V) do minimalnego, stwierdzonego przez nią udziału spoiwa (22–74%) (Moroz-Kopczyńska 1977).

Na podstawie obserwacji mikroskopowych stwierdzono, że w materiale okrucowym badanych piaskowców wśród grubszych frakcji ziarnowych dominują odporne mechanicznie ziarna kwarcu, okruchy granitoidów, kwarcytów oraz skał piaskowcowych i chalcedonitów, a ponadto obserwuje się nieodporne mechanicznie: miękkie i podatne klasty ilaste, ziarna glaukonitu, stosunkowo cienkie blaszki mik oraz podatne na pęknięcia fragmenty łupków łyszczykowych i grubszych blaszek mik, podczas gdy cieńsze pakiety łyszczykowe są bardziej podatne na odkształcenia kompakcyjne. Do składników nieodpornych mechanicznie należą również zsercytyzowane ziarna skaleni i fragmenty granitoidów, w których składnik skaleniowy uległ przeobrażeniu, a także zwietrzałe blaszki biotytów i łupków łyszczykowych. Generalnie dłuższe blaszki łyszczyków i płaskie fragmenty skał obcych rozmieszczone są kierunkowo, natomiast bardziej izometryczne oraz jajowate ziarna grubszych frakcji bezładnie wśród materiału drobniej uziarnionego. Drobniejsze fragmenty łyszczyków są rozproszone i zazwyczaj chaotycznie zorientowane w wyniku dopasowania się krótkich pakietów do kształtu sąsiadujących ziaren (efekt kompaktacji mechanicznej).

Spoivo piaskowców **typu VII** (żółtawo-rdzawe, nierównoziarniste i porowate) jest ubogie, kontaktowo-porowe i wykształcone w formie cieniutkich kwarcowych obwódek rege-

TABELA 2. Skład mineralno-petrograficzny dla pięciu typów piaskowców krosnieńskich (typy I–V) [% obj.]

TABLE 2. Mineral composition of the five types (I–V) of Krosno sandstones [% vol.]

Typ	I	II	III	IV	V
<b>Kwarc (Q)</b>	<b>35,7</b>	<b>34,7</b>	<b>32,7</b>	<b>22,7</b>	<b>30,0</b>
<b>Skalenie (F)</b>	<b>5,7</b>	<b>7,0</b>	<b>6,0</b>	<b>3,7</b>	<b>4,0</b>
<b>Suma okruchów skał (R)</b>	<b>26,7</b>	<b>36,0</b>	<b>42,3</b>	<b>30,8</b>	<b>33,0</b>
Okruchy skał magmowych ( $R_{mg}$ )	4,7	5,3	10,3	4,0	5,3
Okruchy skał metamorficznych ( $R_{mt}$ )	10,3	16,0	16,0	17,7	18,0
Okruchy skał silikoklastycznych ( $R_{si}$ )	3,7	3,7	7,0	2,3	3,3
Okruchy skał węglanowych ( $R_c$ )	8,0	11,0	9,0	6,8	6,3
<b>Łyszczyki (M)</b>	<b>11,7</b>	<b>8,7</b>	<b>3,7</b>	<b>12,0</b>	<b>10,0</b>
<b>Suma składników podrzędnych (A)</b>	<b>1,3</b>	<b>1,7</b>	<b>1,6</b>	<b>1,7</b>	<b>2,6</b>
Glaukonit	0,0	0,0	0,3	0,0	0,3
Minerały ciężkie	0,0	0,0	0,0	0,7	1,0
Pyr + Detryt roślinny	1,3	1,7	1,3	1,0	1,3
<b>Suma spoiw (C)</b>	<b>19,0</b>	<b>12,0</b>	<b>13,7</b>	<b>29,2</b>	<b>20,3</b>
Spoiwo węglanowe	16,0	10,0	11,7	27,2	19,7
Spoiwo krzemionkowe	0,3	1,0	1,7	0,3	0,3
Spoiwo ilaste	2,7	1,0	0,3	1,7	0,3

neracyjnych, a także matriks ilastej, która gromadzi się przeważnie w przestrzeniach międzyziarnowych. Marginalny składnik spoiwa stanowi cement węglanowy, który jest silnie rozproszony i wypełnia jedynie izolowane przestrzenie międzyziarnowe, spajając przy tym sąsiadujące ziarna, a ponadto rozwija się w niektórych porach moldycznych.

Spoiwo piaskowców **typu VI** (żółtawo-rdzawe, zbite z kierunkowo ułożonymi litoklastami) o charakterze kontaktowo-porowym tworzą szczątkowo rozwinięte na ziarnach kwarcu regeneracyjne obwódki (a raczej „wypustki”: *outgrowths*), a także ilasto-żelaziste otoczki wykształcone na niektórych okruchach i ziarnach. Jednak istotnym składnikiem spoiwa jest matriks węglanowa, a miejscami węglanowo-ilasta, która wypełnia pory nieznacznie korodując ziarna, niektóre z nich (np. skalenie) ulegają zastępowaniu przez węglany.

