

Stanisław FRELKIEWICZ, Piotr KIJEWSKI, Jan LIS

Geomechaniczne własności łupków łyszczykowych Pasma Kamienieckiego z rejonu Krobicy

Określono fizyczne i mechaniczne parametry łupków łyszczykowych Pasma Kamienieckiego w Górach Izerskich. Obszar ten ze względu na perspektywy złożowej mineralizacji kasyteritem jest obecnie obiektem intensywnych prac geologicznych. Oprócz podstawowych własności geomechanicznych podano sposób deformacji łupków oraz określono anizotropię wytrzymałościową, wpływ nawodnienia i wszechstronnego ciśnienia na wytrzymałość badanych skał.

WSTĘP

W trakcie prac związanych z poszukiwaniem złóż cyny, prowadzonych w Górach Izerskich przez Oddział Dolnośląski Instytutu Geologicznego, zaistniała potrzeba wykonania badań własności fizycznych i mechanicznych łupków łyszczykowych Pasma Kamienieckiego. Znajomość tych parametrów jest niezbędna do oceny warunków geologiczno-inżynierskich występowania złóż kopalin, określenia stateczności wyrobisk powierzchniowych i podziemnych, jak również przy rozwiązywaniu innych zagadnień inżynierskich.

Odnosnie do geomechanicznych parametrów skał metamorficznych w polskiej literaturze geologicznej i geotechnicznej brak jest bardziej konkretnych danych. Wykonane badania stanowią więc pierwszą próbę ujęcia tego zagadnienia zgodnie z aktualnymi wymaganiami w zakresie metod badawczych.

Autorzy składają serdeczne podziękowania dr Marii Szałamachowej za udostępnienie materiału z wierceń z okolicy Krobicy, jak również Kolegom z Zakładu Mechaniki Górotworu i Zakładu Geologii Stosowanej za współpracę w trakcie realizacji programu badań.

CHARAKTERYSTYKA PROFILU GEOLOGICZNEGO

Przedmiotem badań geomechanicznych były łupki łyszczykowe z rdzenia otworu wiertniczego K-II/3, zlokalizowanego w bezpośrednim sąsiedztwie czyn-

nego kamieniołomu w Krobicy. Obszar ten leży w zachodniej części Pasma Kamienieckiego, w odległości ok. 3 km na północ od Świeradowa Zdroju. Prekambryjskie łupki łuszczkowe ciągną się szerokim pasmem od Nowego Męsta na zachodzie do Wojcieszyc na wschodzie. Na obu krańcach graniczą one dyskordantnie z granitem karkonoskim, a od północy i południa kontaktują z gnejsami izerskimi (J. Szałamacha, M. Szałamacha, 1968).

W okolicy Krobicy łupki łuszczkowe zapadają na północ pod kątem 50–70°. Wyróżnia się wśród nich szereg odmian litologicznych, które zazębiają się ze sobą i dają wzajemne stopniowe przejścia (M. Szałamacha, J. Szałamacha, 1974). Możliwość występowania mineralizacji kruszcowej powoduje duże zainteresowanie tym obszarem przemysłu metali nieżelaznych oraz intensyfikację badań geologicznych.

W wierceniu K-II/3 stwierdzono szereg odmian łupków łuszczkowych. Zmienność litologiczna wynika głównie z dużego zróżnicowania w stosunkach ilościowych podstawowych składników mineralnych: muskowitu, chlorytu, kwarcu i biotytu oraz innych minerałów, takich jak skalenie, granaty, dysten, piryty itp. Zróżnicowanie budowy litologicznej spowodowało konieczność dużej generalizacji profilu pod kątem potrzeb badań geomechanicznych. W takim ujęciu przedstawia się on następująco:

Głębokość w m	Opis litologiczny
0,0– 7,0	Gruz skalny składający się z okruchów łupków łuszczkowych, przykryty warstwą gleby.
7,0– 36,8	Łupki łuszczkowe intensywnie zafałdowane o nachyleniu foliacji 30–60°, zwłaszcza w górnej części do głęb. 16 m mocno zwietrzałe; stopień zwietrzenia maleje w kierunku spągu; lokalnie drobne wkładki łupków chlorytowych.
36,8– 49,0	Łupki łuszczkowe z przewagą odmian wzbogaconych w chloryt, z obecnością naprzemianległych lamin skaleniowo-kwarcowych; często na powierzchniach złupkowania i spękań występują siarczki żelaza głównie piryty, podrzędnie chalkopiryty.
49,0– 77,5	Łupki łuszczkowo-skaleniowo-kwarcowe o drobnolaminowanej teksturze z obecnością dysharmonijnych fałdków; skała odznacza się dużą zwięzłością i odpornością na działanie mechaniczne; liczne przerosty i płaskie soczewki kwarcu.
77,5–135,8	Łupki łuszczkowe o bardzo zróżnicowanym składzie mineralnym wynikającym ze zmiennej ilości chlorytu, łuszczków, kwarcu i skaleni oraz podrzędnej zawartości granatów i piryty; oprócz przeważających odmian łuszczkowo-chlorytowych występują także łupki skaleniowo-kwarcowe, silnie zafałdowane i sprasowane; powierzchnia foliacji o nachyleniu ok. 60°.
135,8– 148,0	Łupki łuszczkowo-kwarcowo-skaleniowe, drobnolaminowane o dużej zwięzłości, lokalnie silnie sfałdowane (fałdki typu fleksuralnego). W tle skały występują rozproszone siarczki żelaza.
148,0–198,4	Łupki łuszczkowo-chlorytowe z obecnością kwarcu i skaleni silnie zróżnicowane w profilu pionowym pod względem składu mineralnego; częste soczewki kwarcu oraz porfiroblastyczny biotyt i granaty; lokalnie laminy wzbogacone w siarczki żelaza; łupek jest silnie sfałdowany – głównie fałdki typu fleksuralnego.

OPRÓBOWANIE I ZAKRES BADAŃ

Opróbowany został odcinek rdzenia długości 179,7 m z interwału 18,7–198,4 m. Z każdego metra pobrano dwie próbki punktowe minimalnej długości 10 cm. Lokalnie, w zależności od stanu materiału skalnego, opróbowanie rozrzedzano

lub zagęszczano. Odcinki silnie rozkruszone lub spękań były jednak stosunkowo krótkie.

Średnica rdzenia wiertniczego wynosiła 56–118 mm, stąd też badania przeprowadzono specjalną obróbką materiału skalnego. Za pomocą wiertarki firmy *Diamant Boart* nadano próbkom kształt walców i krążków średnicy 42–45 mm, których powierzchnie czołowe i boczne szlifowano następnie do zachowania równoległości podstaw z dokładnością do 0,5 mm, zgodnie z wytycznymi Międzynarodowego Biura Mechaniki Górotworu (IBG) stosowanymi w Laboratorium Mechaniki Skał ZBiPM „Cuprum” (A. Kidybiński, 1966; J. Lis, P. Kijewski, 1977; H. Pfoor, 1973).

