

Właściwości fizyczno-mechaniczne zróżnicowanych litologicznie skał fliszu karpackiego jako element oceny masywu skalnego na potrzeby budowy tuneli

Marek Rembiś¹, Jakub Czurczak¹



M. Rembiś



J. Czurczak

Physical and mechanical properties of lithologically diverse Carpathian flysch rocks as an element of rock mass assessment for tunnelling purposes. *Prz. Geol.*, 74: 25–37; doi: 10.7306/2026.1

Redaktor prowadząca: Anna Fijałkowska-Mader

Abstract. The paper presents the results of physical and mechanical tests of Carpathian flysch rocks of variable lithology, including sandstones, siltstones, shales and claystones collected from various tectonic units of the Polish Carpathians. The analyses comprised uniaxial compressive strength (R_c), tensile strength (R_t), Cerchar abrasivity index (CAI) and Cerchar hardness index (CHI). The obtained results show strong positive correlations between R_c , R_t , CHI and CAI ($\rho = 0.77-0.93$), indicating that the type and composition of the cement are the

main factors controlling the mechanical behaviour, whereas grain size plays a secondary role. The highest mechanical strength was observed in silica- and silica-carbonate-cemented sandstones and siltstones, and the lowest in clay- and clay-carbonate-cemented rocks. The Carpathian flysch represents a highly heterogeneous, rhythmically bedded rock complex. This variability results in significant differences in rock behaviour, even within a single tunnel section, requiring a detailed geological-engineering investigation supported by an extensive laboratory testing program. The obtained relationships form a basis for predictive modelling of flysch rock behaviour under mechanical excavation and for calibrating geomechanical classifications (RMR, Q, GSI) for tunnelling conditions in the Carpathians.

Keywords: Carpathian flysch, physical and mechanical properties of rocks, laboratory testing, TBM, tunnelling, geomechanical classifications

Dynamiczny rozwój infrastruktury podziemnej, związany z budową tuneli komunikacyjnych, sieci transportowych czy instalacji technicznych, stawia coraz większe wymagania wobec technologii drążenia oraz rozpoznania warunków geologiczno-inżynierskich masywów skalnych. Jedną z najczęściej stosowanych i najbardziej zaawansowanych metod realizacji tuneli jest wykorzystanie tarcz mechanicznych TBM (*Tunnel Boring Machine*). Umożliwiają one realizację inwestycji podziemnych w zróżnicowanych warunkach geologiczno-inżynierskich przy jednoczesnym ograniczeniu oddziaływania na powierzchnię terenu. Skuteczność, bezpieczeństwo i ekonomiczność procesu drążenia tym sposobem w znacznym stopniu zależą od właściwego rozpoznania i oceny właściwości mechanicznych ośrodka skalnego, w którym są prowadzone prace.

Znajomość właściwości mechanicznych skał, takich jak: wytrzymałość na ściskanie, rozciąganie, ścinanie, moduł sprężystości czy podatność na ścieranie lub rozkruszanie, umożliwia prognozowanie zachowania się ośrodka w trakcie drążenia oraz optymalny dobór parametrów pracy tarczy TBM. Wartości tych parametrów są niezbędne do oceny podatności skał na skrawanie oraz doboru optymalnych narzędzi tnących. Brak szczegółowej wiedzy o charakterystyce skał może prowadzić do nieprzewidywanych problemów eksploatacyjnych, zwiększonego zużycia narzędzi skrawających, spadku efektywności drążenia, a nawet do awarii urządzenia.

Obecnie znaczna część inwestycji budowy tuneli drogowych i kolejowych jest realizowana lub planowana w obrębie Karpat fliszowych. Jest to obszar o wyjątkowo złożonej budowie geologicznej, która bezpośrednio wpływa na warunki prowadzenia prac tunelowych. Flisz karpacki jest zbudowany z naprzemianległych warstw głównie piaskowców, łupków, mułowców i margli, tworzących rytmicznie zalegające kompleksy o zróżnicowanej zwięzłości oraz różnym stopniu spękania i zdeformowania. To powoduje, że górotwór nie jest jednolity, a jego właściwości mogą się zmieniać nawet na niewielkich odcinkach drążonego tunelu. Ta niejednorodność litologiczna i strukturalna masywu sprawia, że rozpoznanie geologiczne wykonane przed zastosowaniem tarczy TBM musi być szczególnie dokładne i wieloaspektowe. Zazwyczaj obejmuje ono badania geofizyczne, odwierty geotechniczne z poborem rdzeni, oceną miąższości i orientacji warstw oraz laboratoryjnym oznaczeniem cech wytrzymałościowych. Ponadto zawiera mapowanie strukturalne i analizę orientacji spękań oraz dyslokacji tektonicznych, a także ocenę warunków hydrogeologicznych, zwłaszcza ciśnienie wód porowych w masywie skalnym oraz przepuszczalność warstw wodonośnych. W ramach tych prac są także wykonywane klasyfikacje geomechaniczne masywu (np. RMR, Q lub GSI), dzięki którym jest możliwe prognozowanie zachowania się górotworu w trakcie drążenia tunelu.

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; rembis@agh.edu.pl; czurczak@agh.edu.pl; ORCID ID: M. Rembiś – 0000-0003-2879-3949, J. Czurczak – 0000-0003-4270-7592.

W warunkach terenowych, podczas realizacji badań geologiczno-inżynierskich związanych z budową tuneli metodą TBM, jednym z zasadniczych elementów charakterystyki podłoża skalnego jest makroskopowy opis próbek rdzeni wiertniczych. Wynika to z ograniczeń czasowych i logistycznych prowadzonych prac, które nie zawsze pozwalają na natychmiastowe wykonanie pełnego zestawu analiz laboratoryjnych. Makroskopowa ocena skał stanowi jednak fundamentalny etap wstępnego rozpoznania litologicznego, dostarczając kluczowych informacji o rodzaju i jakości ośrodka skalnego. Opis makroskopowy obejmujący szczegółową ocenę barwy, struktury, tekstury, zwieźłości, obecności spękań, żył, przewarstwień i innych cech diagnostycznych, np. rodzaju spoiwa, pozwala jednoznacznie określić rodzaj skały i jej odmianę litologiczną. Umożliwia także wstępne określenie jej właściwości fizyczno-mechanicznych, co ma zasadnicze znaczenie dla planowania prac tunelowych. Istotną zaletą badań makroskopowych jest również możliwość racjonalnego i reprezentatywnego wyboru próbek do dalszych analiz laboratoryjnych. Na podstawie obserwacji terenowych jest bowiem możliwe wskazanie fragmentów rdzeni o reprezentatywnej jakości, ciągłości i jednorodności, które najlepiej odzwierciedlają warunki geologiczne danego odcinka trasy tunelu. Właściwy dobór próbek stanowi zatem kluczowy element dla uzyskania wiarygodnych wyników badań mechanicznych i fizycznych. Znaczenie tych badań jest zarówno inżynierskie, poprzez stworzenie podstaw do zaprojektowania techniki urabiania, jak i ekonomiczne, gdyż stanowią one źródło danych umożliwiających dokonanie odpowiedniego doboru narzędzi i określenie ich przewidywanego zużycia. Do podstawowych właściwości badanych na etapie rozpoznania geologicznego oraz podczas monitoringu geotechnicznego w trakcie budowy tunelu należą: wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie (R_c), wytrzymałość na rozciąganie (R_t), ścierność Cerchar (wskaźnik CAI) oraz twardość Cerchar (wskaźnik CHI). W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań tych parametrów wykonanych przez autorów w latach 2019–2025 dla różnych, opisanych makroskopowo skał fliszu karpackiego, na potrzeby rozpoznania masywów skalnych, które prowadzono przed pracami tunelowymi z zastosowaniem tarcz TBM. Celem pracy było przedstawienie związku między litologią skał a zmiennością wartości ich parametrów fizyczno-mechanicznych.

MATERIAŁ BADAWCZY I METODYKA BADAŃ

Próbki do badań zostały pobrane z rdzeni pozyskanych z kilkudziesięciu otworów wiertniczych wykonanych w strefie planowanych tuneli kolejowych i drogowych. Były one zlokalizowane w obrębie utworów należących do różnych serii polskiej części Karpat fliszowych: magurskiej (w strefach Siar i raczańskiej), śląskiej, grybowskiej i skolskiej. W jednostkach tych występuje szereg różnorodnych wydzieleni litostratygraficznych szczegółowo opisanych w licznych pracach (np. Jucha, 1969; Oszczytko, 1973, 1992; Haczewski, 1981; Koszarski, 1985; Żytko i in., 1988; Birkenmajer, Oszczytko, 1989; Oszczytko i in., 1990, 2008; Bromowicz, 1992; Słomka, 1995; Poprawa, Rączkowski, 1996; Peszat, 1999; Chodyń, 2002; Rembiś, 2002; Cieszkowski i in., 2006, 2007; Golonka, 2007). Spo-

śród nich badaniami objęto utwory należące do warstw z Kaniny, z Jaworzynki, hieroglifowych oraz ogniwa z Wątkowej (seria magurska), ponadto reprezentujące warstwy krośnieńskie jednostki grybowskiej w oknie tektonicznym Klęczan–Limanowej (Pisarzowej), a także warstwy hieroglifowe i krośnieńskie jednostek skolskiej i śląskiej oraz warstwy istebniańskie dolne z serii śląskiej.

Makroskopowa ocena pobranych próbek skalnych wykazała, że pomimo występowania w różnych jednostkach litostratygraficznych, przejawiają one wzajemne podobieństwo litofacjalne, reprezentując litofacje piaskowców, mułowców, łupków mułowcowych oraz ilowców. Ich charakterystyka petrograficzna została przedstawiona poniżej.

Piaskowce drobnoziarniste o spoiwie ilasto-węglanowym. Pochodzą z serii magurskiej, z warstw z Kaniny i z Jaworzynki, gdzie tworzą cienkie i średnie ławice o miąższości od kilkunastu do 60 cm. Są szaro-niebieskawe, masywne lub laminowane równoległe bądź konwolutive i zawierają ziarna o wielkości poniżej 1 mm. Pobrane zostały także z ogniwa z Wątkowej (seria magurska), gdzie mają barwę szarą lub szaro-zielonawą. Są one gruboławicowe (powyżej 80 cm), masywne, w wyższych częściach ławic niekiedy laminowane równoległe lub przekątne.

Piaskowce drobnoziarniste o spoiwie węglanowym. Reprezentują głównie piaskowce warstw krośnieńskich jednostek grybowskiej, skolskiej i śląskiej. Są one jasnoszare lub niebieskavo-popielate, muskowitzowe, z zauważalną domieszką detrytusu roślinnego. Tworzą ławice cienkie i bardzo cienkie o miąższości do 15 cm (jednostka grybowska) bądź średnie i grube (jednostki skolska i śląska). Są laminowane równoległe, konwolutive oraz przekątne, zawierając ziarna mniejsze niż 1 mm. Dla niektórych ławic charakterystyczna jest ich bardzo dobra oddzielność płytowa. Do tej litofacji należą również piaskowce warstw z Jaworzynki (seria magurska), które są wykształcone jako szaro-niebieskawe piaskowce, cienko- lub średnioławicowe, masywne lub laminowane równoległe albo konwolutive.

