

OKREŚLANIE ZWROTU ŚCINANIA

UKD 551.243

Jednym z zadań geologii strukturalnej jest określenie kinematyki (odkształceń, przemieszczeń i rotacji) pasm orogenicznych. W tym celu poznaje się styl i orientację przestrzenną różnych struktur tektonicznych oraz sekwencję ich deformacji. Pospolitymi strukturami wśród zdeformowanych skał krystalicznych pasm orogenicznych są strefy ścinania (*shear zones*), opisane między innymi w pracach (3, 4, 5, 9, 12, 14, 19, 28, 31, 34, 35). W strefach ścinania, szczególnie w warunkach deformacji podatnych (*ductile*), rozwija się na ogół wyraźnie wykształcona foliacja mylonityczna, a na jej powierzchniach — lineacja mylonityczna, często określaną jako lineacja ekstensyjna (10). Lineacja ta wyrażona przez kierunkowe wyciągnięcie ziarn i agregatów mineralnych wyznacza w przybliżeniu kierunek przemieszczenia (transportu tektonicznego) w strefach ścinania (10, 20). Zwrot przemieszczenia w tych strefach może być określony na podstawie różnorodnych, asymetrycznych struktur tektonicznych, powstałych podczas deformacji ze ścinania (9, 14, 18, 20, 26, 30, 31, 35).

Na wstępie zaznaczyć należy, że kryteria strukturalne, określające zwrot ścinania, nie były dotychczas uwzględniane w badaniach strukturalnych w Polsce, chociaż są obecnie szeroko wykorzystywane w krajach wysoko rozwiniętych. Świadczyć o tym może między innymi bogata literatura na ten temat z ostatnich kilku lat. Dlatego też celem tego krótkiego artykułu jest zapoznanie czytelnika polskiego z różnorodnymi kryteriami strukturalnymi, które służą do oceny zwrotu ścinania. W artykule pominięto zagadnienia dotyczące genezy tych struktur oraz opuszczono przykłady regionalne, koncentrując się na morfologii struktur, ich kinematycznej interpretacji oraz niejednoznaczności takich interpretacji.

UWAGI OGÓLNE

Obserwacje struktur na podstawie, których ustala się zwrot ścinania należy wykonywać na powierzchniach równoległych do płaszczyzny XZ elipsoidy odkształcenia końcowego ($X > Y > Z$). Powierzchnie te odpowiadają przekrojom równoległym do lineacji ekstensyjnej L_e i prostopadłym do powierzchni foliacji mylonitycznej S_m (ryc. 1). Powierzchnie foliacji mylonitycznej S_m są również określane jako powierzchnie ścinania C (np. 2, 8, 9, 18).

Asymetryczne struktury w szerokim zakresie skał powstały podczas głównego, odkształcenia niekoaksjalnego (rotacyjnego) (8, 13, 16). Struktury te charakteryzują się następującymi cechami (20):

1) symetrią jednoosiową; ich płaszczyzna symetrii jest równoległa do lineacji ekstensyjnej L_e i prostopadła do foliacji mylonitycznej S_m (C), czyli płaszczyzną symetrii jest płaszczyzna XZ (ryc. 1),

2) stałym, nie zmieniającym się zwrotem asymetrii, zarówno w różnych częściach poszczególnych odsłoneń, jak i między odległymi od siebie partiami w rozległych strefach ścinania,

3) synchronicznym rozwojem różnych struktur asymetrycznych i stref ścinania, wyrażonych powstaniem foliacji mylonitycznej S_m (=C).

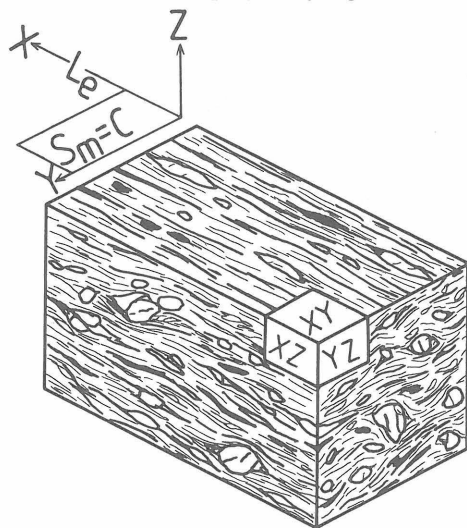
Ponizej przedstawiono główne cechy wskazujące zwrot rotacji dla poszczególnych asymetrycznych struktur tektonicznych. Kolejno zostaną omówione następujące struktury wskaźnikowe: defleksje, fałdy śródfoliacyjne, „porfiroklasty”, struktury typu „domino”, struktury ekstensyjne, struktury SC, asymetria więzby, spēkania kuliste i inkluzje tektoniczne.

DEFLEKSJE

Odchylenia (defleksje) w przebiegu struktur planarnych i (lub) liniowych, powstałych przed deformacją ścięciową, są jednym z najpospolitszych i najbardziej wiarygodnych kryteriów oceny zwrotu ścinania. Defleksje mogą być badane w szerokim zakresie skał obserwacji, od map geologicznych i strukturalnych aż po mikrostruktury, np. kliważe krenulacyjne. Kryterium to można podzielić ze względu na charakter uginanej, starszej powierzchni anizotropowej na:

- 1) defleksje foliacji,
- 2) defleksje powierzchni wskaźnikowych.

Defleksje foliacji S zaznaczają się wyraźnie na kontaktach ze strefami ścinania, gdzie foliacja S ulega rotacji do prawie równoległości z powierzchniami granicznymi strefy ścinania (ryc. 2). W wyniku tego procesu powstaje charakterystyczny sigmoidalny obraz przebiegu foliacji S, który pozwala określić zwrot ścinania. I tak defleksja (ugięcie) foliacji S zgodna z ruchem wskazówek zegara w pobliżu strefy ścinania wskazuje na prawoskrętną (dekstralną) strefę ścinania. Defleksja foliacji S w kierunku



Ryc. 1. Blokdiagram ilustrujący orientację lineacji ekstensyjnej (L_e), równoległej do osi X, na powierzchni foliacji mylonitycznej C (S_m), zorientowanej równoległe do płaszczyzny XY elipsoidy odkształcenia końcowego, w blastomylonitcie gnejsowym; płaszczyzna XZ jest wykorzystywana do określenia zwrotu ścinania

Fig. 1. Blokdiagram showing attitude of L_e extensional lineation, which is commonly parallel to the X axes on the C-plane (S_m) of mylonitic foliation in a blastomylonitic gneiss; S_m (C) mylonitic foliation is thought to be nearly parallel to the XY plane of finite strain ellipsoid; the XY plane is using to deduce the sense of shear

ku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara określa lewoskrętny (sinistralny) zwrot ścinania.

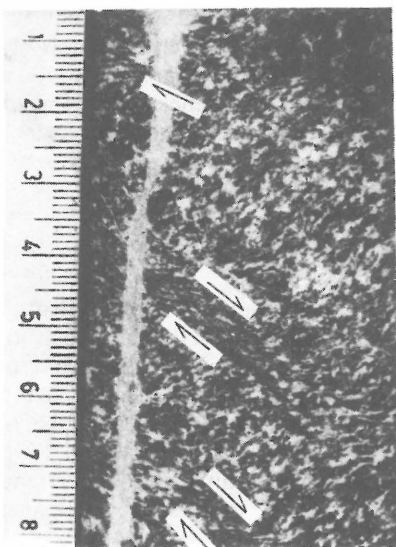
Powyższa reguła ma jednak pewne ograniczenia. Dotyczy to przede wszystkim stref ścinania, które charakteryzują się skośną orientacją kierunku wektora przemieszczeń (ryc. 3). W takich przypadkach i jeżeli foliacje S i/lub powierzchni wskaźnikowe są nachylone konsekwentnie w kierunku nachylenia wektora przemieszczeń, to defleksja tych powierzchni, np. na mapie, może wyznaczać przeciwny niż w rzeczywistości zwrot ścinania. Konieczna jest w takiej sytuacji pełna 3-wymiarowa analiza zwrotu defleksji foliacji S lub pasywnych powierzchni wskaźnikowych za pomocą tzw. metody defleksji (ang. *deflection method*), opracowanej ostatnio przez J. Wheeler'a (32).