Łupki metamorficzne z Krobicy odznaczają się bardzo zróżnicowanym przebiegiem foliacji, co w znacznym stopniu utrudnia przygotowanie znormalizowanych próbek. W większości przypadków orientowano je tak, aby oś pionowa była prostopadła do powierzchni foliacji. Część próbek została zorientowana pod kątem 45–60°, a także równoległe do foliacji. Zabieg ten miał na celu określenie anizotropii wytrzymałościowej łupków, jednakże z uwagi na niewielką liczbę przebadanych próbek uzyskane wyniki nie są ścisłe i mają charakter informacyjny.

Zakres badań obejmował oznaczenie: gęstości objętościowej ((ρ_0) i właściwej (ρ_w), nasiąkliwości wagowej (N_w), porowatości (P), wytrzymałości na ściskanie w stanie powietrzno-suchym (R_c) i w stanie nasycenia wodą (R_{cw}), wytrzymałości na rozciąganie (R_t), ścinanie (R_s) i zginanie (R_g) oraz modułu sprężystości podłużnej Younga (E) i współczynnika rozszerzalności poprzecznej Poissona (ν). Wstępnie określono także energetyczny wskaźnik skłonności skał do tępiań (W_{et}).

METODYKA BADAŃ

Parametry fizyczne w większości przypadków wyznaczono zgodnie z istniejącymi normami: gęstość właściwą i objętościową według normy PN-66/B-04100, a nasiąkliwość wagową według normy PN-67/B-04101. Porowatość określono metodą odmienną od powszechnie stosowanej, wykorzystując porozymetr rțciowy firmy *Carlo Erba 1540*. Podstawą do obliczeń są tu wykresy penetracji rțci w pory skały w zależności od zadanego ciśnienia, w wyniku czego uzyskuje się objętość porów w jednostce masy, którą można przeliczyć na procentowy wskaźnik porowatości. Ponadto przy stosowaniu porozymetru rțciowego można określić promienie porów oraz stosunki ilościowe między poszczególnymi przedziałami ich wartości.

Wytrzymałość na ściskanie określono na próbkach o średnicy równej wysokości w aparacie typu *Amsler 200-D79* przy zachowaniu stałej prędkości obciążenia (ok. 0,5 MPa/s). Analogiczną metodę stosowano w badaniach wpływu nawilżenia na wytrzymałość skał. W tym przypadku nasycenie mieszaniną wody i alfenolu prowadzono w aparacie próżniowym. Roztwór ten ma zwiększoną efektywność nasycenia próbek skalnych drogą wzrostu ilości wilgoci związanej absorbcyjnie i kapilarnie.

Wytrzymałość na rozciąganie wyznaczono tzw. metodą brazylijską, polegającą na ściskaniu próbek walcowych wzdłuż tworzących. Stosowano próbki o średnicy równej wysokości, które poddano obciążeniu w aparacie typu *ZD-40*.

Przy określeniu wytrzymałości na ścinanie i zginanie posługiwano się próbkami w kształcie krążków o średnicy 42–45 mm i wysokości 10 mm. Badania wykonano w aparacie do badań wytrzymałościowych typu *ZD-40*. Pomiar pierwszego parametru polegał na umieszczeniu próbki w specjalnym urządzeniu i ścinaniu jej za

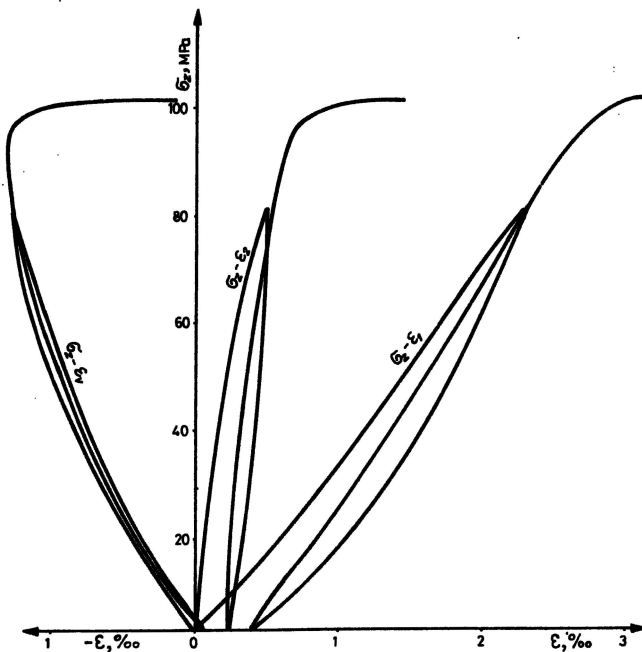


Fig. 1. Charakterystyka mechaniczna łupków łyszczykowych w trakcie ściskania w jednoosiowym stanie naprężeń (próbka z głębokości 55,7 m; $R_c = 105$ MPa)

Mechanical characteristics of micaceous schists during compression in uniaxial stress state (sample from 55.7 m depth; $R_c = 105$ MPa)

pomocą stalowego stempla o średnicy 20 mm. Pomiar wytrzymałości na zginanie odbywał się w urządzeniu, w którym próbkę umieszczano na dolnym pierścieniu oporowym i obciążano za pośrednictwem ustawionego współśrodkowo górnego pierścienia tłocznego.

Badania parametrów sprężystości przeprowadzono na próbkach walcowych o wysokości dwukrotnie większej od średnicy ($h = 2d$), co zapewniało jednorodny rozkład odkształceń w jej środkowej części. Stosowano aparat *Amsler 200-D79*, z ciągłym zapisem odkształceń podłużnych (ϵ_1) i poprzecznych (ϵ_2) metodą tensometrii oporowej. Każda próbka miała po dwa tensometry w kierunku podłużnym i poprzecznym, które zostały połączone w układ pełnego mostka z analogicznymi tensometrami na próbce kompensacyjnej.

Moduł sprężystości podłużnej Younga określono na podstawie wykresu $\sigma_z - \epsilon_1$ jako tangens nachylenia jego liniowej części. Moduł rozszerzalności poprzecznej Poissona wyznaczono analogicznie z wykresów $\sigma_z - \epsilon_2$ i ϵ_1 (fig. 1).

W niewielkim zakresie przeprowadzono pomiary wytrzymałości skał w warunkach wszechstronnego ciśnienia. Badania te wykonano w komorze o konstrukcji opartej na zasadzie Karmana (J.C. Jaeger, N.G. Cook, 1971). Umieszczono tam próbki walcowe o średnicy równej wysokości. Oprócz obciążenia osiowego podane one były ciśnieniu bocznemu w zakresie 0–60 MPa.

