

Analiza porównawcza wytrzymałości rezydualnej powierzchni pogniszczeniowych na przykładzie wybranych struktur geometrycznych

Andrzej Domonik¹, Przemysław Wilczyński¹



A. Domonik



P. Wilczyński

Comparative analysis of the residual strength of post-failure surfaces on the example of selected geometric structures. *Prz. Geol.* 64: 254–261.

A b s t r a c t. The paper presents analysis of the residual strength and geometric structure (roughness) of post-failure surfaces of sandstones from Śmiałów and andesites from Wdżar Mountain. The analysis was carried out on the roughness of the surface distribution of samples obtained by extension and shearing tests of rocks. The morphology of these surfaces was characterized by statistical parameters and 2D and 3D maps, from investigations conducted using a Hommel Tester T8000 profilometer.

Keywords: residual strength, quantitative and qualitative roughness analysis, sandstone, andesite, Śmiałów, Wdżar Mountain, geomechanical properties

W artykule wyjaśniono znaczenie morfologii powierzchni rozdzielczych i szczelin pogniszczeniowych, określaną w terminologii geotechnicznej jako chropowatość, dla oceny wytrzymałości resztkowej (rezydualnej) ośrodków spękanych. Parametr ten decyduje o oporach poślizgu na powierzchniach nieciągłości. Chropowatość jest charakterystycznym składnikiem klasyfikacji wytrzymałości masywu skalnego, zdefiniowanej przez Bartona w 1973 r., coraz szerzej uwzględniana w praktyce inżynierskiej oraz stale uzupełniana nowymi elementami badawczymi (Bodziony, 1965, 2000; Kwaśniewski & Wang, 1998; Li, 1998; Pinińska, 2000; Babadagli & Develi, 2003; Domonik, 2005).

CEL BADAŃ

Podjęto próbę określenia w jaki sposób mechanizmy niszczenia (rozciąganie i ścinanie) oraz czynniki geologiczne, takie jak różny skład mineralny, struktura i tekstura badanych skał, wpływają na morfologię powierzchni pogniszczeniowych. W tym celu właściwości mechaniczne skał powiązано z parametrami statystycznymi powierzchni rozdzielczych przy zastosowaniu nowoczesnych, komputerowych i analitycznych technik pomiarowych.

Nieciągłości, szczeliny i spękania występujące w materiale skalnym jako defekty struktury skał różnej genezy są podstawową cechą naturalnych ośrodków skalnych. Obniżają one wytrzymałość ośrodka i zwiększają podatność na rozwój dużych, niekontrolowanych odkształceń w stanach pokrytycznych. Jednakże po przekroczeniu wytrzymałości granicznej, dzięki procesom tarcia na ich chropowatych powierzchniach, w większości skał jest zachowana pogniszczeniowa wytrzymałość rezydualna.

Zachowanie się nieciągłych ośrodków skalnych w polu naprężeń i ich właściwości mechaniczne są uzależnione od liczby szczelin, ich orientacji, ciągłości i rozwarcia oraz stopnia wypełnienia oraz rodzaju materiału wypełniającego, a także od stopnia zwietrzenia masywu skalnego. Siły tarcia i quasi-spójność spękanych fragmentów skał, jako rezultat chropowatości tych powierzchni, są charakterystycznym

parametrem rozpatrywanym w geotechnicznej ocenie stateczności masywu skalnego (Pinińska, 1999).

Jednym z ważniejszych rozwiązań analizy wpływu chropowatości powierzchni rozdzielczych na wytrzymałość jest przyjęty przez ISRM (*International Society of Rock Mechanics*) i stosowany w inżynierii skalnej, zaproponowany przez Bartona (1973, 1976) oraz Bartona & Choubey'a (1977), współczynnik *JRC* (*Joint Roughness Coefficient*). Umożliwia on ilościowe opisanie chropowatości przez porównanie do 10 wzorcowych profili morfologii powierzchni o wartości liczbowej współczynnika *JRC* w przedziale 0–20. Pozwala to ustalić wartość *JRC* badanej powierzchni. Metoda zaprezentowana przez Bartona jest jednak obciążona subiektywną oceną podobieństwa profilu i wymaga dużego doświadczenia. Trudno także przyjąć, że chropowatość pojedynczego profilu jest reprezentatywna dla całej powierzchni rozdzielczej (Domonik, 2012). Należy także mieć na uwadze, że współczynnik *JRC* nie jest tylko statycznym parametrem geometrycznym (Kwaśniewski & Wang, 1998), ale zależy od zróżnicowanej struktury materiału skalnego oraz od stanu naprężenia.

Dlatego w pracy analizowano zarówno profile, jak i dwuwymiarowe (2D) oraz przestrzenne (3D) mapy powierzchni szczelin. Parametry morfologii powierzchni szczelin mają istotne znaczenie dla oceny zarówno wytrzymałości na ścinanie ośrodków ciągłych, jak i jakości spękanych masywów skalnych. W niniejszej pracy morfologię powierzchni szczelin analizowano w sposób jakościowy oraz ilościowy. Porównano następujące cechy: parametry statystyczne oraz profile i powierzchnie chropowatości. Analizy te pozwoliły na określenie chropowatości powierzchni szczelin i oszacowanie ich wpływu na wytrzymałość rezydualną badanych skał.

MATERIAŁ I METODY

Do badań laboratoryjnych wybrano dwa różne typy skał, skałę osadową (piaskowiec) oraz skałę magmową (andezyt). Monolity skał pobrano z czynnego kamieniołomu

¹ Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; adomonik@uw.edu.pl, przemyslaw.wilczynski@uw.edu.pl.