Żółtawo-rdzawą barwę piaskowcom **typu VI** i **VII** nadają rdzawe otoczki ilasto-żelaziste wykształcone na ziarnach detrytycznych, a także matriks ilasta i zwietrzałe brunatnawo-zielone blaszki biotytu oraz okruchy skał ilastych i łyszczykowych o podobnych barwach.

W spoiwie piaskowców **typu II** oraz **III**, podobnie jak we wcześniej opisanych typach, rozpoznano podrzędny cement kwarcowy w postaci pryzmatycznych kryształów narastających na ziarnach kwarcu i lokalnie ich spajających oraz matriks o składzie węglanowym i węglanowo-ilastym, ponadto cement węglanowy, który stopniowo zastępuje ziarna szkieletowe, najczęściej skalenie, ale również ziarna kwarcu, czy okruchy skał magmowych.

Kontakty międzyziarnowe są przeważnie wklęsło-wypukłe i proste, a rzadziej zazębiające. Ziarna skaleni podobnie jak w wyżej opisywanych typach (VI i VII) są w różnym stopniu zsercytowane, niekiedy również świeże, zaś okruchy łupków ilastych niekiedy są silnie zwietrzałe i zastępowane przez węglany.

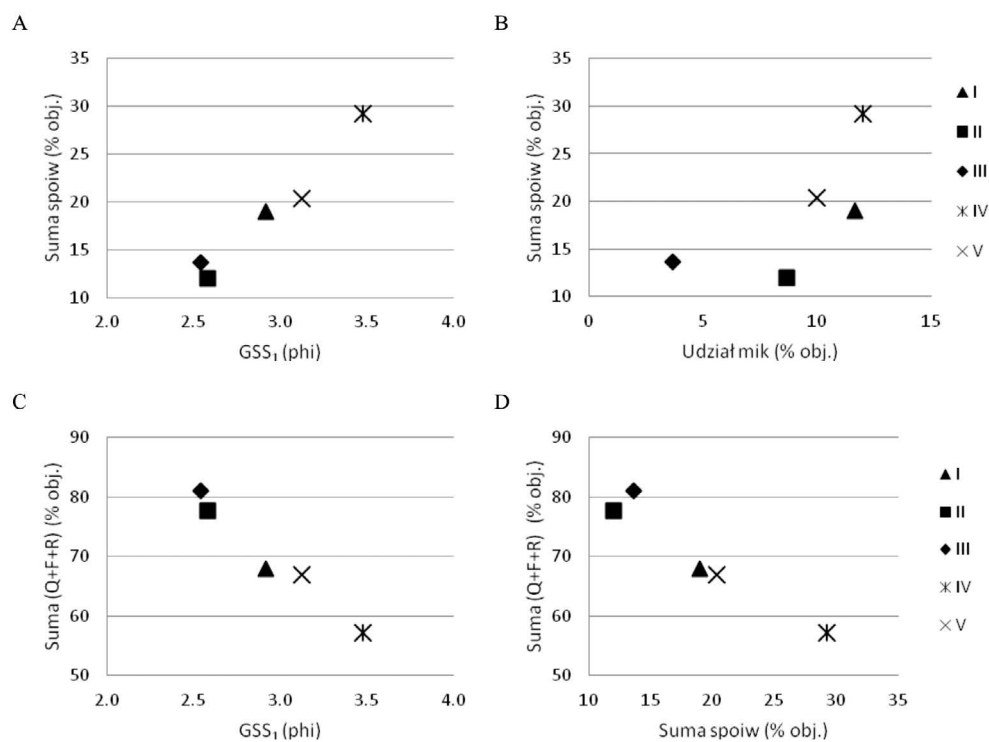
Piaskowce **typu I** makroskopowo były opisywane jako masywne z drobnymi blaszkami łyszczyków, lecz w płytce cienkiej próbka tego typu ujawniła kierunkowe ułożenie większych blaszek mik, a także grubszych i wydłużonych ziaren kwarcu i litoklastów. Natomiast drobniejsze blaszki łyszczyków rozmieszczone są bezładnie. Spoiwo wykształcone jest podobnie jak we wcześniej opisywanych typach piaskowców (II i III), w postaci matriks węglanowej i węglanowo-ilastej oraz cementu węglanowego i kwarcowego. Lokalnie rolę spoiwa pełnią zdeformowane i zgniecione kompakcyjnie fragmenty skał ilastych (pseudomatriks). Kontakty międzyziarnowe są podobne jak w typie II i III. Proces korozji i zastępowania ziaren szkieletowych przez cement węglanowy jest mniej zaawansowany niż w piaskowcach typu II i III.

Piaskowiec **typu V** budują, zorientowane poziomo względem powierzchni spągu ławicy, alternujące laminy, w których cyklicznie zmienia się uziarnienie materiału detrytycznego, jego skład oraz barwa. Laminy drobniejszego materiału są ciemniejsze, zawierają matriks ilastą, drobne skupienia pirytu, ziarna kwarcu, skaleni, okruchy skał obcych, a ponadto wzbogacone są w cieniutkie blaszki łyszczyków, które generalnie ułożone są poziomo. Z kolei laminy jaśniejsze zawierają nieco grubszy materiał okrucowy, w którego skład wchodzi głównie ziarna kwarcu i litoklastów ze sporadycznymi blaszkami mik, przy stosunkowo większej zawartości matriks węglanowej.