Defleksje foliacji są wykorzystywane do określenia zwrotu ścinania w szerokim zakresie skal obserwacji, szczególnie przy analizie map geologicznych i strukturalnych. Najważniejszym warunkiem dla tego kryterium strukturalnego jest możliwość obserwacji strefy ścinania z sąsiednią domeną, pozbawioną zasadniczo odkształceń ścinających.

W przypadku wykorzystania kryterium defleksji powierzchni wskaźnikowych nie jest konieczne spełnienie powyższego warunku. Sama forma powierzchni wskaźnikowej (np. sigmoidalna) może być wykorzystana do określenia zwrotu ścinania. Ograniczeniem tej metody, jest jednak dość rzadkie występowanie pasywnych, przedścięciowych powierzchni wskaźnikowych, wyznaczonych przez żyły, dajki, itp.

FAŁDY ŚRÓDFOLIACYJNE

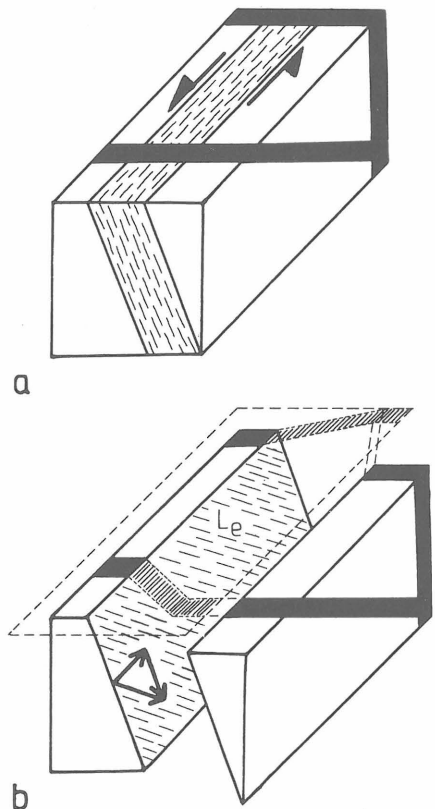
Fałdy śródfoliacyjne, określane także jako fałdy śródmylonityczne (*intramylonitic folds*, 4), występujące w do-



Ryc. 2. Sigmoidalna foliacja powstała w wyniku defleksji foliacji S w licznych strefach ścinania podatnych; zwrot w strefach ścinania przedstawiają strzałki; zarówno foliacja, jak i rozwijająca się jej kosztem foliacja mylonityczna S_m przecięte są przez ciekłą, jasną, prawie pionową strefę kataklazytu; amfibolity, próba z głęb. 372,3 m, wierc. Niedźwiedz IG 2; skala w cm

Fig. 2. Sigmoidal foliation produced as a result of deflection of S foliation in numerous ductile shear zones; the sense of shear indicates arrows; S foliation and S_m (C) mylonitic foliation, which developed from S foliation, is discordantly cut by thin, light, almost vertical cataclasite band; sample from depth of 372,3 m, borehole Niedźwiedz IG 2, amphibolites; scale in centimetres

menach między strefami ścinania, mogą być wykorzystane do określenia zwrotu ścinania (6, 7, 20, 35). Wergencja fałdów śródfoliacyjnych wyznacza kierunek i zwrot przemieszczania mas skalnych (ryc. 4 i 5). Fałdy śródfoliacyjne charakteryzują się dużą zmiennością w ich morfologii. Obok form otwartych występują także fałdy izoklinalne, często o pogrubionych przegubach (fałdy symilarne) (ryc. 4). Fałdy śródfoliacyjne rozwijające się synchronicznie z otaczającymi je strefami ścinania powinny charakteryzować się niezmienną asymetrią i obaleniem w kierunku transportu tektonicznego. W samych strefach ścinania występują, jednak dość rzadko, fałdy niecyldryczne, zwane także fałdami futerałowymi (*sheath folds*), które

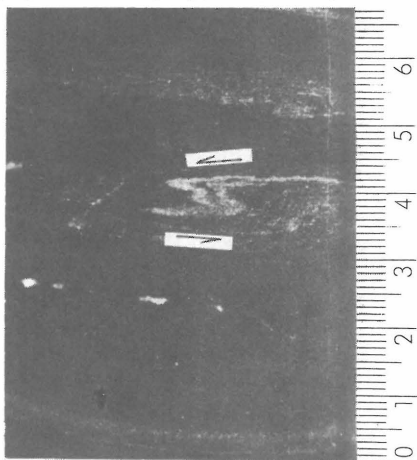


Ryc. 3. Blokdiagramy pokazujące rzeczywisty i pozorny zwrot ścinania na podstawie dwuwymiarowej analizy defleksji pasywnych powierzchni wskaźnikowych; a – nachylona, lewoskrętna strefa ścinania (linie przerywane) przecina pionową i nachyloną powierzchnie wskaźnikową (np. żyły, dajki, itp.); b – etap po przemieszczeniu materiału skalnego i powierzchni wskaźnikowej horyzontalnej i normalnej; kierunek przemieszczenia wyznaczony jest przez kierunek orientacji lineacji ekstensyjnej (L_e) na powierzchniach ścinania; zwrot ścinania ustalony na podstawie analizy mapy z wykorzystaniem defleksji powierzchni wskaźnikowych jest różny: rzeczywisty (lewoskrętny) dla pionowych lub asekwentnie zorientowanych względem wektora ruchu powierzchni wskaźnikowych, albo pozorny (prawoskrętny) dla powierzchni wskaźnikowych zapadających w kierunku nachylenia wektora przemieszczeń

Fig. 3. Block diagrams showing the real and apparent sense of shear on the basis of two-dimensional deflection analyses of passive planar markers; a – steeply inclined sinistral shear zone (broken lines) cuts vertical and low-angle dipping planar markers (e.g. veins, dykes, etc.); b – stage after shearing deformation, rocks and the planar markers has moved in shear zones with an oblique slip vector (the slip vector resolved into horizontal and normal components); slip direction is defined by attitude of extensional lineation (L_e) on the $C(S_m)$ plane of shearing; the sense of shear determined from map analyses using of deflection of passive planar markers is different: actually (sinistral) in a case of vertical or asequently dipping planar markers to the slip vector and also apparent (dextral) for marker planes dipping conformably with pitching of the slip vector

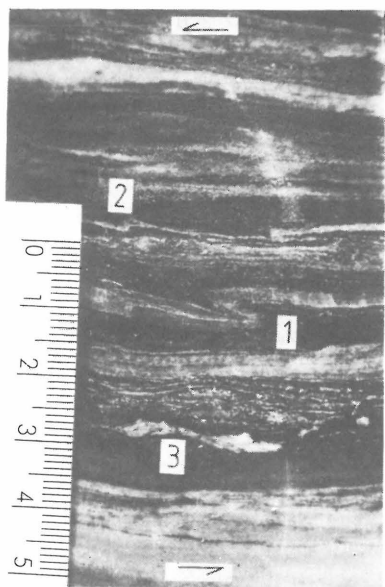
charakteryzują się bliską koaksjalnością osi fałdu z lineacją ekstensyjną (10).

