

Fałdy i pasma kolankowe (załomowe) — geometria, warunki powstawania, interpretacja (przykład z fliszu Karpat zewnętrznych)

Jacek Rubinkiewicz*



Kink folds and kink bands — geometry, conditions of nucleation, interpretation (an example from the Outer Carpathian flysch). *Prz. Geol.*, 53: 1040–1046.

Summary. Kink folds and kink bands are common structures which occur in metamorphic and sedimentary rocks. They have a specific geometry. Kink folds originate under layer — parallel compression. To nucleate those structures, several conditions are necessary such as: multilayered material, high overburden pressure conditions and presence of initial perturbation. Different sedimentary and tectonic structures form initial perturbations, e.g. solemarks, fractures and faults. Knowing the locking angle of kink fold it is possible to determine the orientation of the maximum stress axis and the friction angle between the layers using a butterfly diagram.

Key words: kink folds, kink bands, butterfly diagram, Outer Carpathians

Celem niniejszego artykułu jest przegląd wybranych, użytecznych informacji na temat fałdów i pasm kolankowych, a w szczególności ich geometrii, mechanizmu i warunków powstawania oraz interpretacji. Przedstawiony będzie również przykład analizy fałdu kolankowego z obszaru Karpat fliszowych.

Fałdy kolankowe występują w formie fałdów o złamanych, najczęściej ostrych przegubach (ryc. 1), stąd spotykana w polskiej literaturze nazwa fałdy „załomowe” (Jaroszewski, 1980).

Poza typowym opisem pasm kolankowych w podręcznikach z zakresu geologii strukturalnej i tektoniki (np. Jaroszewski, 1980; Dennis, 1987; Ramsay & Huber, 1987; Dadlez & Jaroszewski, 1994; Price & Cosgrove, 1990; Twiss & Moores, 1992; Davis & Reynolds, 1996), są dostępne opracowania poświęcone wyłącznie tego typu fałdom, z zawartymi w nich wnioskami z badań teoretycznych i doświadczalnych (np. Paterson & Weiss, 1961; Anderson, 1964, 1968, 1974; Gay & Weiss, 1974; Honea & Johnson, 1976; Reches & Johnson, 1976; Weiss, 1980) oraz obserwacji terenowych (np. Reches & Johnson, 1976). Podjęto również próby zastosowania metod analizy przemieszczeń uskoku do analizy paleonaprężeń z pasm kolankowych (Srivastava i in., 1999). Najnowsze informacje dotyczące opisu i interpretacji fałdów kolankowych dostępne są na stronach internetowych w niepublikowanych gdzie indziej pracach (Johnson, 2000; Johnson & Manuszak, 2001; Johnson i in., 2001).

Z polskiej literatury na uwagę zasługuje praca Halickiego (1963) opisująca struktury „Z” z fliszu podhalańskiego, mogące być przykładem fałdów kolankowych. Brodzikowski i Cegła (1981) analizują fałdy kolankowe powstałe prawdopodobnie w zamarzniętych, skonsolidowanych utworach czwartorzędowych. Mastella (1988) opisuje grupę fałdów „złamanych” wzdłuż powierzchni osiowych i o płaskich, nierównej długości skrzydłach, tworzących szeregi pasm kolankowych. Z kolei Konon (2001) przedstawia fałdy z ostrymi przegubami, układające się w pasma kolankowe (ryc. 1B). Autor niniejszej publikacji (Rubinkiewicz, 2002) opisał serię fałdów kolankowych z utworów fliszowych, które powstały pod znacznym nadkładem, spowodowanym nasuwaniem się wyżej leżących jednostek tektonicznych.

Geometria fałdów i pasm kolankowych oraz warunki powstawania

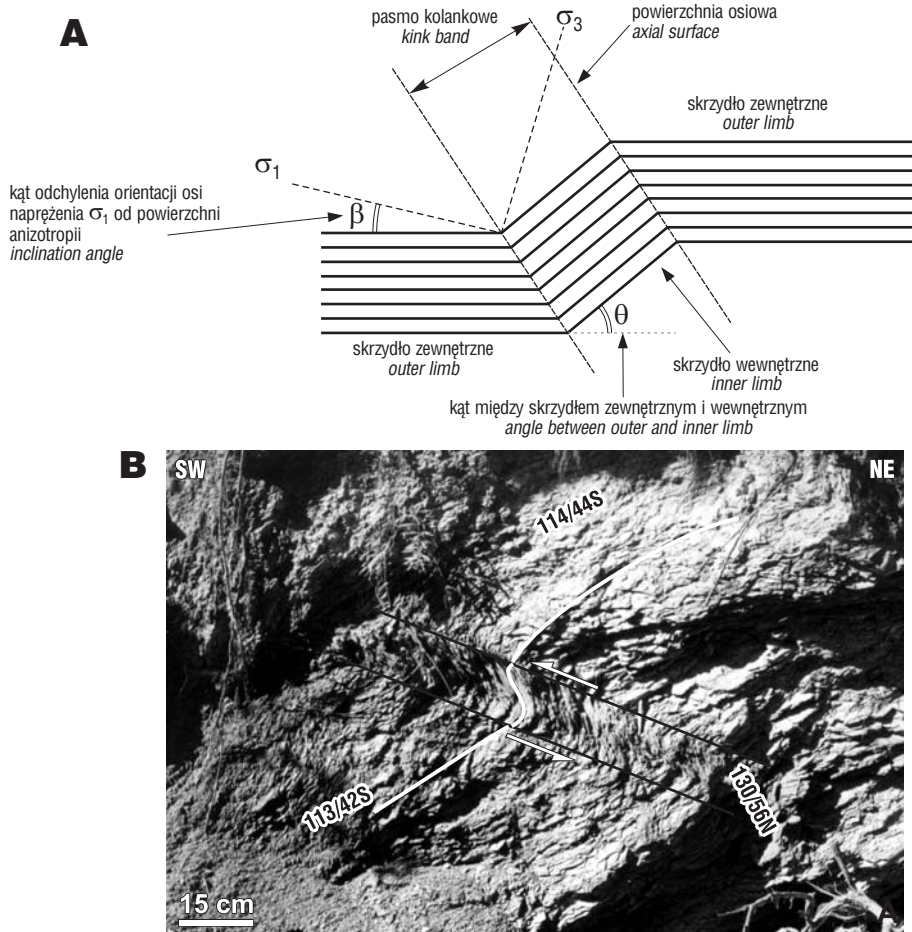
Fałdy kolankowe występują w ośrodkach skalnych z gęstymi, równoległymi powierzchniami anizotropii. Są to przeważnie skały metamorficzne z dobrze wykształconą foliacją oraz gęsto uławiczone lub skliważowane skały osadowe (np. niektóre partie fliszu). Fałdy te najczęściej osiągają wielkości od kilku do kilkudziesięciu centymetrów (ryc. 1B), spotyka się również formy kilku-, kilkunastometrowe.