Piaskowce drobnoziarniste o spoiwie krzemionkowo-ilastym. Są to szaro-niebieskawe lub szaro-zielonawe piaskowce warstw z Kaniny i z Jaworzynki oraz ogniwa z Wątkowej (seria magurska). Tworzą cienkie lub średnie, rzadziej grube ławice o laminacji równoległej, przekątnej lub konwolutivej. Oddzielność wzdłuż powierzchni lamin nadaje piaskowcom skorupowy charakter. Zawierają znaczny udział glaukonitu, a na powierzchniach laminacji jest zauważalna koncentracja blaszek muskowitzu.

Piaskowce drobnoziarniste o spoiwie krzemionkowo-węglanowym. Reprezentują warstwy z Kaniny (jednostka magurska) oraz warstwy hieroglifowe jednostki śląskiej. Mają szaro-niebieską barwę z różnym odcieniem. Te pierwsze są cienko- i średnioławicowe. Zwykle są masywne, rzadziej mają laminację równoległą lub falistą. Piaskowce warstw hieroglifowych są laminowane równoległe lub przekątne. Wykazują oddzielność płytkową lub kostkową.

Piaskowce drobnoziarniste o spoiwie krzemionkowym. Pochodzą z warstw hieroglifowych jednostki śląskiej. Są ciemnoszare i masywne. Tworzą cienkie i średnie ławice o kostkowej podzielności. W stropie przechodzą w mułowce.

Piaskowce średnioziarniste o spoiwie ilastym. Należą do warstw istebniańskich dolnych serii śląskiej. Są szaro-popielate, po zwietrzeniu stają się jaśniejsze lub rdzawo-szare. Wykształcone są w formie grubych ławic, źle wysortowanych, masywnych, czasem o frakcyjnym uziarnieniu.

Piaskowce średnioziarniste o spoiwie węglanowym. Należą do utworów warstw krośnieńskich jednostki grybowskiej i jednostki śląskiej. Są jasnoszare lub niebieskawe. Występują w ławicach cienkich i bardzo cienkich, rzadziej średnich o bardzo dobrej oddzielności płytowej. Są frakcjonowane, z dominacją ziaren o wielkości do 1,5 mm, laminacją równoległą lub przekątną, dużą ilością rozproszonemu muskowitu lub detrytusu roślinnego na powierzchniach oddzielności.

Mułowce ilasto-krzemionkowe. Reprezentują warstwy z Kaniny oraz warstwy hieroglifowe jednostki skolskiej i jednostki śląskiej. Mają barwę ciemnoszarą. Ich struktura jest bardzo drobnoziarnista (pelityczna), a tekstura laminowana. Zawierają przeważające ilościowo laminy złożone z miękkiej i łatwej do wykruszenia substancji ilastej, sąsiadujące z mniej licznymi warstewkami wyraźnie twardszego materiału ziarnistego. Laminy charakteryzują się nieciągłością, często są porozrywane, ulegają pocienieniu lub zanikowi. Są faliście lub konwolutive zaburzone. Po namoczeniu skała staje się plastyczna.

Mułowce krzemionkowe. Pochodzą z warstw z Kaniny oraz z warstw hieroglifowych jednostki skolskiej. Są ciemnoszare. Charakteryzują się bardzo drobnoziarnistą (pelityczną) strukturą oraz masywną teksturą. Mają wysoki stopień zwięzłości i dużą twardość. Rozpadają się na nieregularne, pryzmatyczne fragmenty.

Mułowce węglanowe. Stanowią składnik warstw z Kaniny oraz warstw krośnieńskich jednostki grybowskiej i warstw hieroglifowych jednostki skolskiej. Mają barwę od jasno do ciemnoszarej. Ich struktura jest bardzo drobnoziarnista (pelityczna), a tekstura gruzłowa. Zawierają liczne żyłki białego kalcytu, o zmiennej grubości – od dziesiętnych części milimetra do kilku milimetrów, ułożone bezładnie, wręcz chaotycznie, często wzajemnie się krzyżując.

Łupki mułowcowe ilasto-krzemionkowe. Zostały porwane z warstw z Kaniny i z Jaworzynki oraz z ogniwa z Wątkowej, a także z warstw krośnieńskich jednostki grybowskiej. Mają barwę szaro-brązową. Ich struktura jest bardzo drobnoziarnista (pelityczna), a tekstura laminowana. Wykazują łupkową podzielną. Laminy mają nieregularny, chaotyczny przebieg. Są nieciągłe, porozrywane, miejscami smużyste i mają zróżnicowaną grubość od kilku milimetrów do kilkunastu centymetrów. Makroskopowo różnią się barwą – od jasnoszarej do ciemnoszarej z brązowym odcieniem. Jaśniejsze z nich zawierają większy udział kwarcu i często przybierają postać soczewek. Laminy ciemniejsze są złożone głównie z minerałów ilastych, krzemionki oraz substancji organicznej. Powierzchnie przełamu skały są pofalowane.

Łupki mułowcowe krzemionkowe. Pochodzą z warstw z Kaniny i z Jaworzynki oraz z ogniwa z Wątkowej. Mają barwę ciemnoszaro-zielonkawą, strukturę bardzo drobnoziarnistą (pelityczną) oraz teksturę laminowaną, miejscami gruzłową. Mają łupkową podzielną, rozpadając się na

cienkie, dyskowate fragmenty, wzdłuż matowych i stosunkowo gładkich, ale pofalowanych, sedymentacyjnych powierzchni podzielną. Są twarde, czasem rozpadają się na ostrokrawędzisty gruz o pryzmatycznym kształcie poszczególnych fragmentów, ujawniając gładkie i błyszczące powierzchnie podzielną o tektonicznym charakterze, tzw. lustra tektoniczne. Zawierają żyłki białego kalcytu, krótkie, o zmiennej grubości, z licznymi pustkami.

Łupki mułowcowe węglanowe. Należą do warstw z Kaniny i z Jaworzynki (seria magurska) oraz do warstw krośnieńskich jednostki grybowskiej i skolskiej. Mają ciemnoszarą barwę, pelityczną strukturę oraz laminowaną teksturę. Są stosunkowo zwięzłe, ale po namoczeniu częściowo miękką. Są pocięte żyłkami białego kalcytu o grubości od 0,1 mm do 5 mm. Ich ułożenie jest bezładne, od równoległego do niemal prostopadłego w stosunku do powierzchni łupkowej oddzielności.

Łupki ilaste. Pochodzą z różnych jednostek litostratigraficznych: warstw z Jaworzynki, ogniwa z Wątkowej, warstw krośnieńskich jednostki grybowskiej i śląskiej oraz warstw hieroglifowych jednostki skolskiej i śląskiej. Mają zróżnicowaną barwę: ciemnoszarą, zielonkawą, szaro-zieloną lub brązowo-szarą. Ich struktura jest bardzo drobnoziarnista (pelityczna), natomiast tekstura jest laminowana. Wykazują łupkową podzielną zgodnie z powierzchniami laminacji. Rozpadają się na cienkie, liściaste lub blaszkowe płytki. Są miękkie, a po namoczeniu uplastyczniają się i rozpadają na drobne, miękkie bryłki.

Iłowce. Należą do ogniwa z Wątkowej (seria magurska) oraz warstw hieroglifowych jednostki skolskiej. Pierwsze z nich są szaro-zielonkawe, brązowo-szare lub ciemnoszare. Ich tekstura jest bezładna, miejscami gruzłowata. Są bardzo miękkie, łatwe do roztrącenia między palcami. Po namoczeniu przekształcają się w półpłynną masę. Iłowce z warstw hieroglifowych mają szarą lub popielatą barwę i są bardzo twarde. Część z nich zawiera krzemionkę, inne są wapienne. Charakteryzują się bezładną teksturą.

Wymienione skały zostały poddane badaniom wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie (Rc), wytrzymałości na rozciąganie (Rt), ścierności Cerchar (CAI) oraz twardości Cerchar (CHI).

Wytrzymałość skał na jednoosiowe ściskanie (Rc) zbadano na 514 próbkach piaskowców, 135 próbkach mułowców, 88 próbkach łupków mułowcowych oraz 20 próbkach ilowców. Z większości próbek piaskowców oraz nielicznych próbek mułowców, łupków mułowcowych oraz ilowców było możliwe wykonanie foremnych próbek walcowych i oznaczenie tego parametru zgodnie z normą PN-EN 1926:2007. Dla pozostałych próbek skalnych, charakteryzujących się znacznym spękaniami wzdłuż nieregularnie ułożonych powierzchni, oznaczenie wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie wykonano metodą punktową, opisaną w zaleceniach Międzynarodowego Towarzystwa Mechaniki Skał oraz w normie PN-G-04307:1998. Wartość współczynników ustalono uwzględniając wymiary próbek oraz wyniki badań na próbkach foremnych.

Wytrzymałość na rozciąganie (Rt) oznaczono metodą pośrednią (tzw. testem brazylijskim) wg normy ASTM-D3967-16. Należy dodać, że analogiczna metoda jest podana w normie PN-G-04302:1997 oraz w zaleceniach Międzynarodowego Towarzystwa Mechaniki Skał (Ulu-

say, Hudson, 2007). Zbadano 98 próbek piaskowców, 57 próbek mułowców, 60 próbek łupków mułowcowych i 20 próbek iłowców.

Test ścierności materiału skalnego Cerchar (wskaźnik CAI – *Cerchar Abrasivity Index*) został wykonany wg normy AFNOR NF P 94-430-1 i ASTM D7625-10 na 103 próbkach piaskowców, 69 próbkach mułowców, 56 próbkach łupków mułowcowych i 20 próbkach iłowców.

Badanie twardości materiału skalnego metodą Cerchar (wskaźnik CHI – *Cerchar Hardness Index*) wykonano wg normy AFNOR XP P 94.412 na 71 próbkach piaskowców, 69 próbkach mułowców, 36 próbkach łupków mułowcowych i 20 próbkach iłowców.

