

Ocena morfologii powierzchni spękań rozdzielczych w piaskowcach metodą profilometrii laserowej

Marek Rembiś¹, Łukasz Oczkowski²



M. Rembiś



L. Oczkowski

Analysis of morphology of separation fracture surfaces in sandstones using laser profilometry. Prz. Geol., 73: 81–89; doi: 10.7306/2025.7

Abstract. This paper attempts to determine the relationship between the lithology, the type of mechanism of disintegration of sandstone samples and the morphology of the resulting separation surfaces, which has a significant impact on the magnitude of displacements occurring within the rock mass. Six lithologically different sandstones from the Carpathians, Sudetes and Holy Cross Mountains were analysed. The first element of the research was petrographic studies. The next tests consisted of carrying out strength tests, including tests of rock resistance to uniaxial compression strength and flexural strength under concentrated force. Then, a total of 12 surfaces obtained were examined using a laser profilometer. Laser profiling data was correlated with petrographic and strength test data. They showed that the strength value is influenced by the type of rock itself and that the morphology of the separation surfaces differs depending on the type of disintegration.

Surfaces obtained by uniaxial compression testing are rougher than those obtained by bending forces. Moreover, the study revealed a fairly clear relationship between sandstone textures and roughness parameters of surfaces, regardless of the disintegration test. The highest roughness values are found on the surfaces of sandstones from Radków, Tumlin and Bieganów. On the other hand, there is no correlation between waviness values and rock textures. Therefore, waviness parameter is a poor tool for describing the morphology of the separation surfaces in sandstones.

Keywords: laser profilometry, roughness, waviness, sandstone, compressive strength, flexural strength

Szorstkość (inaczej chropowatość) powierzchni spękań i powierzchni uskokowych (rozdzielczych) w masywie skalnym ma istotny wpływ na przemieszczenia zachodzące w górotworze. Opór tarcia powstającego na nierównej powierzchni spękania zwiększa jej wytrzymałość na ścinanie, co istotnie wpływa między innymi na stateczność zboczy lub stabilność wyrobisk drążonych w górotworze, takich jak np. tunele. Z tych względów chropowatość jest parametrem uwzględnianym w wielu klasyfikacjach geomechanicznych górotworu, np. w klasyfikacji Bartona i in. (1974) jako wskaźnik chropowatości szczelin, Bieniawskiego (1989) jako chropowatość, Palmströma (1996) jako falistość spękania oraz w normie PN-EN ISO 14689 (2018) jako szorstkość powierzchni nieciągłości. Klasyfikacje te polegają na wizualnej ocenie powierzchni i przypisaniu jej określonej liczby punktów w zależności od zauważonych cech tej powierzchni. Coraz częściej do oceny wprowadza się również instrumenty badawcze, np. profilometrię, i podejmuje próby parametryzacji tej cechy masywu skalnego.

Powszechnie wiadomo, że faktura powierzchni rozdzielczych, jakie powstają w skałach, zależy od różnych czynników, głównie od typu skały i jej cech strukturalno-teksturalnych, warunkujących charakterystykę naprężeniowo-odkształceniową, ale także od cech górotworu i istniejącego w nim stanu naprężeń.

W niniejszej pracy opisano wyniki eksperymentu przeprowadzonego w celu określenia związków między litologią piaskowców i rodzajem mechanizmu ich rozpadu, spowodowanego przez określone obciążenie, a morfologią

powstałych powierzchni rozdzielczych. Do analizy wybrano dwa rodzaje mechanizmu zniszczenia: test jednoosiowego ściskania próbki oraz test zginania pod działaniem siły skupionej. Powierzchnie rozdzielcze uzyskane w wyniku tych eksperymentów badano za pomocą profilometra laserowego.

METODYKA BADAŃ

Do badań wytypowano 6 zróżnicowanych litologicznie odmian piaskowca, które znajdują powszechne zastosowanie jako surowce budowlane. Z obszaru północnej części mezozoicznego obrzeżenia Gór Świętokrzyskich wybrano jurajski piaskowiec ze złoża Śmiłów I oraz triasowy piaskowiec ze złoża Tumlin-Gród. Ponadto wybrano piaskowce kredowe z niecki północnosudeckiej (ze złoża Rakowiczki) oraz z niecki śródsudeckiej (ze złoża Radków). Z tego drugiego obszaru pobrano także permski piaskowiec ze złoża Bieganów, a z Karpat fliszowych piaskowiec króśnieński ze złoża Barwałd (paleogen).

Pierwszy etap badań polegał na makroskopowej i mikroskopowej analizie petrograficznej piaskowców, obejmującej określenie ich składu mineralnego, a także struktury i tekstury, z uwzględnieniem uziarnienia, morfologii ziaren oraz charakterystyki typów kontaktów międzyziarnowych. Badaniom mikroskopowym w świetle przechodzącym poddano 6 preparatów (po jednym preparacie każdej z badanych skał). Analizę granulometryczną przeprowadzono na podstawie 150 pomiarów średnic ziaren w każdym szlifie. Na ich podstawie wyliczono parametry uziarnienia, tj. gra-

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; rembis@agh.edu.pl

² Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Oddział Świętokrzyski, ul. Zgoda 21, 25-953 Kielce; locz@pgi.gov.pl

ficzną średnią średnicę ziaren, graficzne standardowe odchylenie, graficzną skośność oraz graficzne spłaszczenie.

W drugim etapie prac przeprowadzono testy wytrzymałościowe, obejmujące badanie wytrzymałości skał na jednoosiowe ściskanie (wg normy PN-EN 1926) oraz wytrzymałości na zginanie pod działaniem siły skupionej (PN-EN 12372). W celu przeprowadzenia badania wytrzymałości piaskowców na ściskanie wycięto z nich próbki w postaci kostek o wymiarach $5 \times 5 \times 5$ cm, po jednej próbce ze wszystkich analizowanych 6 rodzajów skał. Do badań wykorzystano maszyny wytrzymałościowe o obciążeniu do 100 kN oraz do 5000 kN. Badaniu wytrzymałości na zginanie poddano 6 belek piaskowców o wymiarach $60 \times 60 \times 300$ mm, wyciętych po jednej z każdego badanego rodzaju piaskowca. Stalowe rolki (podpory) przyłożono w następujący sposób: jedną na górnej powierzchni w połowie długości belki oraz dwie na dolnej powierzchni w odległości 2,5 cm od jej krańców. Próbki laminowanych piaskowców z Tumlina oraz Bieganowa umieszczono tak, aby przyłożona siła działała w kierunku prostopadłym do rozciągłości lamin. Z każdej badanej próbki wybrano jedną, reprezentatywną powierzchnię rozdzielczą, uzyskaną w wyniku rozpadu podczas testów wytrzymałościowych. Łącznie wybrano 12 powierzchni, które odpowiednio oznaczono, określając na nich kierunek działającej siły niszczącej.