W książkach z zakresu geologii strukturalnej spotyka się bardzo różne definicje oraz opis geometryczny fałdów kolankowych (np. Ramsay & Huber, 1987; Twiss & Moores, 1992; Dennis, 1987). W niniejszym artykule postanowiono zastosować (z pewnymi modyfikacjami) opis geometrii fałdu kolankowego na podstawie prac podsumowujących Johnsona (2000) i Johnsona i in. (2001). Fałd kolankowy tworzą w rzeczywistości dwa fałdy o ostrych przegubach (ryc. 1), jednak potocznie całość struktury jest traktowana jako pojedynczy fałd. Typowy fałd kolankowy składa się (ryc. 1) z dwóch dłuższych, równoległych do siebie skrzydeł „zewnętrznych”, połączonych ze sobą krótszym skrzydłem „wewnętrznym” (Davis & Reynolds, 1996). Skrzydło wewnętrzne tworzy pasmo kolankowe, ograniczone od skrzydeł zewnętrznych powierzchniami osiowymi. Opis geometrii fałdu kolankowego uzupełniają: kąt θ między skrzydłem wewnętrznym i zewnętrznym oraz kąt β odchylenia osi naprężenia σ_1 od płaszczyzn anizotropii (warstwowania, foliacji itp.) w skrzydłach zewnętrznych (ryc. 1A).

Wyróżnia się (Johnson, 2000) trzy podstawowe rodzaje fałdów kolankowych (ryc. 2): symetryczne sprzężone, asymetryczne sprzężone i monoklinalne. Mogą one być S-kształtne lub Z-kształtne. Takie określenia geometrycznego kształtu fałdów kolankowych wydają się być najbardziej neutralne, choć w literaturze anglojęzycznej spotyka się pojęcia *dextral* i *sinistral* (Davis & Reynolds, 1996) lub *right-facing* i *left-facing* (Johnson, 2000).

Mechanizm powstawania fałdów i pasm kolankowych obejmuje zginanie z poślizgiem w ośrodkach z gęstymi powierzchniami anizotropii, pod działaniem ściskania równoległego lub bliskiego równoległości do tych powierzchni (Anderson, 1974; Reches & Johnson, 1976) i pod znacznym ciśnieniem otaczającym, utrudniającym ogólny rozproszony posuw fałdowy (Paterson & Weiss,

*Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; Jacek.Rubinkiewicz@uw.edu.pl



Ryc. 1. A — Parametry geometryczne fałdu kolankowego; B — Fałd kolankowy w warstwach menilitowych płaszczyny śląskiej w kamieniołomie Skrzydlna w Beskidzie Wyspowym (fot. A. Konon)

Fig.1. A — Geometrical features of a kink fold ; B — Kink fold formed within menilite beds — Skrzydlna quarry, Beskid Wyspowy Mts. (Photo A. Konon)

1968; Anderson, 1974; Ahmer Wadee i in., 2004). Przyjmuje się powszechnie związek pasm wygięć kolankowych z płaszczynami, wzdłuż których uaktywniają się wzmożone naprężenia ścinające (Anderson, 1974).

Powstawanie fałdów kolankowych lub typowych fałdów ze zginania jest ściśle związane z siłą tarcia na powierzchniach anizotropii. W przypadku, gdy jest ona niewielka, to poślizg na powierzchniach anizotropii jest ułatwiony i powstaną typowe fałdy ze zginania z poślizgiem (w tym, np. fałdki ciągnięte). W przypadku, gdy siła tarcia jest stosunkowo duża, to do wzajemnego przemieszczenia wzdłuż powierzchni anizotropii może dojść tylko w pewnych strefach, gdzie następuje koncentracja sił ścinających. W wyniku takiego procesu mogą powstać fałdy i pasma kolankowe. Sposób powstawania fałdów ze zginania lub fałdów kolankowych dobrze dokumentują Reches & Johnson (1976). Autorzy wskazują, że w kompleksie skalnym poddanym fałdowaniu, złożonym z rogówców i łupków, w zależności od miąższości wkładek łupkowych powstają albo fałdy kolankowe (mały udział łupków — duża siła tarcia — utrudniony poślizg) albo fałdy ciągnięte (duży udział łupków — zmniejszona siła tarcia — ułatwiony poślizg). Badając fałdy w terenie bardzo istotne jest rozpoznanie, z którą grupą fałdów mamy do czynienia, ponieważ klinencja (kierunek odchylenia płaszczyn środkowych fałdów od prostopadłości do ich obwiedni) fałdów ze zginania jest odwrotna do klinencji

fałdów kolankowych, co radykalnie zmienia interpretację zwrotów przemieszczenia.

Fałdy kolankowe są często mylone z fałdami szewronowymi (zygzakowatymi). Różnica w ich powstawaniu jest związana z kierunkiem skrócenia tektonicznego (Twiss & Moores, 1992). Jeśli jest ono równoległe lub niemal równoległe do powierzchni anizotropii (foliacji, warstwowania), to powstaną fałdy kolankowe, jeśli natomiast jest ustawione skośnie pod stosunkowo dużym kątem, to mogą utworzyć się fałdy szewronowe.

Zgodnie z obserwacjami terenowymi i badaniami doświadczalnymi oraz teoretycznymi (Paterson & Weiss, 1968; Honea & Johnson, 1976; Reches & Johnson, 1976), aby mogły powstać fałdy kolankowe muszą być spełnione następujące warunki:

1. Istnienie ośrodka skalnego z gęstymi powierzchniami anizotropii (np. foliacja, uławicenie, złupkowacenie, skliważowanie), z przewagą ławic niepodatnych (kompetentnych) i niewielkim udziałem podatnych (niekompetentnych).