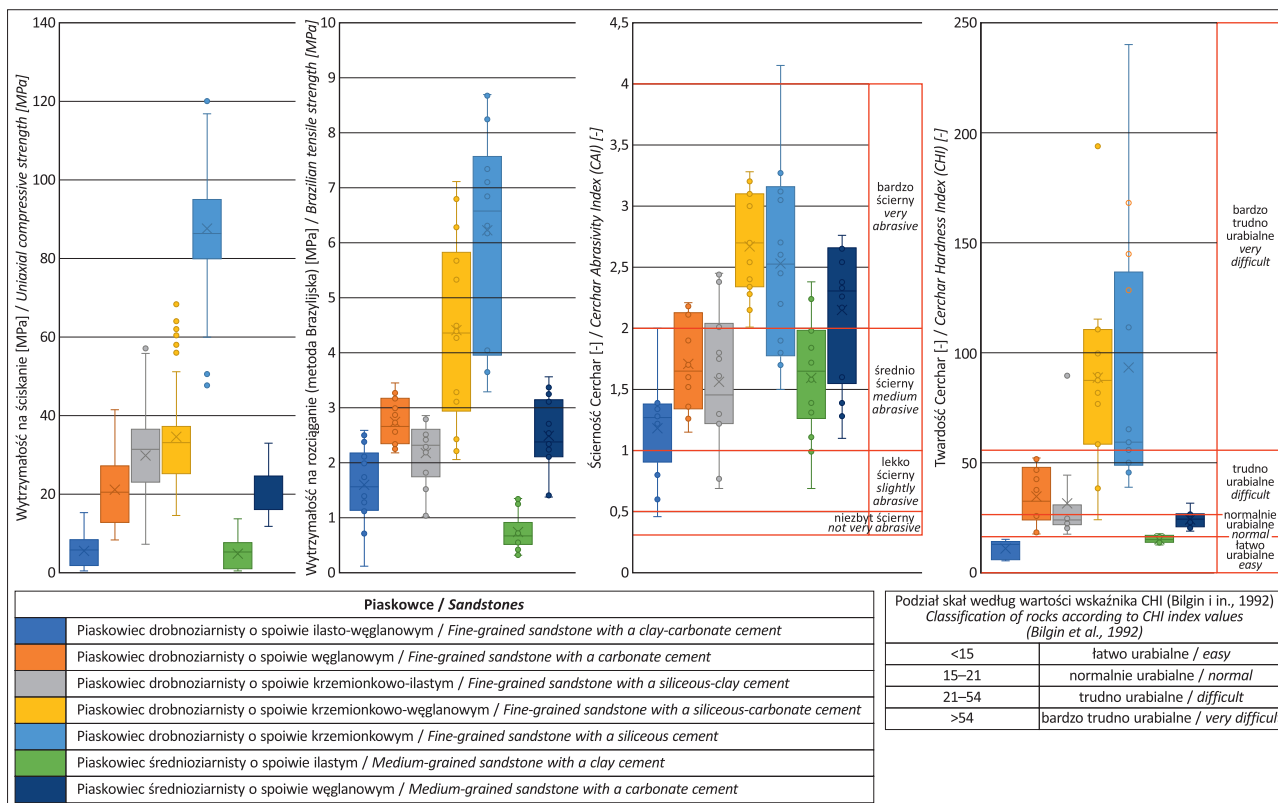
WYNIKI BADAŃ

W grupie piaskowców drobnoziarnistych stosunkowo niskimi wartościami parametrów mechanicznych cechują się piaskowce o spoiwie ilasto-węglanowym. Wytrzymałość na ściskanie mieści się w zakresie 0,5–15,3 MPa (średnio 5,6 MPa), natomiast na rozciąganie 0,12–2,59 MPa (średnio 1,60 MPa). Wskaźnik ścierności CAI waha się między 0,46 a 2,00 (średnio 1,23), co wg klasyfikacji Plinningera i Restnera (2008) lokuje te skały jako średnio ścierające narzędzia urabiające. Wskaźnik twardości CHI osiąga wartości od 5,38 do 15,21 (średnio 11,00; ryc. 1, tab. 1). Według klasyfikacji Bilgina i in. (1992) są to skały łatwo lub normalnie podatne na urabianie. Stosunkowo szeroki zakres zmienności wartości wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie wynika najprawdopodobniej z różnego udziału poszczególnych składników spoiwa, zwłaszcza w piaskowcach laminowanych. Pomimo tej zmienności, wytrzymałość na rozciąganie pozostaje proporcjonalna (zgodnie

z modelem regresji liniowej) do wytrzymałości na ściskanie ($R_t \approx 0,29 R_c$), co potwierdza wielkość powiązania między tymi parametrami wykazywaną wcześniej, charakterystyczną dla skał o niskiej zwięzłości (Coviello i in., 2005; Guan i in., 2023). Korelacja pomiędzy R_c a CHI jest dodatnia, jednak słaba, co dowodzi, że wzrost twardości nie zawsze przekłada się na proporcjonalny wzrost wytrzymałości. Może on bowiem wynikać także ze zróżnicowanego udziału twardych ziaren szkieletu. Również wartości CAI nie wykazują wyraźnej zależności z R_c , co sugeruje, że zmienny udział składników szkieletu ziarnowego ma także wpływ na właściwości ściernie.

Odmiana o spoiwie węglanowym wykazuje wyższe wartości analizowanych parametrów. Wytrzymałość na ściskanie wynosi 8,4–41,5 MPa (średnio 21,2 MPa), a na rozciąganie 2,18–3,45 MPa (średnio 2,75 MPa). Wskaźnik CAI osiąga wartość 1,15–2,21 (średnio 1,68), co sprawia, że skały te należą do średnio i bardzo ścierających narzędzia (Plinninger, Restner, 2008). CHI ma wartość od 17,65 do 52,16 (średnio 34,64) (tab. 1, ryc. 1) i w związku z tym są to skały o normalnej podatności lub trudno podatne na urabianie (Bilgin i in., 1992).

Zakresy wartości wskazują na umiarkowaną zmienność poszczególnych parametrów, co może wynikać z różnego wykształcenia składników węglanowych spoiwa (mikryt, sparyt) i ich różnego udziału. Zależność R_c – R_t (model regresji liniowej) jest dodatnia ($R_t \approx 0,13 R_c$), typowa dla skał średnio zwięzłych (Lakirouhani i in., 2022; Guan i in., 2023). Silna korelacja R_c –CHI sugeruje, że zwiększony udział spoiwa węglanowego podnosi zarówno odporność mechaniczną, jak i twardość powierzchni. Ścierność CAI pozostaje natomiast na poziomie podobnym jak w piaskowcach o spoiwie ilasto-węglanowym, mimo znacznie



Ryc. 1. Zmienność fizyczno-mechanicznych właściwości piaskowców
Fig. 1. Variability of physical and mechanical properties of sandstones

Tab. 1. Zmienność fizyczno-mechanicznych właściwości piaskowców
Table 1. Variability of physical and mechanical properties of sandstones

	Piaskowce droбноziarniste <i>Fine-grained sandstones</i>					Piaskowce średnioziarniste <i>Medium-grained sandstones</i>				
	spoiwo iasto-węglanowe <i>clay-carbonate cement</i>	spoiwo węglanowe <i>carbonate cement</i>	spoiwo krzemionkowo- ilaste <i>siliceous-clay cement</i>	spoiwo krzemionkowo- węglanowe <i>siliceous-carbonate cement</i>	spoiwo krzemionkowe <i>siliceous cement</i>	spoiwo ilaste <i>clay cement</i>	spoiwo węglanowe <i>carbonate cement</i>			
Liczba próbek <i>Number of samples</i>	134	86	46	110	46	46	46			
Zakres wartości (średnia) <i>Range of values (average)</i>	0,5–15,3 (5,6)	8,4–41,5 (21,2)	7,3–57,1 (29,8)	14,6–68,3 (34,6)	47,7–120,0 (87,6)	0,3–13,8 (4,8)	11,8–33,0 (20,4)			
Odchylenie standardowe/współczynnik zmienności <i>Standard deviation/coefficient of variation</i>	3,84/68,69	3,84/68,69	11,96/40,12	12,76/36,89	14,87/16,98	3,53/73,17	5,12/25,14			
	Wytrzymałość na ściskanie [MPa] <i>Uniaxial compressive strength [MPa]</i>									
	Wytrzymałość na rozciąganie (metoda brazylijska) [MPa] <i>Brazilian tensile strength [MPa]</i>									
Liczba próbek <i>Number of samples</i>	14	14	14	14	14	14	14			
Zakres wartości (średnia) <i>Range of values (average)</i>	0,12–2,59 (1,60)	2,18–3,45 (2,75)	1,02–2,86 (2,18)	2,06–7,11 (4,41)	3,29–8,69 (6,23)	0,32–1,35 (0,74)	1,38–3,56 (2,49)			
Odchylenie standardowe/współczynnik zmienności <i>Standard deviation/coefficient of variation</i>	0,69/43,10	0,40/14,39	0,59/26,96	1,61/36,44	1,80/28,94	0,33/44,84	0,64/25,68			
	Wskaźnik ścierności Cerchar CAI [-] <i>Cerchar Abrasivity Index (CAI) [-]</i>									
Liczba próbek <i>Number of samples</i>	16	14	16	15	14	14	14			
Zakres wartości (średnia) <i>Range of values (average)</i>	0,46–2,00 (1,23)	1,15–2,21 (1,68)	0,69–2,45 (1,57)	2,01–3,28 (2,64)	1,50–4,15 (2,50)	0,69–2,38 (1,60)	1,10–2,76 (2,20)			
Odchylenie standardowe/współczynnik zmienności <i>Standard deviation/coefficient of variation</i>	0,4/31,66	0,4/21,24	0,6/35,56	0,4/15,08	0,8/29,66	0,5/29,26	0,5/25,47			
	Wskaźnik twardości Cerchar CHI [-] <i>Cerchar Hardness Index (CHI) [-]</i>									
Liczba próbek <i>Number of samples</i>	9	10	10	11	13	8	10			
Zakres wartości (średnia) <i>Range of values (average)</i>	5,38–15,21 (11,00)	17,65–52,16 (34,64)	17,59–89,56 (31,64)	24,07–193,80 (88,73)	38,90–240,02 (93,29)	12,58–17,78 (15,25)	18,87–31,58 (24,25)			
Odchylenie standardowe/współczynnik zmienności <i>Standard deviation/coefficient of variation</i>	3,82/34,74	12,51/36,13	20,48/64,73	42,81/48,25	58,96/63,20	1,70/11,13	3,55/14,63			

wyższego Rc. Pokazuje to, że spoiwo węglanowe zwiększa wytrzymałość i twardość skały, jednak jego wpływ na ścierność jest umiarkowany.

Piaskowce o spoiwie krzemionkowo-ilastym charakteryzują się znacznym zróżnicowaniem – od skał średnio-zwięzłych po silnie scementowane, co wynika zapewne z dużych różnic w udziale poszczególnych składników spoiwa, a częściowo także obecności glaukonitu lub muskowitu. Wytrzymałość na ściskanie wynosi 7,3–57,1 MPa (średnio 29,8 MPa), a na rozciąganie 1,02–2,86 MPa (średnio 2,18 MPa). Wartość wskaźnika CAI mieści się w granicach 0,69–2,45 (średnio 1,57). Są to zatem, wg klasyfikacji Plinningera i Restnera (2008), skały lekko, średnio i bardzo ścierające narzędzia urabiające. Wskaźnik CHI wynosi od 17,59 do 89,56 (średnio 31,64; tab. 1, ryc. 1), co zalicza te skały (wg Bilgina i in., 1992) do trzech grup: normalnie, trudno i bardzo trudno podatnych na urabianie. Zależność Rc–CHI jest dodatnia, ale umiarkowana. Pomimo wzrostu wytrzymałości, twardość nie rośnie proporcjonalnie, co wskazuje, że pomimo dość silnego wiązania ziaren przez krzemionkę, w skale są także obecne strefy o niższej twardości, zasobne w minerały ilaste. Wytrzymałość na rozciąganie słabo koreluje z wytrzymałością na ściskanie ($R_t \approx 0,07 R_c$), co może wynikać z obecności w tych skałach lamin różniących się rodzajem spoiwa oraz udziałem muskowitu. Ścierność CAI wzrasta nieznacznie w stosunku do poprzednio omówionych odmian, wskazując na poprawę odporności ściernej, ale bez jednoznacznej zależności z wytrzymałością na ściskanie.

