

Andrzej Domonik

Anizotropia właściwości wytrzymałościowych skał fliszowych jako efekt oddziaływania naprężeń na przykładzie piaskowców cergowskich z Komańczy

**Anisotropy of geomechanical properties of flysch
sandstones as an effect of influence of stresses
on example of cergowskie sandstones from Komańcza**

Streszczenie: Właściwości geomechaniczne masywu skalnego w dużej mierze zależą od reżimu tektonicznego w regionie. Oddziaływanie naprężeń odzwierciedla się w postaci anizotropii. Anizotropia ta przejawia się między innymi kierunkowym pękaniem powodowanym przez pierwotne mikropęknięcia obecne w próbce skalnej. Te mikropęknięcia wywołane są paleonaprężeniami związanymi z wypiętrzaniem się Karpat. Określono przestrzenną orientację mikropęknięć za pomocą defektoskopii ultradźwiękowej, jak również kierunkowe osłabienia budowy wewnętrznej próbek skalnych za pomocą testów wytrzymałości na rozciąganie metodą brazylijską. Orientacja tych osłabień porównana została z kierunkami jawnych spękań ciosowych określonych w terenie.

Słowa kluczowe: cios, paleonaprężenia, anizotropia, fala podłużna, wytrzymałość na rozciąganie

Abstract: Geomechanical properties of rock massif depend mostly on tectonic regime in the region. Paleostresses induce anisotropy. This anisotropy manifests itself, e.g., in directional cracking caused by preexisting microcracks in rock samples. These microcracks are created by paleostresses that are connected to uplift of Carpathian Mountains. Spatial location of microcracks was defined using ultrasonic testing and directional weaknesses in rock samples was determined by brazilian testing. The orientations of these structural weaknesses was compared with directions of natural joints measured in terrain.

Key words: joints, paleostresses, anisotropy, longitudinal wave, tensile strength

Wprowadzenie

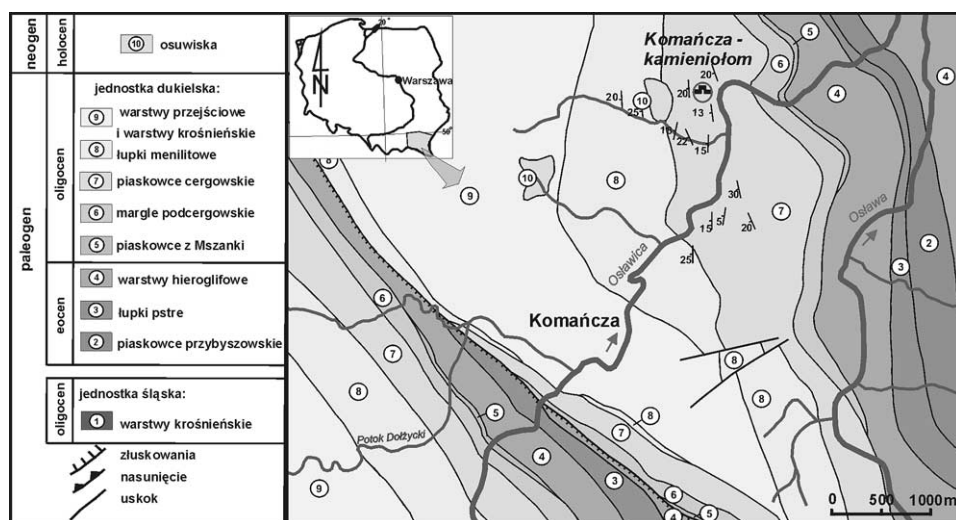
Właściwości geomechaniczne każdego kompleksu skalnego uwarunkowane są historią geologiczną regionu. Z punktu widzenia mechaniki są to ośrodki niejednorodne, nieciągłe i anizotropowe, gdyż ich struktura i tekstura ukształtowane zostały, często etapowo, w toku złożonych procesów sedymentacyjnych i diagenetycznych. Elementy strukturalne, np. wielkość ziaren, typ spoiwa, oraz cechy tekstury, jak np. kierunkowość ułożenia minerałów, obecność porów, powodują zmienność szeregu właściwości ośrodka skalnego. Oprócz cech strukturalnych i teksturalnych istotny wpływ na anizotropię ma także lokalny reżim tektoniczny, który w zależności od rozkładu i intensywności naprężeń wywołuje jawne spękania ciosowe lub osłabienia budowy wewnętrznej; ujawniają się one w postaci spękań analogicznych do spękań ciosowych podczas dalszego odprężania lub pod obciążeniem. Szczególnie ten typ anizotropii ma doniosłe znaczenie, ponieważ wartości określanych parametrów wytrzymałościowych, w pozornie izotropowej próbce skalnej, mogą zmieniać się znacznie w zależności od kierunku badania. Spękania ciosowe to występujące seryjnie, penetratywne spękania systematyczne, przecinające pojedyncze ławice bez przemieszczeń lub z niewielką tendencją do ruchu przesuwczego, prostopadle do uławicenia (Mastella, 1972; Jaroszewski, 1972; Daldlez, 1994; Dune, Hancock, 1994). W Karpatach Zewnętrznych (fliszowych) spękania ciosowe to jawne ślady historycznych pól naprężeń powstałych w wyniku oddziaływania kompresji, przede wszystkim horyzontalnej, związanej z nasuwaniem się płaszczowin.