Każdą z wybranych powierzchni skanowano za pomocą skanera laserowego 2D/3D ScanCONTROL firmy *Micro-Epsilon*. Skanowanie prowadzono w kierunku zgodnym z kierunkiem obciążania próbek. Uzyskano od 195 do 260 profili każdej z badanych powierzchni. Analizie poddano co piątą z tych profili, czyli od 39 do 52 profili zawierających od 138 do 1280 punktów pomiarowych. Dane dotyczące tych profili zaimportowano do oprogramowania *OmniSurf*. Wyliczono podstawowe parametry chropowatości i falistości zdefiniowane w normie PN-EN ISO 4287:1999, tj. średnią arytmetyczną rzędnych profilu (R_a, W_a), największą wysokość profilu (R_c), całkowitą wysokość profilu (R_t, W_t), jak również średnią szerokość rowków elementów profilu (R_{sm}), stanowiącą tzw. parametr częstotliwościowy. Parametry R_a i W_a są interpretowane jako średnie odległości między poszczególnymi punk-

tami profilu pomiarowego $Z(x)$ wewnątrz odcinka elementarnego l a linią referencyjną m , w stosunku do której mierzy się odchylenie profilu. Parametry te obliczono ze wzoru [1]:

$$R_a, W_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad [1]$$

Wskaźnik R_c jest określany jako średnia wysokość wszystkich elementów profilu, rozumiana jako odległość od wgłębienia do wzniesienia. Obliczono go zgodnie ze wzorem [2]:

$$R_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Zt_i \quad [2]$$

Parametry R_t i W_t wyrażają sumę odległości między najwyższym i najniższym punktem wewnątrz odcinka elementarnego.

Parametr R_{sm} odpowiada wartości średniej szerokości elementów profilu wewnątrz analizowanego odcinka. Obliczono go ze wzoru [3]:

$$R_{sm} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Xs_i \quad [3]$$

WYNIKI BADAŃ

Charakterystyka petrograficzna

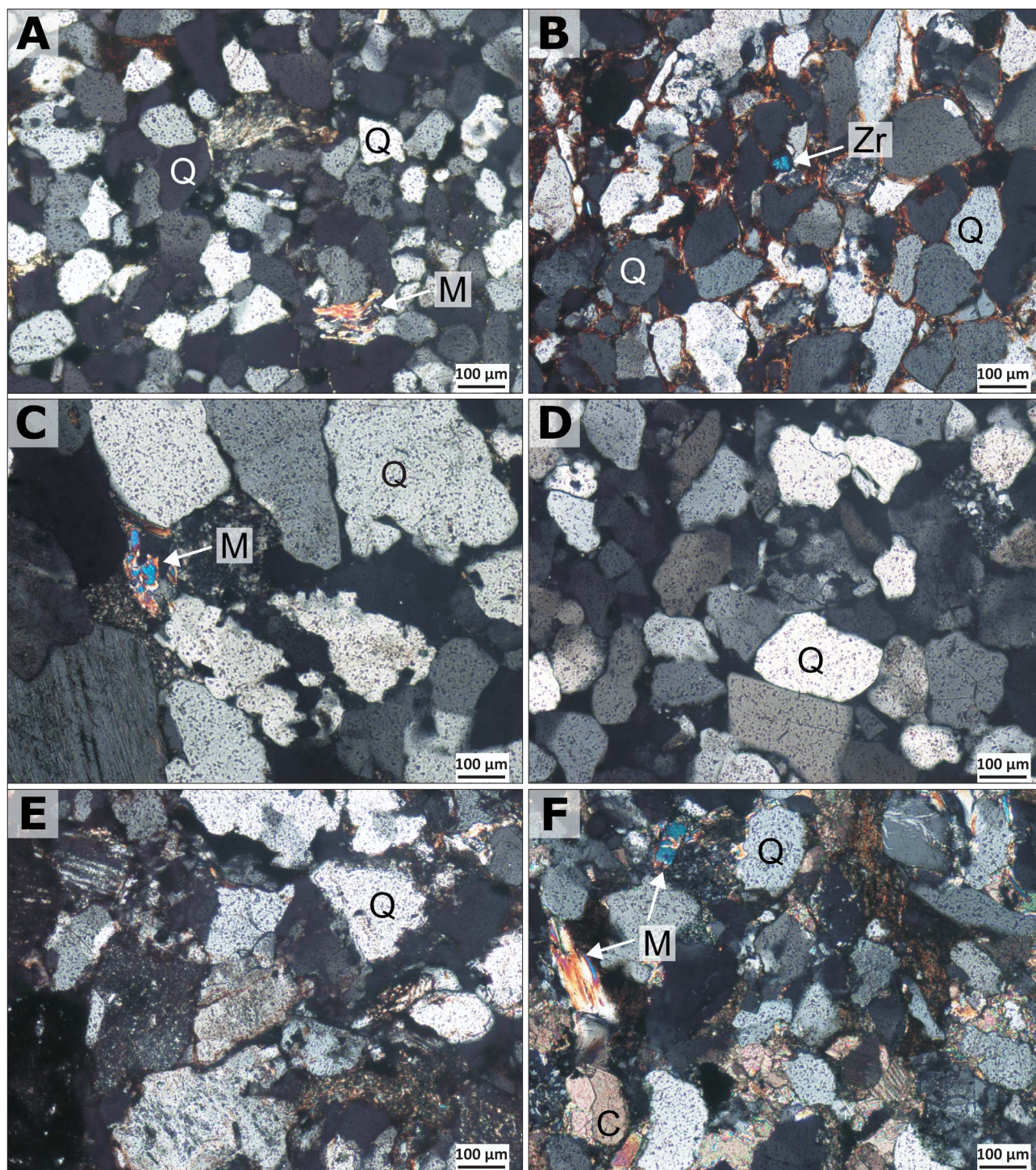
Piaskowiec ze złoża Śmiłów I. Piaskowiec ten ma beżową i jasnożółtą barwę i odznacza się dużą zwięzłością oraz bezładną teksturą. Jego uziarnienie mieści się w zakresie frakcji drobnziarnistej z domieszką frakcji bardzo drobnziarnistej. Graficzna średnia średnica ziarna (GSS) wynosi 0,21 mm, a wysortowanie jest umiarkowane (wartość graficznego standardowego odchylenia GSO wynosi 0,732 \emptyset). Graficzna skośność (GSK) przyjmuje wartość $-0,005$, co oznacza niemal brak asymetrii. Wartość graficznego spłaszczenia (GSP) jest dodatnia, a rozkład leptokurtyczny (tab. 1). Ziarna wykazują słabe obtoczenie, mają liczne ostre krawędzie. Ich kształty są raczej izometryczne, choć występują też ziarna wydłużone. Skała jest niemal