Wysokie wartości parametrów zarejestrowano dla drobno-ziarnistej odmiany piaskowców o spoiwie krzemionkowo-węglanowym. Wytrzymałość na ściskanie wynosi 14,6–68,3 MPa (średnio 34,6 MPa), a na rozciąganie 2,06–7,11 MPa (średnio 4,41 MPa). Wskaźniki CAI i CHI przyjmują odpowiednio 2,01–3,28 (średnio 2,64) i 24,07–193,8 (średnio 88,73; tab. 1, ryc. 1). Tym samym piaskowce te należą do skał bardzo ścierających ostrza tarczy TBM (Plinninger, Restner, 2008) oraz do skał trudno i bardzo trudno podatnych na urabianie (Bilgin i in., 1992). Współczynniki zmienności w zakresie ok. 36–48% świadczą o dość dużej niejednorodności tych właściwości. Wyjątek stanowi ścierność, której wartości cechują się małą zmiennością. Jednocześnie górne granice wartości tych parametrów istotnie przekraczają wielkości osiągnięte przez inne odmiany, co oznacza, że cementacja krzemionkowo-węglanowa prowadzi do znacznego zespolenia ziaren szkieletu skały. Stwierdzono silną, dodatnią korelację między Rc, R_t i CHI, wskazującą, że wzrost odporności mechanicznej pociąga za sobą równoczesny wzrost twardości. Proporcja parametrów wytrzymałościowych ($R_t \approx 0,13 R_c$) utrzymuje się na tym samym poziomie jak dla odmiany o spoiwie węglanowym. Ścierność CAI wyraźnie koreluje z CHI i Rc w ten sposób, że większa twardość i wytrzymałość przekładają się na wyższą odporność na ścieranie.

Najwyższe wartości omawianych parametrów zanotowano w piaskowcach o spoiwie krzemionkowym. Wytrzymałość na ściskanie osiąga 47,7–120,0 MPa (średnio 87,6 MPa), a na rozciąganie 3,29–8,69 MPa (średnio 6,23 MPa). Wskaźnik CAI wynosi 1,5–4,15 (średnio 2,50), dzięki czemu skały należą, wg Plinningera i Restnera (2008), głównie do bardzo ścierających narzędzia urabiające. Wskaźnik CHI mieści się w zakresie 38,9–240,02 (średnio 93,29)

(tab. 1, ryc. 1). Są to więc skały trudno i bardzo trudno podatne na urabianie (Bilgin i in., 1992). Wyniki te wskazują, że krzemionka tworzy silne połączenia między ziarnami szkieletu, natomiast zmienność wartości parametrów jest związana z różnym jej udziałem w poszczególnych skałach. Wszystkie parametry pozostają w silnej, dodatniej korelacji. Wysoka twardość powierzchni (CHI) przekłada się bezpośrednio na odporność na ściskanie i ścieranie, a wytrzymałość na rozciąganie utrzymuje proporcję $R_t \approx 0,07 R_c$, taką samą jak dla odmiany o spoiwie krzemionkowo-ilastym. Skały są mechanicznie jednorodne, co potwierdzają zwykle niskie wartości współczynnika zmienności. Duży wpływ na to ma masywna tekstura tych skał.

W grupie piaskowców średnioziarnistych odmiana o spoiwie ilastym należy do skał o bardzo niskiej zwięzłości. Wytrzymałość na ściskanie mieści się w przedziale 0,3–13,8 MPa (średnio 4,8 MPa), a na rozciąganie 0,32–1,35 MPa (średnio 0,74 MPa). Wartości CAI wynoszą 0,69–2,38 (średnio 1,60), a CHI mieszczą się w zakresie 12,58–17,78 (średnio 15,25) (tab. 1, ryc. 1). Sytuuje to omawiane skały jako lekko i średnio ścierające ostrza tarczy TBM (Plinninger, Restner, 2008) oraz łatwo i normalnie podatne na urabianie (Bilgin i in., 1992). Wszystkie wartości omawianych parametrów są niskie, a dla niektórych z nich, np. dla wytrzymałości na ściskanie, współczynnik zmienności jest bardzo wysoki (73,17%). Korelacje między parametrami są słabe, co wskazuje, że na właściwości tych piaskowców mogą mieć wpływ różne czynniki litologiczne. Na przykład, niewielki udział spoiwa oraz większe rozmiary ziaren mogą wpływać na niską wytrzymałość, ale jednocześnie większą twardość. Sprzyjać temu będzie także większy udział kwarcu w stosunku do innych składników ziarnowych.

Piaskowce średnioziarniste o spoiwie węglanowym mają wyraźnie lepsze właściwości od odmiany o spoiwie ilastym. Wytrzymałość na ściskanie wynosi 11,8–33,0 MPa (średnio 20,4 MPa), a na rozciąganie 1,38–3,56 MPa (średnio 2,49 MPa). Wartość CAI mieści się w przedziale 1,10–2,76 (średnio 2,20), a CHI 18,87–31,58 (średnio 24,25; tab. 1, ryc. 1), co klasyfikuje te skały jako średnio i bardzo ścierające narzędzia urabiające oraz normalnie i trudno podatne na urabianie. W porównaniu z drobnoziarnistą odmianą o takim samym spoiwie, parametry te mają nieco mniejszy rozrzut wartości, co wynika z bardziej jednorodnej budowy wewnętrznej tych piaskowców. Zależności pomiędzy parametrami są dość wyraźne i dodatnie. Spoiwo węglanowe zapewnia w tych piaskowcach przeciętną zwięzłość (wyrażoną wartością ich wytrzymałości na ściskanie) i umiarkowaną twardość oraz ścierność. Te stosunkowo niskie wartości tych parametrów mogą wynikać z przewagi w spoiwie składników mikrytowych nad sparytowymi, które słabiej niż sparyt wiążą ze sobą ziarna szkieletu. Wpływ może mieć także obecność w tych piaskowcach dużej ilości miękkich blaszek muskowitu oraz ziaren detrytusu roślinnego.

Grupa skał bardzo drobnoziarnistych (mułowce, łupki i iłowce) charakteryzuje się znacznie większą heterogenicznością parametrów wytrzymałościowych, przy czym dominują ich niskie wartości. Wpływ rodzaju spoiwa, a zwłaszcza udziału składnika krzemionkowego jest również widoczny, lecz słabszy niż w piaskowcach.

Mułowce ilasto-krzemionkowe reprezentują skały o zróżnicowanej zwięzłości i niejednorodnej strukturze. Zakres

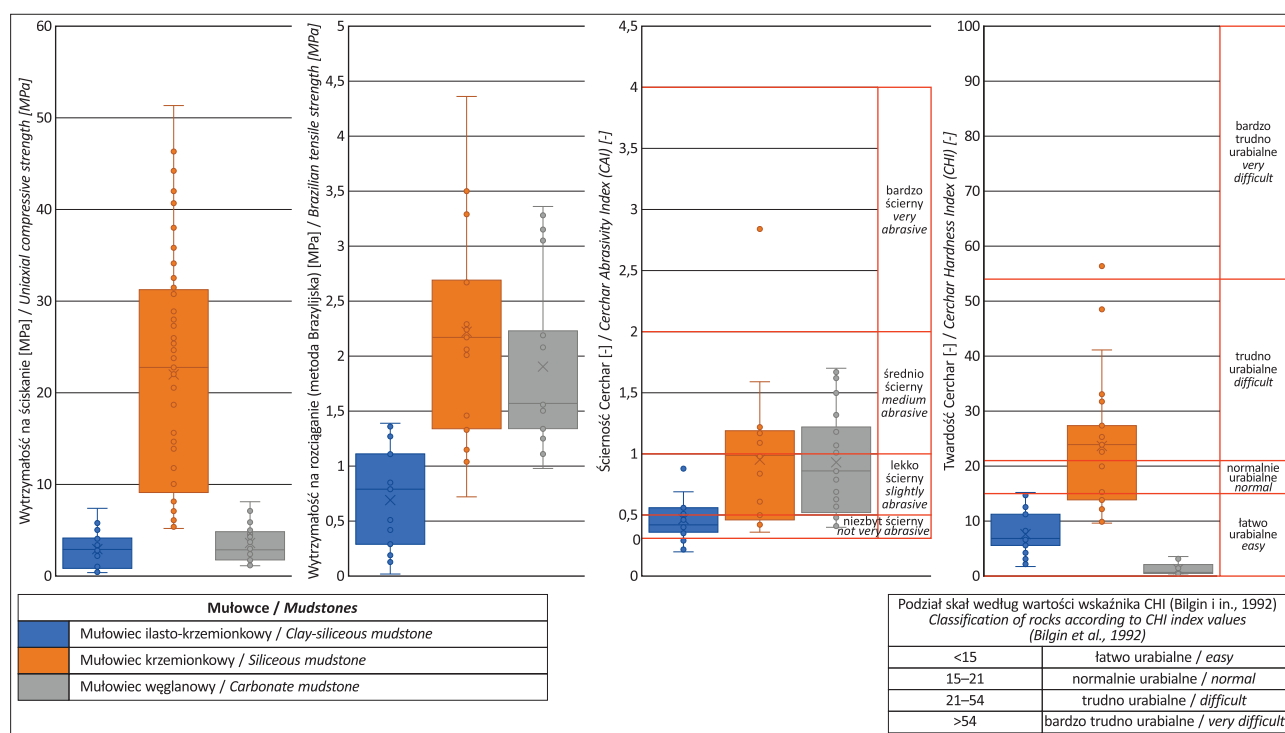
wytrzymałości na ściskanie waha się w przedziale od 0,4 do 7,4 MPa, a wartość średnia wynosi 2,9 MPa. Wytrzymałość na rozciąganie zmienia się od 0,02 do 1,39 MPa przy średniej 0,69 MPa, natomiast wskaźnik ścierności (CAI) mieści się w granicach od 0,20 do 0,92 ze średnią 0,47. Zalicza to tę odmianę skał do grupy lekko lub niezbyt ścierających ostrza urabiające (Plinninger, Restner, 2008). Wskaźnik twardości (CHI) osiąga wartości od 1,75 do 15,23, co daje średnio 7,59 (ryc. 2, tab. 2). Według Bilgina i in. (1992) są to więc skały łatwo lub normalnie podatne na urabianie. Skały te, dzięki obecności zarówno minerałów ilastych, jak i cementu krzemionkowego, mają charakter przejściowy między typowo ilastymi a bardzo drobnziarnistymi utworami zasobnymi w krzemionkę. Współczynniki zmienności są wysokie, potwierdzając dużą niejednorodność budowy wewnętrznej mułowców, cechujących się naprzemiennym ułożeniem lamin, zawierających składniki ilaste bądź twardego materiału ziarnowego zespolony krzemionką. Zależności między poszczególnymi parametrami są dodatnie choć umiarkowane (współczynnik korelacji w granicach 0,4–0,6), co wskazuje, że wzrost udziału krzemionki w skale nie wystarcza, by wyraźnie zwiększyć jej wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie proporcjonalnie do twardości i ścierności.