Ze względu na polifazowość deformacji i możliwość rozwoju fałdów przed lub po głównej deformacji ścięciowej, a także ze względu na częste dewiacje osi fałdów futerałowych (nawet do 180°), kryterium wergencji (asymetrii) fałdów do określania zwrotu ścinania należy stosować z dużą ostrożnością. Szczególnie w przypadku zmian wergencji i silnie dysharmonicznych form fałdowych (możliwość interferencji fałdów) konieczne jest wykonanie szczegółowej analizy sekwencji deformacji i wydzielenie na tej podstawie grupy fałdów synchronicznych



Ryc. 4. Fałd śródfoliacyjny o lewoskrętnej wergencji, typu symilar; wierc. Niedźwiedź IG 2, łupek amfibolowy z głęb. 1579,3 m

Fig. 4. Interfolial fold almost similar with sinistral vergence; borehole Niedźwiedź IG 2, amphibole schists from depth of 1579,3 m



Ryc. 5. Fałdy śródfoliacyjne w strefie ścinania podatnego; wierc. „Odra 2” (około 10 km na południe od Brzegu), głęb. 780,4 m, mylonity kwarcowo-serycytowo-chlorytowe

1 – fałd wąskopromienny, 2 – fałd otwarty, asymetryczny, 3 – struktura ekstensyjna typu nabrzmień i zwężeń; wszystkie struktury wskazują na lewoskrętny zwrot ścinania; skala w cm

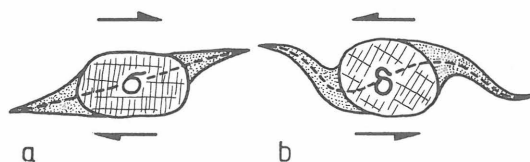
Fig. 5. Intrafolial folds within ductile shear zones; borehole "the Odra 2" (almost 10 km southern from Brzeg, Lower Silesia), mylonitic schists from depth 780,4 m

1 – tight fold, 2 – asymmetrical open fold, 3 – pinch and swell structure. All structures show sinistral sense of shear; scale in centimetres

z rozwojem stref ścinania. Tylko te fałdy mogą być wykorzystane do określenia zwrotu ścinania.

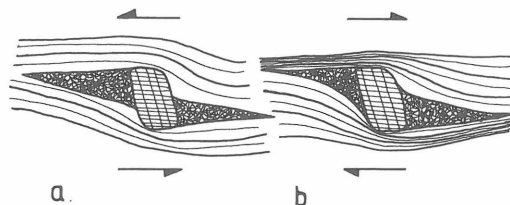
„PORFIROKLASTY”

Wśród wielu stref ścinania, zwłaszcza w podatnych strefach ścinania, występują charakterystyczne struktury typu ogonków (*tails*), zbudowane z drobnoziarnistego materiału, przeważnie o tym samym składzie mineralnym co sąsiednie duże ziarno lub agregat mineralny (ryc. 6–10). Taki zespół dwóch, zwykle klinowatych ogonków (określanych także terminami: cienie tarcia, cienie deformacji lub cienie ciśnienia), przylegających z dwóch stron do większego ziarna lub agregatu mineralnego zdefiniowano nie genetycznym terminem „porfiroklast”. Określenie „porfiroklast” oznacza w niniejszej pracy formę geometryczną struktury tektonicznej, a nie genetyczne implikacje terminu porfiroklast, którym określano kataklastyczną redukcję wielkości ziarna. Drobnoziarnisty materiał w ogonkach powstaje zwykle w wyniku rekrystalizacji dynamicznej (29, 30, 34). Obok blastezy



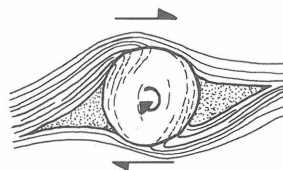
Ryc. 6. Różnice w morfologii między „porfiroklastami”; a – typ sigma σ ; b – typ delta δ ; linia mediany prawie prosta dla „porfiroklastu” typu σ i skrzywiona (zrotowana) dla typu δ

Fig. 6. Differences in style between "porphyroclasts"; a – σ -type of "porphyroclast", b – δ -type of "porphyroclast". The median line is almost straight in σ -type "porphyroclast" and curved (rotated) in δ -type one



Ryc. 7. Brak różnic w morfologii między „porfiroklastami”; a – typ sigma σ z prostymi liniami ogonków i prawie równym odstępem między powierzchniami foliacji; b – typ delta δ o wklęsłej wewnętrznej linii ogonków i wyraźnym zwięzieniu między powierzchniami foliacji w kierunku prawoskrętnie rotującego „porfiroklastu”

Fig. 7. This sketch shows no difference in style between σ - and δ -type "porphyroclasts"; a – σ -type "porphyroclast" with straight lines of tips or "wings" and almost constant spacing of pre-existing planes of foliation, b – δ -type "porphyroclast" has commonly a shape that is concave towards the adjacent more spaced in the direction dextrally rotated "porphyroclast"



Ryc. 8. „Porfiroklast” typu delta δ (np. granat) zrotowany prawoskrętnie z drobnymi mikrofałdami w strefie kontaktu ziarna z otaczającą foliacją

Fig. 8 "Porphyroclast" of δ -form (e.g. garnet) rotating dextrally with small microfolds in foliation at the edges of the "porphyroclast"

w strefach ścinania dochodzi także do redukcji wielkości ziarna związanego generalnie z tzw. zmiekczeniem deformacyjnym (*strain softening*). W powstaniu struktur typu „porfiroklastów” współdziałają więc procesy kataklazy (i mylonityzacji) z procesami rekrytalizacji syntektonicznej (blasteza). Usprawiedliwia to użycie neutralnego terminu „porfiroklast” do opisu tego rodzaju struktur tektonicznych.

Wśród asymetrycznych struktur typu „porfiroklastów” można wyróżnić dwie grupy różniące się pod względem morfologii:

1) typ sigma (σ) (26, 17, 20), określane często jako struktura oczkowa (*augen structure*, np. 30, 29, 35),

2) typ delta (δ) (26, 17, 20), zwany także jako cienie ciśnienia (*pressure shadows*, np. 30, 31), zrotowane porfiroblasty (*rotated porphyroblasts*) lub jako struktury toczone (*rolling structures*, wg. 33).

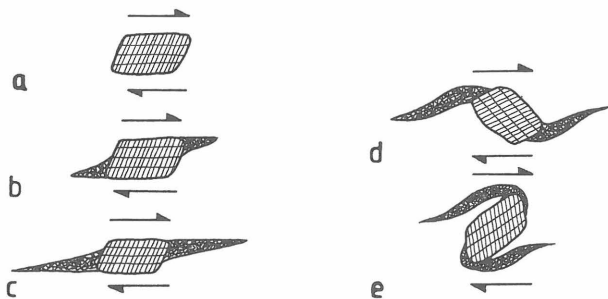
Ze względu na częste geometryczne podobieństwo między typami σ a δ istnieje niebezpieczeństwo błędnej oceny zwrotu ścinania. Dlatego zanim zostanie określony zwrot ścinania należy oddzielić od siebie obydwaj typy „porfiroklastów”, wykorzystując następujące kryteria:

1) przebieg linii mediany jest prosty lub zbliżony do prostego w typie σ (ryc. 6a), a w typie δ linia ta jest wyraźnie skrzywiona w wyniku rotacji (ryc. 6b) (17),

2) granica wewnętrzna ogonków jest prawie prosta w typie σ (ryc. 7a), natomiast dla typu δ jest ona wyraźnie wygięta (wkłęsła) od strony szerszej rozstawionych od siebie foliacji (ryc. 7b) (30),

3) zagęszczenie foliacji po zewnętrznej stronie ogonków wskazuje na składową rotacyjną, wyznacza więc typ δ (ryc. 7b) (30),

4) mikroskopowe zafałdowania foliacji na brzegach rotujących „porfiroklastów” (ryc. 8) wskazują na typ δ (30).