Wykonano także wstępne badania skłonności skał do tąpnięć metodą Z. Szczótki (1972), która polega na pomiarze bilansu energii w próbce w trakcie ściskania cyklicznego.

WYNIKI BADAŃ

Łupki łyszczykowe z Krobicy odznaczają się znacznie zróżnicowanymi parametrami wytrzymałościowymi oraz zmiennymi charakterystykami mechanicznymi. Wynika to z niejednorodności składu mineralnego i tekstury poszczególnych warstw skalnych. W przypadku własności fizycznych, a szczególnie gęstości właściwej i objętościowej, rozbieżność wyników jest stosunkowo niewielka, a współczynnik wariacji (k) nie przekracza 2%. Największe wahania wykazuje wytrzymałość na ściskanie w stanie nasycenia wodą. Wpływają na to: porowatość, nasiąkliwość, skład mineralny i stopień szczelinowatości. Czynniki te w warunkach nasycenia wodą, zwłaszcza w przypadku znacznej niejednorodności teksturalnej, nakładają się potęgując swój wpływ, co prowadzi do wyjątkowo wysokiej rozbieżności wyników.

Z punktu widzenia parametrów fizycznych i mechanicznych w obrębie łupków łyszczykowych z Krobicy odcina się od pozostałych warstw górna ich część, sięgająca do głęb. 36,8 m. Są to łupki łyszczykowo-dolomitowe, lokalnie z obecnością kwarcu i skaleni, wykazujące obecność przeobrażeń typu wietrzeniowego, niską zwięzłość oraz intensywną podzielność. W części tej zaobserwowano także większą porowatość i nasiąkliwość oraz mniejszą gęstość właściwą i objętościową (tab. 1) w stosunku do pozostałych ogniw litologicznych (tab. 2, 3). Szczególnie niska jest wytrzymałość na ścinanie, w mniejszym stopniu wytrzymałość na rozciąganie, zginanie i ściskanie. Wytrzymałość na ściskanie zwietrzałej części łupków łyszczykowych stanowi 25–50% wytrzymałości na ściskanie pozostałych wydzieli litologicznych.

Drugi, odmienny typ skał stanowią łupki łyszczykowe drobnolaminowane, kwarcowo-skaleniowe z soczewkami i przerostami kwarcu. Występują w dwóch poziomach: 49,0–77,5 m oraz 135,8–148,0 m. Wykazują one strukturę drobnokrystaliczną, zbitą, lokalnie zbliżoną do granulitowej, wysoką zwięzłość i znaczny stopień zafałdowania. Są to skały o jasnej barwie, z naprzemianległymi warstewkami ciemnymi wzbogaconymi w łyszczyki i chloryt. Odznaczają się zdecydowanie wyższymi parametrami mechanicznymi (tab. 2). Dotyczy to szczególnie wytrzymałości na ściskanie w stanie powietrzno-suchym i w stanie nasycenia wodą, w mniejszym stopniu wytrzymałości na ściskanie, zginanie i rozciąganie oraz wartości modułu Younga.

Pozostałą część skał z badanego profilu stanowi typ pośredni pod względem wytrzymałościowym (tab. 3), który reprezentuje odmiany łupków łyszczykowych, chlorytowo-łyszczykowych z lokalną zawartością kwarcu i skaleni.

Oprócz oznaczenia podstawowych parametrów fizycznych i mechanicznych przeprowadzono – chociaż w ograniczonym zakresie – badania dodatkowe. Między innymi określono rozmiary porów, jak również stosunki ilościowe między nimi (fig. 2, tab. 4). Stwierdzono, że promień porów w poszczególnych próbkach łupków łyszczykowych wynosi 0,0051–7,5 μm , przy czym przeważają pory drobne. Potwierdza to przykład próbki z głęb. 38,3 m, w której pory o promieniu 0,0685–1 μm stanowią 70%. Znaczny jest także udział (ok. 10% porowatości ogólnej) bardzo drobnych porów o promieniu poniżej 0,0685 μm . Rozkład ten wskazuje, że porowatość łupków krystalicznych związana jest w głównej mierze z obecnością drobnych wolnych przestrzeni typu intergranularnego, a w mniejszym stopniu z obecnością większych porów lub szczelin. Fakt ten potwierdzają obserwacje mikroskopowe, obrazujące gęste upakowanie ziarn oraz teksturę zbitą, równoległą lub fluidalną.

W łupkach łyszczykowych wyraźnie zaznacza się obniżający wpływ nawodnienia na parametry wytrzymałościowe. Mimo niewielkiej nasiąkliwości, wytrzyma-

Tabela 1

Analiza statystyczna wyników badań fizycznych i mechanicznych własności łupków lyszczkowych z Krobicy z głębokości 18,7–36,0 m

Parametr	Liczebność zbioru (n)	Wartość minimalna (x_{\min})	Wartość maksymalna (x_{\max})	Średnia arytmetyczna (\bar{x})	Odchylenie standardowe (S_x)	Średni błąd standardowy ($S_{\bar{x}}$)	Współczynnik wariacji (k)	Wartość obliczeniowa (x_0)
Gęstość objętościowa (ρ_0) w kgdm^{-3}	5	2,53	2,67	2,60	0,06	0,03	0,02	2,54
Gęstość właściwa (ρ_w) w kgdm^{-3}	5	2,62	2,86	2,71	0,09	0,04	0,03	2,62
Porowatość całkowita (P_c) w %	5	2,76	5,56	4,30	1,13	0,51	0,26	3,18
Nasiąkliwość wagowa (N_w) w %	5	1,58	2,40	1,89	0,45	0,26	0,24	1,43
Wytrzymałość na ściskanie \perp do powierzchni foliacji (R_c) w MPa	6	19,0	42,7	26,72	5,60	2,29	0,21	18,97
Wytrzymałość na rozciąganie (R_r) w MPa	5	6,2	9,5	7,45	1,32	0,66	0,18	6,10
Wytrzymałość na ścinanie (R_s) w MPa	8	14,0	28,4	18,90	5,32	1,88	0,28	13,60
Wytrzymałość na zginanie (R_g) w MPa	5	7,2	12,0	10,34	2,31	1,03	0,22	8,06

Tabela 2

Analiza statystyczna wyników badań fizycznych i mechanicznych własności łupków łyszczykowych z Krobicy z głębokości 49,0–77,5 oraz 135,8–148,0 m