Tab. 1. Parametry uziarnienia piaskowców

Table 1. Grain size parameters, size and sorting class of analysed samples

Pochodzenie piaskowca <i>Location</i>	GSS (M_z)	GSO (σ_t)	GSK (Sk_t)	GSP (KG)	Uziarnienie <i>Grain size class</i>	Wysortowanie <i>Sorting class</i>
Śmiłów I	2,210	0,732	-0,005	0,938	Drobnziarnisty <i>Fine-grained</i>	Umiarkowanie wysortowany <i>Moderately sorted</i>
Tumlin-Gród	3,387	0,649	-0,217	0,945	Bardzo drobnziarnisty <i>Very fine-grained</i>	Umiarkowanie dobrze wysortowany <i>Moderately well sorted</i>
Radków	0,753	0,670	0,252	1,130	Gruboziarnisty <i>Coarse-grained</i>	Umiarkowanie dobrze wysortowany <i>Moderately well sorted</i>
Rakowiczki	1,730	0,558	0,238	1,068	Średnioziarnisty <i>Medium-grained</i>	Umiarkowanie dobrze wysortowany <i>Moderately well sorted</i>
Bieganów	1,203	0,722	0,068	0,950	Średnioziarnisty <i>Medium-grained</i>	Umiarkowanie wysortowany <i>Moderately sorted</i>
Barwałd	1,473	0,858	0,018	0,968	Średnioziarnisty <i>Medium-grained</i>	Umiarkowanie wysortowany <i>Moderately sorted</i>

Objaśnienia / Explanations: GSS – graficzna średnia średnica ziarna / *graphic medium grain diameter*; GSO – graficzne standardowe odchylenie (wysortowanie) / *graphic standard deviation (sorting)*; GSK – graficzna skośność / *graphic skewness*; GSP – graficzne spłaszczenie / *graphic flattening*



Ryc. 1. Obrazy mikroskopowe piaskowców w świetle przechodzącym. Polaryzatory skrzyżowane. Piaskowce ze złóż: **A** – Śmiłów I, **B** – Tumlin-Gród, **C** – Radków, **D** – Rakowiczki, **E** – Bieganów, **F** – Barwałd. Objaśnienia: **Q** – kwarc, **M** – muskowit, **Zr** – cyrkon, **C** – węglany

Fig. 1. Transmitted light microscopic images of sandstones. Crossed polarizers. Sandstone deposits: **A** – Śmiłów I, **B** – Tumlin-Gród, **C** – Radków, **D** – Rakowiczki, **E** – Bieganów, **F** – Barwałd. Shortcut description: **Q** – quartz, **M** – muscovite, **Zr** – zircon, **C** – carbonates

monomineralna. W szkielecie ziarnowym dominuje kwarc, ponadto występują pojedyncze blaszki biotytu i ziarna cyrkonu. Spoiwo jest głównie regeneracyjne, krzemionkowe ze sporadycznie współwystępującym spoiwem ilastym (ryc. 1A).

Piaskowiec ze złoża Tumlin-Gród. Skała ma wyraźnie widoczne laminy o zmiennej grubości, odznaczające się różnym odcieniem zabarwienia, od czerwonoróżowego

do intensywnie czerwonościowego. Piaskowiec jest bardzo drobnoziarnisty. Średnia wielkość (średnica) ziarna wynosi 0,1 mm, a wartość GSO jest równa 0,649 ϕ , co wskazuje na umiarkowanie dobre wysortowanie. Lekko lewostronna asymetria rozkładu świadczy o skośności ku większym frakcjom (GSK ma wartość $-0,217$). Wielkość ziaren jest skoncentrowana głównie wokół wartości średniej GSP, wynoszącej 0,945 (tab. 1). Stopień obtoczenia ziaren jest średni – ziarna są półobtroczone. Niemal wszystkie

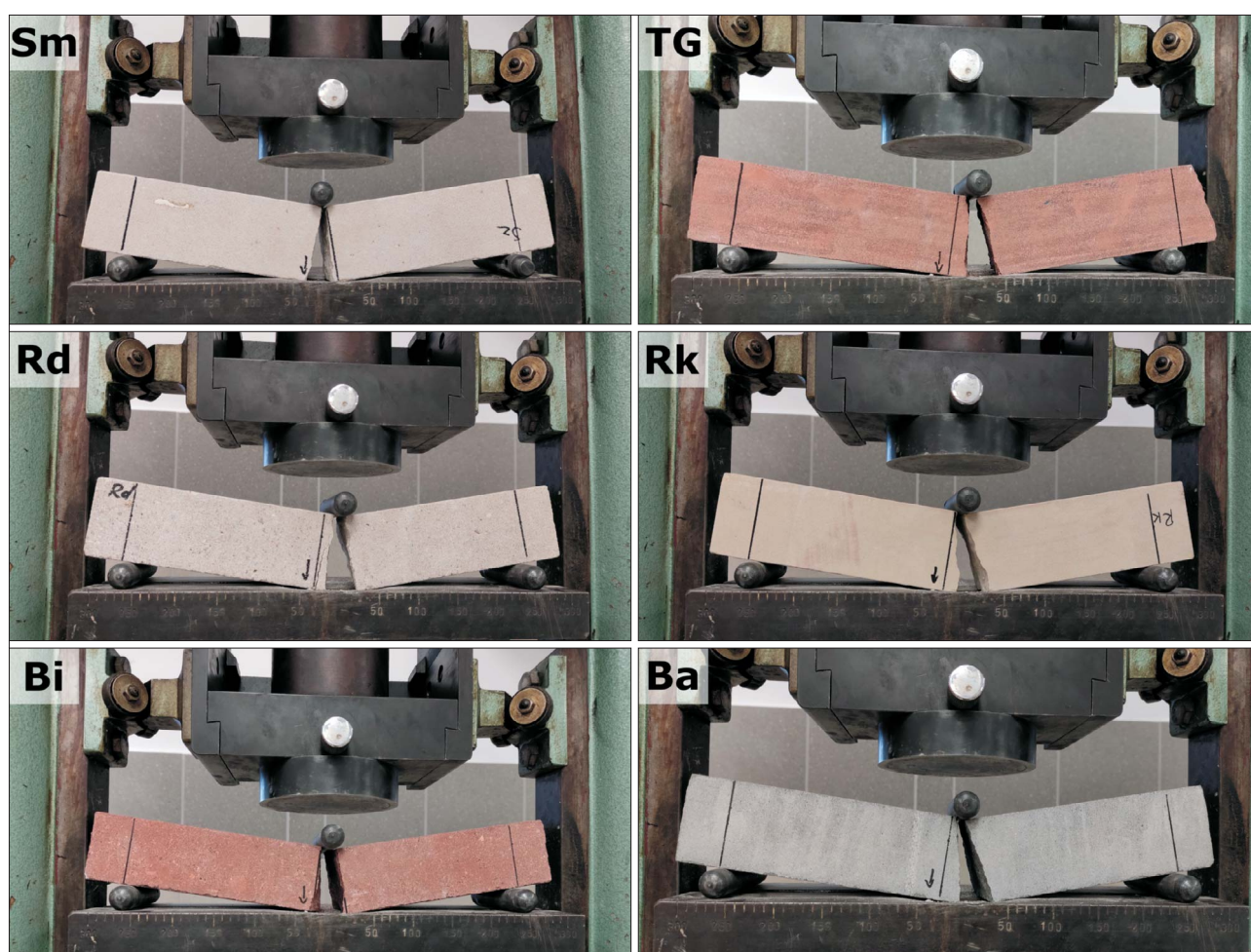
z nich, niezależnie od wielkości, są wydłużone, ich dłuższa krawędź jest zgodna z kierunkiem ułożenia lamin. Najliczniejszym składnikiem materiału okruskowego są ziarna kwarcu. Podrzednie występują okruchy skalne, a sporadycznie łuszczyki oraz minerały ciężkie. Spoiwo jest głównie żelaziste z domieszką ilastego i tworzy obwódki wokół ziaren. Miejscami można się dopatrzeć spoiwa krzemionkowego (ryc. 1B). Składniki spoiwa są rozmieszczone nierównomiernie między ziarnami.