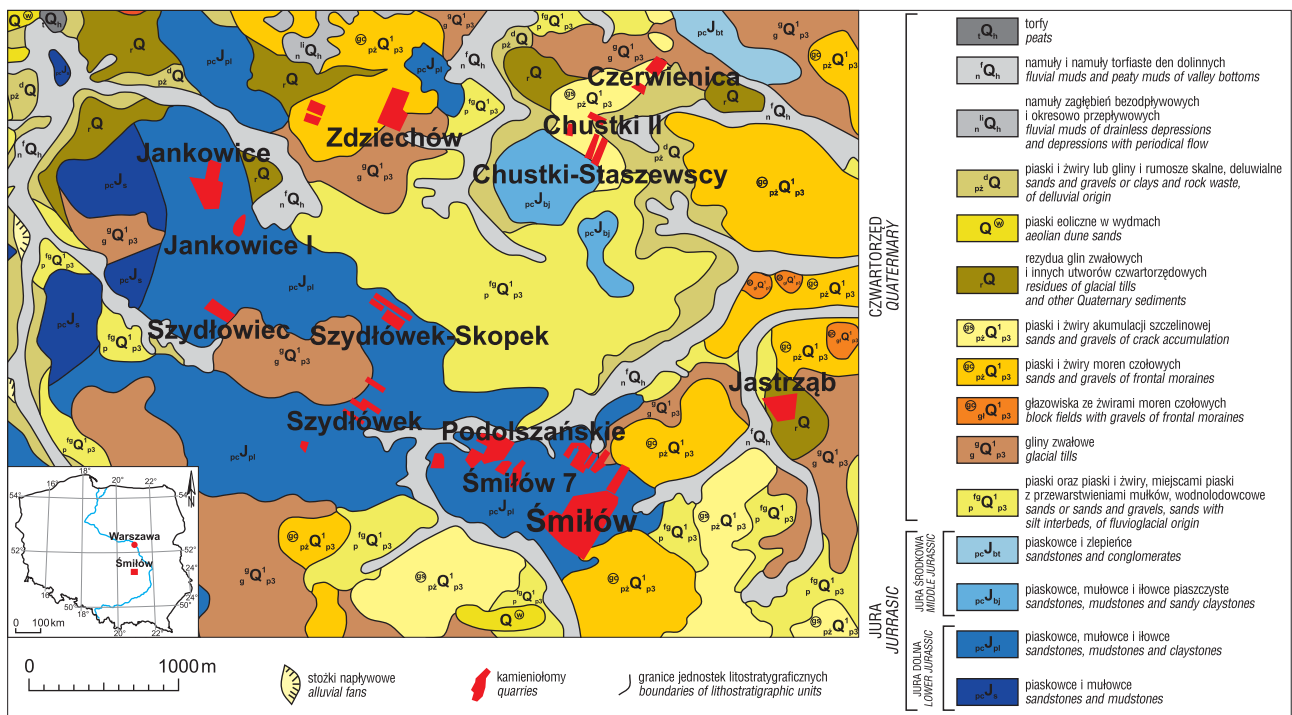
w Śmiłowie (ryc. 1), w którym występują piaskowce wieku jurajskiego tzw. szydłowieckie, oraz z nieczynnego kamieniołomu Snozka na Górze Wdżar, skąd pobrano andezyty wieku miocenijskiego (ryc. 2).

Piaskowce szydłowieckie (kunowskie) są zaliczane do serii drzewieckiej. Były one deponowane w śródlądowych rozlewiskach środkowej wczesniej jury (Kłopotowska, 2013). Tworzą kompleks piaskowcowy przełamany ilowcami i mułowcami, o miąższości 180 m. Region Szydłowca słynie z tych piaskowców wykorzystywanych w budownictwie (Pinińska, 1994). Ich złoża występujące w tej okolicy należą do najdłużej eksploatowanych w Polsce.