Piaskowiec laminowany skorupowo (**typ IV**) zawiera liczne i bardzo cienkie blaszki łyszczyków, które są chaotycznie rozproszone wśród ziaren kwarcu, skaleni oraz okruców innych skał (głównie metamorficznych i węglanowych), ale taka aranżacja materiału detrytycznego jest wynikiem zaburzenia osadu pierwotnego we wczesnym stadium jego konsolidacji (vide Birkenmajer 1959).

W obu typach piaskowców (**IV i V**) spoiwo jest obfite (20–29% obj.), a jego głównym składnikiem jest matriks węglanowo-ilasta, zaś podrzędnym cement węglanowy i kwarcowe obwódki regeneracyjne. Przy tak wysokim udziale spoiwa obserwuje się pomiędzy ziarnami częściej kontakty proste i punktowe niż wklęsło-wypukłe. Ziarna są korodowane i zastępowane przez cement węglanowy, jednak te procesy nie są zaawansowane.

Opierając się na wynikach ilościowej analizy składu mineralno-petrograficznego badanych piaskowców (typy I–V) oraz uzyskanych dla nich parametrach uziarnienia stwierdzono silną zależność między zawartością spoiwa a parametrem GSS ( $\Phi$ ) wyliczonym dla materiału bezłyszczkowego, jak również dla kwarcowo-skaleniowego, gdyż wraz ze wzrostem wartości GSS (coraz drobniejsze ziarno) wzrasta udział spoiwa. Piaskowce typu IV i V, a także typu I, które wyróżniają się stosunkowo najwyższą wartością parametru GSS (drobniej uziarnione) zawierają najwyższe ilości spoiwa (odpowiednio 29,2%, 20,3% oraz 19,0%). Z kolei grubiej uziarnione piaskowce typu II i III odznaczają się niskimi udziałami spoiwa (odpowiednio 12,0% i 13,7%) (rys. 3A). Ponadto, bogatsze w spoiwo piaskowce typu I, IV oraz V zawierają więcej łyszczyków w przeciwieństwie do piaskowców typu II i III. Zależność pomiędzy udziałami łyszczyków i sumą spoiwa jest znacząca (rys. 3B). Komplementarną zależnością do pierwszej tu opisanej jest relacja między parametrem GSS (niezależnie od wariantu rozkładu) a sumą udziałów kwarcu, skaleni i litoklastów. Drobniej uziarnione piaskowce typów I, IV



Rys. 3. Zależności pomiędzy sumą spoiw (% obj.) a średnią średnicą ziaren (GSS<sub>1</sub> phi) obliczoną dla materiału bezluzszykowego (wariant I) (A) i zawartością mik (% obj.) (B) oraz sumą udziałów kwarcu, skaleni i litoklastów (Q + F + L, % obj.) a parametrem GSS<sub>1</sub> (phi) (C) i sumą spoiw (% obj.) (D)

Fig. 3. Relations between contents of cements (% vol.) and graphic means calculated for all grains excluding micas (GSS<sub>1</sub> phi) (A), and contents of micas (% vol.) (B); relations between the sums of quartz, feldspars and rock fragments (% vol.) and graphic means GSS<sub>1</sub> (phi) (C) and contents of cements (% vol.) (D)

oraz V wykazują niższe zawartości sumy tych składników, a z kolei grubiej uziarnione piaskowce typu II i III zawierają większe ich udziały (rys. 3C). Można ponadto zauważyć, że wraz ze wzrostem zawartości spoiwa maleje suma ziaren kwarcu, skaleni i litoklastów (rys. 3D). Powyższe zależności są typowe dla piaskowców karpaccich i były już opisywane przez M. Moroz-Kopczyńską (1977) oraz C. Peszata (1984, 1997).

### 3.3. Właściwości fizyczno-mechaniczne

Badania pobranych próbek wykazały istnienie wyraźnych różnic pomiędzy właściwościami fizycznymi wydzielonych typów petrograficznych (tab. 3). Wśród nich piaskowce typu IV (laminowane skorupowo) odznaczały się najniższą nasiąkliwością wagową (0,70%) i jednocześnie najwyższą gęstością pozorną (2,67 Mg/m<sup>3</sup>). Podobne wartości tych param-