Piaskowiec ze złoża Radków. Piaskowiec ten ma barwę kremowobiałą. Cechuje się zwięzłą i bezładną teksturą oraz nierównoziarnistą strukturą. Makroskopowo są widoczne pojedyncze ziarna kwarcu o rozmiarach sięgających nawet 5 mm. Średnia średnica ziarna wynosi 0,59 mm. Stopień wysortowania określony graficznym wskaźnikiem (GSO) przyjmuje wartość 0,670 \emptyset , czyli jest on umiarkowanie dobry. Graficzna skośność wynosi 0,252, co świadczy o prawostronnej asymetrii wykresu uziarnienia tego piaskowca. Spośród pozostałych badanych piaskowców ma on najbardziej wysmukły (leptokurtyczny) kształt wykresu, wyrażony wartością GSP = 1,130 (tab. 1). Ziarna są obtoczone w różnym stopniu, ale najczęściej średnio. Mają zróżnicowany kształt – od izometrycznego po nieco wydłużony. Kontakty między nimi bardzo często są wklęsło-wypukłe. Szkielet ziarnowy tworzy głównie kwarc,

stanowiący ponad 85% obj. skały, pobocznie występują ziarna skaleni i sporadycznie okruchy innych skał. W próbce jest obecne spoiwo ilaste typu matriks (ryc. 1C).

Piaskowiec ze złoża Rakowiczki. Jasnożółty piaskowiec ze smugami o ciemniejszym, żółtym bądź czerwonym zabarwieniu, wykazuje strukturę zwięzłą i bezładną. Ziarna należą głównie do frakcji średnioziarnistej, ich średnia średnica wynosi 0,3 mm. Wysortowanie jest umiarkowanie dobre (GSO = 0,558 \emptyset), a rozkład jest dodatnio skośny, o czym świadczy wartość GSK (0,238), przy czym większość ziaren ma średnicę poniżej średniej. Wartość GSP jest dodatnia i wynosi 1,068 (tab. 1). Ziarna są półobtoczone lub mają zaokrąglone krawędzie i naroża. Ilościowo w szkielecie ziarnowym zdecydowanie przeważa kwarc. Pozostałymi składnikami są nieliczne skaleni i okruchy skał. Ziarna stykają się bezpośrednio ścianami lub są ze sobą połączone ubogim spoiwem krzemionkowym typu kontaktowego (ryc. 1D).

Piaskowiec ze złoża Bieganów. Piaskowiec jest jasnobordowy z ciemniejszymi laminami. Ma zwięzłą i laminowaną teksturę. Jest średnioziarnisty (GSS wynosi 0,43 mm) i umiarkowanie wysortowany, z zauważalnymi, większymi ziarnami kwarcu. Wykazuje niewielką asymetrię prawo-