Parametr	Liczebność zbioru (n)	Wartość minimalna (x_{\min})	Wartość maksymalna (x_{\max})	Średnia arytmetyczna (\bar{x})	Odchylenie standardowe (S_x)	Średni błąd standardowy (S_p)	Współczynnik wariacji (k)	Wartość obliczeniowa (x_0)
Gęstość objętościowa (ρ_0) w kgdm^{-3}	24	2,53	2,80	2,71	0,05	0,01	0,02	2,66
Gęstość właściwa (ρ_w) w kgdm^{-3}	12	2,67	2,75	2,73	0,02	0,01	0,01	2,70
Porowatość całkowita (P_c) w %	12	0,26	1,02	0,58	0,27	0,08	0,46	0,31
Nasiąkliwość wagowa (N_w) w %	18	0,10	0,30	0,16	0,05	0,02	0,31	0,11
Wytrzymałość na ściskanie \perp do powierzchni foliacji (R_c) w MPa	26	34,6	153,4	105,59	26,65	5,23	0,25	79,19
Wytrzymałość na ściskanie \perp do powierzchni foliacji w stanie nasycenia wodą ($R_{c,w}$) w MPa	6	32,0	102,9	61,12	28,51	11,64	0,47	32,39
Wytrzymałość na rozciąganie (R_t) w MPa	7	10,1	19,2	15,91	4,21	1,59	0,26	11,77
Wytrzymałość na ścinanie (R_s) w MPa	20	22,4	32,9	27,93	3,15	0,70	0,11	24,84
Wytrzymałość na zginanie (R_z) w MPa	18	16,7	30,9	24,92	5,24	1,23	0,21	19,69
Moduł sprężystości podłużnej Younga (E) w GPa	13	21,1	52,9	35,39	10,42	2,89	0,29	25,13
Współczynnik rozszerzalności poprzecznej Poissona (ν)	13	0,10	0,22	0,14	0,03	0,01	0,20	0,11

łość tych skał po nasyceniu wodą maleje od 25 do 50%. Ponadto próbki nawilgoczone odznaczają się zdecydowanie większą odkształcalnością w stosunku do analogicznych próbek w stanie powietrzno-suchym.

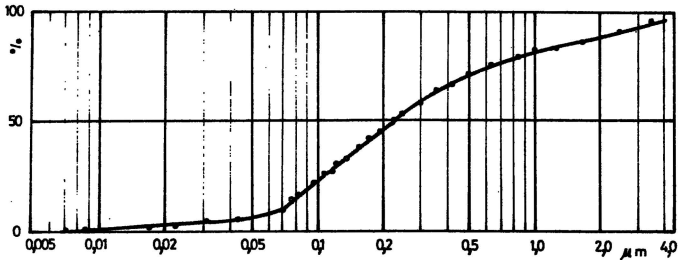


Fig. 2. Przykładowy rozkład porów w łupku łyszczykowym (próbka z głębokości 38,3 m)

An example of distribution of voids in micaceous schist (sample from 38.5 m depth)

Interesujące wyniki uzyskano na temat eksplozywnych własności łupków z Krobicy. Stwierdzono mianowicie duży rozrzut wartości energetycznego wskaźnika skłonności do tąpnięć (W_{et}), który mieści się w przedziale 1,25–5,40 (tab. 5). Jednakże większość badanych próbek łupków łyszczykowych w świetle klasyfikacji czterostopniowej (Z. Szecówka i in., 1977) należy zaliczyć do skał nieskłonnych lub słabo skłonnych do tąpnięć. Pojedyncze, wysokie wartości wskaźnika W_{et} odnoszą się do zwięzłych, drobno laminowanych łupków łyszczykowo-kwarcowo-skalenio-wych lub soczewek i przerostów kwarcowych. Charakter pętli histerezy oraz wartości wskaźnika W_{et} wskazują, że łupki nie mają własności eksplozywnych w warunkach powolnego obciążenia statycznego.

W trakcie badań określono wpływ wszechstronnego ciśnienia na wytrzymałość łupków łyszczykowych oraz podano charakterystykę wytrzymałościową ($\tau_n - \sigma_n$) w zakresie do 60 MPa ciśnienia bocznego. Stwierdzono bardzo szybki wzrost wytrzymałości w początkowym zakresie ciśnień $p/R_c < 0,5$ oraz mniejszy przyrost wytrzymałości w miarę zwiększenia ciśnienia bocznego (fig. 3). Ponadto badania pozwoliły na przedstawienie charakterystyki mechanicznej w warunkach wszechstronnego ciśnienia (fig. 4). Umożliwiła to prognozowanie stanu wyęteżenia górotworu w otoczeniu wyrobisk przy określonych wartościach naprężeń (σ_1 , σ_2 i σ_3) zgodnie z teorią zniszczenia Mohra.

Kierunkowość tekstury łupków łyszczykowych powoduje wyraźną anizotropię wytrzymałościową. Najdobitniej zaznacza się ona wówczas, kiedy kierunek obciążenia tworzy z płaszczyzną foliacji kąt w granicach 30–45°. W tym przypadku średnia wytrzymałość na ściskanie jest prawie dwukrotnie niższa niż przy prostopadłym działaniu obciążenia w stosunku do foliacji. Ponadto maksymalna wytrzymałość na ściskanie łupków łyszczykowych jest prawie pięciokrotnie wyższa od wytrzymałości minimalnej zarejestrowanej przy foliacji zorientowanej pod kątem 45° w stosunku do przyłożonego obciążenia.

Klasyczny sposób oceny anizotropii wytrzymałościowej na podstawie badań w kierunku prostopadłym i równoległym do uławicenia lub foliacji w przypadku skał o teksturze łupkowej może prowadzić do błędnej interpretacji zagadnienia. Wynika to z faktu, że w obu tych kierunkach wytrzymałość skał na ścinanie może być bardzo podobna. Zjawisko takie stwierdzono podczas badań łupków łyszczykowych z Krobicy, dla których różnica średniej wytrzymałości określonej prosto-

Analiza statystyczna wyników badań fizycznych i mechanicznych własności łupków łyszczykowych z Krobicy z głębokości 36,0–49,0 m, 77,5–135,8 m oraz 148,0–198,4 m