W przypadku mułowców krzemionkowych obserwuje się wyraźnie wyższy stopień zwięzłości i odporności mechanicznej. Wytrzymałość na ściskanie tej odmiany waha się od 5,2 do 51,3 MPa, przy średniej 22,0 MPa, a wytrzymałość na rozciąganie osiąga wartości od 0,72 do 4,36 MPa, ze średnią 2,22 MPa. Wskaźnik CAI przyjmuje wartości w przedziale 0,36–2,84 (średnio 0,95), lokując te skały w kilku grupach, od niezbyt do bardzo ścierających ostrza tarczy TBM (Plinninger, Restner, 2008). Wartość CHI waha się od 9,65 do 56,38, ze średnią na poziomie 23,66 (tab. 2, ryc. 2), dzięki czemu są to skały o zróżnicowanej podatno-

ści na urabianie, od łatwo do bardzo trudno podatnych (Bilgin i in., 1992). Parametry te wskazują na skały o największej zwięzłości w całej grupie mułowców. Wszystkie parametry pozostają w silnej dodatniej korelacji, szczególnie Rc–CHI i Rc–Rt. Współczynniki zmienności są dość wysokie, co świadczy o dużym zróżnicowaniu udziału krzemionki w spoiwie.

Odmiana mułowców węglanowych cechuje się właściwościami fizyczno-mechanicznymi o wartościach pośrednich między mułowcami ilasto-krzemionkowymi a krzemionkowymi. Wytrzymałość na ściskanie wynosi od 1,1 do 8,1 MPa, osiągając średnią wartość 3,6 MPa. Na jej stosunkowo niską wartość może mieć wpływ obecność w skale licznych żyłek kalcytu. Wytrzymałość na rozciąganie zmienia się od 0,98 do 3,36 MPa (średnio 1,91 MPa). Wskaźnik ścierności wynosi od 0,40 do 1,67 (średnio 0,93), natomiast twardość (CHI) osiąga wartości od 0,18 do 3,58, przy średniej 1,27 (tab. 2, ryc. 2). Zatem są to głównie skały lekko ścierające ostrza narzędzi (Plinninger, Restner, 2008) i łatwo podatne na urabianie (Bilgin i in., 1992). Skały te, ze względu na obecność spoiwa węglanowego, charakteryzują się większą spójnością niż mułowce ilaste, lecz mniejszą odpornością mechaniczną niż odmiany krzemionkowe. Zależność Rc–Rt jest wyraźna i dodatnia ($Rt \approx 0,53 Rc$), natomiast korelacje Rc–CHI i CHI–CAI są słabe. Pomimo niewielkiej twardości CHI, skały zachowują dość wysoką wytrzymałość na rozciąganie, co wynika z ich masywnej (nielaminowanej) tekstury oraz świadczy o obecności lokalnych i beładnie rozmieszczonych stref cementacji węglanowej.

W obrębie łupków mułowcowych wartości parametrów mechanicznych wyraźnie spadają w stosunku do mułowców, co w dużym stopniu zależy od rodzaju spoiwa, a niewątpliwie także od ich łupkowej tekstury. W łupkach mułowcowych krzemionkowych zakres wytrzymałości na



Ryc. 2. Zmienność fizyczno-mechanicznych właściwości mułowców
Fig. 2. Variability of physical and mechanical properties of mudstones

Tab. 2. Zmienność fizyczno-mechanicznych właściwości mułowców, łupków i ilowców
Table 2. Variability of physical and mechanical properties of mudstones, shales and claystones

	Mulowce / Mudstones			Łupki / Shales				Iłowce Claystones
	ilasto- krzemionkowe clay-siliceous	krzemionkowe siliceous	węglanowe carbonate	mulowcowe ilasto- krzemionkowe clay-siliceous siltstones	mulowcowe krzemionkowe siliceous siltstones	mulowcowe węglanowe calcareous siltstones	ilaste argillaceous	
	Wytrzymałość na ściskanie [MPa] Uniaxial compressive strength [MPa]							
Liczba próbek Number of samples	45	45	45	22	22	22	22	20
Zakres wartości (średnia) Range of values (average)	0,4-7,4 (2,9)	5,2-51,3 (22,0)	1,1-8,1 (3,6)	0,4-4,1 (2,0)	4,9-31,5 (16,5)	2,3-8,2 (5,7)	0,1-1,5 (0,8)	0,25-68,5 (15,8)
Odchylenie standardowe/współczynnik zmienności Standard deviation/coefficient of variation	1,83/62,30	12,66/57,56	2,20/61,11	1,19/60,16	7,47/45,35	1,48/25,86	0,41/51,01	20,85/132,24
	Wytrzymałość na rozciąganie (metoda brazylijska) [MPa] Brazilian tensile strength [MPa]							
Liczba próbek Number of samples	19	19	19	15	15	15	15	20
Zakres wartości (średnia) Range of values (average)	0,02-1,39 (0,69)	0,72-4,36 (2,22)	0,98-3,36 (1,91)	0,06-1,56 (0,62)	1,26-3,11 (2,15)	1,11-3,05 (1,91)	0,04-0,67 (0,17)	0,17-3,05 (1,38)
Odchylenie standardowe/współczynnik zmienności Standard deviation/coefficient of variation	0,44/63,26	0,93/41,84	0,76/39,84	0,46/75,55	0,59/28,66	0,66/35,09	0,15/86,09	0,66/47,96
	Wskaźnik ścierności Cerchar CAI [-] Cerchar Abrasivity Index (CAI) [-]							
Liczba próbek Number of samples	23	23	23	14	14	14	14	20
Zakres wartości (średnia) Range of values (average)	0,20-0,92 (0,47)	0,36-2,84 (0,95)	0,40-1,67 (0,93)	0,24-0,83 (0,48)	0,86-1,66 (1,24)	0,54-1,56 (1,03)	0,29-0,70 (0,43)	0,21-2,42 (0,90)
Odchylenie standardowe/współczynnik zmienności Standard deviation/coefficient of variation	0,18/38,30	0,53/55,77	0,43/45,91	0,18/37,89	0,28/22,64	0,30/29,17	0,11/25,08	0,54/59,60
	Wskaźnik twardości Cerchar CHI [-] Cerchar Hardness Index (CHI) [-]							
Liczba próbek Number of samples	23	23	23	9	9	9	9	20
Zakres wartości (średnia) Range of values (average)	1,75-15,23 (7,59)	9,65-56,38 (23,66)	0,18-3,58 (1,27)	3,59-18,90 (10,05)	11,25-17,24 (14,55)	6,37-14,62 (10,10)	0,64-2,35 (1,28)	0,28-35,52 (6,41)
Odchylenie standardowe/współczynnik zmienności Standard deviation/coefficient of variation	3,75/49,38	12,07/51,01	1,03/80,96	5,04/50,17	1,82/12,51	2,18/21,59	0,53/41,19	8,26/128,89

ściskanie wynosi 4,9–31,5 MPa (średnio 16,5 MPa), a na rozciąganie 1,26–3,11 MPa (średnio 2,15 MPa). Wskaźnik CAI zmienia się od 0,86 do 1,66, ze średnią 1,24, natomiast CHI od 11,25 do 17,24 (średnio 14,55) (tab. 2, ryc. 3). Według przyjętych klasyfikacji skały te są lekko i średnio ścierające ostrza narzędzi oraz łatwo i normalnie podatne na urabianie. Zwiększona zawartość krzemionki sprzyja większej spoiwości i twardości, lecz skały te nadal są podatne na rozwarstwienie i zachowują cechy łupliwości typowe dla łupków lub wykazują kostkowy rozpad warunkowany ich tektonizacją. Zależności Rc–CHI i Rc–Rt są silne i dodatnie, charakterystyczne dla wszystkich opisanych wcześniej skał o dominacji spoiwa krzemionkowego. Wyższa zawartość krzemionki skutkuje wzrostem twardości i spójności, co prowadzi do równoległego wzrostu wytrzymałości i odporności ściernej.

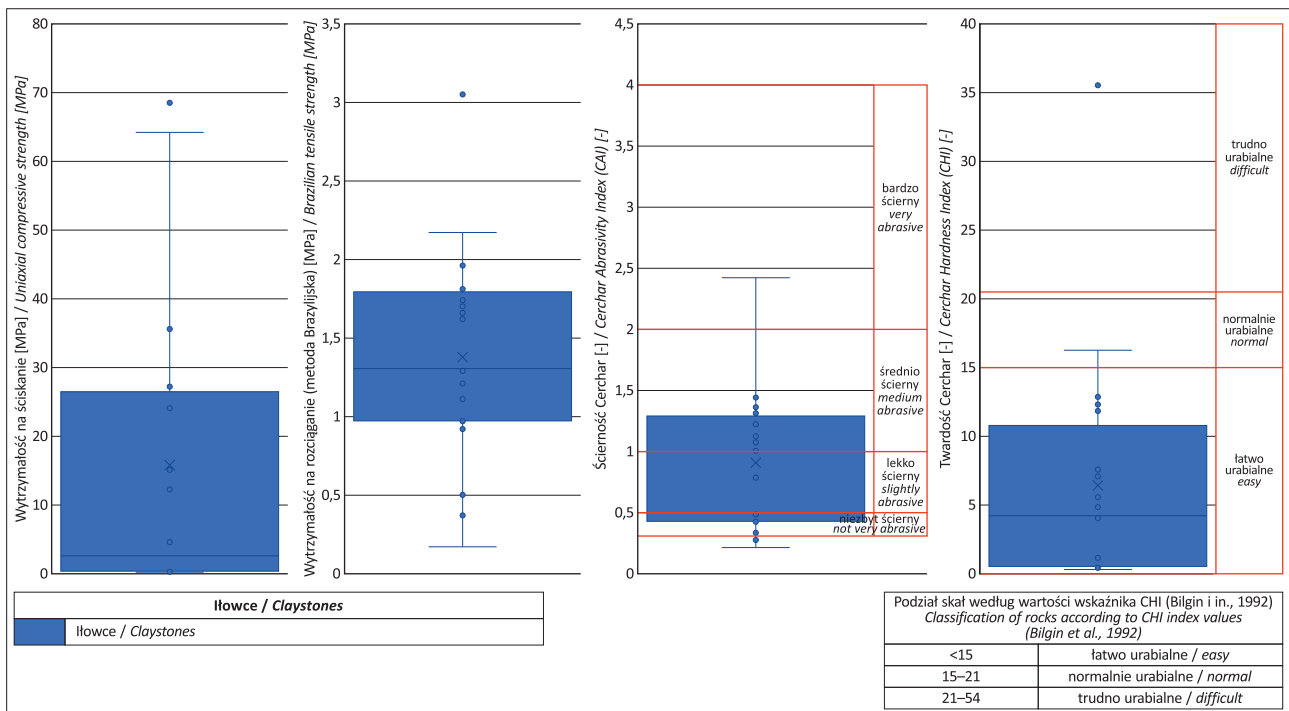
Łupki mułowcowe ilasto-krzemionkowe odznaczają się wytrzymałością na ściskanie od 0,4 do 4,1 MPa, ze średnią 2,0 MPa. Wytrzymałość na rozciąganie osiąga wartość 0,06–1,56 MPa (średnio 0,62 MPa). Wskaźnik CAI waha się od 0,24 do 0,83 (średnio 0,48), co klasyfikuje te łupki jako niezbyt lub lekko ścierające ostrza tarczy TBM. Wskaźnik twardości zawiera się w granicach od 3,59 do 18,90, ze średnią 10,05 (tab. 2, ryc. 3), decydując o ich łatwej lub normalnej podatności na urabianie. Skały te wykazują wyraźną laminację, dużą łupliwość i anizotropię mechaniczną, co czyni je słabo odpornymi na obciążenia. Pomimo niskiej wytrzymałości, zwłaszcza w strefach zasobnych w minerały ilaste, skała wykazuje miejscami dość dużą twardość, z powodu lokalnego wzbogacenia niektórych lamin w ziarna kwarcu. Zależności Rc–Rt i Rc–CHI są słabe, co wynika zarówno ze zróżnicowanego składu mineralnego tych skał, jak też z ich łupkowej tekstury.