Przeprowadzone badania miały na celu wykazanie, za pomocą testów wytrzymałości na rozciąganie oraz badań z użyciem defektoskopii ultradźwiękowej, istnienia przestrzennie zorientowanych defektów, mikroszczelin powodujących kierunkowe obniżenie wytrzymałości na rozciąganie i kierunkowe tłumienie fali ultradźwiękowej oraz że orientacja tych osłabień jest zgodna z orientacją spękań ciosowych określonych w terenie.

Zarys budowy geologicznej

Skąły wytypowane do badań to piaskowce cergowskie (fliszowe), pochodzące ze znanego odsłonięcia w miejscowości Komańcza (*Komańcza kamieniołom*) w Beskidzie Niskim, należące do dukielskiej jednostki tektonicznej (ryc. 1).

Ogniwo piaskowców i towarzyszących im łupków cergowskich wraz z serią rogowcową dolną, margłami podcergowskimi i łupkami menilitowymi zalicza się do warstw menilitowych. Termin piaskowce cergowskie wprowadził Teisseyre (1930) w odniesieniu do kompleksu gruboławicowych piaskowców w obrębie łupków menilitowych. Najpełniejszy profil obserwuje się w brzeżnej części jednostki dukielskiej, a największą miąższość osiągają w fałdzie brzeżnym w okolicy Wisłoka Wielkiego (300 m) oraz w fałdzie Piotrusia (350 m). W rejonie Komańczy miąższość piaskowców osiąga od 200 do 250 m (Ślącza, 1971).



Ryc. 1. Mapa geologiczna okolic Komańczy (Ślącza, 1971, zmodyfikowana)

Fig. 1. Geologic map of the Komańcza region (Ślącza, 1971, modified)

Piaskowce cergowskie z odsłonięcia w Komańczy wybrano ze względu na bardzo dobrze wykształcone spękania ciosowe, a także dlatego że skały te są litologicznie i petrograficznie jednorodne oraz makroskopowo anizotropowe pod względem teksturalnym.

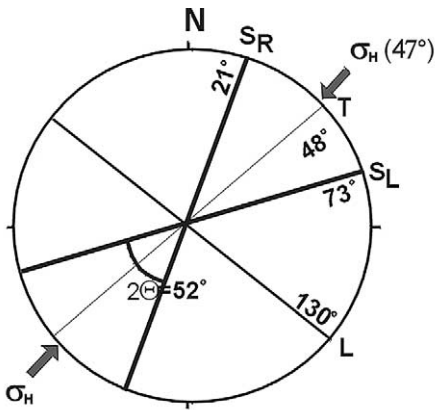
Metodyka badań terenowych i laboratoryjnych

Badania laboratoryjne poprzedzone były obserwacjami i pomiarami spękań ciosowych w warstwach piaskowców odsłaniających się w kamieniołomie. Pomiary wykonywano z dokładnością do $\pm 2^\circ$. Zmierzono blisko 100 powierzchni spękań ciosowych. Analizę spękań przeprowadzono, stosując ogólne zasady dotyczące opracowań statystycznych ciosu (Mastella, Konon, Mardal, 1996).