TABELA 3. Właściwości fizyczno-mechaniczne badanych piaskowców

TABLE 3. Physical and mechanical properties of the sandstones

Parametr fiz.- -mech.	Parametr statyst.	Typ petrograficzny																			
		I		II		III		IV		V		VI		VII							
$\rho_o$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	$x_m$	<b>2,64</b>		<b>2,61</b>		<b>2,61</b>		<b>2,67</b>		<b>2,66</b>		<b>2,54</b>		<b>2,43</b>							
	$x_1 - x_n$	2,61–2,68		2,55–2,65		2,50–2,67		2,65–2,69		2,62–2,68		2,38–2,60		2,22–2,55							
	$\sigma$	0,02		0,02		0,04		0,02		0,02		0,06		0,14							
	$n$	18		19		18		7		8		17		7							
$A_b$ [%]	$x_m$	<b>0,87</b>		<b>1,24</b>		<b>1,19</b>		<b>0,70</b>		<b>0,72</b>		<b>1,85</b>		<b>2,91</b>							
	$x_1 - x_n$	0,55–1,28		0,90–1,69		0,58–1,49		0,47–0,88		0,45–1,03		1,33–3,00		1,82–3,95							
	$\sigma$	0,18		0,22		0,25		0,17		0,19		0,47		0,94							
	$n$	18		20		22		7		8		17		7							
$R_{cs1}$ [MPa]	$x_m$	<b>99</b>		<b>90</b>		<b>88</b>		<b>115</b>		<b>154</b>		<b>85</b>		<b>42</b>							
	$x_1 - x_n$	60–151		45–134		30–162		62–176		79–208		44–130		25–55							
	$\sigma$	24		22		33		39		67		22		11							
	$n$	17		18		22		6		3		16		7							
$R_{cs3}$ [MPa]	$x_m$	<b>95</b>		<b>91</b>		<b>88</b>		<b>n.o.</b>		<b>n.o.</b>		<b>51</b>									
	$x_1 - x_n$	91–98		88–94		73–97		n.o.		n.o.		29–83									
	$\sigma$	2		3		8		n.o.		n.o.		14									
	$n$	8		4		8		n.o.		n.o.		16									
$R_{cs2}$ [MPa]	Typ:	I		II		III		IV i V		VI i VII											
	Orientacja	⊥				⊥				⊥				⊥							
	$x_m$	<b>106</b>		<b>90</b>		<b>106</b>		<b>82</b>		<b>92</b>		<b>71</b>		<b>137</b>		<b>95</b>		<b>71</b>		<b>74</b>	
	$x_1 - x_n$	64–151		60–108		90–134		45–122		60–162		30–126		62–208		79–112		25–93		37–130	
	$n$	10		5		5		11		10		8		7		2		7		15	
$I_{Res}$	–	<b>1,18</b>		<b>1,29</b>		<b>1,30</b>		<b>1,44</b>		<b>0,96</b>											
		<b>1,26</b>																			

Objaśnienia:  $\rho_o$  – gęstość pozorna,  $A_b$  – nasiąkliwość wagowa,  $R_{cs1}$  – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie w stanie powietrzno-suchym,  $R_{cs2}$  – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie w osi prostopadłej (⊥) lub równoległej (||) do uławicenia,  $R_{cs3}$  – wytrzymałość na ściskanie obliczona na podstawie liczby odbicia,  $I_{Res}$  – współczynnik anizotropii wytrzymałości na ściskanie,  $x_m$  – wartość średnia,  $(x_1 - x_n)$  – zakres wartości,  $\sigma$  – odchylenie standardowe,  $n$  – liczba próbek, n.o. – nie oznaczano.

trów otrzymano także dla piaskowców laminowanych równolegle (typ V). Wśród odmian szaroniebieskich piaskowców największą nasiąkliwość wykazują te o nierównoziarnistej teksturze: typ II (śr. 1,24%) i typ III (śr. 1,19%). Badania wcześniejsze wykazywały dla piaskowców z omawianych i innych złóż piaskowców krośnieńskich gęstość pozorną w granicach 2,61–2,66 Mg/m<sup>3</sup> i nasiąkliwość wagową nie przekraczającą 5% (Bogacz 1973; Znańska 1974; Moroz-Kopczyńska 1977).

W piaskowcach o różnym stopniu zwietrzenia, lecz zachowujących zwięzłość (typ VI i VII) nasiąkliwość wagowa wzrasta przynajmniej dwukrotnie, mieszcząc się w przedziale 1,33–3,95%, a gęstość pozorna spada nawet do wartości 2,22 Mg/m<sup>3</sup>. Wyniki pomiarów dla tych ostatnich typów wykazują największą zmienność, świadcząc o ich większej niejednorodności w porównaniu z odmianami piaskowców niebieskoszarych.

Również laboratoryjne badania wytrzymałości na ściskanie potwierdziły zmienną jakość kopaliny w badanych złożach. Parametr ten osiągał największe wartości dla piaskowców, wykazujących laminację (typy IV i V), dochodząc do ponad 200 MPa dla pojedynczych próbek. Wiązało się to z uzyskiwanym, płaskim kształtem próbek, który wymuszał zwykle konieczność wykonywania badania przy nacisku prasy skierowanym prostopadle do uławicenia. Niższe wartości wytrzymałości (śr. 99 MPa) uzyskano dla drobnoziarnistych piaskowców masywnych (typ I), podczas gdy odmiany różnoziarniste okazały się najmniej wytrzymałe, zwłaszcza gdy większe klasty układały się w pewnym uprzywilejowanym kierunku (typ III). Piaskowce o żółtawych barwach wykazywały zmienną wytrzymałość na ściskanie przy średnich 85 MPa dla typu VI i tylko 42 MPa dla odmiany porowatej (typ VII). Uzyskane wyniki mieściły się w granicach podawanych w dokumentacjach i pracach innych autorów (Bogacz 1973; Znańska 1974; Moroz-Kopczyńska 1977; Pinińska red. 2003).