Ryc. 9. Schemat ilustrujący etapy rozwoju porfiroklastu typu delta δ z porfiroklastu typu sigma σ ; prawoskrętna rotacja; a – „porfiroklast” przed rozpoczęciem prawoskrętnego ścinania, b – początku rozwoju klinowatych ogonków, c – dalszy rozwój ogonków spowodowany dynamiczną rekrytalizacją, d – początki rotacji „porfiroklastu” – niedojrzała forma typu delta δ , e – dalsza progresywna rotacja „porfiroklastu” – dojrzała forma typu delta δ

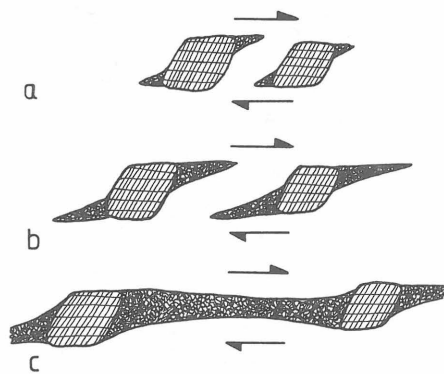
Fig. 9. Schematic illustrations of models of development of δ -type "porphyroblast" from σ -type one; dextral rotation; a – "porphyroblast" before initiation of dextral shearing, b – beginning of development of wedge-shaped tips ("wings"), c – continuous evolution of tails due to dynamic recrystallization, d – beginning of rotation of σ -type "porphyroblast" – causing development of immature δ -type "porphyroclasts", e – further progressive rotation of δ -type "porphyroblast" – mature δ -form "porphyroblast"

Po dokonaniu rozdziału „porfiroklastów” na typy σ i δ można określić zwrot ścinania. Zwrot przemieszczeń dla typu σ zgodny jest z kierunkiem wyciągnięcia ostrych, klinowatych zakończeń ogonków (ryc. 6a, 7a, 9b, 9c, 10). Natomiast zwrot ścinania dla typu δ jest przeciwny do kierunku wyciągnięcia ostrych końcówek ogonków (ryc. 6b, 7b, 8, 9d, 9e).

„Porfiroklasty” typu δ mogą powstać z „porfiroklastów” typu σ w wyniku progresywnej rotacji i dynamicznej rekrytalizacji (17, 10, 26) (ryc. 9). W warunkach ścinania materiał w ogonkach, zmiekczone przez deformację, ma szybsze tempo rotacji do równoległości z płaszczyzną ścinania. C niż sąsiednie „klasty” rotujące pasywnie i znacznie wolniej niż materiał w ogonkach. Dynamicznie rekrytalizujący materiał w ogonkach tworzony jest w sposób ciągły i niesiony coraz dalej od „klastów” (17, 34). Doprowadzenie krzemionki z otoczenia do miejsc o niższym ciśnieniu (cieni ciśnienia lub stref dylatacji, np. 21) przy progresji rekrytalizacji dynamicznej prowadzi m.in. do powstania lineacji ekstensyjnych typu przecikowego lub typu *quartz ribbon* (ryc. 10, np. 34).

STRUKTURY TYPU „DOMINO”

W „sztywnych porfiroklastach” nie zmiekczone przez deformację, zbudowanych głównie ze skaleni, ale także w pakietach fyllokrzemianów w mylonitach lub fylloinitach (25, 30), występują często szczeliny ekstensyjne (*extension cracks*), które mogą służyć jako wskaźnik zwrotu ścinania. Szczelinki te są zorientowane skośnie do foliacji mylonitycznej S_m (= C), a wzdłuż szczelinek doszło do rotacji połamanych ziaren. Rotacja tych drobno-skalowych przemieszczeń jest analogiczna do modelu ścinanego pakietu kart (30, 31) lub obalonego domina (ryc. 11). Zwrot przemieszczeń wzdłuż mikrospeków ekstensyjnych jest przeciwny do głównego zwrotu ścinania (ryc. 12).



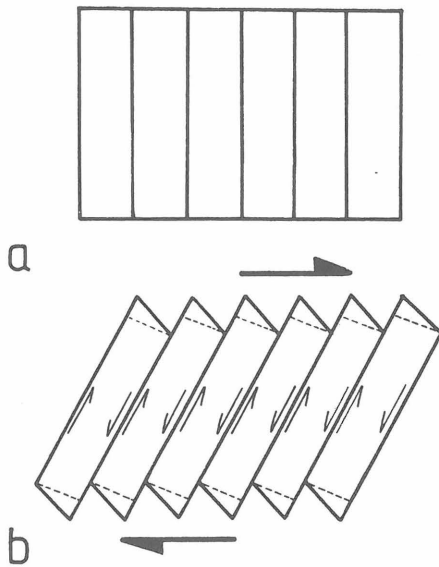
Ryc. 10. Schemat pokazujący rozwój lineacji typu wstążki kwarcu lub roddingowej w strefie prawoskrętnego ścinania. a – początkowy etap rozwoju „porfiroklastów” typu sigma σ , b – dalszy progresywny rozwój „porfiroklastów” w wyniku dynamicznej rekrytalizacji drobnych ziarn w ogonkach oraz rozciąganie, wyrażone przez wzrost odstępu między sąsiednimi „porfiroklastami”, c – połączenie ogonków i ciągły ich wzrost przez doprowadzenie nowego materiału z otoczenia (głównie SiO_2)

Fig. 10. Schematic diagram showing sequence of development of ribbon quartz or rodding lineation in dextral shear zones; a – initial stage of development of σ -type "porphyroblast", b – continuous development of "porphyroclasts" due to dynamic recrystallization of small grains in tails and pulling-apart of the fragments and sealing of gaps by newly crystallized grains, c – connection tails and continuous their increase due to dynamic recrystallization of a new generation of grains (mainly SiO_2)

STRUKTURY EKSTENSYJNE

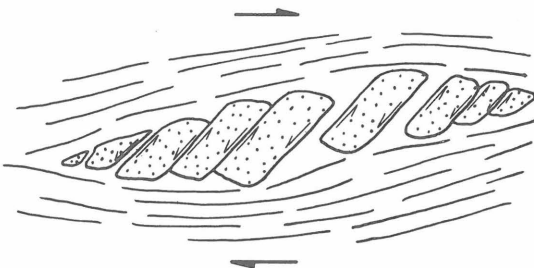
Kolejną grupę wskaźników ścinania stanowią tzw. struktury ekstensyjne (*extension structures*, 18, 20, 22), określone również terminem struktury z rozrywania (*pull-apart structures*, 15). Struktury te są szczególnie przydatnym wskaźnikiem ścinania w skałach o silnym stopniu metamorfozy, w których w wyniku penetratywnej, wtórnej rekrytalizacji zatarte zostały inne, drobniejsze wskaźniki zwrotu ścinania (15, 20). Geometrycznie podobne struktury tektoniczne występują także w melanżach (22).

Do grupy struktur ekstensyjnych, wykorzystywanych do oceny zwrotu ścinania, należą m.in.: budiny asymetryczne (ryc. 13c), struktury typu nabrzmień i zwężeń (15, 20).