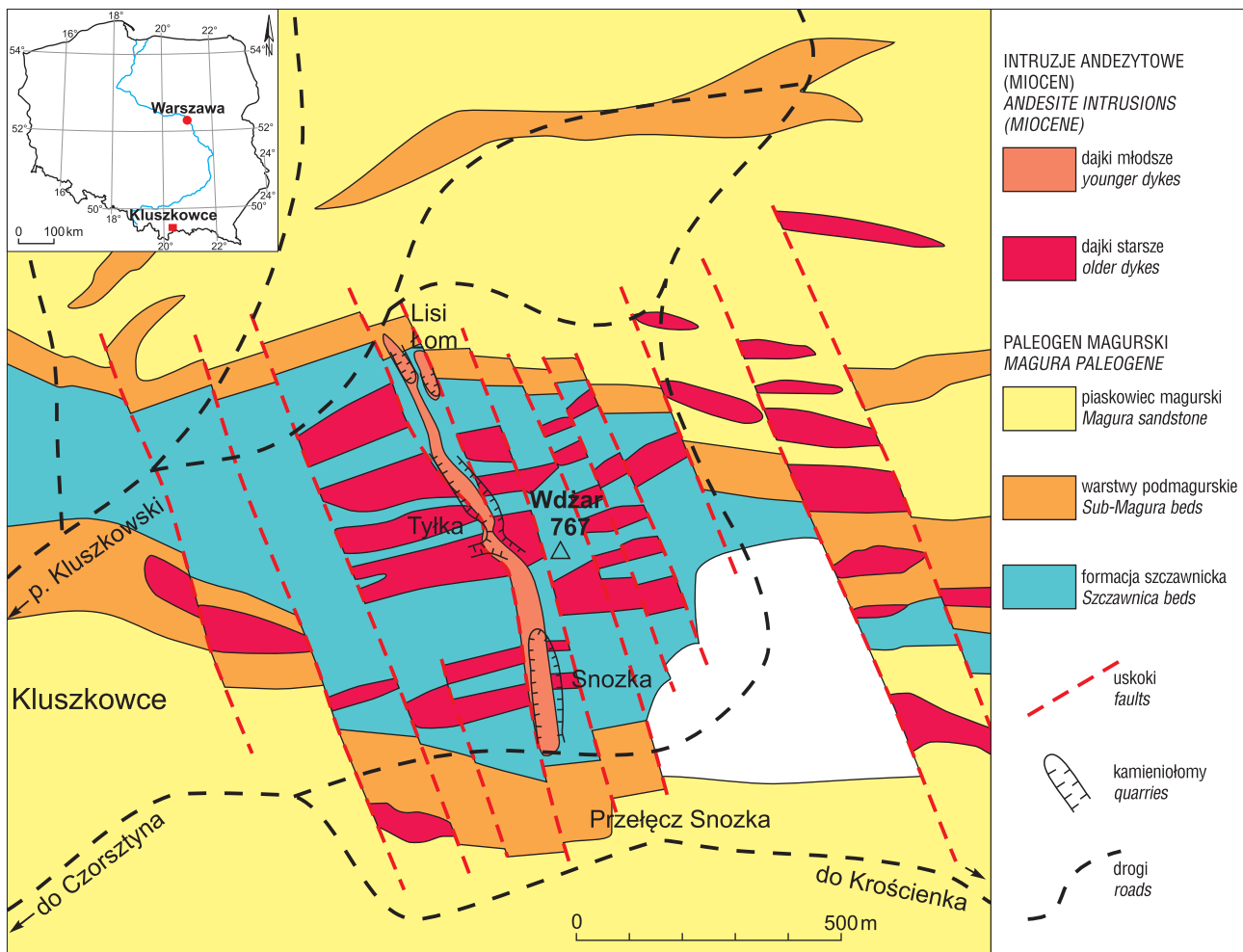
Góra Wdżar jest położona w pasie przejściowym pomiędzy pienińskim pasem skałkowym, a płaszczowiną magurską. Na tej granicy występują miocenijskie intruzje andezytowe, świadczące o działalności wulkanicznej zachodzącej głównie na obszarze Karpat Wewnętrznych (Kulka i in., 1991). Powstały one w dolnym miocenie, po fazie sawskiej (Birkenmajer, 1979). Magma andezytowa, która utworzyła się w krystalicznym podłożu, po okresie kompresji i odprężenia górotworu wykorzystwała płaszczyzny nasunięć tektonicznych i dyslokacji, wdzierając się w skały mezozoiczne i paleogeńskie pienińskiego pasa skałkowego oraz przyległej płaszczowiny magurskiej (Birkenmajer, 1959). Działalność wulkaniczna zanikła w środkowym miocenie (Birkenmajer, 1979). Góra Wdżar jest zbudowana z piaskowca magurskiego poprzecinanego żyłami andezytowymi. Andezyty te, intrudując w piaskowiec, tworzyły żyły pokładowe zgodne (sile) oraz żyły niezgodne z uławiczeniem warstw (dajki). Wyróżniono tu dwie generacje intruzji różniących się wiekiem oraz cechami petrograficznymi – andezyt augitowo-amfibolowy oraz andezyt skalenio-amfibolowy. Dajki odsłaniające się w kamieniołomie Snozka są zbudowane z andezytu amfibolowo-piroksenowego (Domonik, 2012).

Piaskowce szydłowieckie są drobnoziarniste, cechuje je jasnożółty kolor z przebarwieniami brązowymi na powierzchni zwierzęcej. W obrazie mikroskopowym są widoczne głównie ziarna kwarcu o rozmiarach od 0,08 do 0,15 mm, jednolicie rozłożone w masie skalnej (ryc. 3A). Podrzednie w piaskowcach występują ziarna polikrystalicznego kwarcu, a także okruchy skalne. Mineralami akcesorycznymi są cyrkonie oraz turmaliny. W skale dominuje regeneracyjne spoiwo kwarcowe, lokalnie spoiwo krzemionkowo-ilaste. Piaskowce szydłowieckie są mocno porowate o licznych, rozległych, dobrze skomunikowanych porach międzyziarnowych.

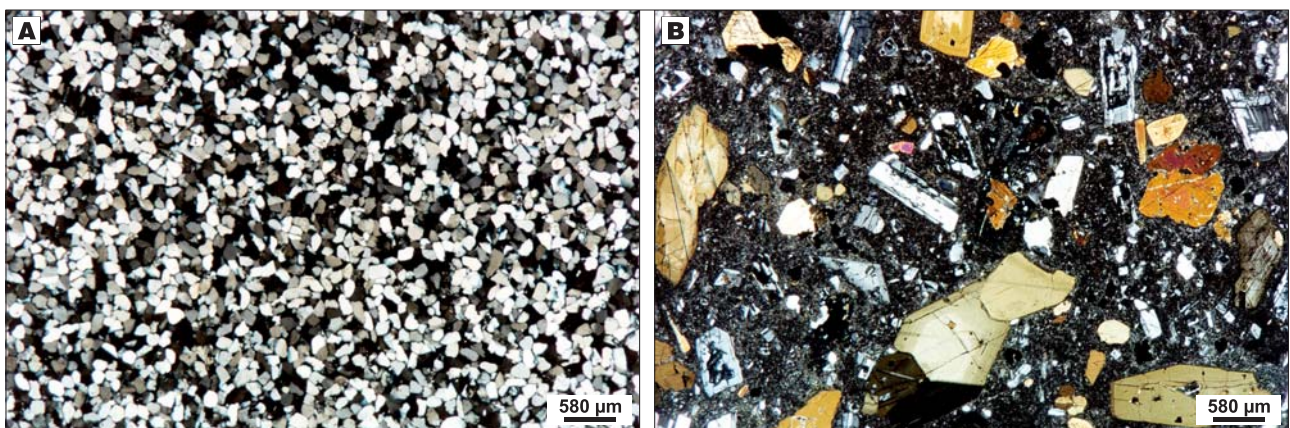
Andezyty cechuje szara barwa z widocznymi makroskopowo czarnymi fenokryształami. Charakteryzują się one średnioziarnistą, holokrystaliczno-porfirową strukturą. Zbudowane są z dużych, hipo- i automorficznych fenokryształów zastygłych w drobnokrystalicznym cieście skalnym o felsytowej oraz hyalopitowej strukturze (ryc. 3B). Miejscami ciasto skalne mieści w sobie zdewitryfikowane szkliwo wulkaniczne. Rozmiary fenokryształów plagioklazów, piroksenów, hornblendy i biotyту wahają się od 0,4 do 1,0 mm. Fenokryształami występującymi najczęściej w skale są plagioklasy o pokroju grubo tabliczkowym, w większości znacznie przeobrażone (karbonatyzacja i sercytyzacja). Spotykane są często wzrostki minerałów nieprzezroczystych oraz kwarc. W płytkach cienkich pod mikroskopem, w andezytach są widoczne również fenokryształy łyszczyków (muskowitu) oraz biotyту w znacznej części schlorotyżowanego. Drobnokrystaliczne tło skalne jest zbudowane z drobnych krystalitów skaleni, w części zrekrystalizowanego szkliwa wulkanicznego oraz nieprzezroczystych i żółto-brunatnych minerałów żelaza rozproszonych w masie tła. W skale występują również agregatowe nagromadzenia krystaliczne minerałów nieprzezroczystych, najczęściej magnetytu. Andezyty są skałą słabo porowatą. Wtórne