2. Obecność lokalnego zaburzenia w warstwowaniu (perturbacji), które jest miejscem inicjacji fałdu kolankowego i początkiem działania naprężeń

ścinających w tworzącym się skrzydle wewnętrznym. Zaburzeniami mogą być wcześniej istniejące struktury przecinające powierzchnie anizotropii (np. drobne spękania i uskoki), a w skałach osadowych także drobne nierówności na stropowych, bądź spągowych powierzchniach ławic (np. hieroglify). Wielkość (skala) takich zaburzeń jest proporcjonalna do wielkości powstających fałdów kolankowych.

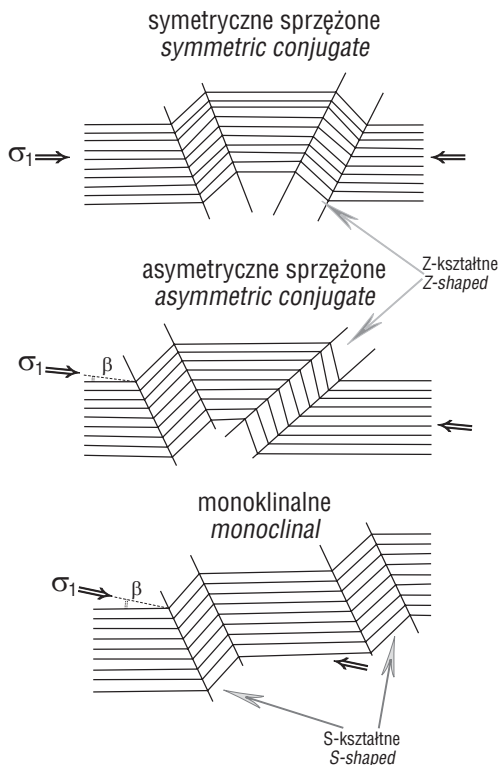
3. Duża siła tarcia na powierzchniach anizotropii, która jednakże zostanie przekroczona w miejscu występowania zaburzeń (perturbacji).

4. Oś największego naprężenia σ_1 musi być zorientowana pod kątem mniejszym niż $45^\circ - \phi/2$ (ϕ — kąt tarcia wewnętrznego), w stosunku do powierzchni anizotropii w skrzydłach zewnętrznych.

5. Duże ciśnienie otaczające, utrudniające rozproszony posuw fałdowy.

Mechanizm powstawania fałdu kolankowego

Przykład powstawania fałdu kolankowego przedstawiono przy założeniu, że kąt tarcia wewnętrznego na powierzchniach anizotropii (w tym przypadku warstwowania) wynosi 30° . W sytuacji wyjściowej warstwowanie jest poziome, a oś naprężenia σ_1 jest do niego równoległa. W obrębie warstwowania występuje lokalne zaburzenie (per-



Ryc. 2. Rodzaje fałdów kolankowych z orientacją osi największego naprężenia. Pozostałe objaśnienia w tekście

Fig. 2. Types of kink folds with orientation of maximum stress axis

turbacja). Stopniowo zwiększa się wartość naprężenia σ_1 , przy równoczesnej, stałej wartości naprężenia σ_3 o orientacji osi prostopadłej do warstwowania (wartość tego naprężenia może być spowodowana, np. ciężarem nadkładu i musi być większa niż wytrzymałość skały na rozciąganie). Kiedy różnica skrajnych naprężeń staje się coraz większa, w miejscu lokalnego zaburzenia zaczynają się wywiązywać naprężenia ścinające, wystarczające do powstania lokalnego przemieszczenia. W ten sposób zaistnieją warunki do rozwoju fałdu kolankowego.

Stopniowy rozwój fałdu kolankowego można przedstawić w formie wykresu, w funkcji stosunku naprężeń głównych σ_1/σ_3 i wielkości kąta θ (Reches & Johnson, 1976; ryc. 3). Wartości przedstawione na wykresie są przykładowe (za Johnson, 2000).

Wraz z rosnącą kompresją zwiększają się również naprężenia ścinające w obrębie perturbacji (zaburzenia), ale tylko do momentu, gdy siła tarcia zostanie przekroczona. W omawianym przykładzie, gdy stosunek naprężeń σ_1/σ_3 osiągnie wartość 22,5 (ryc. 3 — punkt A) zaczyna się formować pasmo kolankowe z równoczesnym poślizgiem w obrębie zaburzenia (perturbacji). Wskutek tego poślizgu kąt θ stopniowo zwiększa swoją wartość. Jak wynika z analizy krzywej (ryc. 3) proces ten jest niestabilny, ponieważ krytyczny stosunek σ_1/σ_3 naprężeń potrzebny do spowodowania poślizgu w skrzydle wewnętrznym, przy wyższych kątach θ staje się mniejszy niż początkowy krytyczny stosunek naprężeń (ryc. 3 — przejście od punktu A do B). Przykładowo stosunek ten zmniejsza się niemal o 50% (do 12), jeśli kąt θ zwiększa się z 4 do 6°. Jeśli kąt θ zwiększy się do 30° to stosunek naprężeń σ_1/σ_3 zmniejszy się do około 3 (ryc. 3 — punkt C). Przy takim stosunku

naprężeń orientacja uławicenia w skrzydle wewnętrznym zaczyna się stabilizować, ponieważ dalsze zwiększanie się kąta θ jest uwarunkowane ponownym zwiększeniem się krytycznego stosunku naprężeń.

Kąt odpowiadający punktowi C nazywany jest **kątem zablokowania** (θ_L) lub zamknięcia (ang. *locking angle*) dla pasma kolankowego (Reches & Johnson, 1976; Collier, 1978). Jeśli stosunek naprężeń σ_1/σ_3 nie będzie się zwiększać ponad wartość w punkcie C, to kąt θ zamknie się na wartości 30°.

Od punktu C do D proces staje się stabilny i przy ponownie zwiększającym się stosunku naprężeń σ_1/σ_3 kąt zamknięcia fałdu kolankowego będzie większy. Ostatecznie, jeśli stosunek naprężeń σ_1/σ_3 osiągnie wartość taką jak początkowa (22,5), wtedy kąt θ osiągnie wartość 58° (punkt D). W omawianym przykładzie kąt ten jest ograniczony wartością 60°, która odpowiada tzw. **ostatecznemu kątowi zablokowania** (θ_{UL}) pasma kolankowego (ang. *ultimate locking angle*), (Collier, 1978). Innymi słowy, jeśli stosunek naprężeń σ_1/σ_3 dąży do nieskończoności to kąt zablokowania dąży do 60°.