Ryc. 11. Schemat ilustrujący model ścinanego pakietu kart lub przewróconego domina; a – stan początkowy, b – w wyniku prawoskrętnego ścinania dochodzi do przemieszczeń antytetycznych między poszczególnymi blozkami; w blokach wewnętrzna homotetyczna rotacja powoduje zmiany kształtu blozków

Fig. 11. Schemat showing a model of sheared stack of cards or overthrows domino a – initial stage, b – dextral shearing due to antithetic displacement along microfractures between broken grains or blocks. In the blocks internal homotethic rotation due to changes in their shapes

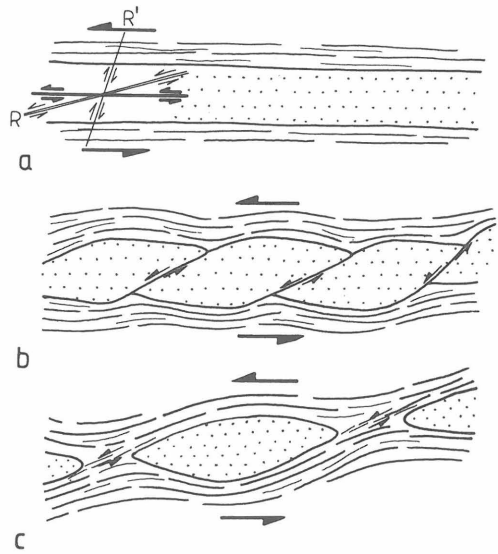


Ryc. 12. Rotacja prawoskrętna w strefie ścinania powoduje spękanie, przemieszczanie, rotację i rozciąganie np. porfiroklastu skaleniowego oraz wypełnianie jego szczelin świeżym, rekrytalizującym materiałem

Fig. 12. Dextral rotation within shear zone due to fracturing, displacements, rotation and stretching (e.g. feldspar "porphyroblast") and sealing the gaps by newly crystallized grains (subgrains)

(*pinch and swell*, ryc. 13b), jak również struktury określane angielskimi terminami, nie posiadającymi jeszcze polskich odpowiedników, np.: *web structure* (ryc. 14), *horse-tail structure* (27), *lozenge structure* (14), *foliation fish* (15) i *foliation boudinage* (np. 16). Ta ostatnia grupa struktur ekstensyjnych związana jest z rozwojem sprzężonych stref i pasemek ścinań (13, 16, 20), powstaniem struktur SC, a przede wszystkim – generalną zmianą planu kinematycznego (13), np. w wyniku wtargnięcia diapiru podczas synchronicznego rozwoju regionalnych nasunięć i imbrykacji.

Znacznie mniej skomplikowanymi strukturami do oznaczania zwrotu ścinania są budiny asymetryczne i struktury typu nabrzmień i zwężeń (15, 20). Ścinanie może odbywać się synchronicznie wzdłuż pierwotnych



Ryc. 13. Schemat rozwoju struktur ekstensyjnych typu budinażu asymetrycznego w strefie lewoskrętnego ścinania; a – stan przed deformacją ścięciową; struktury ekstensyjne rozwijają się w bardziej kompetentnej warstwie (zakropkowana). Powierzchnia głównego ścinania jest równoległa do anizotropii skały; równocześnie z powierzchniami głównego ścinania rozwijają się wtórne powierzchnie ścinania, np. ścinania Riedla R i R' (tylko ścinanie R jest generalnie aktywne); b – początkowy rozwój budinażu, powstaje struktura ekstensyjna podobna do struktury typu nabrzmień i zwężeń; rotacja jest homotetyczna między poszczególnymi „nabrzmieniami”, a wewnątrz nich – antytetyczna; widoczne różnice w zwrotach ścinań między strukturą ekstensyjną a strukturą typu „domino” (por. ryc. 12 i 13b); c – dalszy rozwój struktur ekstensyjnych prowadzi do izolacji poszczególnych budin

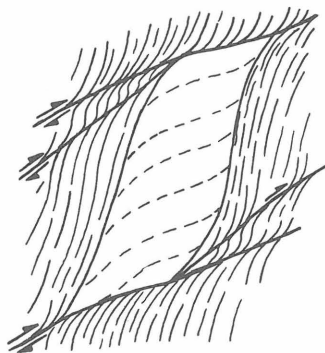
Fig. 13. Schematic diagrams to illustrate the formation of extensional structures (e.g. asymmetric boudinage) within sinistral shear zones; a – initial stage, before deformation, extensional structures developed in a more competence layer (dotted area); surfaces of bulk shear is parallel to anisotropy planes in rocks; shearing may occur simultaneously along primary shear surfaces and along secondary shearing ones (e.g. Riedel shears, only R shears are generally active); b – incipient stage of formation of boudinage structure, this extensional structure is similar to pinch and swell structures; a small amount of displacement on these R planes products asymmetric pinch and swell; homotethic rotation between swells and antithetic rotation inside them; note differences in senses of shearing between extensional structures and displaced broken grains ("domino" type structure) (comp. Figs. 12 and 13b), c – continued displacement separates boudins producing the characteristic tectonic melange structure and separation of boudins

pasemek ścinania, które są równoległe do płaszczyzny głównego ścinania, a także wzdłuż wtórnych pasemek ścinania, np. ścinań Riedla (ryc. 13a). Możliwy jest także rozwój innych zespołów wtórnych pasemek ścinania (np. typu *P* lub *thrust shears*). Ich wzajemne koneksje powodują izolację bryłowych soczew, np. typu *web structure* (ryc. 14).

Dlatego też struktury ekstensyjne wymagają żmudnych badań wielu rozgałęziających się stref ścinań. Struktury ekstensyjne mogą wykazywać różne zwroty rotacji. I tak np. końcówki asymetrycznych budin wykazują zgodną rotację z generalnym zwrotem ścinania (ryc. 13), natomiast struktury typu nabrzmień (*swell*) rotują w przeciwną stronę (*back-rotating*, wg 15). Wsteczna rotacja nabrzmień w strefach ścinań może być efektem poślizgu wzdłuż wewnętrznej anizotropii nabrzmienia i lokalnej dewiacji od zakładanego idealnego modelu ścinania prostego lub może być wynikiem przemieszczenia wzdłuż nieciągłych *P* ścinań, zlokalizowanych między poszczególnymi nabrzmieniami (15).

STRUKTURY SC

Struktury SC, opisane najwcześniej z granitów jako typowy przykład struktury powstałej w wyniku deformacji ścięciowej, są jednym z najbardziej wiarygodnych kryteriów zwrotu ścinania (2, 9, 13, 23, 29, 30). Struktury SC, określane także jako mylonity SC (9, 18) lub jako złożona więźba planarna (*composite planar fabrics*, 30), charakteryzują się współwystępowaniem dwóch zespołów powierzchni anizotropii (ryc. 15): foliacji S (symbol od franc. *schistosity*) i foliacji mylonitycznej C (symbol od franc. *cisaillement* = ang. *shear zone*). W miarę wzrostu deformacji ze ścinania maleje kąt między powierzchniami S i C, a powierzchnie foliacji S zbliżają się do coraz bliższej równoległości z powierzchnią ścinania C. Dlatego też kąt ostry między powierzchniami S—C wskazuje kierunek zwrotu przemieszczenia (ryc. 15).

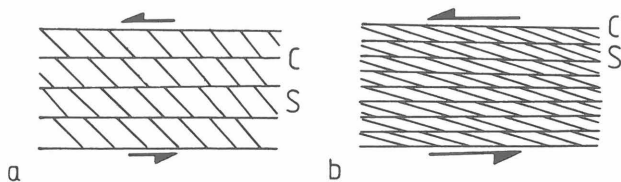


Ryc. 14. Struktura typu migdałów lub pajęczyny (*web structure*); w strefach ścinań charakterystyczny jest anastomozujący układ ścinań, gdzie poszczególne często krzywe powierzchnie ścinań łączą się, rozgałęziają się lub ulegają zakończeniu; połączenia stref ścinań prowadzą często do izolacji różnej wielkości brył (migdałów) zbudowanych ze względnie nie zmylonityzowanych skał; zauważ wewnętrzną prawoskrętną rotację bloku otoczonego siecią (pajęczyną) prawoskrętnych stref ścinań

Fig. 14. Schematic drawing illustrating the web structure. In an anastomosing network of shear zones, individual shear zones can be considered as curved surfaces which may join and splay, but also terminate. Joining of shear zones often leads to the isolation of all sized lozenge-shaped (almonds, webs) blocks of relatively non-mylonitized country rocks. Note internal dextral rotation of the block in web-style orientation of shear bands with dextral shearing