Ryc. 1. Mapa geologiczna okolic Śmiłowa, wycinek z SMGP, arkusz Szydłowiec (Warmuzek, 1986; zmodyfikowana)
Fig. 1. Geological map of the Śmiłów area, part of DGMP – Szydłowiec map sheet (Warmuzek, 1986; modified)



Ryc. 2. Mapa geologiczna Góry Wdżar (Birkenmajer, 1979; zmodyfikowana)
Fig. 2. Geological map of Wdżar Mountain (Birkenmajer, 1979; modified)



Ryc. 3. Obraz mikroskopowy płytek cienkich: A – piaskowca z kamieniołomu w Śmiłowie, B – andezytu z kamieniołomu Snozka
Fig. 3. Microscopic image of thin-sections: A – sandstone from the Śmiłów quarry, B – andesite from the Snozka quarry

pory i nieforemne puste przestrzenie w skale są spowodowane intensywnym przeobrażeniem fenokryształów plagioklawów oraz minerałów ciemnych (Domonik, 2012).

Badanie wytrzymałości na rozciąganie przeprowadzono metodą brazylijską w warunkach poprzecznego ściskania walcowych próbek skalnych, o wysokości $H \sim 50$ mm i smukłości ok. 1. Próbkę piaskowców zostały ściśnięte w prasie MTS-815 z prędkością 5 kN/min, a próbki andezytów z prędkością 15 kN/min.

W metodzie brazylijskiej podczas obciążenia próbki walcowej powstaje złożony stan naprężeń, który rzutuje na charakter pęknięcia wzdłuż osi cylindra. Charakter tworzącej się powierzchni rozdzielności jest uwarunkowany cechami strukturalnymi skał (Pinińska, 1994).

Badanie wytrzymałości na ścinanie przeprowadzono pod trzema wymuszonymi kątami: 30, 45 i 60°, w celu określenia poszukiwanych parametrów i uzyskania różnorodnych powierzchni ścicia. Próbkę umieszczano w

„karetkach”, a następnie ścinano pod wymuszonymi kątami, rejestrując wartość obciążenia krytycznego P_{kr} .

Powierzchnie rozdzielcze próbek walcowych uzyskanych w wyniku badań rozciągania i ścinania posłużyły do określenia parametrów chropowatości.

Do analizy powierzchni chropowatości wykorzystano mechaniczny profilometr Hommel Tester T8000 firmy Hommel Werke (ryc. 4A) z oprogramowaniem Turbo Roughness oraz Hommel Map. Pomiary zostały przeprowadzone z krokiem dyskretyzacji w pionie (z) $2,5 \mu\text{m}$ i w poziomie (x, y) $100 \mu\text{m}$.

Badania chropowatości powierzchni spekań rozdzielczych przeprowadzono na powierzchniach 5 próbek piaskowców i 3 powierzchniach próbek andezytów uzyskanych podczas badania wytrzymałości na rozciąganie metodą brazylijską oraz na 6 powierzchniach (po 3 dla każdego typu skał) powstałych podczas badania wytrzymałości na ścinanie. Dla każdej powierzchni rozdzielczej uzyskanej podczas badania wytrzymałości na rozciąganie (ryc. 4B) przeanalizowano 300 pojedynczych profili chropowatości, a dla powierzchni rozdzielczych otrzymanych podczas testu na ścinanie (ryc. 4C) przeanalizowano 200 pojedynczych profili chropowatości. Z otrzymanych danych utworzono mapy 2D i 3D oraz obliczono parametry chropowatości badanych powierzchni.

Próby powiązania parametrów statystycznych z właściwościami mechanicznymi ścianek spekań w ośrodkach skalnych, dzięki najnowszej technice pomiarowej i skomputeryzowanej analizie wyników, pozwalają wykorzystać szereg nowych, nie ujętych jeszcze normami parametrów charakteryzujących morfologię powierzchni spekań. Morfologia losowo wybranego profilu na analizowanej powierzchni może być zatem porównana z wzorcowymi profilami chropowatości Bartona.

Li (1998) zauważył, że znaczna chropowatość szczeliny uwidacznia się w zwiększonej różnicy między maksymalną wytrzymałością na ścinanie (τ_{max}) a wytrzymałością rezydualną (τ_{rez}). Przy gładkiej powierzchni spekania, różnice między τ_{max} a τ_{rez} są niewielkie (Pinińska, 1999).