Ostateczny kąt zablokowania ma wartości dodatnie dla S-kształtnych fałdów kolankowych, zgodnie ze wzorem $\theta_{ULS} = 90 - \phi + \beta$, a ujemne dla Z-kształtnych: $\theta_{ULZ} = -(90 - \phi) + \beta$ (Johnson, 2000). Wartość tego kąta jest więc określona przez dwie zmienne: kąt tarcia na kontaktach ławic oraz kąt inklinacji osi największego naprężenia σ_{s1} .

Kąt zablokowania mierzony w terenie jest bardzo użyteczny do interpretacji pasm kolankowych, ponieważ kąt ten odpowiada ostatecznemu kątowi zablokowania dla szerokiego zakresu stosunków naprężeń.

Warunki powstawania trzech typów fałdów kolankowych

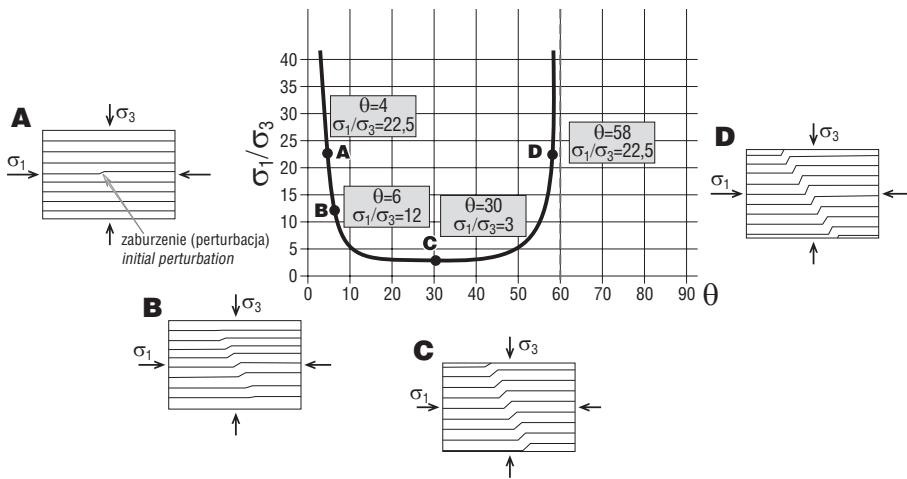
Istnieje ścisły związek pomiędzy wielkością odchylenia osi największego naprężenia σ_{s1} (o kąt β) od powierzchni anizotropii (Gay & Weiss, 1974; Reches & Johnson, 1976), a rodzajem powstających, poszczególnych typów fałdów kolankowych (symetryczne sprzężone, asymetryczne sprzężone, monoklinalne).

Kiedy oś naprężenia σ_1 jest równoległa do powierzchni anizotropii ($\sigma_1 = 0$) powstają symetryczne sprzężone pasma kolankowe (ryc. 2), przy równych kątach zablokowania dla S i Z-kształtego fałdu kolankowego ($\theta_{ULS} = \theta_{ULZ}$). W przypadku, gdy oś σ_1 jest odchylona ($\beta \neq 0$ o wartości kilku stopni), to mogą powstawać asymetryczne sprzężone pasma kolankowe ($\theta_{ULS} \neq \theta_{ULZ}$). W końcu, gdy σ_1 jest jeszcze bardziej odchylona od powierzchni anizotropii fałdy kolankowe mogą formować się w monoklinalne pasma kolankowe.

Gdy wielkość kąta β osiąga wartość krytyczną ($\beta = 45^\circ - \phi/2$; ϕ — kąt tarcia na powierzchniach anizotropii), to przemieszczenie będzie zachodzić również w zewnętrznych skrzydłach i fałdy kolankowe nie będą mogły się tworzyć (Reches & Johnson, 1976).

Metodyka analizy fałdów kolankowych — diagram motylowy

Badając fałdy kolankowe w terenie i mierząc orientację powierzchni anizotropii w skrzydłach zewnętrznych i wewnętrznych możemy w prosty sposób określić kąty



Ryc. 3. Przykład rozwoju fałdu kolankowego na wykresie w funkcji stosunku skrajnych naprężeń do wielkości kąta θ (wg Reches & Johnson, 1976; Collier, 1978), uczytelnione. Objaśnienia stadiów rozwoju A–D w tekście

Fig. 3. An example of the development of kink fold as a function of stress ratio and orientation of the layering within the inner limb θ (after Reches & Johnson, 1976; Collier, 1978), modified

zablokowania. Johnson (2000) zaproponował zastosowanie diagramu motylowego (ryc. 4), użytecznego do określenia kąta inklinacji odchylenia osi naprężenia σ_1 oraz kąta tarcia ϕ na powierzchniach anizotropii, na podstawie pomierzonego kąta zablokowania, który w większości przypadków odpowiada wartości ostatecznego kąta zablokowania.

Diagram motylowy przedstawiono w postaci wykresu, korzystając z równań: $\theta_{ULS} = 90^\circ - \phi + \beta$ dla $\theta > 0$ oraz $\theta_{ULS} = -(90 - \phi) + \beta$ dla $\theta < 0$. Na osi rzędnych oznaczono wartości ostatecznego kąta zablokowania θ , a na osi odciętych wartość kąta β oraz wartości kąta tarcia wewnętrznego ϕ . Zasięg możliwych wartości dla danego kąta tarcia wewnętrznego jest ograniczony do obszarów zacieniowanych skrzydełek. Granice tych skrzydełek to rezultat ograniczeń wartości kąta β , zgodnie ze wzorem $45^\circ - \phi/2$.

Kąt β może mieć wartości dodatnie lub ujemne (ryc. 4). Dla danego kąta tarcia rotacja kierunku osi największego naprężenia odwrotnie do ruchu wskazówek zegara ($\beta > 0$)

zwiększa kąt zablokowania dla S-kształtnych fałdów kolankowych i zmniejsza dla Z-kształtnych. Odwrotnie, rotacja osi naprężenia zgodnie z ruchem wskazówek zegara ($\beta < 0$) zmniejsza kąt zablokowania dla pasm S-kształtnych i zwiększa dla Z-kształtnych.