Parametr	Liczebność zbioru (n)	Wartość minimalna (x_{\min})	Wartość maksymalna (x_{\max})	Średnia arytmetyczna (\bar{x})	Odczylenie standardowe (S_x)	Średni błąd standardowy ($S_{\bar{x}}$)	Współczynnik wariacji (k)	Wartość obliczeniowa (x_0)
Gęstość objętościowa (ρ_0) w kgdm^{-3}	46	2,48	2,91	2,73	0,06	0,01	0,02	2,68
Gęstość właściwa (ρ_w) w kgdm^{-3}	22	2,67	2,81	2,76	0,03	0,01	0,01	2,73
Porowatość całkowita (P_c) w %	22	0,24	1,32	0,50	0,19	0,04	0,38	0,31
Nasiąkliwość wagowa (N_w) w %	24	0,09	0,38	0,19	0,06	0,02	0,32	0,13
Wytrzymałość na ściskanie \perp do powierzchni foliacji (R_c) w MPa	32	20,1	113,5	59,93	17,59	3,11	0,29	42,55
Wytrzymałość na ściskanie \perp do powierzchni foliacji w stanie nasycenia wodą ($R_{c,w}$) w MPa	8	25,5	75,7	38,80	17,84	6,31	0,46	20,95
Wytrzymałość na ściskanie \parallel do powierzchni foliacji ($R_{c,\parallel}$) w MPa	7	37,1	80,7	54,00	15,59	5,89	0,29	38,34
Wytrzymałość na ściskanie pod kątem 45° do powierzchni foliacji ($R_{c,45}$) w MPa	11	24,2	67,9	33,21	10,20	3,07	0,31	22,91
Wytrzymałość na rozciąganie (R_t) w MPa	21	7,7	22,0	13,86	4,28	0,93	0,31	9,56
Wytrzymałość na ścinanie (R_s) w MPa	40	2,17	36,8	27,03	3,63	0,57	0,13	23,52
Wytrzymałość na zginanie (R_z) w MPa	35	9,3	30,4	21,59	5,23	0,88	0,24	16,41
Moduł sprężystości podłużnej Younga (E) w GPa	20	19,5	53,6	28,57	8,60	1,92	0,30	20,00
Współczynnik rozszerzalności poprzecznej Poissona (ν)	20	0,10	0,25	0,17	0,03	0,01	0,19	0,14

Tabela 4

Rozkład wielkości porów w łupkach łyszczykowych
z głębokości 38,3 m*

Ciśnienie w MPa	Promień porów w μm	Udział porów w %
0,00	2,5	100,0
0,30	2,500	92,1
0,45	1,667	87,1
0,75	1,000	82,1
1,20	0,625	76,0
1,50	0,500	71,1
2,10	0,357	63,1
2,55	0,297	57,5
3,30	0,227	50,2
4,35	0,172	42,8
4,80	0,156	37,9
5,55	0,135	33,0
6,15	0,122	30,6
6,45	0,116	27,0
7,05	0,106	25,8
8,40	0,089	19,8
9,90	0,076	13,8
18,00	0,042	6,4
24,00	0,031	4,8
43,50	0,017	1,8
84,00	0,009	0,8
103,50	0,007	0,3
124,50	0,006	0,0

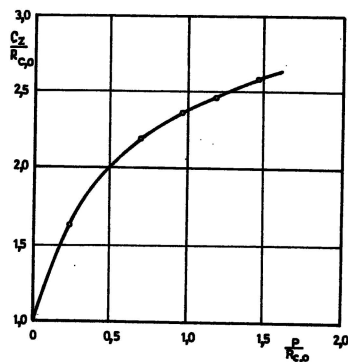
* Badania wykonał mgr inż. R. Gruber

padle i równoległe do foliacji nie przekraczała 10% (tab. 3), czyli wyraźnie odbiegała od tych wartości, jakie wyznaczono przy diagonalnym ustawieniu foliacji w stosunku do obciążenia. Znalazło to potwierdzenie w wynikach badań E. Hoeka (1966), który uznał, że najniższa wytrzymałość skał typu łupków jest wówczas, gdy płaszczyzny osłabionej spójności (uławiczenia, foliacji) są zorientowane pod kątem 30° do kierunku przyłożonego obciążenia. Zdaniem tego badacza najwyższa wytrzymałość może być czterokrotnie większa od najniższej wytrzymałości w zależności od zorientowania płaszczyzn osłabionej spójności.

W trakcie badań wytrzymałościowych zwrócono uwagę na proces deformacji próbek w zależności od cech teksturalnych i składu mineralnego. Wpływ ten ujawnia się w zasadzie przy każdym rodzaju badań wytrzymałościowych. Podczas ściskania przy obciążeniu działającym zgodnie z kierunkiem foliacji, niszczenie próbek następuje zgodnie z ich orientacją (tabl. I, fig. 5), a spekania powstają na powierzchniach lamin łupków wzbogaconych w łyszczyki. W takim przypadku dużą rolę odgrywają prawdopodobnie naprężenia rozciągające, powodujące powstawanie pęknięć zgodnie z kierunkiem maksymalnego obciążenia ściskającego.

Fig. 3. Wpływ wszechstronnego ciśnienia na wytrzymałość łupków łyszczykowych

The influence of the all-sided pressure on strength of micaceous schists

 $R_{z,0}$ – wytrzymałość przy ciśnieniu $p = 0$; C_z – wytrzymałość różnicowa ($C_z = R_c - p$) $R_{z,p}$ – strength at pressure $p = 0$; C_z – differential strength ($C_z = R_c - p$)

Jeżeli foliacja jest prostopadła do kierunku obciążenia, powstaje bardzo złożony system pęknięć ścinających oraz dodatkowych szczelin naśladowujących przebieg foliacji (tabl. I, fig. 6).

Odmienny jest sposób niszczenia łupków w przypadku obecności w nich gniazd lub soczewek kwarcu. Różne własności mechaniczne poszczególnych składników skały powodują w pierwszej kolejności niszczenie najsłabszych miejsc, czyli kontaktów łupek – kwarc. Utworzone spękania dostosowują się do orientacji przestrzennej soczewek kwarcu (tabl. I, fig. 7) i mają znacznie zróżnicowany przebieg, często prostopadły do kierunku obciążenia. W takim przypadku ogólna wytrzymałość próbek jest minimalna.

Pod wpływem wszechstronnego ciśnienia tworzą się spękania ścinające (tabl. I, fig. 8), podobnie jak pod wpływem ciśnienia jednoosiowego przy diagonalnym ustawieniu foliacji w stosunku do przyłożonego obciążenia. W łupkach skaleniowo-kwarcowych o zwartej budowie, zawierających podrzędną ilość łyszczyków, tworzą się otwarte, pojedyncze szczeliny o prostoliniowym przebiegu, natomiast w łupkach łyszczykowych powstaje wąska strefa zniszczenia o szerokości 1–5 mm.