Zgodnie z zaleceniami ISRM krytyczną wartość wytrzymałości rezydualnej na ścinanie (τ_p) wyliczono zgodnie z formułą empiryczną Bartona (2007):

$$\tau_p = \sigma_n \operatorname{tg} \left[(JRC_n) \log \left(\frac{JCS_n}{\sigma_n} \right) + \phi_r \right]$$

gdzie:

σ_n – naprężenie normalne (MPa),

JRC_n – współczynnik chropowatości powierzchni szczelin,

JCS_n – wytrzymałość spekania ściany masywu,

ϕ_r – resztkowy kąt tarcia powierzchni.

$$JRC_n \approx JRC_o \left(\frac{L_n}{L_o} \right)^{-0,02 JRC_o}$$

$$JCS_n \approx JCS_o \left(\frac{L_n}{L_o} \right)^{-0,03 JRC_o}$$

gdzie:

JRC_o – współczynnik chropowatości powierzchni szczelin w skali laboratoryjnej,

$JCS_o = r_s$ – wskaźnik odbojności młotkiem Schmidta,

L_n – rozmiary bloku *in situ*,

L_o – długość próbki pomiarowej.

W celu ustalenia zakresu wartości współczynnika JRC_o , współczynnik ten zmodyfikowano empirycznie do



Ryc. 4. A – głowica pomiarowa profilometru Hommel Tester T8000 z przygotowaną do analizy chropowatości powierzchni próbką andezytu, B – powierzchnie rozdzielcze próbek piaskowca i andezytu otrzymane podczas badania rozciągania metodą brazylijską, C – powierzchnie rozdzielcze próbek piaskowca i andezytu otrzymane podczas badania ścinania

Fig. 4. A – the measuring head of Hommel Tester T8000 profilometer with a sample of andesite prepared for surface roughness analysis, B – surfaces distribution of sandstone and andesite samples obtained during the Brazilian test, C – surfaces distribution of sandstone and andesite samples obtained during the shear test

zakresu wartości współczynnika JRC_n , a następnie jego wartość obliczono z następującego wzoru:

$$JRC_o = 16,1 + 16,23 \log S_q$$

gdzie:

S_q – średnie kwadratowe odchylenie chropowatości [mm].

Wykorzystane do interpretacji parametry opisujące ilościowo strukturę geometryczną powierzchni szczelin zostały zdefiniowane oraz szczegółowo opisane w normach PN-EN ISO 4287:1999 oraz PN-EN ISO 3274:2011. Zastosowane parametry to:

1. Średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości (S_a):

$$S_a = \frac{1}{NM} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} |z_{x,y}|$$

2. Średnie kwadratowe odchylenie chropowatości (S_q):

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{NM} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} z_{x,y}^2}$$

3. Współczynnik asymetrii chropowatości (S_{sk}):

$$S_{sk} = \frac{1}{NMS_q^3} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} z_{x,y}^3$$

4. Współczynnik nachylenia chropowatości (S_{ku}):

$$S_{ku} = \frac{1}{NMS_q^4} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} z_{x,y}^4$$

Do scharakteryzowania chropowatości zastosowano również parametry pomocnicze:

S_p – wysokość najwyższego wierzchołka,

S_v – głębokość najniższego wgłębienia, czyli najgłębsza dolina rozpatrywanej powierzchni,

S_t – całkowita wysokość powierzchni chropowatości ($S_p + S_v$),

S_z – średnia chropowatość powierzchni. Jest to średnia arytmetyczna bezwzględnych wartości pięciu najwyższych wzniesień i pięciu najgłębszych zagłębień.