Pomiary terenowe z wykorzystaniem młotka odbojnego dały przy mniejszej zmienności podobne wyniki średniej wytrzymałości na ściskanie dla poszczególnych typów piaskowców. Badania laboratoryjne umożliwiły jednak wyznaczenie wartości wytrzymałości na ściskanie w zależności od kierunku działania siły w trakcie niszczenia próbki. Dla prób ściskanych prostopadle do powierzchni uławicenia wyniki wytrzymałości były znacznie wyższe, niż dla tych ściskanych równolegle. Uzyskany współczynnik anizotropii był najniższy dla piaskowców masywnych (typ I) i wyniósł 1,18. Wzrastał on wraz ze stopniem kierunkowego ułożenia składników do wartości 1,44 dla typu V, reprezentującego wyraźnie laminowane piaskowce. Piaskowce o żółtawych barwach (typy VI i VII) praktycznie nie wykazywały anizotropii w zakresie tego parametru.

#### 4. Dyskusja wyników

Nasiąkliwość wagowa i gęstość pozorna są wyraźnie skorelowane z uziarnieniem niebieskoszarych odmian piaskowców krośnieńskich, co potwierdziły już wcześniejsze badania (Moroz-Kopczyńska 1977). Najniższe wartości nasiąkliwości wagowej (średnio ok. 0,7%, minimalnie 0,5%) uzyskiwane są dla próbek piaskowców bardzo drobnoziarnistych o różnej laminacji (GSS: 3,12–3,48  $\Phi$ , czyli ok. 0,1 mm), podczas gdy w próbkach z obecnością większych litoklastów (do 0,81 mm – typy II i III) nasiąkliwość wzrasta średnio do około 1,2%, a w pojedynczych próbkach nawet do 1,7%. Niskiej nasiąkliwości towarzyszy także

duży udział spoiwa (20–29%), w przewodzie węglanowego (20–27% obj. próbki). Zależność ta stwierdzana była także dla innych piaskowców karpaccich (Moroz-Kopczyńska 1977; Bromowicz 1997; Peszat 1997, 1999). W próbkach o największej nasiąkliwości (typy II i III) udział tego ostatniego składnika jest dwa razy mniejszy (ok. 10–12%). W piaskowcach bardzo drobnoziarnistych (typy IV, V) na niektórych ziarnach kwarcu stwierdzono w pełni wykształcone obwódki regeneracyjne i zaobserwowano słabiej zaawansowane, niż w typach II i III, procesy korozji i zastępowania okruchów przez cement węglanowy, któremu towarzyszy matriks węglanowo-ilasta. Obfitość spoiwa węglanowego szczelnie wypełnia przestrzenie międzyziarnowe w tych próbkach. Efektem tych zjawisk są najniższe wartości nasiąkliwości wyznaczone w badanych typach (IV i V).

Z opisanym wykształceniem próbek typu IV wiąże się ich wysoka wytrzymałość na ściskanie. Niska wartość tego parametru dla odmian różnoziarnistych (typy II i III) powodowana jest, poza ich wyższą porowatością, m.in. występowaniem stref osłabień na granicy większych ziaren. Wśród grubszych frakcji ziarnowych dominują odporne mechanicznie ziarna kwarcu, okruchy granitoidów, kwarcytów oraz skał piaskowcowych i chalcedonitów. Ponadto obserwuje się nieodporne mechanicznie: miękkie klasty ilaste, ziarna glaukonitu, stosunkowo cienkie blaszki mik oraz podatne na pęknięcia fragmenty łupków łuszczycowych i grubszych blaszek mik. Do składników nieodpornych mechanicznie należą również zserycytizowane ziarna skaleni i fragmenty granitoidów, w których składnik skaleniowy uległ przeobrażeniu, a także zwietrzałe blaszki biotytów i łupków łuszczycowych. Kontakty między ziarnami w tych typach (II i III) przeważnie są wklęsło-wypukłe i proste, rzadziej zazębiające, dając słabą siłę wiązań pomiędzy okruchami. Istotne znaczenie dla wytrzymałości na ściskanie oraz nasiąkliwości ma sposób wykształcenia spoiwa. W piaskowcach typu I, II i III rozpoznano podrzędny cement kwarcowy w postaci wyrostków (*outgrowths*) oraz matriks o składzie węglanowym i węglanowo-ilastym, a także cement węglanowy, który stopniowo zastępuje ziarna szkieletowe, najczęściej skaleni, ale również ziarna kwarcu, czy okruchy skał magmowych.