Diagramy położenia dominant zespołów ciosowych przedstawiono na rycinie 2. Zespoły ciosowe wykazują dużą stałość orientacji biegów. Dwa z nich oznaczone jako S_R i S_L są skośne do osi fałdów, w których występują, zespół T jest niemal prostopadły do osi tych struktur, zaś zespół L jest w różnym stopniu równoległy do nich. Kąt ostry pomiędzy zespołami S_R i S_L nazywany jest podwójnym kątem ścinania (2Θ), a dwusieczna tego kąta wyznacza położenie osi maksymalnej kompresji σ_H (Bucher, 1920, 1921; Ramsay, Huber, 1987) i ma w przybliżeniu stały kierunek. Jego średnia orientacja w piaskowcach cergowskich w Komańczy wynosi 47° .

Przygotowanie próbek do badań

Do badań geomechanicznych pobrano monolity skalne ściśle zorientowane względem głównych kierunków kompresji w polu trójosiowym $\sigma_H > \sigma_V > \sigma_h$ przy założe-



Ryc. 2. Diagram położenia dominant zespołów ciosu. Grube linie odpowiadają zespołom ciosu diagonalnego (S_R i S_L), cienkimi liniami oznaczono zespoły (T i L), strzałki wskazują kierunek osi maksymalnej kompresji s_H , 2Θ oznacza podwójny kąt ścinania

Fig. 2. Diagram showing orientation of joint sets (dominants). Thick lines indicate the diagonal system (S_R & S_L), and the thin one indicates other joint sets (T & L), arrows indicate orientation of maximum stress axis s_H , 2Θ double shear angle

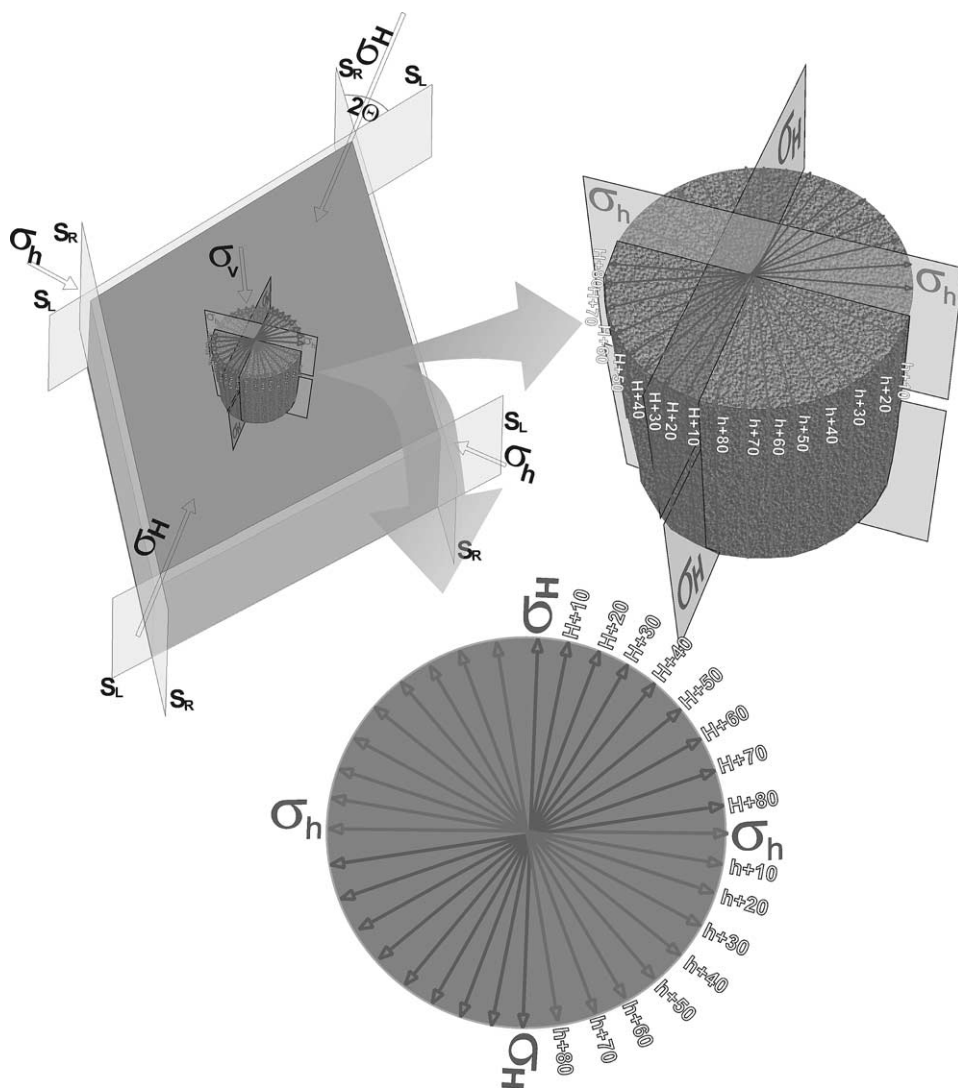
równoległa do osi największej kompresji, $H+10 \div H+80$ – płaszczyzny orientowane o kolejne 10 stopni względem σ_H , σ_h – płaszczyzna równoległa do osi najmniejszej kompresji, $h+10 \div h+80$ – płaszczyzny orientowane co 10 stopni względem σ_h (ryc. 3). Wzdłuż owych 18 kierunków mierzono prędkość fali podłużnej oraz były to kierunki płaszczyzn wymuszonego zniszczenia w badaniach wytrzymałości na rozciąganie.