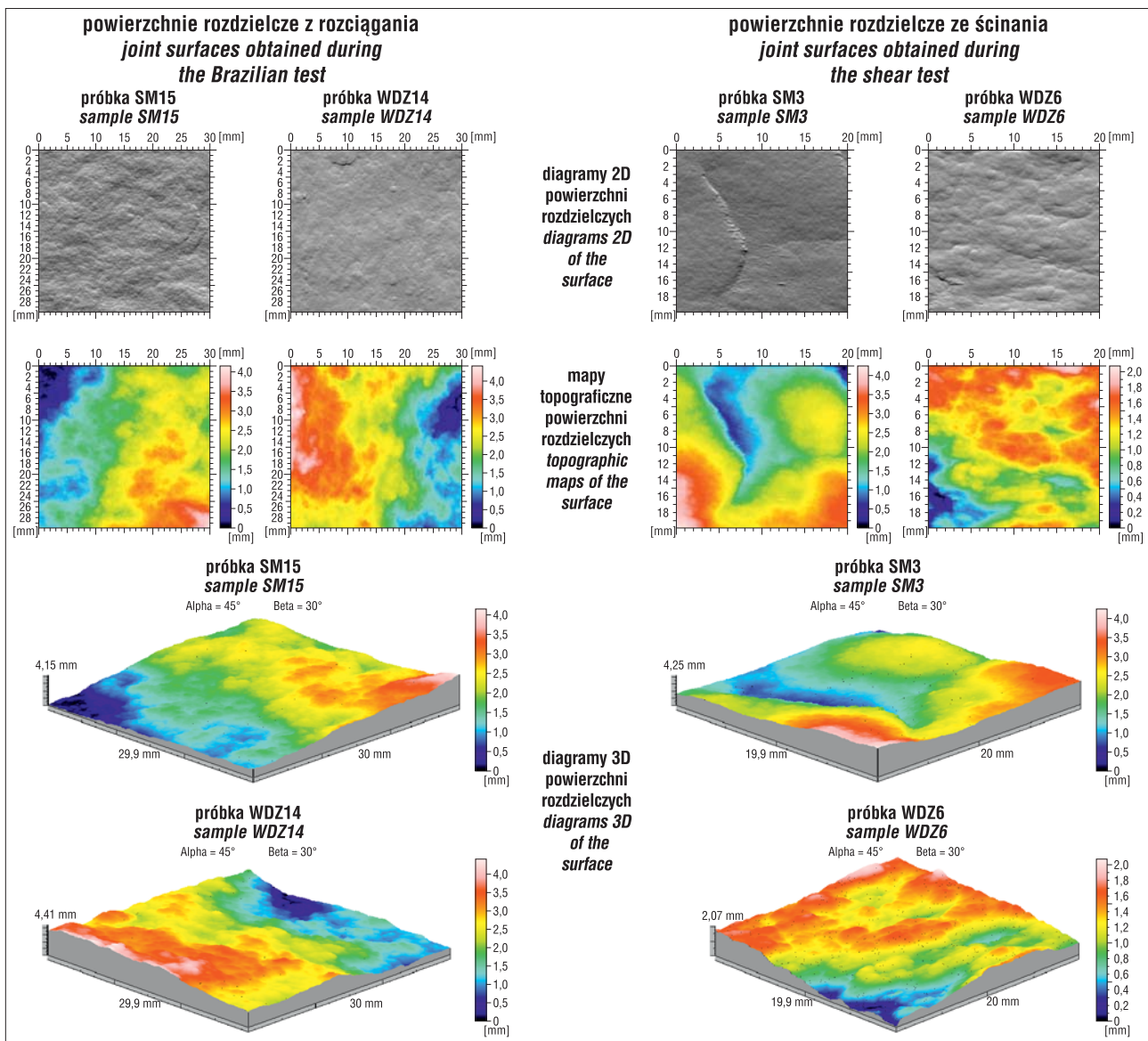
WYNIKI BADAŃ

W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano parametry statystyczne powierzchni rozdzielczych piaskowców i andezytów, powstałych w testach rozciągania i ścinania (tab. 1). Otrzymano również obrazy 2D i 3D morfologii powierzchni rozdzielczych (ryc. 5).

Porównując parametry statystyczne otrzymane w wyniku pęknięcia ekstensyjnego próbek, można zauważyć, że andezyty osiągają wyższe wartości parametru S_a oraz parametru S_q niż piaskowce. Może to sugerować, że powstałe w wyniku rozciągania metodą brazylijską powierzchnie są bardziej gładkie w piaskowcu niż w andezytcie. Powierzchnie uzyskane podczas ścięcia próbek andezytów charaktery-

Tab. 1. Parametry statystyczne, JRC_n i wytrzymałości rezydualnej badanych piaskowców i andezytów
Table 1. Statistical parameters, Joint Roughness Coefficient and the residual strength of the sandstones and andesites

Nr próbki No. of sample	Metoda Method	Parametry statystyczne Statistical parameters								JRC_n [-]	τ_p [MPa]
		S_a [mm]	S_q [mm]	S_p [mm]	S_v [mm]	S_t [mm]	S_{sk} [-]	S_{ku} [-]	S_z [mm]		
SM 1	rozciąganie extension	0,854	0,985	2,63	1,86	4,49	0,267	1,89	4,20	16,0	6,3
SM 7		0,442	0,523	1,67	1,33	3,00	0,364	2,39	2,87	11,5	6,4
SM 13		0,372	0,454	1,40	1,24	2,64	0,339	2,75	2,57	10,5	6,4
SM 15		0,596	0,727	2,26	1,89	4,15	-0,215	2,77	3,97	13,9	6,4
SM 23		0,807	0,957	2,32	3,07	5,39	-0,364	2,42	5,13	15,8	6,3
WDZ 3		1,100	1,270	2,49	2,99	5,48	-0,121	1,95	5,30	17,8	7,4
WDZ 14		0,754	0,902	2,09	2,32	4,41	-0,239	2,21	4,32	15,4	7,3
WDZ 18		0,440	0,561	1,70	2,02	3,72	-0,175	3,38	3,61	12,0	7,2
Średnia piaskowiec Average sandstone		0,614	0,729	2,06	1,88	3,93	0,08	2,44	3,75	13,5	6,3
Średnia andezyt Average andesite		0,765	0,911	2,09	2,44	4,54	-0,18	2,51	4,41	15,1	7,3
SM 3	ściananie 30° shear 30°	0,596	0,746	2,15	2,10	4,25	0,148	2,61	3,93	14,0	6,2
SM 11	ściananie 45° shear 45°	0,847	1,050	2,51	2,08	4,59	0,282	2,33	4,40	16,4	6,1
SM 21	ściananie 60° shear 60°	0,792	0,976	2,48	1,69	4,17	0,736	2,61	4,12	15,9	6,2
WDZ 6	ściananie 30° shear 30°	0,274	0,346	0,89	1,18	2,07	-0,747	3,36	1,96	8,6	6,6
WDZ 17	ściananie 45° shear 45°	0,526	0,658	1,97	1,11	3,07	0,759	2,76	2,84	13,1	6,6
WDZ 21	ściananie 60° shear 60°	0,471	0,612	1,93	2,43	4,37	-0,456	3,82	2,99	12,6	6,6
Średnia piaskowiec Average sandstone		0,745	0,924	2,38	1,96	4,34	0,39	2,52	4,15	15,5	6,2
Średnia andezyt Average andesite		0,424	0,539	1,60	1,57	3,17	-0,15	3,31	2,60	11,5	6,6



Ryc. 5. Przykładowe powierzchnie zniszczenia piaskowców i andezytów otrzymane w wyniku badań rozciągania oraz ścinania po wymuszonej powierzchni

Fig. 5. Examples of post-failure surfaces of sandstone and andesite obtained by extension and shearing tests of the forced area

zują się mniejszymi wartościami parametrów S_a i S_q niż analogiczne powierzchnie piaskowców. W tym przypadku bardziej gładkie, bez większych wzniesień oraz zagłębień są powierzchnie andezytów.