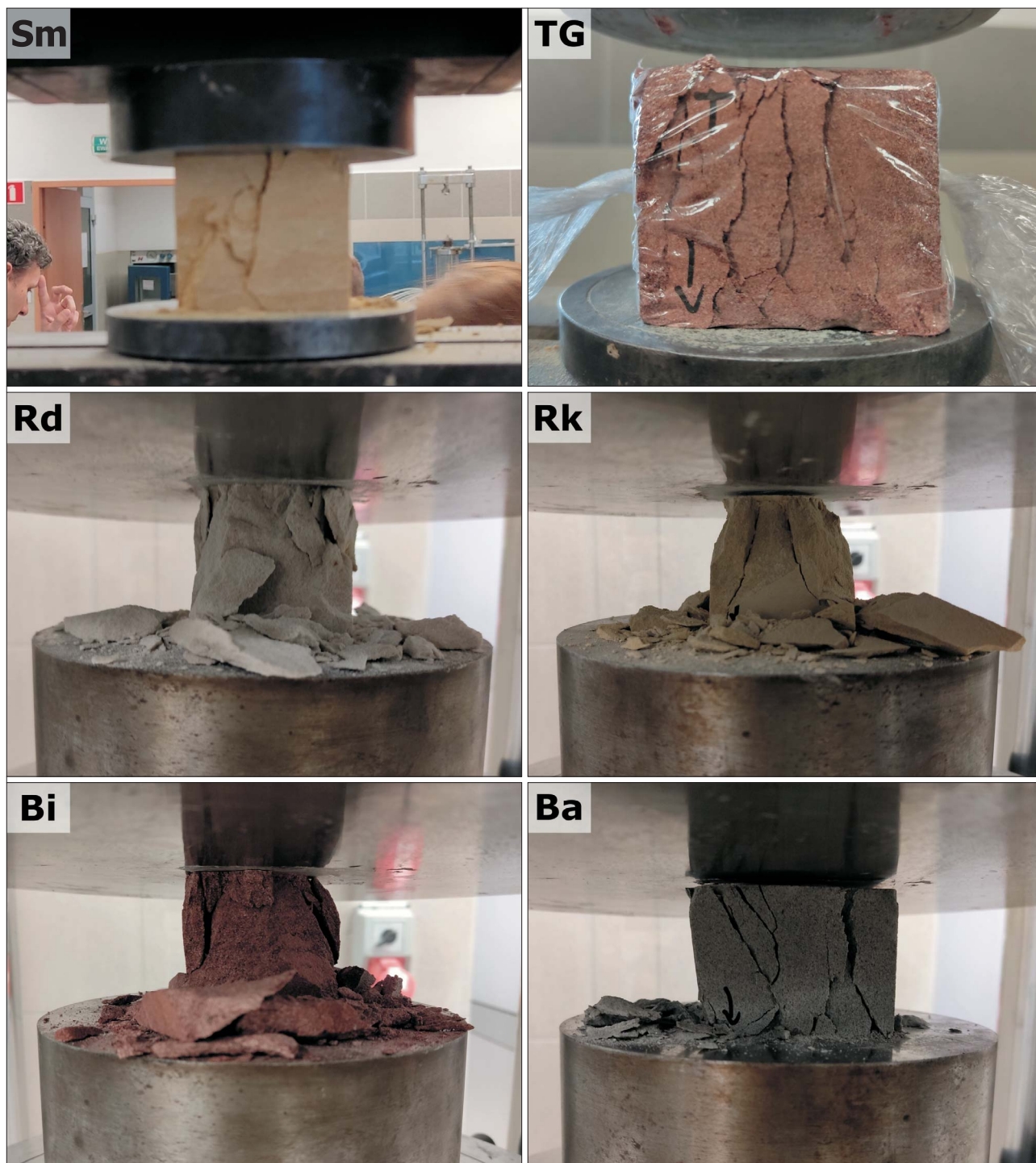


Ryc. 2. Próbki piaskowców po badaniu wytrzymałości na zginanie pod działaniem siły skupionej: **Sm** – Śmiłów I, **TG** – Tumlin-Gród, **Rd** – Radków, **Rk** – Rakowiczki, **Bi** – Bieganów, **Ba** – Barwałd

Fig. 2. Sandstone samples after testing flexural strength under concentrated force: **Sm** – Śmiłów I, **TG** – Tumlin-Gród, **Rd** – Radków, **Rk** – Rakowiczki, **Bi** – Bieganów, **Ba** – Barwałd

stronną oraz rozkład leptokurtyczny (tab. 1). Ziarna są w różnym stopniu obtoczone. Znaczna ich część ma ostre krawędzie. Materiał okruczowy składa się głównie z kwarcu, występującego zarówno w postaci monokrystalicznej, jak i polikrystalicznej. Ponadto są w nim obecne skalenie, litoklasty i drobne blaszki łyszczyków. Część ziaren jest objęta procesami wietrzenia. Spoiwo skały jest krzemionkowo-ilasto-żelaziste (ryc. 1E).

Piaskowiec ze złoża Barwałd. Piaskowiec ma popielatoniebieskoszarą barwę. Odnacza się zbitą i bezładną teksturą oraz średnioziarnistą strukturą z występującymi punktowo nieco większymi ziarnami. Średnia średnica ziaren wynosi 0,36 mm. Stopień wysortowania ziaren jest umiarkowany. Asymetria jest bliska zerowej, wyniki koncentrują się wokół średniej (tab. 1). Ziarna mają ostre krawędzie. Zawartość kwarcu nie jest tak duża jak w pozostałych



Ryc. 3. Próbkki piaskowców po badaniu wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie: **Sm** – Śmiłów I, **TG** – Tumlin-Gród, **Rd** – Radków, **Rk** – Rakowiczki, **Bi** – Bieganów, **Ba** – Barwałd

Fig. 3. Sandstone samples after testing uniaxial compressive strength: **Sm** – Śmiłów I, **TG** – Tumlin-Gród, **Rd** – Radków, **Rk** – Rakowiczki, **Bi** – Bieganów, **Ba** – Barwałd

Tab. 2. Wytrzymałość piaskowców na jednoosiowe ściskanie i zginanie**Table 2.** Uniaxial compressive and flexural strength of sandstone samples

Pochodzenie piaskowca <i>Location</i>	Wytrzymałość na zginanie <i>Flexural strength</i> [MPa]	Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie <i>Uniaxial compressive strength</i> [MPa]
Śmiłów I	2,95	29,29
Tumlin	2,33	37,05
Radków	2,16	34,60
Rakowiczki	2,21	8,80
Bieganów	2,27	23,24
Barwałd	7,55	63,65

badanych próbkach piaskowców, choć nadal minerał ten stanowi dominujący składnik. Liczne są również litoklasty. W mniejszych ilościach występują łuszczyki i skalenie. Od pozostałych skał odróżnia się obfitym, węglanowo-krzemionkowym spoiwem, miejscami również ilastym (ryc. 1F).

Test jednoosiowego ściskania i test zginania

W wyniku testu zginania, który polega na łamaniu próbek skał w kształcie belki, wszystkie próbki piaskowców pękły niemal identycznie – wzdłuż jednej powierzchni, prawie w połowie długości belki (ryc. 2). Natomiast próbki poddane testowi jednoosiowego ściskania, mające formę kostek, rozpadły się wzdłuż kilku powierzchni, przybierając czasem postać zbliżoną do dwóch stożków stykających się wierzchołkami (ryc. 3).

Stwierdzono dość duże zróżnicowanie wytrzymałości badanych piaskowców na jednoosiowe ściskanie. Najmniejszą wytrzymałość (8,80 MPa) ma średnioziarnisty piaskowiec ze złoża Rakowiczki o ubogim (kontaktowym) spoiwie krzemionkowym i znacznej porowatości. Największą wytrzymałością (63,65 MPa) odznaczył się piaskowiec ze złoża Barwałd (tab. 2), co niewątpliwie wynika ze związania ziaren jego szkieletu obfitym spoiwem węglanowo-krzemionkowym.

Pod względem wytrzymałości na zginanie różnice między poszczególnymi skałami były niewielkie. Najmniej odporny okazał się gruboziarnisty piaskowiec ze złoża Radków, o spoiwie ilastym. Wytrzymałość tej skały na zginanie wyniosła 2,16 MPa. Niewiele większą wytrzymałość (2,21 MPa) wykazał piaskowiec ze złoża Rakowiczki. Największą wytrzymałość na zginanie (7,55 MPa), podobnie jak na ściskanie, ma piaskowiec ze złoża Barwałd (tab. 2). Wartości wytrzymałości na zginanie wszystkich badanych próbek były znacząco mniejsze niż wartości wytrzymałości na ściskanie.