Metodyka badań ultradźwiękowych

Zastosowana metodyka polegała na pomiarze prędkości przechodzenia ultradźwiękowej fali podłużnej przez próbkę wzdłuż opisanych wyżej kierunków. Badania wykonano przy użyciu defektoskopu UMT-12 firmy Unipan z oprogramowaniem typu ULTRAMET, wyposażonego w głowice o częstotliwości 1 MHz. Zgodnie z założeniami defektoskopii ultradźwiękowej, każda mikroszczelina prostopadła lub nachylona do wiązki pod pewnym kątem osłabia lub całkowicie eliminuje impuls przejścia fali, jaki normalnie występuje w obszarze bez defektów. Defektoskopia jest zatem cennym narzędziem pozwalającym wychwycić nie tylko samą obecność mikrode-

niu ścięciowej genezy spękań S_R i S_L (Dunne, Hancock, 1994; Mastella, Zuchiewicz, 2000). Ponadto przyjęto (za Boretti-Onyszkiewicz, 1968), że w skałach, w których obecne są jawne spękania (ciosowe) istnieją także ukryte, „zapamiętane” przez skałę powierzchnie ułatwionego podziału, które są inicjalnymi załączkami spękań o podobnej przestrzennej orientacji co spękania ciosowe.

W monolicie oś największego ściskania s_H została określona z dwusiecznej kąta ostrego pomiędzy zespołami ciosowymi S_R i S_L . Osie kompresji σ_H i σ_h to w monolicie składowe poziome, prostopadłe do siebie, σ_v reprezentuje składową pionową (ryc. 3). Przy tak opisanym monolicie wszystkie próbki wycięto w kierunku zgodnym z osią σ_v . Ogółem przygotowano 96 cylindrycznych, zorientowanych próbek, o wysokości i średnicy 5 cm, z których do dalszych badań przeznaczono 90. W każdej próbce wyznaczono osiemnaście kierunków płaszczyzn zorientowanych względem osi naprężeń, a także względem spękań ciosowych. Płaszczyzny orientowano co 10 stopni: σ_H – płaszczyzna