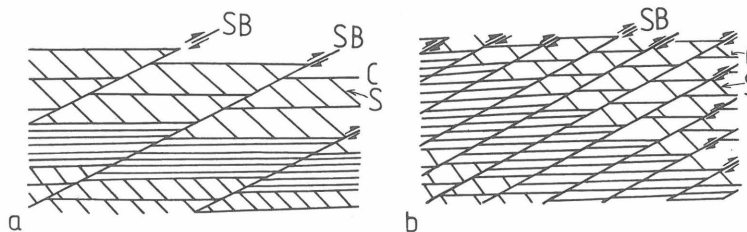
Przy intensywnych odkształceniach ścinających w późniejszych etapach historii deformacji mogą powstawać wspomniane już wyżej, wtórne zespoły ścinań (*R* i/lub *P*), określane jako pasemka mylonityczne SB (skrót literowy od *shear bands*). Pasemka te mogły powstać w wyniku gwałtownego wzrostu tempa odkształcenia (23) lub/i osiągnięcia przez deformowane skały stanu pasywnej plastyczności (*passive plastic state*, wg 16). Pasemka mylonityczne nadrukowują strukturę SC (ryc. 16a) i w miejscach silnego, dalszego rozwoju zacierają jej ślady (ryc. 16b). Prowadzić to może do określenia przeciwności zwrotu ścinania niż był w czasie głównej deformacji ścięciowej. Dlatego też przy wykorzystywaniu struktur SC należy rozpoznawać, dość częste w strefach ścinań, wtórne pasemka mylonityczne SB, które mogą być nawet lokalnie strukturą penetratywną (24).

W skali mikroskopowej struktury SC opisywano jako skośność zrekrystalizowanych i wyciągniętych ziaren i podziarn (*subgrains*, 30) lub jako więźbę skośnej elongacji przyrostu ziarn (31). W obrazie mikroskopowej



Ryc. 15. Struktura SC powstała w lewoskrętnej strefie ścinania; a — kąt między powierzchniami S i C jest w granicach 30° w strefach ścinań, które uległy słabym deformacjom ścięciowym; b — w miarę wzrostu deformacji ścięciowych maleje kąt między powierzchniami S i C

Fig. 15. SC structure developed in sinistral shear zone a — angle between S and C surfaces is approximately about 30° in weakly development of shear zones, b — with increase of shearing the angle between S and C surfaces is decreased



Ryc. 16. Struktury SC i wtórne pasemka mylonityczne SB; a — słaby, niepenetratywny rozwój pasemek mylonitycznych SB o zwrocie ścinania przeciwnym do głównego ścinania, wyznaczonego przez struktury SC; b — intensywny, penetratywny rozwój pasemek mylonitycznych SB zaciera struktury SC; zwrot ścinania wyznaczony na podstawie pasemek mylonitycznych SB dotyczy tylko etapu rozwoju tych pasemek (przyrostu elipsoidy deformacji) i jest przeciwny do zwrotu głównego, progresywnego ścinania, które spowodowało rozwój struktury SC

Fig. 16. SC structures and second SB mylonitic bands; a — weakly, non-penetrative development of SB shear bands with opposite sense of shear to the bulk shearing, defined by SC structures, b — intensive, penetrative formation SB shear bands disrupted SC structures. The sense of shear zones, defined by SB shear bands indicates only state of formation of SB shear bands (increment of strain ellipsoid), this sense is opposite to the bulk progressive shearing, which caused development of SC structures

wym mylonitów obserwuje się pospolicie skośność orientacji długich osi ziarn mineralnych, wyznaczających foliację, do powierzchni ścinania C (1, 12, 19) (ryc. 17).

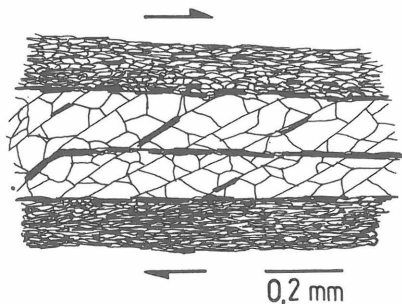
ASYMETRIA WIĘŻBY

Specjalną grupę wskaźników zwrotu ścinania stanowią badania petrotektoniczne więźby (*fabric*). Najczęściej jest badana orientacja osi c kwarcu za pomocą stolika uniwersalnego i przedstawiana w formie diagramów uprzywilejowanej orientacji (1, 5, 11, 14, 19, 28). Zakłada się, że podczas deformacji nierotacyjnej (ściananie czyste) pas osi c kwarcu będzie zorientowany prawie prostopadłe do powierzchni ścinania C i nachylony względem powierzchni foliacji (np. 11, 14).

Gdy diagram uprzywilejowanej orientacji osi c kwarcu jest zbudowany z więcej niż jednego pasa, do określenia zwrotu ścinania stosuje się dwie niezależne od siebie metody (14). Wybiera się na diagramie najlepiej zaznaczony pas osi c i prostopadłe do niego wyznacza się kierunek ścinania (powierzchnia C) ze zwrotem w kierunku ćwiartki diagramu o większym zagęszczeniu danych. Druga metoda wykorzystuje płaszczyzną symetrii uporządkowania (więźby) na diagramie, która pokrywa się z powierzchnią lokalnej foliacji. Prostopadła do powierzchni S dzieli diagram na cztery części, a zwrot jest wyznaczony od ćwiartki o mniejszej ilości danych do ćwiartki o większym zagęszczeniu osi c kwarcu (11, 14).

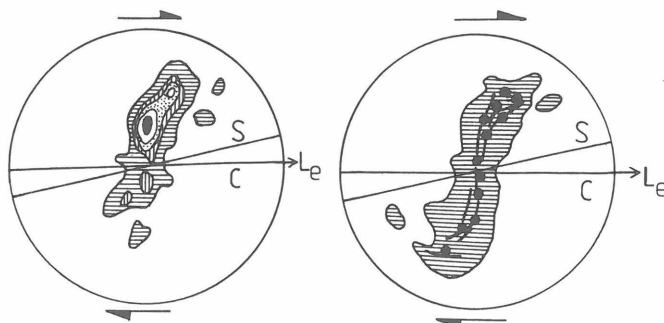
Podobne zasady odnoszą się także do analizy asymetrii pojedynczego pasa osi c kwarcu (ryc. 18). Interpretacja zwrotu ścinania na podstawie orientacji osi c kwarcu może być uzupełniona np. przez konstrukcję synoptycznego diagramu maksimum punktowych (ryc. 19) lub diagramu z tzw. prowadzącym brzegiem (ryc. 20).

Zakładając, że krystalograficzny kierunek poślizgu ułożony jest w płaszczyźnie ścinania C, można wyznaczyć zwrot ścinania na podstawie orientacji osi a kwarcu (ryc. 21). Ze względu na kosztowną metodę oznaczania osi a kwarcu oraz fakt, że bardzo często maksima osi a są niewyraźne, ta metoda oznaczania zwrotu ścinania jest rzadko stosowana.