Duża zmienność właściwości żółtawordzawych piaskowców typu VI i VII, występujących w strefach zwietrzenia, wiąże się z różnym wykształceniem strukturalno-teksturalnym skał pierwotnych oraz różnym stopniem ich przeobrażeń. Na ich jakość wpływa wiele czynników, tj. obecność większych litoklastów, zawartość spoiwa węglanowego, która może odbiegać od jego udziału w skale pierwotnej czy przeobrażenia niektórych ziaren. Obserwowane w próbkach typu VII pory sugerują pierwotną przynależność tej odmiany do piaskowców typu II lub III z wyróżniającymi się w drobnoziarnistej masie większymi składnikami. W skale typu VII obecne są wolne i chaotycznie rozsiane pustki o rozmiarach zbliżonych do wielkości największych i nieco większych od przeciętnych okruchów (około 0,5–1 mm), a ich kształty są nieco wydłużone lub zbliżone do izometrycznych, przy czym podobne formy posiadają największe ziarna szkieletowe. Na podstawie takiej charakterystyki można wnioskować, że są to pory moldyczne, powstałe w wyniku rozkładu zwietrzałych ziaren (np. skaleni, klastów ilastych czy okruchów skał magmowych). W konsekwencji sieć pustek dodatkowo ułatwiała migrację roztworów łągujących spoiwo węglanowe, które aktualnie stanowi marginalny składnik piaskowca typu VII. Jest ono silnie rozproszone i wypełnia jedynie izolowane przestrzenie międzyziarnowe, spajając przy tym sąsiadujące ziarna, a ponadto rozwija się w niektórych porach moldycznych. Żółtawo-rdzawą barwę przeobrażonym próbkom nadaje rdzawa matriks ilasta, brunatnawo-zielone blaszki biotyty,



zwietrzałe okruchy skał ilastych i łyszczykowych oraz ilasto-żelaziste otoczki wykształcone na części ziaren.

Struktura badanych skał wpływa nie tylko na samą wielkość wytrzymałości na ściskanie, ale także na współczynnik anizotropii tego parametru. Otrzymane wyniki wskazują na istnienie tego zjawiska nie tylko w typach III–V, gdzie obecność kierunkowo ułożonych składników widoczna jest już makroskopowo, ale także w odmianach opisanych jako masywne (I i II). Wyjaśnieniem tego są rezultaty obserwacji mikroskopowych, w trakcie których stwierdzono kierunkowe ułożenie wydłużonych składników, zwłaszcza łyszczyków, a także większych ziaren kwarcu i litoklastów, we wszystkich próbkach. Współczynnik anizotropii opisywanych typów litologicznych jest dość wysoki, ponieważ już w typach I i II odpowiada wartości uzyskanej dla laminowanych piaskowców tumlińskich (Figarska-Warchoł i Stańczak 2016). Wpływ struktury skały na tę właściwość zanika wraz z postępem procesu wietrzenia, które prowadzi do rozkładu składników nieodpornych, a w konsekwencji do osłabienia szkieletu poprzez rozpuszczenie węglanów wchodzących w skład spoiwa.

W związku z istnieniem zależności pomiędzy różnymi właściwościami mechanicznymi skał można wnioskować o istnieniu anizotropii także innych parametrów, zwłaszcza takich, w których duże znaczenie odgrywa struktura materiału. Do nich należą przede wszystkim właściwości sprężyste i wytrzymałościowe (Dziedzic 2005; Pinińska i Płatek 2002).

## Wnioski

Dla oceny jakości piaskowców pomocne jest wyróżnienie w profilu złoża i w obrębie poziomów eksploatacyjnych typów litologicznych z wykorzystaniem podstawowych cech makroskopowych, tj. barwa, uziarnienie, obecność i ułożenie większych klastów oraz występowanie laminacji.

W piaskowcach krośnieńskich ze złóż Górka-Mucharz i Skawce uziarnienie i stopień wysortowania materiału detrytycznego oraz udział spoiwa węglanowego, czy kierunkowo rozmieszczonych płaskich litoklastów i blaszek łyszczyków w sposób zasadniczy wpływają na wartości parametrów fizyczno-mechanicznych tych skał. Istotnym jest również skład mineralno-petrograficzny materiału detrytycznego piaskowców, który decyduje o stopniu odporności mechanicznej szkieletu ziarnowego, a wszelkie wtórne procesy serycytyzacji skaleni, wietrzenia blaszek biotytów, okruchów skał ilastych, łyszczykowych, czy granitoidowych, łącznie z wylugowywaniem klastów, osłabiają więźbę skały, a tym samym jej wytrzymałość na ściskanie.