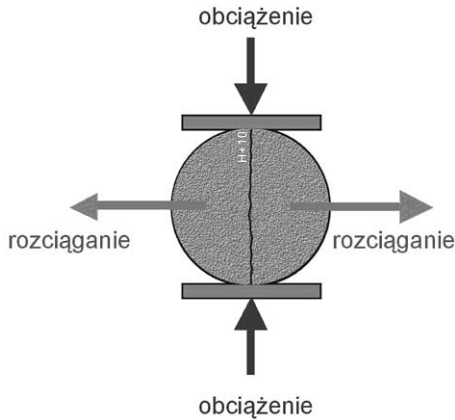


Ryc. 3. Kierunki pomiarowe w badaniach ultradźwiękowych to jednocześnie orientacje płaszczyzn wymuszonego zniszczenia w badaniach wytrzymałości na rozciąganie
 Fig. 3. Measurement plane directions of ultrasonic investigations also mean orientation of the forced failure plane

fektów, ale również ich przestrzenne rozmieszczenie w próbce. Daje to możliwość korelacji orientacji mikrospekąk z kierunkami jawnych spekąk obserwowanych w terenie. Natomiast nieniszczący charakter tej metody zapewnia powtarzalność takich badań.

Metodyka badań wytrzymałości na rozciąganie

Próbki poddawane były testowi wytrzymałości na rozciąganie (R_r) metodą brazylijską. W tej metodzie obciążanie próbki w kształcie walca prostopadle do osi próbki wywołuje pęknięcie wzdłuż powierzchni przechodzącej przez oś walca i powodowana jest w głównej mierze przez siły rozciągające (ryc. 4). Metoda ta może zatem modelować procesy nawiązujące do powstawania ciosu, ponieważ powierzchnie spękań otrzymane po takim badaniu to ekstensyjne spękania rozdzielcze, genetycznie tożsame ze spękaniami zespołów S_R i S_L , które mimo iż założone zostały przy udziale sił ścinających, to ujawniały się już jako spękania ekstensyjne (Dunne, Hancock, 1994; Mastella, Zuchiewicz, 2000).



Ryc. 4. Kierunek obciążania próbki w kształcie walca jest prostopadły do osi próbki. Taki sposób obciążania powoduje, że próbka pęka w sposób rozdzielczy
 Fig. 4. Direction of loading is perpendicular to the axis of cylinder specimen. That kind of loading cause dividing in two extension halves

Wytrzymałość na rozciąganie (R_r) wyznaczano dla siły krytycznej, przy której następowało zniszczenie (F_{max}), zgodnie z formułą:

$$R_r = \frac{2 \cdot F_{max}}{\pi \cdot D \cdot H}$$

gdzie: F_{max} – maksymalna siła, przy której następuje zniszczenie (N),

D – średnica próbki (m),

H – wysokość próbki (m).

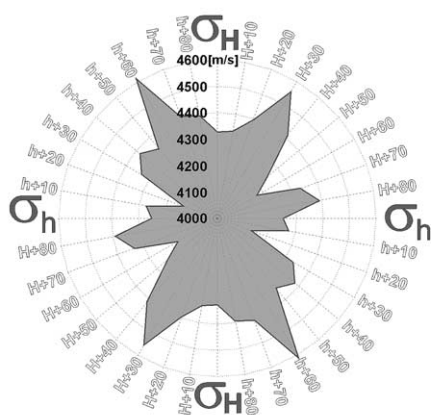
Badanie przeprowadzono w prasie sztywnej MTS 815 zgodnie z procedurą stosowaną w badaniach właściwości i odkształcalności skał (Pinińska 1994, 1995, 2003). W maszynie wytrzymałościowej kolejne próbki umieszczano tak, aby orientacja otrzymanych po teście powierzchni wymuszonego zniszczenia była zgodna z orientacją zaprojektowanych płaszczyzn: H, H+10, H+20 itd. (ryc. 3). W sumie testom poddano 90 próbek (po 5 dla każdej z 18 zaprojektowanych płaszczyzn). Próbkę mocowano w specjalnych uchwytach, dzięki którym punkty przyłożenia siły na powierzchniach próbek znajdowały się bezpośrednio nad sobą w jednej płaszczyźnie. Próbki obciążano ze stałym przyrostem obciążenia 60 kN/min.