Profilometria laserowa

Analiza powierzchni rozdzielczych powstałych po wykonaniu testu zginania wykazała, że najbardziej gładką powierzchnię przełomu ma piaskowiec ze złoża Barwałd. W skale tej, ze względu na jej znaczną zwięzłość, wynikającą z rodzaju i ilości spoiwa, nastąpiła zarówno międzyziarnowa, jak i wewnątrzziarnowa propagacja spękań. Utworzona wskutek tego powierzchnia przełomu skały miała bardzo małą chropowatość i falistość – wartości parametrów tej powierzchni były zdecydowanie najmniejsze w

Tab. 3. Parametry chropowatości i falistości powierzchni rozpadu piaskowców po wykonaniu testów jednoosiowego ściskania i zginania
Table 3. Roughness and waviness parameters of the disintegration surfaces of sandstones after uniaxial compressive and flexural tests

Parametr <i>Parameter</i>	Piaskowiec ze złoża / <i>Sandstone from the deposit</i>											
	Barwałd		Rakowiczki		Śmiłów I		Tumlin Gród		Bieganów		Radków	
	Wartość parametru dla poszczególnych powierzchni rozpadu / <i>The parameter value for each decay surface</i>											
	Zginanie <i>Flexural test</i>	Ściskanie <i>Compression</i>	Zginanie <i>Flexural test</i>	Ściskanie <i>Compression</i>	Zginanie <i>Flexural test</i>	Ściskanie <i>Compression</i>	Zginanie <i>Flexural test</i>	Ściskanie <i>Compression</i>	Zginanie <i>Flexural test</i>	Ściskanie <i>Compression</i>	Zginanie <i>Flexural test</i>	Ściskanie <i>Compression</i>
R_a [μm]	12,91	15,22 (+15%)	13,66	14,62 (+7%)	15,83	15,23 (-4%)	16,57	22,41 (+26%)	18,24	18,57 (+2%)	24,45	22,40 (-8%)
R_c [μm]	44,97	51,32 (+12%)	47,23	48,31 (+2%)	54,91	51,75 (-6%)	57,85	87,01 (+34%)	65,35	66,49 (+2%)	87,27	77,86 (-11%)
R_t [μm]	124,67	289,27 (+57%)	164,16	197,02 (+17%)	163,31	288,26 (+43%)	179,75	840,27 (+79%)	256,47	300,59 (+15%)	300,73	227,05 (-25%)
v [mm]	0,61	0,62 (+3%)	0,55	0,59 (+7%)	0,59	0,578 (-1%)	0,58	0,67 (+14%)	0,64	0,61 (-5%)	0,62	0,63 (+2%)
W_a [μm]	293,93	668,10 (+56%)	400,14	793,78 (+50%)	447,04	502,80 (+11%)	319,13	548,13 (+42%)	896,14	419,68 (-50%)	402,82	560,14 (+28%)
W_t [μm]	1605,41	4514,44 (+64%)	1911,94	4613,18 (+59%)	1923,42	2724,88 (+29%)	1649,08	3590,95 (+54%)	3823,72	2245,94 (-41%)	2157,31	2702,83 (+20%)

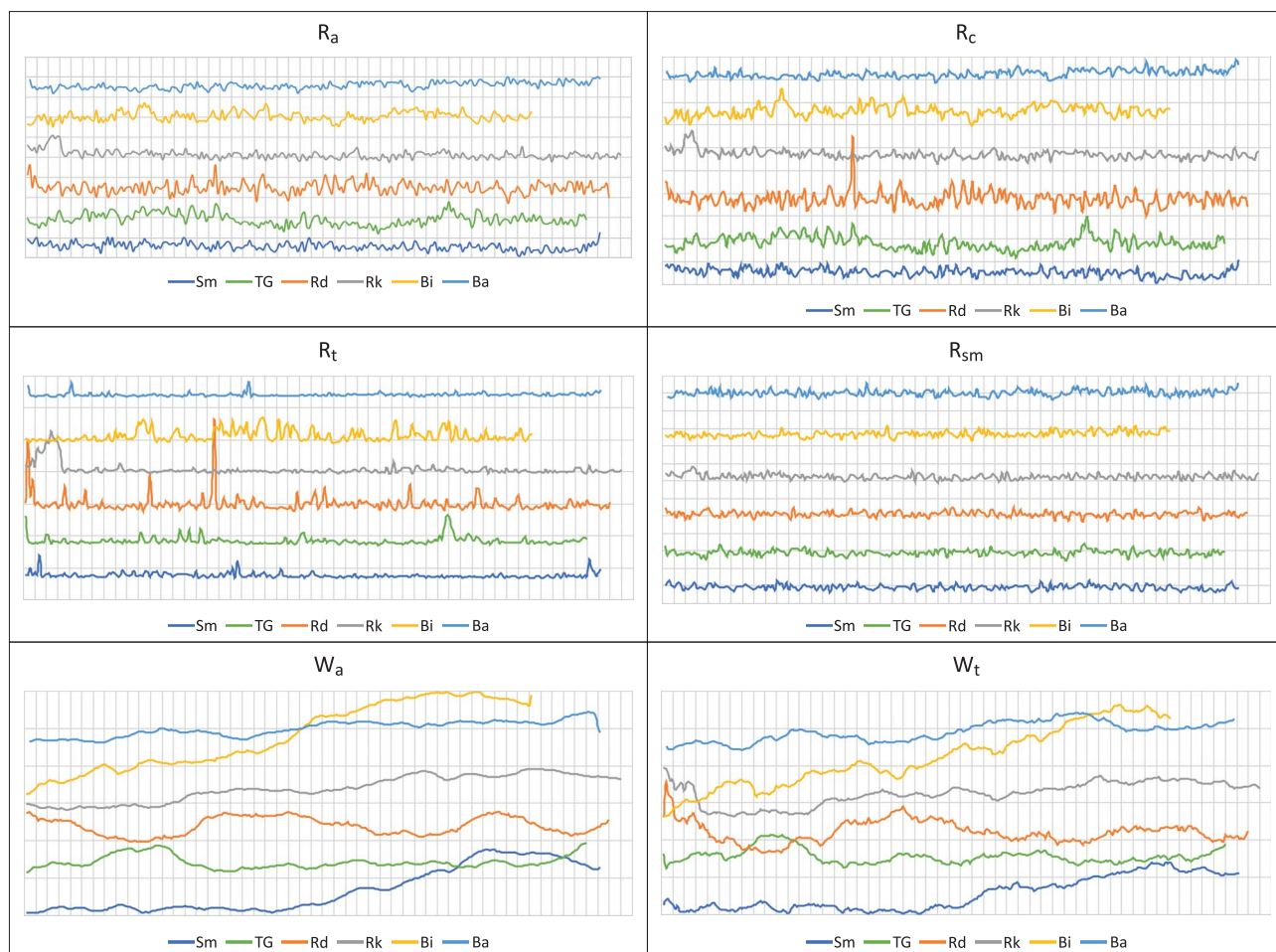
Objaśnienia / Explanations: R_a, W_a – średnia arytmetyczna rzędnych profilu / *arithmetic mean of the profile ordinates*, R_c – największa wysokość profilu / *maximum profile height*, R_t, W_t – całkowita wysokość profilu / *total profile height*