Wśród niebieskoszarych piaskowców omawianych złóż najwyższą średnią wytrzymałością (do 154 MPa) na ściskanie oraz najwyższą gęstością pozorną (do 2,67 Mg/m<sup>3</sup>) odznaczają się bardzo drobnoziarniste, dobrze wysortowane i silnie wapniste odmiany laminowane skorupowo lub poziomo (typ IV i V). Z kolei drobnoziarniste piaskowce – makroskopowo opisywane jako masywne z drobnymi blaszkami łyszczyków i bezładnie rozmieszczonymi klastami (typ I), lecz w płycie cienkiej ujawniające kierunkowe ułożenie większych blaszek mik, a także grubszych i wydłużonych ziaren kwarcu i litoklastów – odznaczają się przeciętną wielkością średniej wytrzymałości na ściskanie (99 MPa) oraz średniej gęstości pozornej (2,64 Mg/m<sup>3</sup>). Najgorszymi parametrami (wytrzymałość na ściskanie 88 MPa i gęstość pozorna 2,61 Mg/m<sup>3</sup>) charakteryzują się piaskowce różnoziarniste (typ II i III).

W tych ostatnich typach zawartość spoiwa węglanowego maleje do 10% obj., a wzrasta udział gorzej wysortowanego materiału okruszowego.

Piaskowce o żółtawym zabarwieniu występują w strefach bliskich naturalnym płaszczynom podzielności. Strefy te, zwłaszcza w stropowych partiach obu złóż, są najbardziej narażone na działanie procesów wietrzenia, które prowadzą do zmiany barwy, stopnia wiązkości oraz odprowadzenia węglanowego składnika spoiwa tych piaskowców, zaś ich cechy strukturalno-teksturalne zależą od charakterystyki materiału pierwotnego. W związku z dużą zmiennością jakości piaskowców żółtawoszarych istnieje możliwość wydzielenia dodatkowych podtypów litologicznych z uwzględnieniem ich tekstury i obecności struktur liniowych, jednak ze względu na ich stosunkowo nieduży udział w złożu zastosowanie takiej procedury w praktyce górniczej byłoby bezzasadne.

Badania wytrzymałości na ściskanie wykonywane na próbkach nieforemnych mogą dać stosunkowo szybko i tanio informację o występowaniu w złożu partii materiału o lepszych, bądź gorszych parametrach jakościowych. Podobne rezultaty można uzyskać także przy zastosowaniu na miejscu w kamieniołomie młotka odbojnego. Uzyskiwane tymi metodami średnie wartości wytrzymałości nie odbiegają znacząco od tych, jakie uzyskuje się dla próbek foremnych.

Stwierdzona w badanych piaskowcach anizotropia wytrzymałości na ściskanie występuje w różnym stopniu we wszystkich opisywanych typach petrograficznych i może przejawiać się także w odniesieniu do innych właściwości, dlatego wiedza na ten temat jest istotna przy określaniu możliwości wykorzystania materiału. Pomocne w tym zakresie są szczegółowe obserwacje oraz pomiary mikroskopowe, które dostarczają danych o wielkości, kształcie, rozmieszczeniu oraz wzajemnych relacjach komponentów skały.

Autorki pragną podziękować Właścicielom firmy Polski Kamień Naturalny Mucharz-Skawce Sp. z o.o. za umożliwienie przeprowadzenia obserwacji i pomiarów terenowych. Wyrażają również wdzięczność dla Recenzentów za trud włożony w lekturę i ocenę treści pracy.

Praca finansowana z funduszu badań statutowych WGGiOŚ AGH nr 11.11.140.320.

## Literatura

- Birkenmajer, K. 1959. Systematyka warstwowań w utworach fliszowych i podobnych. *Studia Geologica Polonica* V. III, s. 133.
- Bogacz, A. 1973. *Dokumentacja geologiczna z zasobami w kat. C<sub>1</sub> + C<sub>2</sub> złoża piaskowców krośnieńskich „Skawce”*. Dok. arch. Kraków: Przedsiębiorstwo Geologiczne.
- Bromowicz, J. 1997. Właściwości fizyczno-mechaniczne piaskowców ropianieckich jednostki skolskiej i magurskich na tle ich litologii. *Materiały II Konferencji Naukowej „Badania podstawowe w geologii złóż surowców skalnych Sudetów, Karpat i Gór Świętokrzyskich*. Kraków-Mogilany 25–26 września 1997, s. 15–23.
- Burtan i in. 1937 – Burtan, J., Konior, K. i Książkiewicz, M. 1937. Mapa geologiczna Karpat Śląskich w skali 1:50000 (z objaśnieniami). Kraków: Wyd. Śląskie, PAU.
- Cieszkowski i in. 2006 – Cieszkowski, M., Golonka, J., Waškowska-Oliwa, A. i Chrustek, M. 2006. Budowa geologiczna rejonu Sucha Beskidzka – Świnna Poręba (Polskie Karpaty fliszowe). *Geologia* t. 32, z. 2, s. 155–201.
- Dziedzic, A. 2003. Structural control on fracture toughness (brittle cracking) in the Krosno Sandstones of Mucharz, southern Poland. *Geol. Quarterly* 47(1), s. 21–28.