Rezultaty badań

Badania ultradźwiękowe

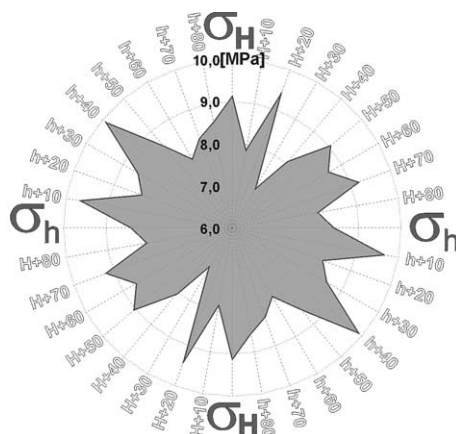
Obserwuje się wyraźną zależność pomiędzy kierunkiem pomiaru a wartością prędkości fali podłużnej. Zależność tę graficznie ilustruje diagram V_p (ryc. 5) wykreślony dla średnich arytmetycznych wartości prędkości.

Maksymalne wartości obserwuje się dla kierunków: H+30, h+60 oraz H+80. Kierunki te odpowiadają przedziałom przyjmowanych wartości przez zespoły ciosowe odpowiednio: S_L , S_R i L . Widoczna na diagramie zależność oznacza, że badane skały wykazują anizotropię akustyczną, która przejawia się zróżnicowaniem osiąganych prędkości fali podłużnej w zależności od kierunku pomiaru. W kierunkach zgodnych z kierunkami powierzchni ciosowych, przede wszystkim S_L i S_R , a w mniejszym stopniu L , fala podłużna (V_p) jest znacznie mniej tłumiona (osiąga wyższe wartości prędkości). Taka wyraźna korelacja pozwala wysnuć wniosek, iż jawne spękania obserwowane w terenie mają swoje odzwierciedlenie także w skali mikro, w pozornie izotropowej próbce, w formie zbiorów mikroszczelin, których przestrzenną orientację można aproksymować w postaci płaszczyzn, a kierunki tych płaszczyzn są zgodne z kierunkami jawnych spękań ciosowych.



Ryc. 5. Diagram rozkładu prędkości fali podłużnej (V_p) w zależności od kierunku pomiarowego wykreślony dla wartości średnich arytmetycznych

Fig. 5. Diagram of distribution of the longitudinal wave speed (V_p) depending on directions of orientation of the forced failure plane drawn for arithmetic mean values



Ryc. 6. Diagram rozkładu wytrzymałości na rozciąganie (R_t) w zależności od orientacji płaszczyzny wymuszonego zniszczenia, wykreślony dla wartości średnich arytmetycznych

Fig. 6. Diagram of distribution of the tensile strength (R_t) depending on orientation of measurement drawn for arithmetic mean values

Wytrzymałość na rozciąganie R_r

Wytrzymałość, podobnie jak prędkość fali podłużnej, w różnym stopniu zależy od kierunku pomiarowego (orientacji obciążenia). Najniższe wartości wytrzymałości (R_r) uzyskano dla płaszczyzn wymuszonego zniszczenia, których orientacja była zgodna z orientacją powierzchni ciosowych S_L (H+30), S_R (h+60) i L (H+80). Testy wytrzymałości na rozciąganie wskazują więc, że zróżnicowanie wytrzymałości piaskowców cergowskich zależy od kierunku działania obciążenia (ryc. 6).

Uzyskane wartości wskazują zatem na istnienie zwiększonej podatności na pękanie wzdłuż kierunków zgodnych przede wszystkim ze ścięciowymi zespołami ciosowymi (S_R i S_L), ale także L .