W przypadku **sprzężonych fałdów kolankowych** możemy określić zarówno kąt tarcia, jak i kąt odchylenia naprężenia σ_1 , jeśli pomierzymy ostateczne kąty zablokowania. Przykładowo (ryc. 4) dla ostatecznych kątów zablokowania wynoszących $\theta_{ULS} = 80^\circ$ i $\theta_{ULZ} = 60^\circ$ kąt inklinacji β wyniesie 10° , a kąt tarcia wewnętrzny ϕ na powierzchniach anizotropii 20° .

Zdecydowanie powszechniej obserwuje się w skałach **monoklinalne fałdy kolankowe**.

W ich przypadku, aby znaleźć kąt inklinacji musimy — oprócz znajomości ostatecznego kąta zablokowania — określić również kąt tarcia na powierzchniach anizotropii. Wartość kąta tarcia wewnętrznego dla szerokiego zakresu skał zawiera się w zakresie $20\text{--}40^\circ$ (Barton & Choubey, 1977). Kąty tarcia na powierzchniach anizotropii są z reguły mniejsze. W przypadku pakietów skał uławicznych takich jak, np. piaskowce z wkładkami łupków i mułowców, gdzie przemieszczenie zachodzi na kontaktach ławic, kąty tarcia osiągają wartości $5\text{--}20^\circ$ (Johnson, 2000). Stąd w takich środowiskach można się spodziewać (jak to wynika z wyżej przedstawionych równań) stosunkowo dużych kątów zablokowania pasm kolankowych.

Przykład interpretacji fałdu kolankowego

Interpretację rozpatrzono na przykładzie fałdu kolankowego z Karpat zewnętrznych (ryc. 5). W rzece Wisłok

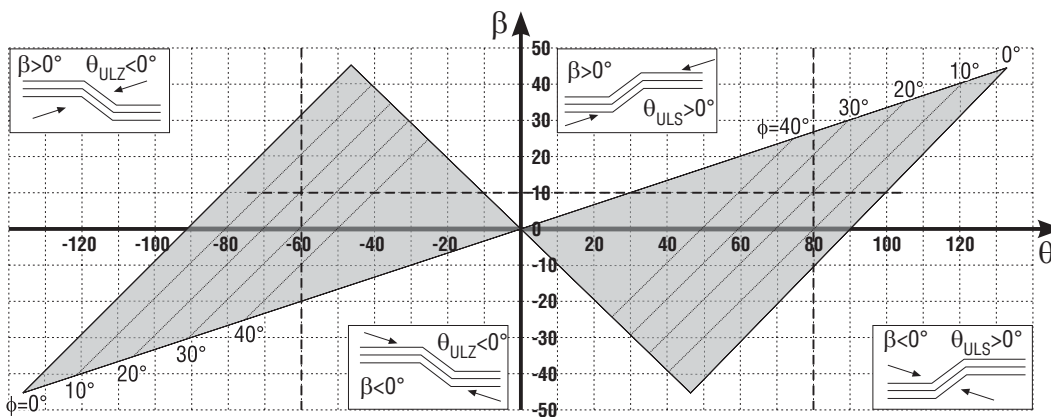
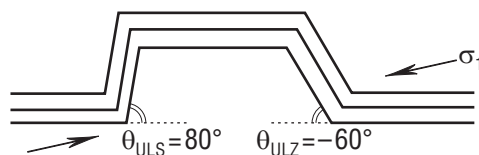
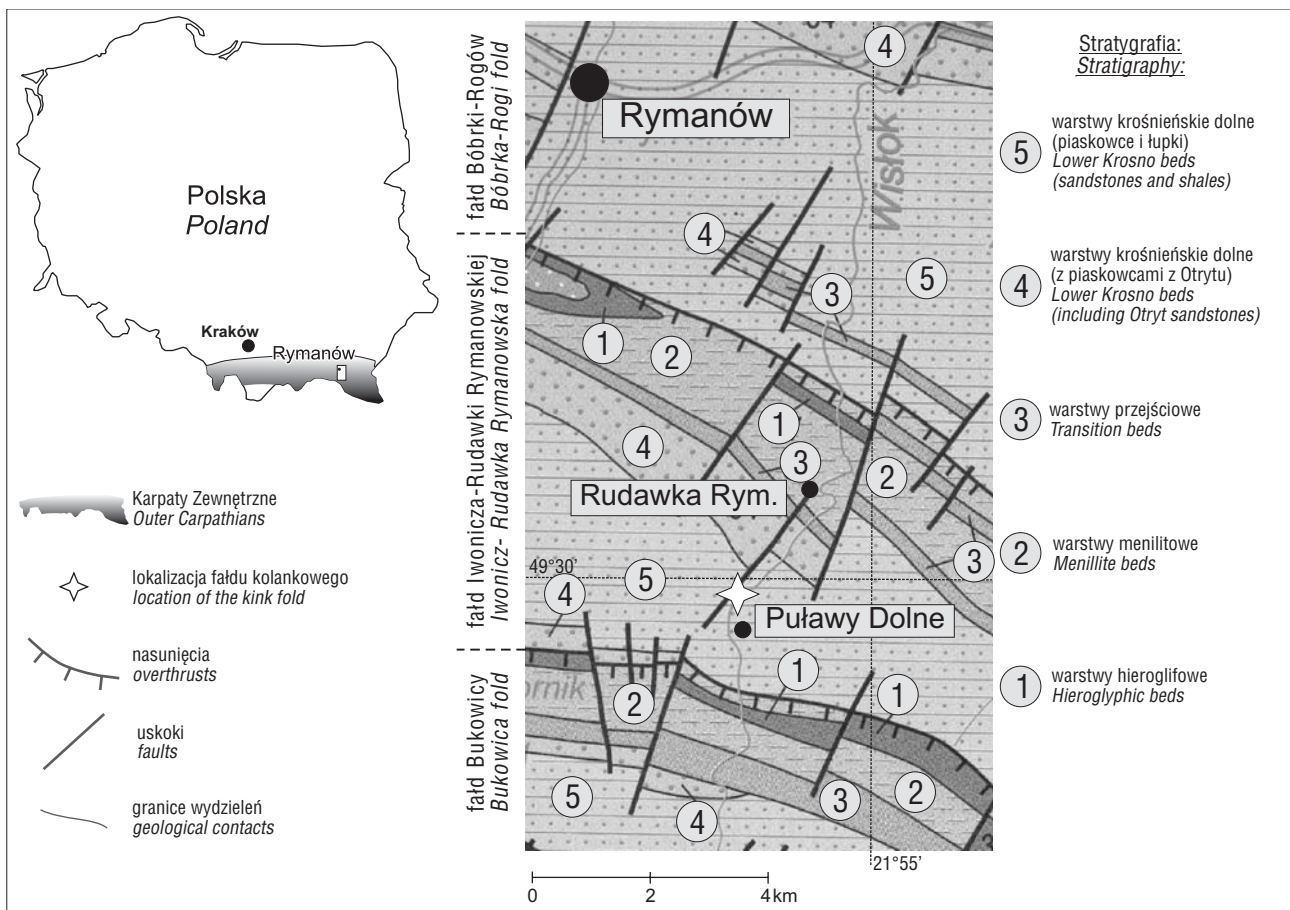