Łupki mułowcowe węglanowe charakteryzują się niższymi wartościami omawianych parametrów w stosunku do odmian krzemionkowej i ilasto-krzemionkowej. Wytrzy-

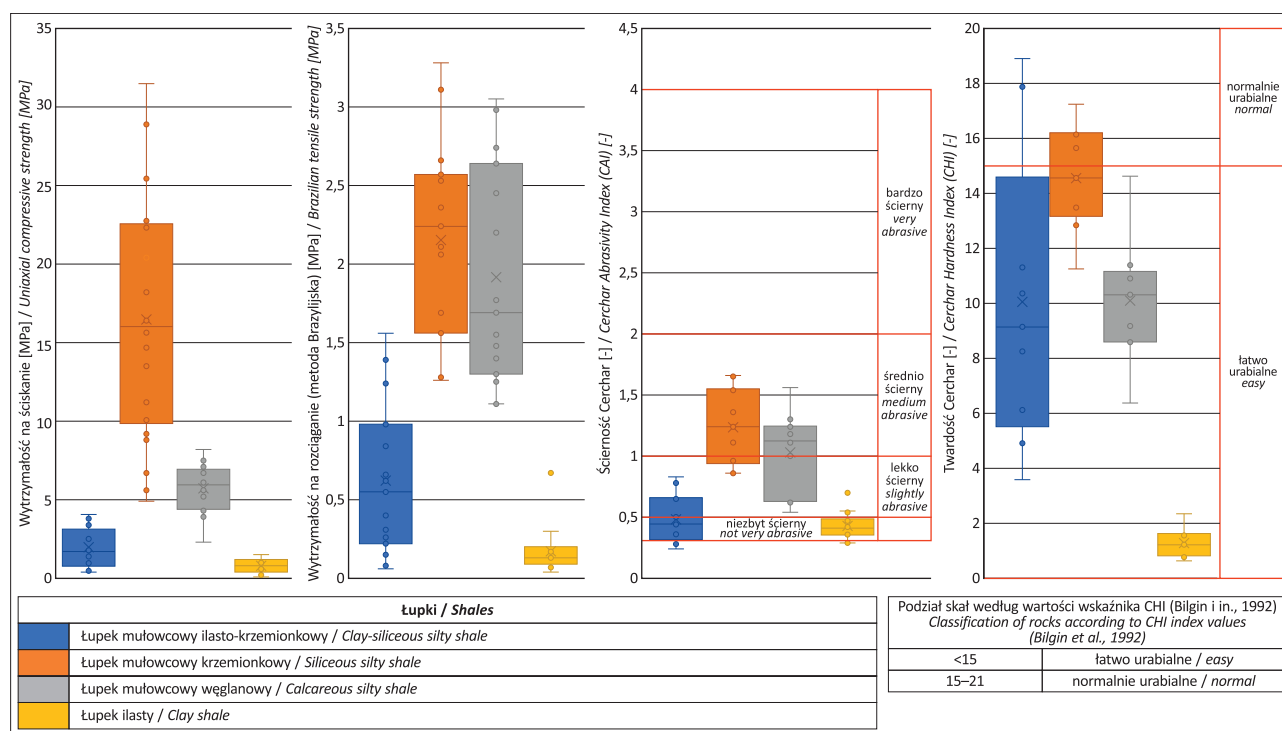
małość na ściskanie mieści się w zakresie 2,3–8,2 MPa (średnio 5,7 MPa), wytrzymałość na rozciąganie od 1,11 do 3,05 MPa (średnio 1,91 MPa). Wskaźnik ścierności przyjmuje wartości 0,54–1,56 (średnio 1,03), a wskaźnik twardości 6,37–14,62, przy średniej 10,10 (tab. 2, ryc. 3). Są to więc skały lekko lub średnio ścierające ostrza narzędzi urabiających oraz łatwo podatne na urabianie (Bilgin i in., 1992; Plinninger, Restner, 2008). Dość niska wytrzymałość na ściskanie, przy stosunkowo wysokich wartościach pozostałych parametrów, może wynikać z obecności licznych żyłek kalcytu, ułatwiających rozpad skały pod wpływem nacisku. Korelacja Rc–Rt jest umiarkowana, podobnie zależności Rc–CHI i CHI–CAI mają charakter dodatni, ale o niewielkiej wartości współczynnika korelacji.

Łupki ilaste stanowią skały o najniższej fizyczno-mechanicznej odporności w całej analizowanej grupie. Wytrzymałość na ściskanie osiąga wartości 0,1–1,5 MPa, ze średnią 0,8 MPa, natomiast na rozciąganie 0,04–0,67 MPa (średnio 0,17 MPa). Wskaźnik CAI kształtuje się w przedziale 0,29–0,70 (średnio 0,43), a CHI w zakresie 0,64–2,35, co daje średnią 1,28 (tab. 2, ryc. 3). Skały te w nieznacznym stopniu ścierają ostrza narzędzi i są łatwo podatne na urabianie (Bilgin i in., 1992; Plinninger, Restner, 2008). Wyraźna łupkowa podzielność oraz wysoka zawartość minerałów ilastych sprawia, że łatwo ulegają rozwarstwieniu wzdłuż powierzchni uławicenia, co tłumaczy zwłaszcza ich niską wytrzymałość na rozciąganie. Zależności między parametrami są słabe lub przypadkowe.

Łowce wyróżniają się spośród analizowanych skał znaczną zmiennością wartości omawianych właściwości. Wytrzymałość na ściskanie waha się w szerokim zakresie od 0,25 do 68,5 MPa, przy średniej wartości 15,8 MPa. Wytrzymałość na rozciąganie wynosi 0,17–3,05 MPa (średnio 1,38 MPa). Wskaźnik CAI mieści się w przedziale 0,21–2,42 (średnio 0,90), natomiast CHI wynosi od 0,28 do 35,52, ze średnią 6,41 (tab. 2, ryc. 4). Są to zatem skały o różnej



Ryc. 3. Zmienność fizyczno-mechanicznych właściwości łupków
Fig. 3. Variability of physical and mechanical properties of shales



Ryc. 4. Zmienność fizyczno-mechanicznych właściwości iłwców
Fig. 4. Variability of physical and mechanical properties of claystones

ścierności, od niezbyt do bardzo ścierających ostrza narzędzi oraz od łatwo do trudno podatnych na urabianie (Bilgin i in., 1992; Plinninger, Restner, 2008). Tak duże zróżnicowanie, wyrażające się wysokimi wartościami współczynnika zmienności, wskazuje na występowanie zarówno miękkich, ilastych odmian o niskiej wytrzymałości, podobnych do łupków ilastych, jak i bardziej zwięzłych, wapnistych oraz krzemionkowych odmian iłwców, zbliżonych pod względem twardości i odporności do mułowców krzemionkowych. Duża zmienność wartości parametrów wynika najprawdopodobniej ze zróżnicowanego stopnia ich diagenety w obrębie różnych jednostek litostratigraficznych i lokalnych różnic w zawartości składników ilastych, węglanowych lub krzemionkowych. Zależności R_c – R_t , R_c – CHI i CHI – CAI wyrażają się słabymi, dodatnimi korelacjami, co sugeruje wpływ lokalnych stref cementacji na właściwości tych skał.

Porównanie parametrów omówionych odmian litologicznych skał wyraźnie ujawniło tendencję wzrostu wartości właściwości fizyczno-mechanicznych wraz z rosnącą zawartością krzemionki w spoiwie. Najwyższe wartości wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie, a także najwyższe wskaźniki twardości i ścierności osiągnęły piaskowce i mułowce krzemionkowe oraz zwięzłe odmiany iłwców. Skały te reprezentują twarde, mało plastyczny i relatywnie kruchy zespół skalny. Z punktu widzenia technologii TBM jest to środowisko sprzyjające dobrej długoterminowej stabilności przekroju tunelu z możliwością niewielkich konwergencyjnych przemieszczeń, ale o zwiększonym ryzyku gwałtownych, lokalnych zniszczeń oraz powodującą szybkie zużycie elementów tnących w tarczach TBM (Lyu i in., 2025). Węglanowe spoiwo piaskowców zapewniła średni poziom wytrzymałości, natomiast spoiwa ilaste i mieszane (ilasto-węglanowe) działają osłabiająco, powodując spadek ich fizyczno-mechanicznych właściwości. Najniższe

wartości obserwuje się w łupkach ilastych oraz węglanowych, w których obecność minerałów ilastych i rozwinięta łupliwość decydują o niskiej spoiwości i dużej anizotropii mechanicznej. W masywach skalnych zawierających te odmiany skał dominują mechanizmy ścinania i uplastycznienia, natomiast zjawiska kruche pęknięcia występują sporadycznie lub w ograniczonym zakresie (He i in., 2019; Yasir i in., 2020). Pod wpływem rosnących naprężeń w masywie skalnym mogą powstawać powierzchnie ścinania o łagodnym przebiegu, często z towarzyszącym wygładzeniem i zjawiskami tiksotropowymi. W skałach ilastych lub mułowcowych może dochodzić do pełzania i powolnych deformacji zależnych od czasu, co wpływa na długotrwałą stabilność wykopu tunelowego. Z punktu widzenia technologii TBM zużycie narzędzi jest ograniczone, a tempo postępu wiercenia może być wysokie, jednak ze względu na małą spoiwość i plastyczność skał może dochodzić do zapychania przestrzeni roboczej tarczy (Frenelus i in., 2022). Ponadto front wykopu w tych skałach wymaga stałej stabilizacji ciśnieniowej, a z uwagi na niską nośność skały i możliwość uplastycznienia materiału, konieczne jest stosowanie natychmiastowej obudowy pierścieniowej, często w postaci segmentów betonowych o wysokiej sztywności. Iłowce, pozbawione detrytycznych składników charakterystycznych dla mułowców (np. kwarcu i skaleni), jako skały bardzo drobnoziarniste mogą w sprzyjających warunkach diagenety osiągać parametry twardości i odporności mechanicznej porównywalne z mułowcami krzemionkowymi.