porównaniu z innymi badanymi próbkami piaskowców (tab. 3, ryc. 4). Tylko średnia szerokość elementów profilu (R_{Sm}) piaskowca z Barwałdu miała wartość ($0,61 \mu\text{m}$) porównywalną do stwierdzonej w innych próbkach skał. Jest to skutkiem znacznych odległości między ziarnami kwarcu tej skały, oddzielenymi od siebie obfitym spoiwem. Pod względem wartości parametrów chropowatości podobny do piaskowca z Barwałdu jest piaskowiec ze złoża Rakowiczki, mimo że (jak wcześniej wspomniano) znacznie różni się od niego wytrzymałością na zginanie i ściskanie. Jego stosunkowo równa i mało chropowata powierzchnia przełomu wynika z podobnego uziarnienia ($GSS = 1,730$) oraz wysortowania ($GSO = 0,558 \varnothing$). W piaskowcu ze złoża Barwałd wartości tych parametrów wynoszą odpowiednio 1,473 i 0,858. Przerwanie ciągłości tej skały, w odróżnieniu od piaskowca Rakowiczki, nastąpiło głównie pomiędzy ziarnami szkieletu oraz wzdłuż płaszczyzn łupliwości skaleni. W mniejszym stopniu rozpadowi uległy ziarna kwarcu i litoklasty. Z opisanego wcześniej sposobu wiązania ziaren szkieletu (bezpośrednie kontakty ziaren i spoiwo kontaktowe) wynika ich znaczne zagęszczenie, wyrażające się niewielkimi odległościami między nimi. Znalazło to swój wyraz w wartości parametru „częstotliwościowego” R_{Sm} , ($0,55 \mu\text{m}$), najmniejszej wśród badanych próbek.

Stwierdzono znaczne podobieństwo wartości parametrów „wysokościowych” profilu chropowatości piaskowców ze złoża Śmiłów I i Tumlin-Gród. Wynoszą one odpowiednio: R_a (15,83 i 16,57 μm), R_c (54,91 i 57,85 μm) i R_t (163,31 i 179,75 μm) i wyraźnie korelują z parametrami uziarnienia GSS, GSO, GSK i GSP tych drobnoziarnistych i bardzo drobnoziarnistych oraz umiarkowanie dobrze wysortowanych piaskowców. Zaobserwowano również, że zbliżone podobieństwo wykazują wartości parametrów falistości W_a i W_t tych piaskowców (tab. 3, ryc. 4).

Gruboziarnisty piaskowiec ze złoża Radków charakteryzuje się największymi wartościami parametrów chropowatości, najmniejszą wartością GSS (0,753) oraz największymi wartościami GSK (0,252) i GSP (1,130). Przełom skały jest głównie międzyziarnowy – powstał w obrębie spoiwa ilastego typu matriks. W połączeniu z gruboziarnistością szkieletu sprawiło to, że nawet makroskopowo uwidacznia się nierówna, zadziorowata powierzchnia tej skały. Pod względem wartości parametrów falistości piaskowiec ten nie różni się istotnie od pozostałych badanych (tab. 3).

Piaskowiec ze złoża Bieganów cechuje się pośrednią wartością parametrów chropowatości – między wartościami parametrów piaskowców ze złóż Śmiłów I i Tumlin-Gród a piaskowca ze złoża Radków. Wynika to w



Ryc. 4. Przykładowe profile chropowatości i falistości powierzchni piaskowców po teście wytrzymałości na zginanie: R_a, W_a – średnia arytmetyczna rzędnych profilu, R_c – największa wysokość profilu, R_t, W_t – całkowita wysokość profilu, R_{Sm} – parametr częstotliwościowy

Fig. 4. Examples of sandstone surface roughness and waviness profiles after flexural strength test: R_a, W_a – arithmetic mean of the profile ordinates, R_c – maximum profile height, R_t, W_t – total profile height, R_{Sm} – frequency parameter



Ryc. 5. Przykładowe profile chropowatości i falistości powierzchni piaskowców po teście wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie: R_a , W_a – średnia arytmetyczna rzędnych profilu, R_c – największa wysokość profilu, R_t , W_t – całkowita wysokość profilu, R_{Sm} – parametr częstotliwościowy

Fig. 5. Examples of sandstone surface roughness and waviness profiles after uniaxial compression strength test: R_a , W_a – arithmetic mean of the profile ordinates, R_c – maximum profile height, R_t , W_t – total profile height, R_{Sm} – frequency parameter

pierwszym rzędzie z wartości parametrów uziarnienia (GSS, GSO, GSK i GSP) piaskowca z Bieganowa, które lokują go między wspomnianymi piaskowcami. Drugim czynnikiem może być różnorodność składu mineralnego jego szkieletu (kwarc, skalenie, litoklasty i łyszczyki) oraz spoiwa (krzemionka, minerały ilaste i związki żelaza), wpływająca na niejednorodność tworzącego się przelomu skały.

Zależność między wartością wytrzymałości na zginanie badanych piaskowców a wartościami parametrów ich chropowatości i falistości jest słaba. Obliczone wartości współczynnika korelacji mieszczą się bowiem w zakresie od $-0,16$ do $-0,51$.

Zmiana sposobu destrukcji próbek z metody zginania na jednoosiowe ściskanie niemal we wszystkich przypadkach zaznaczyła się zwiększeniem wartości parametrów chropowatości i falistości powierzchni przelomu badanych piaskowców. Najwięcej wzrosły wartości całkowitej wysokości profilu chropowatości (R_t) powierzchni przelomu – w piaskowcu ze złoża Tumlin-Gród nawet o 79%. Nastąpił także duży przyrost całkowitej wysokości profilu falistości (W_t) – największy w piaskowcu ze złoża Barwałd, o 64% (tab. 3, ryc. 5). Wyniki te wskazują, że złożony układ naprężeń powstających podczas ściskania próbek, odmienny od mechanizmu ich rozciągania, zachodzącego w teście zginania, powoduje nie tylko różnicę w sposobie rozpadu próbki na wiele płaszczyzn, ale wpływa także na zwiększenie nierówności powstałych powierzchni rozdzielczych.