Fig. 4. Diagram motylowy (wg Johnson, 2000, zmodyfikowane) z przykładem interpretacji. Objaśnienia w tekście

Fig. 4. Butterfly diagram (after Johnson 2000, modified) with an example of the interpretation

Przykład:
An example:





Ryc. 5. Lokalizacja odsłonięcia fałdu kolankowego z rzeki Wisłok na tle fragmentu mapy geologicznej Karpat zewnętrznych (wg Jankowski i in., 2004, zmodyfikowane)

Fig. 5. Location of the outcrop of the kink fold in the Wisłok river against the background of the geological map of the Outer Carpathians (after Jankowski et al., 2004, modified)

na odcinku od Rudawki Rymanowskiej po okolice Puław występuje cały szereg fałdów, które można zinterpretować jako typowe fałdy kolankowe. Jednym z nich jest fałd kolankowy występujący w podcięciu lewego brzegu rzeki Wisłok w miejscowości Puławy Dolne (ryc. 5).

Badane odsłonięcie znajduje się w obrębie skał fliuszowych należących do płaszczowiny śląskiej, która na badanym obszarze charakteryzuje się budową fałdowo-łuskową. Fałd kolankowy występuje w obrębie fałdu Tokarni-Rudawki Rymanowskiej-Iwonicza Zdroju (Ślaczka i in., 1991), budującego brzeżną, południową część centralnego synklinorium karpackiego. Odsłaniają się tu oligoceńskie warstwy krośnieńskie dolne (ryc. 5).

Opis

W skarpię o wysokości około 15 m (ryc. 6) odsłaniają się średnio- i cienkoławicowe piaskowce z cienkimi (do 15 cm) wkładkami szarych łupków. W pakiecie tym występuje S-kształtny, monoklinalny fałd kolankowy. Fałd ten tworzą dwa równoległe do siebie, połogie skrzydła zewnętrzne o orientacji 118/23Sn i 120/25Sn (n — położenia normalne), połączone stromym skrzydłem wewnętrznym o położeniu 110/75No (o — położenia odwrócone). Przeguby łączące skrzydła zewnętrzne z wewnętrznym są ostre i złamane. Płaszczyzny środkowe o orientacji 102/25N i 118/23N ograniczają pasmo kolankowe o szerokości około

6 m. Kąt zablokowania fałdu kolankowego wynosi $\theta_{LS} = 80^\circ$.

W zapadających pod niewielkim kątem skrzydłach zewnętrznych, w obrębie ławic piaskowców występuje zespół spękań prostopadłych do uławicenia o średniej orientacji 110–125/70–80N i średnim rozstępie 10 cm. Spękania te mają nierówne powierzchnie, a ślady przecięcia z powierzchniami uławicenia są krzywoliniowe. W powiązaniu z gęstymi powierzchniami uławicenia zespół ten tworzy typowy kliważ olówkowy z osiami o rozciągłości zgodnej z osiami fałdu kolankowego.

W stromym skrzydle wewnętrznym w stropowej części piaskowców występuje zespół drobnych uskoków o orientacji 110/75S (ryc. 6). Na ich powierzchniach występują lustra tektoniczne z drobnymi rysami, wskazującymi na zrzućowy, odwrócony typ tych uskoków. Wzdłuż ich powierzchni dochodzi do przemieszczenia rzędu kilku cm. Omawiany zespół ma cechy typowych niskokątowych spękań Riedla (R) o kącie 25–35° w stosunku do powierzchni uławicenia. Równocześnie na kontaktach ławic piaskowców i łupków również są widoczne ślady przemieszczenia w postaci zlustrowanych powierzchni.

Kilkanaście metrów na północ od odsłonięcia poniżej północnego, zewnętrznego skrzydła fałdu kolankowego odsłania się strefa deformacji tektonicznych, w której występuje seria stromych uskoków normalnych o średniej orientacji 110/80N. Towarzyszą im fałdy o różnicowanej geometrii (symilarne i koncentryczne), zbudowane z