Analiza maksymalnego wzniesienia oraz zagłębienia, czyli średni stosunek parametru S_p do parametru S_v , dla powierzchni piaskowców zarówno w przypadku rozciągania, jak i ścinania jest większy od 1. Dla powierzchni uzyskanych z rozciągania średni stosunek wynosi 1,09, a otrzymanych ze ścinania – 1,21. Otrzymane średnie wyniki świadczą więc o nieznacznie większym udziale wierzchołków w stosunku do zagłębień. Powierzchnie rozdzielcze andezytów otrzymane z rozciągania charakteryzują się większą liczbą zagłębień w stosunku do wierzchołków, o czym świadczy średni stosunek $S_p/S_v = 0,86$. W przypadku powierzchni ze ścinania stosunek ten jest bliski 1, co oznacza, że powstała powierzchnia jest symetryczna względem pomiarowej linii średniej (PN-EN ISO 4287:1999).

Analizując parametr S_s , czyli całkowitą wysokość powierzchni chropowatości, stwierdzono, że mechanizm powstania powierzchni rozdzielczych ma duży wpływ na otrzymane wyniki. W odniesieniu do parametru S_s , w andezytach średnia suma najwyższego wzniesienia i najgłębszego zagłębienia w przypadku powierzchni uzyskanych z rozciągania jest wyższa niż w piaskowcach. W przypadku powierzchni otrzymanych ze ścinania sytuacja jest odwrotna i suma ta jest większa dla piaskowców.

Ogólnie parametr S_{sk} (skośność profilu) przyjmuje dodatnie lub ujemne wartości. Większość próbek andezytów (oprócz WZ 17), niezależnie od metody otrzymania powierzchni rozdzielczych, charakteryzuje się ujemną wartością skośności, a uzyskane wyniki wskazują na koncentrację materiału w bliskim położeniu wierzchołków. Oznacza to, że otrzymane powierzchnie przypominają „płaskowiznę”, a większa część funkcji rozkładu amplitudy leży powyżej płaszczyzny średniej. Powierzchnie piaskow-

ców pochodzące z rozciągania wykazują zarówno dodatnie, jak i ujemne wyniki, a dla powierzchni ze ścinania wszystkie otrzymane wartości parametru S_{sk} są dodatnie.

Wartość parametru S_{ku} współczynnika nachylenia (kurtozy) podczas rozkładu normalnego wynosi ≈ 3 . Powierzchnie piaskowców zarówno otrzymane z rozciągania, jak i ze ścinania charakteryzują się rozkładem bardziej spłaszczonym ($S_{ku} < 3$). Wartość tego parametru dla powierzchni piaskowców uzyskanych z rozciągania jest w granicach 1,89–2,77 przy wartości średniej 2,44, zaś dla powierzchni otrzymanych ze ścinania znajduje się w przedziale 2,33–2,61 przy średniej 2,52. Otrzymane wartości wskazują na płaską krzywą rozkładu amplitudy, która charakteryzuje się dużą liczbą małych i bardziej zaokrąglonych wzniesień i zagłębień na profilu. Powierzchnie andezytów uzyskane podczas rozciągania mieszczą się w przedziale 1,95–3,38 przy średniej wartości 2,51. Wartość powyżej trzech uzyskano tylko dla jednej próbki (WDZ 18). Średnia wartość kurtozy jest mniejsza od trzech, sugerując rozkład bardziej spłaszczony. Wartości powierzchni otrzymanych ze ścinania mieszczą się w przedziale 2,76–3,82 przy średniej 3,31. Wartość poniżej trzech uzyskano również tylko dla jednej próbki (WDZ 17), pozostałe dwie próbki mają wartości większe od trzech i sugerują rozkład bardziej smukły, o większych, ostrzejszych wierzchołkach i głębszych, wciętych dolinach.

Analizując parametr S_z , stwierdzono, że i w tym przypadku sposób powstania powierzchni rozdzielczych próbek skalnych ma duże znaczenie. Powierzchnie uzyskane z rozciągania mają wyższe wartości parametru S_z dla andezytów, wskazując, że powierzchnie andezytów są bardziej chropowate niż piaskowców. Powierzchnie uzyskane ze ścinania posiadają większe wierzchołki dla piaskowców, sugerując, że powierzchnie piaskowców są bardziej chropowate niż andezytów. Większy wpływ na wielkość chropowatości ma wywołany mechanizm niszczący niż materiał budujący skałę.

Dalsza analiza chropowatości badanych skał na podstawie parametrów statystycznych wymaga przeprowadzenia badań na większej liczbie próbek, tak żeby uzyskana liczba pomiarów stanowiła próbę reprezentatywną do dalszych opracowań statystycznych.

Mapy 2D i 3D powierzchni rozdzielczych (ryc. 5) potwierdzają dotychczasowe wyniki oceny uzyskane na podstawie parametrów statystycznych. Analizując diagramy powierzchni rozdzielczych, stwierdzono, że andezyty charakteryzują się większą liczbą zagłębień i wierzchołków w strukturze geometrycznej powierzchni niż piaskowce. Większa liczba dużych zagłębień i wzniesień oraz nierównomierne ich rozłożenie sprawia, że andezyty są skałami o większej chropowatości.

Uzyskane wartości wytrzymałości rezydualnej na podstawie określonego dla piaskowców i andezytów współczynnika JRC są wyższe dla andezytów zarówno w pierwszym, jak i drugim analizowanym przypadku. Średnia wytrzymałość τ_{rez} andezytów z rozciągania metodą brazylijską wynosi 7,3 MPa, a piaskowców – średnio 6,3 MPa. W przypadku ścinania różnica w wytrzymałości jest znacznie mniejsza. W andezytach τ_{rez} wynosiła średnio 6,6 MPa, a w piaskowcach 6,2 MPa. Różnica w wytrzymałości skał w przypadku pierwszej metody wynosi 1,0 MPa, a w drugiej jest ponad dwukrotnie mniejsza. Tak niewielka różnica

sugeruje, że znaczący wpływ na wytrzymałość rezydualną skał wywiera mechanizm zniszczenia.