Tabela 5

Zestawienie wybranych wyników badań skłonności do tapan łupków łyszczykowych z Krobcy

Głębokość pobrania próbki w m	Rodzaj skały	Energetyczny wskaźnik skłonności do tapan (W_{et})
51,7	łupek łyszczykowo-skaleniowy drobno laminowany	2,24
54,0	łupek jak wyżej	2,05
54,3	łupek skaleniowo-kwarcowy masywny	4,83
71,6	łupek łyszczykowo-skaleniowo-kwarcowy	1,57
83,0	łupek łyszczykowy	1,62
115,8	łupek łyszczykowo-chlorytowy	1,25
143,0	kwarc żyłowy	5,41
157,8	łupek łyszczykowo-chlorytowy	1,00
180,0	łupek łyszczykowy	1,61

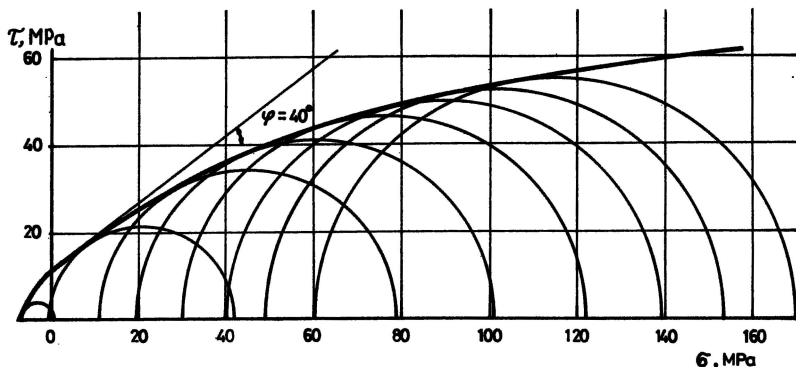


Fig. 4. Charakterystyka wytrzymałościowa (τ - σ) łupków łyszczykowych w warunkach wszechstronnego ciśnienia

Strength characteristics (τ - σ) of micaceous schists under all-sided pressure conditions

W strefie tej obserwuje się proces kruszenia i prasowania łupków, niekiedy także tworzenia się drobnych, wtórnych fałdeków typu fleksuralnego w płaszczyźnie pęknięcia ścinającego.

Charakterystyczne są także deformacje łupków łyszczykowych w trakcie badań wytrzymałości na rozciąganie tzw. metodą brazylijską. Skały o jednorodnej, masywnej budowie ulegają zniszczeniu wzdłuż tworzącej zgodnie z kierunkiem obciążenia, natomiast w skałach o teksturze łupkowej powstają wzdłużne, ale nieregularne i postrzępione pęknięcia oraz liczne pochodne spękania poprzeczne, zainicjowane przebiegiem foliacji (tabl. II, fig. 9).

Podczas badań wytrzymałości na zginanie zaobserwowano dwa odmienne rodzaje niszczenia materiału skalnego. Przy foliacji zorientowanej prostopadle do działania siły oraz masywnej budowie skał powstają pęknięcia rozchodzące się promieniście od środka próbki (tabl. II, fig. 10), natomiast gdy powierzchnia foliacji jest zgodna z kierunkiem obciążenia, powstaje system spękań zgodnych z foliacją oraz nieregularne i silnie postrzępione spękania poprzeczne (tabl. II, fig. 11).

Na podstawie własności mechanicznych, określonych w warunkach jednoosiowego i wszechstronnego ciśnienia, należy wnioskować, że łupki łyszczykowe z Krobicy zachowują się jak materiał sprężysto-plastyczny. Strome, prostolinijne części wykresów σ - ϵ , charakteryzujące etap odkształceń sprężystych, wskazują na stosunkowo wysoką sztywność badanych skał. Wykresy te mają również wyraźnie zaznaczony efekt odkształceń plastycznych w postaci długiego, wypukłego odcinka krzywej. Efekt tego typu odkształceń wiązać należy z występowaniem poślizgów na powierzchniach łupliwości minerałów łyszczykowych, jak również z niszczeniem wiązań między ziarnami bardziej sztywnego materiału (np. kwarcu). Badania wytrzymałościowe ujawniły ponadto fakt znacznej dyssypacji energii, zachodzącej w fazie odciążenia naprężonej próbki, co znajduje swój wyraz w dużym obszarze pętli histerezy (fig. 1).

WNIOSKI

Wykonane badania geomechaniczne łupków łyszczykowych z Krobicy stanowią pierwszy etap i nie wyczerpują zagadnienia, tym bardziej że jak dotychczas

brak jest przykładów prac dla tego typu utworów skalnych. Szczególnie interesujące będą badania z zakresu anizotropii wytrzymałościowej oraz wpływu wszechstronnego ciśnienia. Dotychczasowe wyniki badań wytrzymałościowych i modułów sprężystości, analiz pętli histerezy oraz zachowania się próbek w procesie deformacji wykazują, że łupki krystaliczne mają zdolność do gromadzenia znacznej ilości energii oraz tendencje do jej rozpraszania. Według klasyfikacji D.F. Coatesa i R.C. Parsonsa (1966) są to skały o średniej wytrzymałości, sprężysto-plastycznym zachowaniu w trakcie obciążenia oraz ciągliwym charakterze przelomu.

Zakłady Badawcze i Projektowe Miedzi „Cuprum”

Wrocław, pl. 1-go Maja 1/2

Nadesłano dnia 31 października 1978 r.

PIŚMIENNICTWO

- COATES D.F., PARSONS R.C. (1966) – Experimental Criteria for Classification of Rock Substances. *Int. J. Rock. Mech. Sci.*, 3.
- HOEK E. (1966) – Rock Mechanics – An Introduction for the Practical Engineer. Part I – Theoretical Considerations. *Min. Mag.*, 114, nr 4.
- JAEGER J.C., COOK N.G. (1971) – Fundamentals of Rock Mechanics. Chapman and Hall LTD and Science Paperbacks.
- KIDYBIŃSKI A. (1966) – Prace Międzynarodowego Biura Mechaniki Górniczej (IBG) w zakresie ustalania metodyki badań wytrzymałościowych skał. *Prz. Gór.*, p. 149–154, nr 4. Katowice.
- LIS J., KIJEWski P. (1977) – Metody badań i oceny prognostycznej warunków geologiczno-inżynierskich stosowanych dla złoża miedzi monokliny przedsudeckiej. *Arch. ZBiPM „Cuprum”*. Wrocław.
- PFOOR H. (1973) – Richtlinien zur Ermittlung von geomechanischen Kennzifferen der Gesteine und des Gebirgsmassivus. Mitteilung, Erläuterung und Einschätzung der Richtlinien als Beitrag zur Rationalisierung geomechanischer Untersuchungen, *Freib. Forsch.*, A. 502.
- SZAŁAMACHA J., SZAŁAMACHA M. (1968) – Problem genezy granodiorytów zawidowskich oraz gnejsów granodiorytowych z okolic Grabiszyc i Leśnej. *Kwart. Geol.*, 12, p. 234–250, nr 2. Warszawa.
- SZAŁAMACHA M., SZAŁAMACHA J. (1974) – Geologiczna i petrograficzna charakterystyka łupków zmineralizowanych kasyteritem na przykładzie kamieniołomu w Krobicy. *Biul. Inst. Geol.*, 279, p. 59–89. Warszawa.
- SZECÓWKA Z. (1972) – Zmiana niektórych własności mechanicznych węgla wskutek nawodnienia w aspekcie zwalczania tępań pokładowych. *Pr. Gł. Inst. Gór.*, nr 568. Katowice.
- SZECÓWKA Z., KIJEWski P., LIS J. (1977) – Skłonność do tępań skał z obszaru kopalni „Lubin”. *Inst. Geom. Gór. AGH, IV Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej. Wisła–Jawornik*.