Ryc. 17. Schemat ilustrujący geometryczne zależności między powierzchniami S (foliacji) i powierzchni ścinania C w skali mikroskopowej, np. w mylonicie kwarcowym; powierzchnie C są wyznaczone przez podziarna (zrekrytalizowane dynamicznie nowe ziarna) i wstążki kwarcu oraz blaszki fyllokrzemianów; powierzchnie foliacji S są wyznaczone przez ziarna, również dynamicznie zrekrytalizowanych ziarn kwarcu i skośne blaszki fyllokrzemianów

Fig. 17. Schematic diagram to illustrate the geometrical relationships among S planes (foliation) and C shear surfaces in microscale, e.g. in quartz mylonites. The C surfaces are defined by subgrains (dynamic recrystallized new grains) and quartz ribbons and aggregates of phyllosilicates. The S foliation are defined by large grains, also dynamically recrystallized quartz grains and oblique oriented plates of phyllosilicates



Ryc. 18. Przykład diagramu z pojedynczym, asymetrycznym pasem uprzywilejowanej orientacji osi c kwarcu

Półkula dolna; powierzchnia C jest określona przez najlepiej wykształcone powierzchnie nieciągłości (ściana) i inne struktury, np. ogonki fyllokrzemianów; L_e – orientacja lineacji mylonitycznej (ekstensyjnej), S – powierzchnia zdefiniowana na podstawie orientacji kształtu ziarn

Fig. 18. Example of diagram of the quartz c-axes orientation with asymmetric single girdle discloses sense of shear

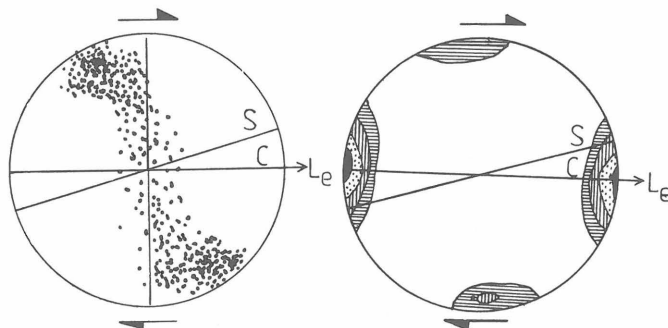
Lower hemisphere; C-surface defined by the most developed discrete surfaces (shear planes) and other structures (e.g. plates of phyllosilicates); L_e – mylonitic linear orientation (extensive), S – plane defined by grain shape

Ryc. 19. Przykład diagramu synoptycznego maksimum punktowych orientacji osi c kwarcu (czarne punkty), zgrupowane w pojedynczy, asymetryczny pas więźby; interpretowana prawoskrętna rotacja

Półkula dolna; objaśnienia symboli jak dla ryc. 18

Fig. 19. Example of synoptic diagram of maximum orientations of quartz c-axes (black dots); asymmetry of single girdle fabric indicates dextral rotation

Lower hemisphere; explanations as for Fig. 18



Ryc. 20. Przykład diagramu punktowego orientacji osi c kwarcu z tzw. brzegiem (krawędzią) prowadzącym (leading edge), który pozwala wyznaczyć powierzchnię ścinania C; powierzchnia C jest prostopadła do brzegu prowadzącego

Półkula dolna; zwrot ścinania prawoskrętny; objaśnienia symboli jak dla ryc. 18

Fig. 20. Example of punctual diagram of the quartz c-axes with "leading edge" which allows to define C surfaces (shear zone); the C surface is always perpendicular to the "leading edge"

Lower hemisphere; explanations as for Fig. 18

Ryc. 21. Przykład diagramu uprzywilejowanej orientacji osi a kwarcu, który wyznacza kierunek poślizgu (ścianania); zwrot ścinania wyznacza kąt między powierzchniami S i C

Półkula dolna; znaczenie symboli omówione przy ryc. 18

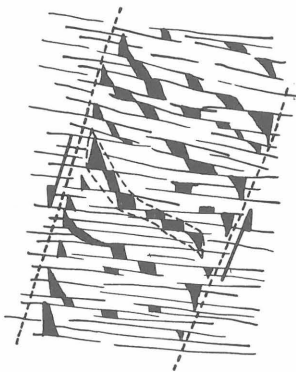
Fig. 21. Example of diagram of quartz a-axes which indicates the direction of shear (flow). The sense of shear is indicated by sharp angle between S and C surfaces

Lower hemisphere. Explanations of symbols as given as the Fig. 18

Ze względu na fakt, że z tej samej próbki otrzymuje się różne wyniki zwrotu ścinania dla różnych minerałów (np. kwarcu i kalcytu) oraz że zakłada się homogeniczność i nierotacyjność deformacji w strefach ścinania, podczas gdy w warunkach naturalnych deformacje są heterogeniczne i rotacyjne we wszystkich skalach (13, 19), asymetria więzby wydaje się najmniej wiarygodnym wskaźnikiem zwrotu ścinania.

SPEKANIA KULISOWE

Szczeliny tensyjne (*tension gashes*) tworzą często systemy sprzężonych, kulisowych (*en echelon*) szeregów spękań, wypełnionych najczęściej kwarcem i (lub) kalcytem. Na podstawie kulistego układu drobnych spękań można wyznaczyć zwrot ścinania (ryc. 22) (6). Spękania kulisowe rozwijają się skośnie do granic stref ścinania i stanowią jeden z typów dylatacji (*dilation*) w rozrywanych (*pull-apart*) miejscach w strefach ścinania (15, 21, 25).



Ryc. 22. Spękania kulisowe (*en echelon*) wyznaczają lewoskrętną strefę ścinania

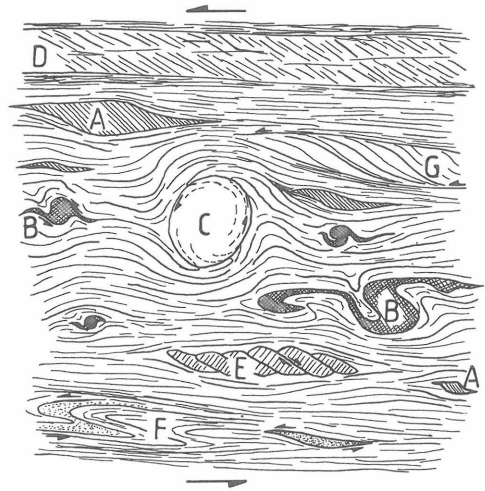
Fig. 22. Tension gashes ("en echelon" type of microfaults) indicating sinistral shear; they are classic "pull-apart" or dilational jogs structures

INKLUZJE TEKTONICZNE

Inkluzje tektoniczne (*tectonic inclusions*) występują we wszystkich skałach i typach skał (20). Ta grupa wskaźników stanowi pośredni zespół struktur między wyżej opisanymi strukturami ekstensyjnymi (15, 24, 25) a defleksjami. Inkluzje mogą pochodzić z najbliższego sąsiedztwa strefy ścinania, ale mogą być także egzotyczne (20) Rotacja, wyciąganie i/lub zafałdowanie asymetryczne inkluzji tektonicznych pozwala określić zwrot ścinania (20, 25, 26). Zasady określania zwrotu są takie same jak dla defleksji i struktur ekstensyjnych.

PODSUMOWANIE

Przedstawione kryteria, pomimo ograniczeń i niejednoznaczności w ich interpretacji, pozwalają określić zwrot ścinania, który należy zawsze obserwować w płaszczyźnie XZ elipsoidy odkształcenia końcowego. W analizie strukturalnej dążyć trzeba do oznaczenia zwrotu ścinania w oparciu o różnorodne i liczne kryteria strukturalne. W warunkach naturalnych struktury takie występują często obok siebie, nawet w skali próby (ryc. 23). Tylko tam, gdzie wszystkie dostępne kryteria strukturalne wyznaczają zgodnie ten sam zwrot ścinania, można



Ryc. 23. Schematyczny przekrój w płaszczyźnie XZ pokazujący wiele, różnych struktur tektonicznych określających zasadniczy lewoskrętny zwrot ścinania. A - „porfiroklasty” typu sigma σ , B - „porfiroklasty” typu delta δ , C - spiralna rotacja granatu („porfiroklast” typu delta δ), D - struktura SC, E - struktura typu „domino”, F - futerałowe fałdy śródfoliacyjne

Fig. 23. Schematic cross-section parallel to the XZ plane to illustrate the use of many, different structural criteria to deduce the bulk sinistral sense of shear. A - σ -type "porphyroclast", B - δ -type "porphyroclast", C - rotated garnet (δ -type "porphyroclast"), D - SC structure, E - "domino" type structure (displaced broken aggregate), F - intrafolial sheath folds

z dużym prawdopodobieństwem przyjąć wynik oceny zwrotu ścinania.

Pragnę podziękować dr Stefanowi Cwojdzkiemu za krytyczne uwagi.