WNIOSKI

Wyniki przeprowadzonych badań pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Analizy parametrów statystycznych, morfologii powierzchni rozdzielczych oraz mapy tych powierzchni są dobrą metodą porównawczą dla wyjaśnienia udziału chropowatości w procesie rozciągania i ścinania w skałach o różnej strukturze;

2. Z porównania drobnoziarnistych piaskowców szydłowieckich z różnoziarnistymi andezytami wynika, że w tych pierwszych w procesie ścinania powstają gładkie powierzchnie, podczas gdy w andezytach powierzchnie te są chropowate. Przejawia się to ich większą wytrzymałością rezydualną;

3. W wyniku rozciągania, w obu typach struktur skalnych, powierzchnie rozdzielcze są bardziej chropowate niż po ścinaniu. Jednakże ich chropowatość w piaskowcach jest mniejsza niż w andezytach;

4. Porównując mechanizmy ścinania i rozciągania uwidocznione morfologią powierzchni rozdzielczej i mikroskopową strukturą materiału, można zauważyć, że tkwiące w tle skalnym andezytów kanciaste, niezaokrąglone kryształy plagioklazów, hornblendy, piroksenów oraz biotyty są wyrwane podczas ścinania i pozostają po nich duże zagłębienia. Podczas rozciągania skała pęka rozdzielczo, w wyniku czego powstają chropowate nieregularne powierzchnie z dużą liczbą wysokich wzniesień i zagłębień. Kształt i wielkość pojedynczych ziaren lub kryształów dobrze obrazują mapy odcieni szarości;

5. Powierzchnia chropowatości pozwala określić mechanizm niszczący. Badanie powierzchni rozdzielczych skał jest bardziej miarodajne niż analizowanie pojedynczych profili. Rozpatrując całą płaszczyznę, można ocenić równomierność chropowatości powierzchni lub przewagę wzniesień lub/i zagłębień w morfologii powierzchni, a to pozwala określić czy mechanizmem niszczącym było rozciąganie, czy ścinanie.

Autorzy serdecznie dziękują recenzentom – prof. dr hab. inż. Joannie Pinińskiej oraz dr hab. Mirosławie Bukowskiej – za poświęcony czas i cenne uwagi.

LITERATURA

- BABADAGLI T. & DEVELI K. 2003 – Fractal characteristic of rock fractured under tension. *Theor. Appl. Fract. Mec.*, 39: 73–88.
 BARTON N.R. 1973 – Review of a new shear strength criterion for rock joints. *Bull. Inter. Assoc. Eng. Geol.*, 7 (4): 287–332.
 BARTON N.R. 1976 – The shear strength of rock and rock joints. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. Geomech., Abstr.*, 13: 255–279.
 BARTON N.R. 2007 – Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy. Taylor & Francis, UK & Netherlands.
 BARTON N.R. & CHOUBEY V. 1977 – The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock. Mech. Eng. Geol.*, 10: 1–54.
 BIRKENMAJER K. 1959 – Przekroje geologiczne przez Polskę, Pieniński pas skałkowy. *Wyd. Geol., Warszawa.*
 BIRKENMAJER K. 1979 – Przewodnik geologiczny po pienińskim pasie skałkowym. *Wyd. Geol., Warszawa.*
 BODZIONY J. 1965 – On certain indices characterizing the geometric structure of rock. *Bull. PAN*, 9: 469–475.
 BODZIONY J. 2000 – O pewnej interpretacji wartości średnich uzyskanych w płaskiej i liniowej analizie stereologicznej. *Pr. Inst. Mech. Gór. PAN*, 2: 395–401.

DOMONIK A. 2005 – Geomechaniczna analiza powierzchni ciosowych w piaskowcach cergowickich z Komańczy. Rozpr. doktorska. Arch. UW, Warszawa.

DOMONIK A. (red.) 2012 – Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał. Część VI Centralne Karpaty Zachodnie. Zakład Geomechaniki IHiGI Wydział Geologii UW, Warszawa.

KŁOPOTOWSKA A. 2013 – Wpływ wybranych związków krzemorganicznych na właściwości geomechaniczne piaskowca szydłowieckiego. Rozpr. doktorska. Arch. UW, Warszawa.

KULKA A., RĄCZKOWSKI W., ŻYTKO K. & PAUL Z. 1991 – Objąśnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski, arkusz Szczawnica–Krościenko, Państw. Inst. Geol., Warszawa.

KWAŚNIEWSKI M. & WANG J. 1998 – Struktura geometryczna powierzchni i zachowanie się nieciągłości w skałach przy ścinaniu. XXI Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej, Kraków: 1–53.

LI C. 1998 – A theory for the Kaiser effect in rock and its potential application, Proc. 6th Conf. AE/MA in Geologic Structures and Materials. Trans. Tech. Publ. Clausthal-Zellerfeld: 171–185.

PINIŃSKA J. 1994 – Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał. Część I Skały osadowe regionu świętokrzyskiego. Zakład Geomechaniki IHiGI, Wydz. Geologii UW, Warszawa.

PINIŃSKA J. 1999 – Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał. Część III Jura krakowsko-częstochowska, Zakład Geomechaniki IHiGI, Wydz. Geologii UW, Warszawa.

PINIŃSKA J. 2000 – Od skały do gruntu – mechanizm pękania skał, Mat. Sesji nauk. z okazji jubil. 70-lecia prof. Z. Grabowskiego. Wyd. PW, Warszawa: 201–210.

PN-EN ISO 4287:1999 – Specyfikacja geometrii wyrobów. Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa. Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni, PKNiM, Warszawa.

PN-EN ISO 3274:2011 – Specyfikacja geometrii wyrobów (GPS) – Struktura geometryczna powierzchni: Metoda profilowa – Charakterystyki normalne przyrządów stykowych (z ostrzem odwzorowującym), PKNiM, Warszawa.

WARMUZEK M. 1986 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski, arkusz Szydłowiec. Państw. Inst. Geol., Warszawa.