- Dziedzic, A. 2005. Ocena cech strukturalnych piaskowców krośnieńskich z Mucharza (Beskid Mały) na podstawie pomiarów prędkości ultradźwiękowej fali podłużnej. *Przegląd Geologiczny* 53, 7, s. 601–604.
- Figarska-Warchoł, B. i Stańczak, G., 2016. Ocena mikrostruktur kierunkowych i ich znaczenie dla właściwości technicznych piaskowców. *Górnictwo Odkrywkowe* 57, 4, s. 26–38.
- Folk R.L., Ward W.C., 1957. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology* 27, 1, s. 3–26.
- Golonka, J. i Waśkowska-Oliwa, A. 2007. Stratygrafia polskich Karpat fliszowych pomiędzy Bielskiem-Białą a Nowym Targiem. *Geologia* t. 33, z. 4/1, s. 5–28.
- ISRM 1981. Rock characterization, testing and monitoring, ISRM suggested methods. Pergamon Press, Oxford, UK.
- Kidybiński i in 1974 – Kidybiński, A., Smółka, J. i Bałazy, I. 1974. Oznaczanie podstawowych własności mechanicznych skał zwięzłych. Prace GIG, Komunikat nr 608, Katowice.
- Książkiewicz, M. 1951. *Objaśnienia do Mapy Geologicznej w skali 1:50000, ark. Wadowice*. Warszawa: PIG.
- Książkiewicz, M. 1974a. *Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1:50000, ark. Sucha Beskidzka*. Warszawa: Wyd. Geologiczne.
- Książkiewicz, M. 1974b. *Objaśnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1:50 000, ark. Sucha Beskidzka*. Warszawa: Wyd. Geologiczne.
- Łukaszewski, P. 2005. Ocena wytrzymałości piaskowców fliszowych przy różnych ścieżkach obciążenia w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania. *Przegl. Geol.* 53, 7, s. 596–601.
- Moroz-Kopczyńska, M. 1977. Litologia piaskowców krośnieńskich w obszarze między Istebną i Myślenicami w świetle ich wykorzystania w przemyśle materiałów budowlanych. *Prace Geologiczne PAN* 104, s. 66.
- Peszat, C. 1984. Zmienność składu petrograficzno-mineralnego piaskowców cergowskich na tle warunków ich depozycji i przemian diagenetycznych. *Biuletyn Instytutu Geologicznego* 346, s. 207–236.
- Peszat, C. 1997. Petrografia i właściwości surowcowe fluksoturbidytowo-turbidytowych piaskowców glaukonitowych warstw krośnieńskich rejonu Bóbrka-Polany. *Biuletyn PIG* 376, s. 93–120.
- Peszat, C. 1999. Właściwości strukturalno-teksturalne i geneza spoiw węglanowych gruboławicowych piaskowców jednostki śląskiej (Polskie Karpaty fliszowe). *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* 15, 1, s. 65–104.
- Pfört, H. 1975. *Wytyczne Międzynarodowego Biura Mechaniki Górnotworu do określania parametrów geomechanicznych skał i górotworu*. Gliwice.
- Pieczara, Ł., 2014. Wpływ cech strukturalnych piaskowców fliszowych z Mucharza (Beskid Mały) na procesy pęknięcia w warunkach jednoosiowego ściskania. *Przegląd Geologiczny*, 62, 10/2, s. 680–686.
- Pinińska, J. red. 2003. Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał. Cz. IV. Karpaty fliszowe. Zakład Geomechaniki. Instytutu Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, Wydz. Geol. UW, Warszawa.
- Pinińska, J. i Płatek, P. 2002. Badania ultradźwiękowe w ocenie wytrzymałościowej skał. *Górnictwo Odkrywkowe* 2–3, s. 89–96.
- PN-EN 1936:2010. Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie gęstości i gęstości objętościowej oraz całkowitej i otwartej porowatości. Warszawa: PKN.
- PN-EN 12504-2:2013. Badania betonu w konstrukcjach. Badania nieniszczące. Oznaczanie liczby odbicia.
- PN-EN 13755:2008. Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczenia nasiąkliwości przy ciśnieniu atmosferycznym. Warszawa: PKN.
- PN-G-04307:1998 – Skały zwięzłe. Oznaczanie wytrzymałości na ściskanie z użyciem próbek nieforemnych.
- Stańczak, G. i Figarska-Warchoł, B. 2016. Wpływ orientacji szlifów mikroskopowych i wyboru mierzonych składników mineralnych na wyniki analizy granulometrycznej. *Górnictwo Odkrywkowe* 57, 5, s. 42–52.
- Wójcik i in. 1995 – Wójcik, Z., Jankowski, L., Kopicowski, R., Malata, T., Marciniak, P. i Nescieruk, P. 1995. *Opracowanie formalnych jednostek litostratygraficznych Karpat zewnętrznych i zapadliska przedkarpackiego dla celów Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski*. Archiwum CAG, Warszawa: PIG.
- Znańska, M. 1974. *Dokumentacja geologiczna złoża piaskowców krośnieńskich „Górka-Mucharz” w kat. B + C<sub>1</sub>, miejsc. Mucharz*. Dok. arch. Kraków: Przedsiębiorstwo Geologiczne.