Станислав ФРЕЛЬКЕВИЧ, Пётр КИЕВСКИ, Ян ЛИС

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛЮДИСТЫХ СЛАНЦЕВ КАМЕНЕЦКОГО КРЯЖА В РАЙОНЕ КРОБИЦЫ

Резюме

Слюдистые сланцы Каменецкого кряжа отличаются разнородностью минерального состава, текстуры и параметрами прочности. В вертикальном разрезе скважины К-II/3 они разделены на три основных разновидности. Первая — слюдистые сланцы с сильно выраженными следами выветривания. Это хрупкая непрочная порода с чёткой сланцевой делимостью (таб. 1). Второй разновидностью являются плотные, прочные слюдисто-полевошпатово-кварцевые сланцы (таб. 2). Третья разновидность это слюдисто-хлоритовые сланцы с полевыми шпатами и кварцем, средней прочности (таб. 3).

В сущности разные виды слюдистых сланцев мало отличаются друг от друга по физическим свойствам. Для них характерна низкая пористость и весовая гигроскопичность. Несмотря на это, насыщение водой значительно понижает их прочность, в границах 25—50%.

Механические свойства слюдистых сланцев (фиг. 1, 4) позволяют причислять их к упруго-пластичным материалам. Изучение их выявило значительное влияние всестороннего давления на прочность. Кроме того эти породы способны как накапливать энергию, так и рассеивать её.

В свете действующей классификации Д.Ф. Котеса и Р.Ц. Парсонса (1966) это породы средней прочности, упруго-пластичные под нагрузками, характеризующиеся непрерывностью расщепления. Слюдистые сланцы отличаются высокой прочностной анизотропией, обусловленной их текстурой. Кроме того текстурные свойства являются основным фактором, обуславливающим способ деформации их в процессе разрушения (таб. I, II).

Stanisław FRELKIEWICZ, Piotr KIJEWSKI, Jan LIS

GEOMECHANICAL PROPERTIES OF MICACEOUS SCHISTS OF THE KAMIENIECKIE RANGE FROM THE KROBICA AREA

Summary

Micaceous schists of the Kamienieckie Range are characterized by high variability in mineral composition, texture and strength parameters. Three major varieties of schists were differentiated in the vertical section of the borehole K-II/3. The first variety comprises micaceous schists displaying highly advanced weathering processes. These rocks are brittle, with marked slaty cleavage and low strength parameters (Table 1). The other variety comprises compact micaceous-feldspar-quartz schists with high strength parameters (Table 2) and very coherent. The third variety includes micaceous-chlorite schists characterized by the presence of feldspars and quartz and with intermediate strength (Table 3).

Physical properties of these micaceous schists are generally similar and not much varying. The schists are also characterized by low porosity and weight water absorption. Nevertheless, strength reduction due to soaking is significant, ranging from 25 to 50%.

Mechanical properties (Figs. 1, 4) indicate elastic-plastic material properties of these schists. The studies also revealed that the all-sided pressure significantly influences their strength (Fig. 3). The rocks also appear capable to energy storage as well as they display a trend to its dispersion.

With reference to D.F. Coates and R.C. Parsons (1966) classification accepted here, these are rocks of medium strength, elastic-plastic behaviour when loaded, and ductile character of fracturing. Micaceous schists are characterized by a very high strength anisotropy related to their texture. Textural features are also the basic factor determining the mode of their deformation in the course of destruction. (Tables I, II).

TABLICA I

Fig. 5. Łupek łyszczykowy. Obciążenie próbki zgodne z kierunkiem foliacji. W próbce powstają pęknięcia na kontaktach lamin wzbogaconych w łyszczyki. Głęb. 146,8 m; $R_c = 130$ MPa
Micaceous schist. Sample loaded consistently with direction of foliation. Fractures originate at contacts of laminae enriched in micaceous minerals. Depth 146.8 m; $R_c = 130$ MPa

Fig. 6. Łupek łyszczykowy. Obciążenie prostopadłe do kierunku foliacji. W próbce powstają spękania ustawione diagonalnie do obciążenia, podrzędnie tworzą się także drobne pęknięcia zgodne z przebiegiem foliacji. Głęb. 125,8; $R_c = 141,5$ MPa
Micaceous schist. Loading perpendicular to the direction of foliation. Sample becomes fractured in direction diagonal to loading; small fractures oriented consistently with foliation also originate. Depth 125.8 m; $R_c = 141.5$ MPa

Fig. 7. Łupek łyszczykowy z soczewkami kwarcu. Powierzchnie spękań utworzone w procesie ściskania rozwijają się zgodnie z przebiegiem lamin łyszczykowych opływających soczewki kwarcu. Głęb. 169,5; $R_c = 20$ MPa
Micaceous schist with quartz lenses. Surfaces of fractures resulting from compression run consistently with the course of micaceous laminae enveloping quartz lenses. Depth 169.5 m; $R_c = 20$ MPa

Fig. 8. Łupek łyszczykowo-skaleniowo-kwarcowy. W trakcie ściskania w warunkach wszechstronnego ciśnienia w próbce tworzy się diagonalna szczelina ścinająca. Głęb. 54,0 m; $R_c = 149,8$ MPa, ciśnienie boczne $p = 200$ MPa
Micaceous-feldspar-quartz schist. Diagonal shearing fracture formed in the sample in result of compression under conditions of all-sided pressure. Depth 54.0 m; $R_c = 149.8$ MPa, lateral pressure $p = 200$ MPa