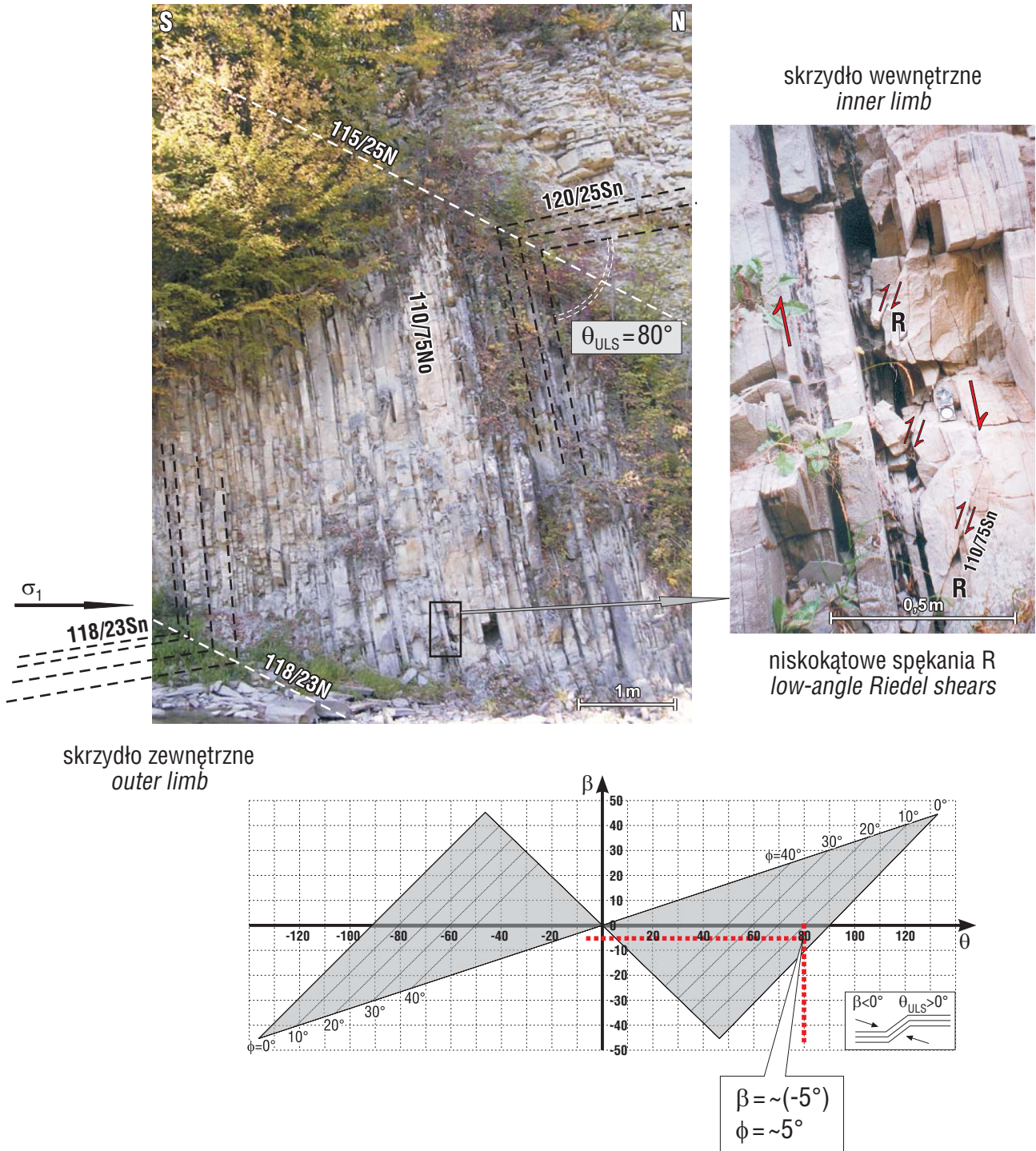
łupków i piaskowców cienkoławicowych. Dodatkowo, w strefie tej występują martwice wapienne oraz wysięki siarkowodoru.

Interpretacja

Odslaniający się gęsto uławicony pakiet skał z przewagą piaskowcowych ławic niepodatnych i niewielkimi wkładkami podatnych łupków (ryc. 6) jest typowym środowiskiem powstawania fałdów kolankowych. Na północ i na południe od osłonięcia, gdzie miąższość wkładek łupkowych jest większa, a ławice piaskowców są mniej liczne

obserwuje się fałdy, powstające na drodze zginania z poślizgiem. Jest to przykład potwierdzający obserwacje Rechesa & Johnsona (1976) o wpływie miąższości przeławiczeń warstw podatnych na możliwość powstania fałdów kolankowych.

Jednym z warunków powstania fałdu kolankowego jest obecność lokalnej perturbacji (zaburzenia) w uławiceniu. W omawianym przypadku takim zaburzeniem mogła być wcześniej istniejąca strefa uskokuwa, ulokowana w strefie położonej pod północnym, zewnętrznym skrzydłem fałdu kolankowego. Potwierdzeniem jej obecności są opisywane



Ryc. 6. Szczegółowa interpretacja fałdu kolankowego z rzeki Wisłok
 Fig. 6. Detailed interpretation of the kink fold from the Wisłok river

wcześniej drobne uskoki oraz martwice wapienne i wysięki siarkowodoru.

Na działanie naprężeń ścinających w wewnętrznym skrzydle fałdu kolankowego wskazują niskokątowe spękania Riedla oraz lustra na powierzchniach uławicenia. Na ich podstawie można określić kierunek i zwrot przemieszczenia (ryc. 6). Z kolei, w skrzydłach zewnętrznych (ryc. 6) brak jest takich przemieszczeń, co wskazuje, że siła tarcia na powierzchniach uławicenia nie została przekroczona.

Na podstawie pomierzonego ostatecznego kąta zablokowania $\theta_{ULS} = 80^\circ$, przy użyciu diagramu motylowego (ryc. 6) określono pośrednio wartość kąta tarcia wewnętrznego ϕ na powierzchniach uławicenia, która wynosi około 5° oraz kąt odchylenia osi naprężenia $\sigma_1 \beta = -5^\circ$. Takie wartości wydają się być najbardziej prawdopodobne, ponieważ przy mniejszych wartościach kąta β powstałyby raczej sprzężone fałdy (pasma) kolankowe, a przy większych kąt tarcia na powierzchniach uławicenia byłby bliski zera. Orientacja osi naprężenia σ_1 wynosi około 120/18N. Równocześnie omawiany fałd kolankowy musiał powstawać pod znacznym nadkładem, którego efektem było oddziaływanie naprężenia σ_3 .

Przedstawiona interpretacja drobnych struktur potwierdza różne mechanizmy deformacji panujące w wewnętrznym i zewnętrznych skrzydłach fałdu kolankowego.

Wnioski

Fałdy i pasma kolankowe, ze względu na specyficzny mechanizm powstawania są dobrym wskaźnikiem warunków deformacji w ośrodkach skalnych z gęstymi powierzchniami anizotropii. W przypadku dużej powszechności występowania na pewnych obszarach mogą wskazywać na specyficzny model fałdowania w dużej skali.

Ponieważ fałdy te powstają pod znacznym ciśnieniem otaczającym, to ich obecność może wskazywać na występowanie dużego nadkładu. W jednostkach tektonicznych typu płaszczowinowego obecność takich fałdów na przedpolu nasunięć może pośrednio wskazywać, że ich obecny zasięg jest erozyjny.