Analiza parametrów charakteryzujących ich morfologię ujawniła, że najmniejsze i zbliżone do siebie wartości parametrów R_a , R_c , R_t i R_{Sm} miały piaskowce ze złożów Barwałd i Śmiłów I oraz, w nieco mniejszym stopniu, piaskowce ze złoża Rakowiczki i Bieganów. Wydaje się, że przyczyniło się do tego podobne uziarnienie tych skał, definiowane głównie jako średnioziarniste (GSS od 1,202 do 1,730), a tylko w jednym przypadku (Śmiłów I) jako drobnoziarniste (GSS = 2,210). Pozostałe cechy litologiczne, takie jak skład mineralny szkieletu i rodzaj oraz ilość spoiwa, znacznie różniące między sobą te piaskowce, nie miały wpływu na chropowatość, ale zadecydowały o dużej zmienności wartości parametrów ich falistości W_a i W_t (tab. 3, ryc. 5).

Największymi wartościami parametrów chropowatości cechuje się gruboziarnisty piaskowiec ze złoża Radków, a także, co może budzić zdziwienie, bardzo drobnoziarnisty piaskowiec ze złoża Tumlin-Gród. W tym ostatnim oznaczono ekstremalnie dużą wartość R_t (840,27 μm), wyrażającą całkowitą wysokość profilu. Prawie czterokrotnie przekracza ona wartości parametru R_t właściwe dla pozostałych piaskowców. Wyniki analizy mikroskopowej tego piaskowca pozwalają wnioskować, że powodem powstania tak głębokich ubytków (zagłębień) w jego powierzchni było nierównomierne rozmieszczenie różnych rodzajów spoiwa. Sprawili to, że pod wpływem działających naprężeń mogło dojść do rozerwania ciągłości skały w miejscach występowania spoiwa ilastego i żelazistego, z ominięciem

dużych agregatów złożonych z kilku lub kilkunastu ziaren kwarcu połączonych spoiwem krzemionkowym.

Nie stwierdzono istotnego związku między wytrzymałością na ściskanie a wartościami poszczególnych parametrów chropowatości i falistości, co wyraża niski poziom współczynnika korelacji, wynoszący od 0,07 do 0,20.

PODSUMOWANIE

Wyniki badań wytrzymałościowych potwierdziły powszechnie znany wpływ wykształcenia litologicznego piaskowców na ich wytrzymałość na ściskanie i zginanie. Najmniejszą wartość tych parametrów wykazały: gruboziarnisty piaskowiec o spoiwie ilastym oraz średnioziarnisty piaskowiec o kontaktowym spoiwie krzemionkowym i znacznej porowatości. Największą wytrzymałość miał piaskowiec o obfitym spoiwie węglanowo-krzemionkowym. Wartości wytrzymałości na zginanie wszystkich badanych próbek były znacząco mniejsze niż wartości wytrzymałości na ściskanie. Wykazano, że nie ma istotnej zależności między wartościami obu tych właściwości a wartościami parametrów chropowatości i falistości. Uzyskano jednoznaczne wyniki wskazujące na to, że istotny wpływ na morfologię powierzchni rozdzielczej ma rodzaj mechanizmu zniszczenia. Powierzchnie uzyskane podczas testu jednoosiowego ściskania są bardziej szorstkie niż uzyskane w wyniku zginania próbek – wartości parametrów chropowatości i falistości tych powierzchni są większe (w piaskowcu ze złoża Tumlin-Gród nawet o 79%). Potwierdzono wstępne założenie, że chropowatość powierzchni przełomu piaskowców jest istotnie uzależniona od struktury skały. Dość wyraźny związek, na poziomie współczynnika korelacji od 0,5 do 0,8, stwierdzono między uziarnieniem piaskowców (wyrażonym wartością GSS) a parametrami chropowatości powierzchni tych skał, uzyskanych w obu testach zniszczenia. Stwierdzono mianowicie, że w grubiej uziarnionych piaskowcach powierzchnie rozdzielcze są bardziej chropowate. Oprócz tego dość oczywistego wniosku wykazano, że także w bardzo drobnoziarnistym piaskowcu na skutek jego ściskania mogą powstać powierzchnie rozdzielcze o znacznej chropowatości, do czego prowadzi specyficzne rozmieszczenie różnych składników spoiwa, sprzyjające powstawaniu większych, zwięzłych agregatów ziarnowych.

Wykazano, że chropowatość powierzchni przełomu jest silnie uzależniona od struktury skały, nie stwierdzono natomiast podobnych zależności odnośnie falistości powierzchni przełomu. Wynika to najprawdopodobniej z faktu, że chropowatość jest traktowana (np. w normie PN-89/M-04256/04) jako zbiór nierówności o względnie małych odległościach między wierzchołkami powierzchni (s) a ich wysokością (h), gdzie $s/h < 50$. Z tego względu parametry chropowatości, takie jak R_a , R_c , R_t i R_{Sm} , mogą dość wiernie odzwierciedlać niuanse strukturalnej zmienności piaskowców. W odróżnieniu od nich parametry falistości (W_a i W_t) odpowiadają nierównościom analizowanym w skali makroskopowej, stanowiącym składowe powierzchni rzeczywistej o przypadkowym ułożeniu lub zbliżonym do postaci okresowej, o odstępach znacznie większych niż w profilu chropowatości (s/h jest większy niż 50, ale mniejszy niż 1000). Tym samym związek wartości parametrów falistości ze strukturą skały jest mniej czytelny i parametry te nie stanowią dobrego narzędzia do opisu morfologii powierzchni rozdzielczych w piaskowcach.

Autorzy składają podziękowanie Recenzentom oraz Redakcji *Przeglądu Geologicznego* za poświęcony czas oraz cenne uwagi dotyczące treści artykułu i jego formy. Praca była finansowana przez AGH Akademię Górniczo-Hutniczą (nr umowy 16.16.140.315).

LITERATURA

- BARTON N.R., LIEN R., LUNDE J. 1974 – Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mech.*, 6.
- BIENIAWSKI Z.T. 1989 – Engineering Rock Mass Classifications. John Wiley & Sons.
- PALMSTRÖM A. 1996 – RMI – A System for Characterising Rock Mass Strength for Use in Rock Engineering, Jr. *Rock Mech. And Tunneling Technology*, 1.
- PN-89/M-04256/04. Struktura geometryczna powierzchni. Falistość powierzchni. Terminologia.
- PN-EN 12372:2010 Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie wytrzymałości na zginanie pod działaniem siły skupionej.
- PN-EN 1926:2007 Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie jednoosiowej wytrzymałości na ściskanie.
- PN-EN ISO 4287:1999. Specyfikacje geometrii wyrobów. Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa. Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.
- PN-EN ISO 14689:2018-05 Rozpoznanie i badania geotechniczne – Oznaczanie, opis i klasyfikowanie skał.

Praca wpłynęła do redakcji 16.11.2024 r.
Akceptowano do druku 17.12.2024 r.