LITERATURA

- Burg J.P. — J. Struct. Geol., 1986 vol. 8 nr 2 s. 123—131.
- Burg J.P. — Ibidem, 1987 vol. 9 nr 8 s. 925—934.
- Burg J.P., Brunel M. in. — Ibidem, 1984 vol. 6 nr 5 s. 535—542.
- Carreras J., Casas J.M. — Tectonophysics, 1987 vol. 135 s. 87—98.
- Casas J.M. — Acta Geol. Hispanica., 1982 vol. 17 nr 3 s. 151—157.
- Casas J.M., Munoz J.A. — Tectonophysics, 1987 vol. 135 s. 67—75.
- Casas J.M., Sàbat F. — J. Struct. Geol., 1987 vol. 9 nr 5/6 s. 647—657.
- Choukroune P., Gapais D., Merle O. — Ibidem, 1987 vol. 9 nr 5/6 s. 525—530.
- Culshaw N. — Ibidem, 1987 vol. 9 nr 3 s. 299—312.
- Cymerman Z. — Prz. Geol., 1989 nr 10 s. 489—494.
- Davis G.H., Gardulski A.F., Lister G.S. — J. Struct. Geol., 1987 vol. 9 nr 3 s. 289—298.
- Duebendorfer E.M., Houston R.S. — Geology, 1986 vol. 14 nr 2 s. 171—174.
- Gapais D., Balè P. in. — J. Struct. Geol., 1987 vol. 9 nr 5/6 s. 635—646.
- Garcia-Celma A. — Ibidem, 1982 vol. 4 nr 4 s. 443—456.
- Hammer S. — Ibidem, 1986 vol. 8 nr 2 s. 111—122.

16. Harris L.B., Cobbold P.R. — *Ibidem*, 1985 vol. 7 nr 1 s. 37–44.
17. Jordan P.G. — *Tectonophysics*, 1987 nr 135 s. 185–197.
18. Lister G.S., Snoke A.W. — *J. Struct. Geol.*, 1984 vol. 6 nr 6 s. 617–638.
19. Mancktelow N. — *Eclogae Geol. Helv.*, 1985 vol. 78 nr 1 s. 73–96.
20. Mawer C.K. — *J. Struct. Geol.*, 1987 vol. 9 nr 5/6 s. 531–539.
21. McCaig A.M. — *Tectonophysics*, 1987 vol. 135 s. 121–132.
22. Needham D.T. — *Geol. Mag.*, 1987 vol. 124 nr 4 s. 311–318.
23. O'Brien D.K., Wenk H.R. in. — *J. Struct. Geol.*, 1987 vol. 9 nr 5/6 s. 719–730.
24. Platt J.P. — *Ibidem*, 1984 vol. 6 nr 4 s. 439–442.
25. Platt J.P., Vissers R.L. — *Ibidem*, 1980 vol. 2 nr 4 s. 397–410.
26. Passchier C.W., Simpson C. — *Ibidem*, 1986 vol. 8 nr 8 s. 831–843.
27. Roering C., Smit C.A. — *Ibidem*, 1987 vol. 9 nr 4 s. 419–427.
28. Simpson C. — *Ibidem*, 1980 vol. 2 nr 1/2 s. 143–170.
29. Simpson C. — *Ibidem*, 1985 vol. 7 nr 5 s. 503–511.
30. Simpson C., Schmid S.M. — *Bull. Geol. Soc. Am.*, 1983 vol. 94 nr 11 s. 1281–1288.
31. Takagi H. — *J. Struct. Geol.*, 1986 vol. 8 nr 1 s. 3–14.
32. Wheeler J. — *J. Geol. Soc. London*, 1987 vol. 144 nr 1 s. 73–77.
33. Van Den Driessche J., Brun J.P. — *J. Struct. Geol.*, 1987 vol. 9 nr 5/6 s. 691–704.
34. Vauchez A., Maillet D., Sougy J. — *Ibidem*, 1987 vol. 9 nr 1 s. 31–40.
35. Zheng Y., Wang Y. in. — *Ibidem*, 1988 vol. 10 nr 2 s. 135–144.

SUMMARY

The aim of this paper is to describe criteria for the determination of the sense of shear. The determination of movement in shear zones is fundamental to the understanding of orogenes. Using the criteria outlined herein, the correct sense of shear can be elucidated.

The most useful criteria in determining shear sense are: deflections, intrafolial folds, "porphyroclasts", "domino" type structures, extensional structures, SC structures, fabric asymmetries, "en echelon" fractures and tectonic inclusions. The sense of shear can often be determined from a reorientation (deflection) of pre-existing planar markers (foliations, veins) (Fig. 2). In some cases, however, traces of the initially planar markers on a map can show an opposite the over-all sense of shear (Fig. 3). The shear sense can also be inferred by the direction of intrafolial fold vergence (Figs. 4, 5). Tails around "porphyroclasts" are an important feature that allows the determination of the sense of shear (Figs. 6–10). Due to a geometrical similarity of some σ — (augen structures) and δ — (pressure shadows) type "porphyroclasts" it is therefore very important for the deduction of shear sense to distinguish σ - from δ -types. (Figs. 6, 7). "Domino" type structures, defined by displaced fragments of grains, may be used to determine the over-all shear sense (Figs. 11, 12).

Extensional structures (asymmetrical pull-apart structures) are potentially useful kinematic indicators in the determination of shear sense (Figs. 13, 14). The relationship between S- and C-planes is the one which is commonly observed in shear zones; the sense of shearing being as indicated in Figs. 15–17. Crystallographic fabrics developing along a rotational strain path are markedly asymmetric in respect to S foliation and L_e extensional lineation (Figs. 18–21). These fabrics criteria, however, cannot be used for all minerals and occasionally gives anomalous results. In highly sheared rocks, deduction of the sense of shear are often obliterated or become ambiguous. In general, however, it may be necessary to examine several samples before the sense of shear can be determined with confidence.

Translated by the author

РЕЗЮМЕ

Целью этой работы является описание критериев оценки скальвания. Определение движения в зонах скальвания является основой для понимания орогенов. Принимая приведенные в статье критерии, можно оценить истинное направление скальвания.

Самые полезные критерии в определении направления скальвания следующие: дефлексии, межплоскостные складки, „порфиорокласты”, структуры типа „домино”, экстенсивные структуры SC, асимметрия сложения (fabric), трещины типа „en echelon” и тектонические включения. Направление скальвания можно часто определить по реориентации (дефлексии) более ранних планарных показателей (плоскопараллельные текстуры, жилы) (рис. 2). В некоторых случаях следы первоначально планарных показателей на карте указывают однако на противоположное к общему направлению скальвания (рис. 3). Ориентировка скальвания может быть также определена по направлению вергенции межплоскостных складок (рис. 4, 5). Хвостки вокруг „порфиорокластов” являются важным признаком, позволяющим определить направление скальвания (рис. 6–10). В результате геометрического сходства некоторых типов σ (очковые структуры) и δ (тени давлений) типов „порфиорокластов” очень важно знать отличие типов σ и δ (рис. 6, 7). Структуры типа „домино” определенные перемещенными фрагментами зерн, можно использовать для определения общего направления скальвания (рис. 11, 12). Экстенсивные структуры (асимметричные структуры типа „pull-apart”) являются потенциально полезным кинематическим показателем для определения направления скальвания (рис. 13, 14). Зависимость между поверхностями S и C является обычной зависимостью в зонах скальвания; направление скальвания показано на рис. 15–17. Сложение (fabric), развивающееся в ротационной деформации, явно асимметрично по отношению к планпараллельной текстуре S и экстенсивной линейности L_e (рис. 18–21). Критерии сложения нельзя употреблять для всех минералов и они иногда дают anomальные результаты. В сильно скальваемых породах критерии скола часто нечетки или неоднозначны. Вообще, прежде чем определить истинную ориентировку скальвания, необходимо исследование многих образцов.