Przedstawione wyniki badań, wskazujące na wyraźne zróżnicowanie parametrów fizyczno-mechanicznych pomiędzy poszczególnymi odmianami litologicznymi skał, stanowiły podstawę do dalszej oceny występujących między nimi zależności statystycznych, wraz z wynikającymi z nich implikacjami dla praktyki inżynierskiej i interpreta-

cji geomechanicznej. Analiza porównawcza przeprowadzona dla zbioru wszystkich analizowanych próbek, na średnich wartościach poszczególnych parametrów, na podstawie tzw. modelu regresji z danych zbiorczych, wykazała dodatnie, najczęściej silne zależności pomiędzy parametrami wytrzymałościowymi (ściskanie, rozciąganie), ściernością (CAI) oraz twardością (CHI). Wyniki korelacji rang Spearmana dla całego zbioru próbek wskazują na bardzo silne dodatnie zależności pomiędzy wszystkimi analizowanymi parametrami ($\rho = 0,77-0,93$). Taki układ wskazuje, że w skałach o różnej litologii wzrost twardości i ścierności pociąga za sobą wzrost odporności na ściskanie i rozciąganie, co stanowi wyraźny przejaw wzajemnych powiązań mineralno-teksturalnych i mechanicznych w badanym materiale skalnym.

Najsilniejsze powiązanie występuje między wytrzymałością na ściskanie (R_c) a wytrzymałością na rozciąganie (R_t), osiągając wartość $\rho = 0,93$. Dowodzi ono, że obie te właściwości są w istocie kontrolowane przez te same czynniki litologiczne. Skały charakteryzujące się większą zwięzłością i jednorodnością wykazują zarówno wyższe wartości R_c , jak i R_t . Z geomechanicznego punktu widzenia oznacza to, że wzrost spójności międzyziarnowej i wytrzymałości spoiwa skutkuje równoległym wzrostem odporności na oba typy obciążeń. Porównywalny poziom zależności stwierdzono między R_c a twardością Cerchar (CHI) ($\rho = 0,92$), a nieco niższy ($\rho = 0,88$) między R_t a CHI. Wskazuje to twardość Cerchar jako właściwość bardzo silnie powiązaną z cechami mechanicznymi badanych skał. Nieznacznie niższe powiązania wykazano pomiędzy R_t a CAI ($\rho = 0,81$) oraz R_c a CAI ($\rho = 0,77$). Potwierdza to wcześniejsze wyniki badań (Kaspar, 2024) wskazujące, że związki CAI z parametrami wytrzymałościowymi nie zawsze są jednoznaczne z powodu wpływu litologicznych cech skały. Pomimo tego należy stwierdzić, że wysoki stopień wykazanych współzależności poszczególnych parametrów wskazuje, że twardość materiału skalnego i jego mineralno-teksturalne cechy determinują zarówno zachowanie skały pod obciążeniem, jak i jej odporność na zużycie mechaniczne. Przeprowadzona analiza wskazuje, że właściwości mechaniczne i tribologiczne badanych skał są ściśle powiązane i wynikają ze wspólnego zespołu cech litologicznych, w szczególności z rodzaju minerałów budujących szkielet ziarnowy oraz charakteru i udziału spoiwa.

Bardzo silną dodatnią korelację stwierdzono pomiędzy ściernością i twardością Cerchar ($\rho = 0,90$), co wskazuje, że obie te właściwości pozostają w ścisłym związku i są przejawami tych samych czynników litologicznych, a wśród nich głównie rodzaju spoiwa i stopnia związania przez nie składników skały. W kontekście pracy tarcz TBM oznacza to, że skały o wysokiej twardości Cerchar są równocześnie bardziej ścierające, co bezpośrednio przekłada się na intensywniejsze zużycie narzędzi skrawających oraz większe zapotrzebowanie energetyczne procesu urabiania. Zatem analiza tej korelacji ma istotne znaczenie praktyczne w prognozowaniu warunków drążenia tuneli oraz w doborze odpowiednich materiałów i technologii eksploatacyjnych dla tarcz TBM.

PODSUMOWANIE

Wyniki przeprowadzonych badań fizyczno-mechanicznych właściwości zróżnicowanych litologicznie skał fliszu

karpackiego jednoznacznie wskazują, że rodzaj spoiwa jest istotnym czynnikiem kontrolującym wartości ich parametrów wytrzymałościowych, twardości i ścierności. Dowodzą tego silne, dodatnie korelacje pomiędzy R_c , R_t , CHI i CAI ($\rho = 0,77-0,93$).

Najwyższe wartości parametrów fizyczno-mechanicznych uzyskano dla piaskowców i mułowców o spoiwie krzemionkowym oraz krzemionkowo-węglanowym. Skały te charakteryzują się wysoką zwięzłością i są stosunkowo jednorodne litologicznie, co przekłada się na ich dużą odporność mechaniczną oraz znaczne ścieranie przez nie narzędzi urabiających. W kontekście mechanicznego drążenia tuneli (np. z zastosowaniem tarcz TBM) oznacza to, że skały te, mimo korzystnych właściwości z punktu widzenia stabilności obudowy i jakości masywu skalnego, stanowią środowisko szczególnie wymagające pod względem technologii urabiania. Wysoka wytrzymałość i ścierność tych skał prowadzi do zwiększonego zużycia elementów tnących tarczy TBM, wyższych oporów skrawania oraz większego zapotrzebowania energetycznego. W praktyce oznacza to konieczność stosowania narzędzi o podwyższonej odporności na zużycie, optymalizacji parametrów pracy maszyny (m.in. prędkości obrotowej i nacisku na tarczę) oraz uwzględnienia w harmonogramie robót częstszych przerw konserwacyjnych. Skały o spoiwie węglanowym wykazują umiarkowane wartości parametrów mechanicznych – ich wysoka jednorodność zapewnia średnią zwięzłość i przeciętną twardość, co przekłada się na stosunkowo stabilne warunki geomechaniczne o umiarkowanym stopniu ścierania narzędzi. Znacznie niższe wartości parametrów wytrzymałościowych stwierdzono dla skał o spoiwie ilastym oraz ilasto-węglanowym. Charakteryzują się one wyraźną anizotropią mechaniczną, co czyni je materiałem problematycznym. Występowanie takich utworów wymaga ciągłej stabilizacji ciśnieniowej frontu robót, bieżącego monitoringu deformacji oraz natychmiastowego montażu obudowy pierścieniowej o dużej sztywności (Kaspar, 2024).

Stwierdzone w niniejszej pracy zależności dla skał ogólnie zidentyfikowanych litologicznie, z uwzględnieniem dominującego typu spoiwa, są zgodne z wynikami prowadzonych wcześniej szczegółowych badań petrograficznych w obrębie utworów fliszu karpackiego. Wykazywano w nich, że rodzaj spoiwa, obok udziału i rodzaju ziaren detrytycznych, wśród których zwykle dominuje kwarc, stanowi jeden z kluczowych czynników determinujących stabilność strukturalną i odporność mechaniczną skał (np. Kamieński i in., 1968; Peszat, Buczek-Pułka, 1984, 1994; Peszat, 1997; Bromowicz, 2002; Pinińska, 2003, 2004; Kłopotowska, Łukasiak, 2011; Figarska-Warchoł, Stańczak, 2016).

W przeciwieństwie do masywów stosunkowo jednorodnych, takich jak wapienne masywy Tatr Zachodnich czy Triestu (Bieniawski, 1989), flisz karpacki stanowi złożony kompleks naprzemianległych warstw o bardzo zróżnicowanej litologii i wytrzymałości. Ze względu na charakter depozycji i warunki diagenety, w jednym profilu mogą współwystępować utwory o diametralnie różnych właściwościach mechanicznych – twarde piaskowce o spoiwie krzemionkowym, osiągające R_c powyżej 100 MPa, są przetrwałymi iłowcami o wytrzymałości nawet kilkadziesiąt razy mniejszej. Taka zmienność prowadzi do istotnych różnic w zachowaniu się ośrodka skalnego, ujawniających się

nie tylko w makroskali, lecz także na odcinkach rzędu kilkudziesięciu centymetrów. W praktyce inżynierskiej oznacza to podwyższone ryzyko geologiczne oraz konieczność traktowania dokumentacji geologiczno-inżynierskiej jako modelu obciążonego znaczną niepewnością, co wymaga od wykonawcy robót tunelowych bieżącej weryfikacji założeń projektowych i ciągłej obserwacji warunków na froncie drążenia. Kluczowym uzupełnieniem takiego rozpoznania powinien być szeroki zakres badań laboratoryjnych obejmujący zarówno skały „mocne”, jak i „słabsze”. W przypadku tych ostatnich, szczególnie łupków i łupków iltowych, obserwuje się jednak istotne ograniczenia metodyczne – próbki tych skał, już na etapie poboru z masywu ulegającego odprężeniu, a także w trakcie transportu do laboratorium, mogą ulegać samoistnej dezintegracji. Powoduje to trudności w uzyskaniu miarodajnych wyników badań, co ogranicza możliwości interpretacyjne oraz wiarygodność parametrów stosowanych w ocenie masywu.

Silne zależności pomiędzy parametrami R_c , R_t , CHI i CAI są kluczowe dla oceny warunków geotechnicznych masywu i optymalizacji strategii tunelowania. Potwierdzają możliwość prognozowania właściwości mechanicznych skał także na podstawie tylko częściowego zestawu badań laboratoryjnych, co ma istotne znaczenie praktyczne w ograniczaniu czasu i kosztów ich realizacji.

Uzyskane wyniki mogą stanowić podstawę do opracowania modeli prognostycznych zachowania skał fliszowych w warunkach urabiania mechanicznego oraz do kalibracji klasyfikacji geomechanicznych RMR, Q i GSI na potrzeby tunelowania w Karpatach (Barton i in., 1974; Bieniawski, 1989). Wysoka niejednorodność fliszu karpacciego powoduje również, że jednoznaczny dobór parametrów pracy tarczy skrawającej TBM dla całego odcinka inwestycji jest utrudniony. Parametry urabiania powinny być dostosowywane dynamicznie do lokalnie zmieniających się warunków litologicznych. Takie podejście, łączące rozpoznanie geologiczne, badania laboratoryjne i bieżący monitoring, stanowi podstawowy warunek bezpiecznej i efektywnej realizacji budowy tuneli.

Autorzy składają podziękowanie Recenzentom oraz Redakcji *Przeglądu Geologicznego* za poświęcony czas oraz cenne uwagi dotyczące treści artykułu i jego formy.