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych można wnioskować, że w próbkach badanych skał występuje silna anizotropia. Anizotropia ta wywołana jest przede wszystkim oddziaływaniem historycznego pola naprężeń. Rozkład tego pola, odtwarzany na podstawie pomiarów orientacji powierzchni zespołów spękań ciosowych w terenie, znajduje także swoje odbicie w skali próbki laboratoryjnej w postaci przestrzennie zorientowanych osłabień i jest swego rodzaju teksturą, wynikającą z nagromadzenia defektów (mikronieciągłości) w określonych płaszczyznach. Potwierdziły to badania defektoskopowe, które wykazały, że najsilniejsze tłumienie impulsu fali podłużnej występuje, gdy kierunki pomiarowe nie pokrywają się z kierunkami powierzchni ciosowych, czyli w przypadku, kiedy kierunek impulsów fali był prostopadły lub w różnym stopniu nachylony do tych płaszczyzn. Natomiast jeśli kierunek przejścia fali podłużnej był równoległy do płaszczyzn, których kierunki są zgodne z kierunkami powierzchni ciosowych S_R , S_L i L , to tłumienie było najniższe.

Podobną korelację dostrzega się także w rozkładzie wartości wytrzymałości na rozciąganie. Najniższe wartości R_r odpowiadają tym płaszczyznom wymuszonego zniszczenia, które są kierunkowo zgodne z orientacją zespołów ciosowych (S_R , S_L i L), wskazując wyraźnie na istnienie osłabień budowy wewnętrznej (zbiorów mikronieciągłości). Te przestrzennie zorientowane powierzchnie ułatwionego podziału, najprawdopodobniej odpowiadają wstępnemu stadium ciosu, czyli zakładaniu ciosu w strefie wzmożonych naprężeń, i są odpowiedzialne za aktualną anizotropię właściwości mechanicznych badanych skał.

Literatura

- Boretti-Onyszkiewicz W., 1968. Anizotropia ciosowa piaskowców fliszowych Podhala Zachodniego. *Biul. Geol. UW* 10: 115–153.
- Bucher W.H., 1920. The mechanical Interpretation of joints. Pt. 1. *J. Geol.* 28: 1–28.
- Bucher W.H., 1921. The mechanical Interpretation of joints. Pt. 2. *J. Geol.* 29: 1–28.

- Dadlez R., Jaroszewski W., 1994. Tektonika. PWN, Warszawa.
- Dunne W.M., Hancock P.L., 1994. Paleostress analysis of small scale brittle structures. W: Hancock P.L. (red.), Continental deformation. Pergamon Press.
- Jaroszewski W., 1972. Drobnostukturalne kryteria tektoniki obszarów nieorogenicznych na przykładzie północno-wschodniego obrzeżenia mezozoicznego Gór Świętokrzyskich. Stud. Geol. Pol. 38: 1–210.
- Mastella L., 1972. Independence of joint density and thickness of layers in the Podhale flysh. Bul. Acad. Pol. Ser. Geol. Geogr. 3, 20: 187–196.
- Mastella L. Konon, A. Mardal T., 1996. Tektonika fliszu podhalańskiego w dolinie Białki. Przeg. Geol. 12: 494–1194.
- Mastella L., Zuchiewicz W., 2000. Jointing in the Dukla Nappe (Outer Carpathians, Poland): an attempt at paleostress reconstruction. Geol. Quarter. 44: 377–390.
- Pinińska J., 1994. Procesy deformacji i pęknięcia cylindrycznych próbek skalnych. Prace naukowe Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej. Konferencje nr 33.
- Pinińska J., 1995. Procesy kruchego pęknięcia skał osadowych przy jednoosiowym ściskaniu ze stałą prędkością odkształcenia. Przeg. Geol. 43, 7: 546–553.
- Pinińska J., 2003. Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał. Cz. IV. Karpaty fliszowe. T. 7. Katalog. Wyd. Tinta, Warszawa.
- Ramsay J.G., Huber M.I., 1987. The techniques of modern structural geology. Academic press Brace Jovanovich Publishers, 1–2.
- Ślęczka A., 1971. Geologia jednostki dukielskiej. Prace Państw. Inst. Geol. 63: 1–76.
- Teisseyre H., 1930. Sprawozdanie z badań geologicznych wykonanych w roku 1929 w okolicy Dukli (arkusz Jasło – Dukla). Spraw. Państw. Inst. Geol. t. 5, nr 3/4. Warszawa.