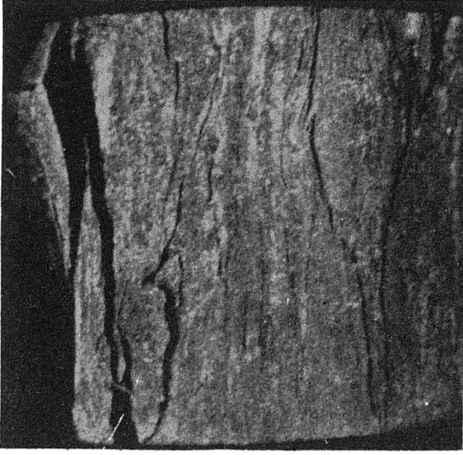


Fig. 5

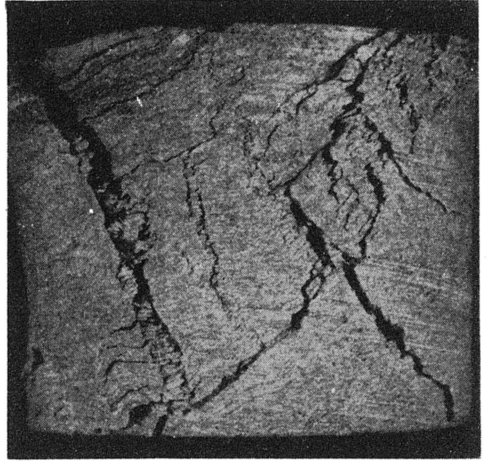


Fig. 6

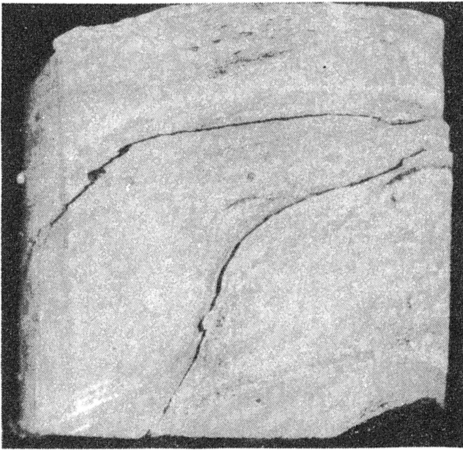


Fig. 7

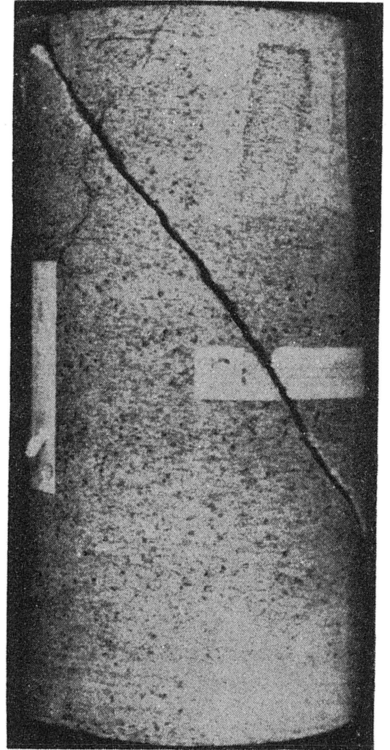


Fig. 8

TABLICA II

Fig. 9. Łupek łyszczykowy. W trakcie badania wytrzymałości na rozciąganie tzw. metodą brazylijską ujawnia się w istotny sposób wpływ tekstury na sposób deformacji próbki. Powstaje nieregularne, osiowe pęknięcie oraz liczne pochodne spękania związane z orientacją foliacji. Głęb. 120,0 m; $R_p = 14,4$ MPa
Micaceous schist. The influence of texture on the mode of deformation of the sample becomes clearly marked in test of strength to compression with the use of so-called Brazilian method. An irregular axial fracture and numerous derivative fractures related to the direction of foliation originate in the sample. Depth 120.0 m; $R_p = 14.4$ MPa

Fig. 10. Łupek łyszczykowy, laminowany. Obciążenie zgodne z kierunkiem foliacji. W trakcie testu określającego wytrzymałość na zginanie w próbce powstają szczeliny zainicjowane przebiegiem lamin łyszczykowych. Głęb. 117,5; $R_p = 17,2$ MPa

Laminated micaceous schist. Loading consistent with the direction of foliation. Fractures initiated by the course of micaceous laminae originate in the sample during the test of strength to bending. Depth 117.5 m; $R_p = 17.2$ MPa

Fig. 11. Łupek łyszczykowy. Obciążenie prostopadłe do kierunku foliacji. Po przekroczeniu wytrzymałości na zginanie w próbce powstaje układ szczelin radialny; a – głęb. 38,6 m; $R_p = 23,4$ MPa; b – głęb. 46,3 m; $R_p = 26,3$ MPa

Micaceous schist. Loading perpendicular to the direction of foliation. A different pattern of radially arranged fractures originates in the sample when strength to bending is overpassed. a – depth 38.6 m; $R_p = 23.4$ MPa; b – depth 46.3 m; $R_p = 26.3$ MPa

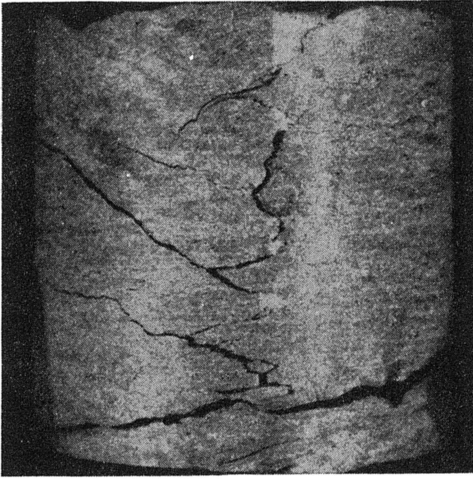


Fig. 9

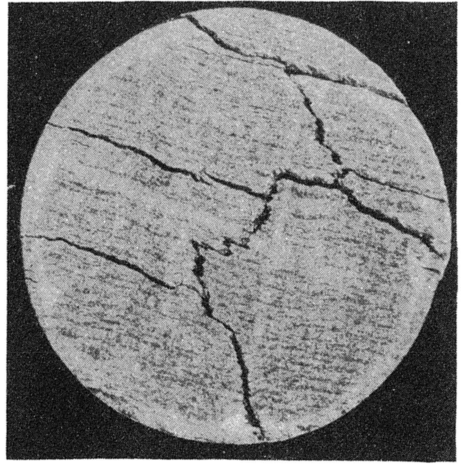


Fig. 10

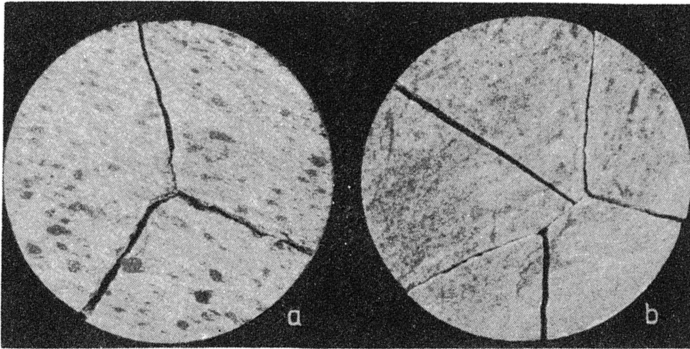


Fig. 11