LITERATURA

- AFNOR NF P 94-430-1 – Rock – Determination of the rock abrasiveness – Part 1: scratching test with a pointed tool. 4.10.2000 r.
- AFNOR XP P 94.412 – Détermination de l'indice de résistance à la pénétration par un foret. Éditée et diffusée par l'Association Française de Normalisation (2001).
- ASTM D3967-16 – Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens, Annual Book of ASTM Standards, vol. 4, ASTM, West Conshohocken, PA.
- ASTM D7625-10 – Standard test method for laboratory determination of abrasiveness of rock using the CERCHAR method.
- BARTON N., LIEN R., LUNDE J. 1974 – Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6 (4): 189–236.
- BIENIAWSKI Z. 1989 – Engineering Rock Mass Classifications. John Wiley & Sons.
- BILGIN N., PHILLIPS H., R., YAVUZ N. 1992 – The cuttability classification of coal seams and an example to mechanical plough application in ELI Darkkale Coal Mine. Proceedings of the 8th Coal Congress of Turkey, Zonguldak: 31–53.
- BIRKENMAJER K., OSZCZYPKO N. 1989 – Cretaceous and Paleogene lithostratigraphic units of the Magura Nappe, Krynica Subunit, Carpathians. *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, 59: 145–181.
- BROMOWICZ J. 1992 – Basen sedimentacyjny i obszary źródłowe piaskowców magurskich. *Zeszyty Naukowe Akademii Górniczo-Hutniczej*, 54: 1–120.
- BROMOWICZ J. 2002 – Petrograficzne i sedimentacyjne uwarunkowania zmienności właściwości fizyczno-mechanicznych kopaliny w złożach piaskowców magurskich. *Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, Konferencje*, 97 (33): 9–25.
- CHODYŃ R. 2002 – Budowa geologiczna strefy Siar w rejonie Mutnego na tle profilu litostratigraficznego płaszczowiny magurskiej między Zwardoniem a Suchą Beskidzką (polskie Karpaty fliszowe). *Przegląd Geologiczny*, 50 (2): 139–179.
- CIESZKOWSKI M., GOLONKA J., WAŚKOWSKA-OLIWA A., CHODYŃ R. 2007 – Type Locality of the Mutne Sandstone Member of the Jaworzynka Formation, Western Outer Carpathians, Poland. *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, 77 (3): 269–290.
- CIESZKOWSKI M., GOLONKA J., WAŚKOWSKA-OLIWA A., CHRUSTEK M. 2006 – Budowa geologiczna rejonu Sucha Beskidzka-Świnna Poręba (polskie Karpaty fliszowe). *Kwartalnik Akademii Górniczo-Hutniczej, Geologia*, 32 (2): 155–201.
- COVIELLO A., LAGIOIA R., NOVA R. 2005 – On the measurement of the tensile strength of soft rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 38: 251–273.
- FIGARSKA-WARCHOŁ B., STAŃCZAK G. 2016 – Wpływ petrograficznego zróżnicowania piaskowców krośnieńskich na ich właściwości fizyczno-mechaniczne w złożach Górka-Mucharz i Skawce (Beskid Mały). *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energii Polskiej Akademii Nauk*, 96: 37–56.
- FRENELUS W., PENG H., ZHANG J. 2022 – Creep Behavior of Rocks and Its Application to the Long-Term Stability of Deep Rock Tunnels. *Applied Science*, 12 (17), 8451; <https://doi.org/10.3390/app12178451>
- GOLONKA J. 2007 – Tektonika polskich Karpat fliszowych pomiędzy Bielskiem-Białą a Nowym Targiem. *Kwartalnik Akademii Górniczo-Hutniczej, Geologia*, 33 (4/1): 29–38.
- GUAN X., HUANG B., LI Z., MA X., LIANG B. 2023 – Characterizing Tensile Strength of Building Sandstone via Uniaxial Tensile, Compressive, and Flexural Bending Tests. *Materials*, 16 (9), 3440; <https://doi.org/10.3390/ma16093440>
- HACZEWSKI G. 1981 – Extent and lateral variation of individual turbidites in flysch horizons with Jasło Limestones, Krosno Beds, Polish Carpathians. *Studia Geologica Polonica*, 48: 13–27.
- HE W., CHEN K., HAYATDAVOUDI A., SAWANT K., LOMAS M. 2019 – Effects of clay content, cement and mineral composition characteristics on sandstone rock strength and deformability behaviors. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 176: 962–969; <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.02.016>
- JUCHA S. 1969 – Łupki jasielskie, ich znaczenie dla stratygrafii i sedymentologii serii menilitowo-krośnieńskiej (Karpaty fliszowe). *Prace Geologiczne Polskiej Akademii Nauk*, 52: 1–128.
- KAMIENSKI M., PESZAT C., RUTKOWSKI J., SKOCZYLAŚ-CISZEWSKA K. 1968 – O wykształceniu i własnościach technicznych piaskowców godulskich. *Zeszyty Naukowe Akademii Górniczo-Hutniczej, Geologia*, 12.
- KASPAR M. 2024 – Extended Evaluation of the CERCHAR Abrasivity Test and Its Application to Hard Rock Characterization. *Engineering Geology*, 329, 107020; <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107020>
- KŁOPOTOWSKA A., ŁUKASIAK D. 2011 – Zmienność wytrzymałościowa piaskowców w warunkach krystalizacji siarczanu sodu oraz oddziaływania dwutlenku siarki. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 446: 143–148.
- KOSZARSKI L. 1985 – Geology of the Middle Carpathians and Carpathian foredeep. Guide to Exc. 3. [W:] Carpatho-Balkan Geological Association XIII Congress, Kraków. Wydaw. Geologiczne, Warszawa.
- LAKIROUHANI A., BAKHSHI M., ZOHDİ A., MEDZVIECKAS J., GADEIKIS S. 2022 – Physical and mechanical properties of sandstones from Southern Zanjan, north-western Iran. *Baltica*, 35 (1): 23–36; <https://doi.org/10.5200/baltica.2022.1.2>
- LYU X., CHEN Y.L., LIAO S., FERNANDEZ-STEEGER T.M. 2025 – Wear Prediction and Mechanism Study of Tunnel Boring Machine Disc Cutter Breaking in Hard-Soft Rock Considering Thermal Effect. *Applied Sciences*, 15 (8), 4183; <https://doi.org/10.3390/app15084183>
- OSZCZYPKO N. 1973 – The geology of the Nowy Sącz Basin (The Middle Carpathians). *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 273: 101–190.
- OSZCZYPKO N. 1992 – Rozwój basenu magurskiego w górnej kredzie i paleogenie. *Przegląd Geologiczny*, 7: 397–404.
- OSZCZYPKO N., DUDZIAK J., MALATA E. 1990 – Stratygrafia osadów płaszczowiny magurskiej (kreda–paleogen) w Beskidzie Sądeckim, Karpaty zewnętrzne. *Studia Geologica Polonica*, 47: 109–163.
- OSZCZYPKO N., ŚLĄCZKA A., ŻYTKO K. 2008 – Regionalizacja tektoniczna Polski – Karpaty zewnętrzne i zapadlisko przedkarpackie. *Przegląd Geologiczny*, 56 (10): 927–935.

- PESZAT C. 1997 – Petrografia i właściwości surowcowe fluksoturbidytowo-turbidytowych piaskowców glaukonitowych warstw krośnieńskich rejonu Bóbrka–Polany. Biuletyn Instytutu Geologicznego, 376: 93–120.
- PESZAT C. 1999 – Właściwości strukturalno-teksturalne i geneza spoiw węglanowych gruboławicowych piaskowców jednostki śląskiej (Polskie Karpaty fliszowe). Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 15 (1): 65–104.
- PESZAT C., BUCZEK-PULKA M. 1984 – Zmienność właściwości fizyczno-mechanicznych budowlanych piaskowców istebniańskich obszaru Karpat. Zeszyty Naukowe Akademii Górniczo-Hutniczej, Geologia, 10 (1): 5–34.
- PESZAT C., BUCZEK-PULKA M. 1994 – Uwarunkowania litologiczno-facjalne zmienności właściwości fizyczno-mechanicznych piaskowców dolnokrośnieńskich jednostki śląskiej na wschód od Osławy. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 10 (3): 355–397.
- PINIŃSKA J. (red.) 2003 – Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał: Karpaty fliszowe. Katalog, Cz. IV, T. 7. Zakład Geomechaniki Instytutu Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, Wydział Geologii Uniwersytetu Warszawskiego.
- PINIŃSKA J. (red.) 2004 – Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał. Część IV – Karpaty fliszowe. Objasnienia i interpretacja. Zakład Geomechaniki Instytutu Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, Wydział Geologii Uniwersytetu Warszawskiego.
- PLINNINGER R.J., RESTNER U. 2008 – Abrasivity testing, Quo Vadis? – A commented overview of abrasivity testing methods. Geomechanics and Tunnelling, 1 (1): 61–70.
- PN-EN 1926:2007 – Metody badań kamienia naturalnego – Oznaczanie jednoosiowej wytrzymałości na ściskanie.
- PN-G-04302:1997 – Skały zwięzłe – Oznaczanie wytrzymałości na rozciąganie metodą poprzecznego ściskania.
- PN-G-04307:1998 – Skały zwięzłe – Oznaczanie wytrzymałości na ściskanie z użyciem próbek nieforemnych.
- POPRAWA D., RĄCZKOWSKI W. 1996 – Przewodnik LXVII Zjazdu Polskiego Towarzystwa Geologicznego „Beskidy zachodnie nowe spojrzenie na budowę geologiczną i surowce mineralne”. Państwowy Instytut Geologiczny, Oddział Karpacki, Kraków.
- REMBIŚ M. 2002 – Spoiwa piaskowców ropianieckich i magurskich między Rabką a Grybowem na tle ich warunków sedimentacji i przemian diagenetycznych. Prace Geologiczne, 149.
- SŁOMKA T. 1995 – Głębokomorska sedimentacja silikoklastyczna warstw godulskich Karpat. Prace Geologiczne Polskiej Akademii Nauk, 139.
- ULUSAY R., HUDSON J. A. 2007 – Suggested Methods for Determining Tensile Strength of Rock Materials. [W:] “The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974–2006”, Kozan Ofset Matbaacilik San. Ve Tic. Sti., Ankara, Turkey: 179–183.
- YASIR S.F., AWANG H., AYUB M.I.H. 2020 – The relationship of Sandstone’s strength with mineral content and petrographic characteristics in Sungai Tekai, Jerantut, Pahang. Advances in Civil Engineering and Science Technology, AIP Conference Proceedings, 2020 (1), 020010; <https://doi.org/10.1063/1.5062636>
- ŻYTKO K., ZAJĄC R., GUCIK S., RYŁKO W., OSZCZYPKO N., GARLICKA I., NEMČOK J., ELIÁŠ M., MENČIK E., STRÁNIK Z. 1988 – Map of the tectonic elements of the Western Outer Carpathians and their foreland. [W:] Poprawa D., Nemčok J. (red.), Geological Atlas of the Western Outer Carpathians and their Foreland. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa/GUDŠ Bratislava/Uug Praha.

Praca wpłynęła do redakcji 14.11.2025 r.

Akceptowano do druku 23.12.2025 r.