Fałdy kolankowe powstają w miejscu wcześniej istniejących zaburzeń (perturbacji), które mogą mieć charakter zaburzeń tektonicznych (spękania, uskoki) lub sedymentacyjnych (np. hieroglify). Wielkość fałdu jest proporcjonalna do wielkości zaburzeń. Fałdy kolankowe o wielkości kilku- kilkunastu metrów mogą wskazywać na występowanie dużych stref uskokowych, mogących mieć niejednokrotnie znaczenie regionalne.

Do interpretacji fałdów kolankowych użyteczny jest diagram motylowy. Znając wielkość ostatecznego kąta zablokowania można określić kąt tarcia wewnętrznego na powierzchniach anizotropii oraz orientację naprężenia σ_1 , szczególnie w przypadku występowania sprzężonych pasm kolankowych. W przypadku monoklinalnych fałdów kolankowych jest to również możliwe, jak to wynika z przedstawionego przykładu interpretacji.

We fliszu Karpat zewnętrznych fałdy kolankowe wydają się być bardziej powszechne niż wynika to z dotychczasowych badań i publikacji, dlatego też ich szczegółowa analiza wymaga dalszych badań.

Niniejszy artykuł został opracowany i sfinansowany ze środków badań własnych (BW-1642/5) oraz badań statutowych (BST-977/2).

Literatura

- AHMER WADEE M., HUNT G.W. & PELETIER M.A. 2004 — Kink band instability in layered structures. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 52: 1071–1091
- ANDERSON T.B. 1964 — Kink bands and related geological structures. *Nature*, 202: 272–274.
- ANDERSON T.B. 1968 — The geometry of a natural orthorhombic system of the kink bands. *Research in tectonics. Geol. Surv. Canada Papers*, 68–52: 200–219.
- ANDERSON T.B. 1974 — The relationship between kink bands and shear fractures in the experimental deformation of slates. *J. Geol. Soc. London*, 130: 367–382.
- BARTON N. & CHOUBEY V. 1977 — The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*, 10: 1–54.
- DAVIS G.H. & REYNOLDS S.J. 1996 — *Structural Geology of Rocks and Regions*. John Wiley & Sons. inc.
- DENNIS J.G. 1987 — *Structural Geology, An Introduction: 1–448*. Wm.C. Brown Publishers, Dubuque, Iowa.
- DADLEZ R. & JAROSZEWSKI W. 1994 — *Tektonika*. Wydawnictwa PWN Warszawa.
- GAY N.C. & WEISS L.E. 1974 — The relationship between principal stress directions and the geometry of kinks in foliated rocks. *Tectonophysics*, 21: 287–300.
- HALICKI B. 1963 — *Tektonika Podhala*. *Rocz. Pol. Tow. Geol.*, t. 33, z. 3: 349–362.
- HONEA E. & JOHNSON A.M. 1976 — Development of sinusoidal and kink folds in multilayers confined by rigid boundaries. *Tectonophysics*, 30: 197–239.
- JANKOWSKI L., KOPCIOWSKI R. & RYŁKO W. 2004 — *Geological Map of the Outer Carpathians: Borelands of Poland, Ukraine and Slovakia*. Polish Geological Institute.
- JAROSZEWSKI W. 1980 — *Tektonika uskoków i fałdów: 1–360*. Wyd. Geol.
- JOHNSON K.M., MANUSZAK J.D. & JOHNSON A.M. 2001 — How kinks work and how to work with kinks. Strona www.eas.purdue.edu/physproc/how_kinks_form.htm.
- JOHNSON K. M. & MANUSZAK J. D. 2001 — How to analyze kink folds: field examples from the Eastern Alaska Range and San Rafael Swell, Utah. Strona physproc/easy_guide_to_kinks.htm.
- JOHNSON K.M. 2000 — *Methods of structural analysis of the Spotted Wolf section of the San Rafael monocline, Utah [M.S. thesis]: Indiana, Purdue University: 1–202*.
- KONON A. 2001 — *Tectonics of the Beskid Wyspowy Mountains (Outer Carpathians, Poland)*. *Geol. Quart.*, 45: 179–204.
- MASTELLA L. 1988 — *Budowa i ewolucja strukturalna okna tektonicznego Mszany Dolnej, polskie Karpaty Zewnętrzne*. *Ann. Soc. Geol. Pol.*, 58: 53–173.
- PATERSON M.S. & WEISS L.E. 1961 — Folding and boudinage of quartz — rich layers in experimental deformed phyllite. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 79: 795–812.
- PRICE N.J. & COSGROVE J.W. 1990 — *Analysis of Geological Structures*. Cambridge Univ. Press: 1–502.
- RAMSAY J.G. & HUBER M.I. 1987 — *The Techniques of Modern Structural Geology. Vol. 2: Folds and Fractures*. Academic Press: 1–700.
- RECHES Z. & JOHNSON A.M. 1976, Asymmetric folding and monoclinical kinking: *Tectonophysics*, 35: 295–340.
- RUBINKIEWICZ J. 2002 — *Ewolucja strukturalna płaszczowiny śląskiej pomiędzy Oslawą a Hoczewką — Bieszczady*. *Rozprawa doktorska.*, Arch. Inst. Geol. Podst. Uniwersytetu Warszawskiego.
- SRIVASTAVA D.C., LISLE R.J., IMRAN M., KANDPAL R. 1999 — A New Approach for Paleostress Analysis from Kink Bands: Application of Fault-Slip Method. *J. Geol.*, 107: 165–176.
- ŚLĄCZKA A., BOBER L., CHOWANIEC J., CIESZKOWSKI M., GIERAT-NAWROCKA D., ZUCHIEWICZ W. 1991 — *Objaśnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski 1: 50 000*. Arkusz Jaśliska (1056). *Wyd. Geol.*: 1–97.
- TWISS R.J. & MOORES E.M. 1992 — *Structural Geology*. W.H. Freeman and Company. New York: 1–532.
- WEISS L.E. 1968 — Flexural slip folding of foliated model materials, [W:] Baer, A.J. & Norris, D.K. (eds) — *Proceedings of the Conference on Research in Tectonics: Geological Survey of Canada Paper 68–52: 294–333*.
- WEISS L.E. 1980 — Nucleation and Growth of Kink Bands. *Tectonophysics* 65: 1–38.