

Współczesny reżim tektoniczny w Polsce na podstawie analizy testów szczelinowania hydraulicznego ścian otworów wiertniczych

Marek Jarosiński*



Recent tectonic stress regime in Poland based on analyses of hydraulic fracturing of borehole walls. Prz. Geol., 53: 863–872.

S u m m a r y. Magnitudes of the recent tectonic stress were estimated based on the hydraulic fracturing data from Poland. In spite of a low quality of the tests, consistent results for particular regions were obtained. For the Outer Carpathians three hydraulic fracturing tests indicate strike-slip stress regime with the local deviation towards the thrust fault regime. Along the front of the Carpathians within the foredeep complex and its basement, low intensity of strike-slip regime with local tendency towards normal fault regime is revealed from tests performed in four wells. Stable, strike-slip stress regime is determined for the Lublin Basin, based on fracturing tests from four wells. Singular result from the Fore-Sudetic Monocline suggests normal fault stress regime for the Permian complex below Zechstein evaporates. Heterogeneity of the stress field within each of these regions is presumably controlled by tectonic structures inherited after the Variscan and the Alpine epochs. For the SE part of Poland, an estimation of the general trend of stress increase with depth gives 2.9 MPa/km for the maximum horizontal stress and 1.9 MPa/km for the minimum horizontal stress.

tonic structures inherited after the Variscan and the Alpine epochs. For the SE part of Poland, an estimation of the general trend of stress increase with depth gives 2.9 MPa/km for the maximum horizontal stress and 1.9 MPa/km for the minimum horizontal stress.

Key words: hydraulic fracturing, recent stress, tectonics, Poland

Mimo wielu prób analizy współczesnej geodynamiki skorupy ziemskiej na terenie Polski (Liszkowski, 1982; Zuchiewicz, 1995; Guterch & Lewandowska-Marciniak, 1975; Wiejacz, 1994; Gibowicz, 1984; Jarosiński, 1998; 1999; 2005), po dziś dzień nie były badane rozmiary współczesnych naprężeń tektonicznych. Na podstawie analizy struktur zniszczeniowych ścian otworów wiertniczych, zwanych *breakouts*, można jedynie stwierdzić, że anizotropia naprężeń poziomych jest zjawiskiem powszechnym w obrębie pokrywy osadowej skorupy ziemskiej, prawie w całym kraju (Jarosiński, 1999, 2005). Nieliczne dane, na podstawie których określano reżim naprężeń, pochodzą z analizy mechanizmów kilku wstrząsów sejsmicznych (Gibowicz, 1984; Wiejacz, 1994). W niniejszym opracowaniu, do obliczenia wielkości naprężeń tektonicznych wykorzystano wyniki testów miniszczelinowania hydraulicznego ścian otworów wiertniczych, jakie wykonywane są w celu przygotowania przemysłowych zabiegów szczelinowania, służących stymulacji przepływu bituminów do otworów produkcyjnych. Wyniki takich testów nie były do tej pory w Polsce wykorzystane do analiz geodynamicznych, mimo iż na świecie stanowią one od dawna przedmiot badań (np. Haimson & Fairhurst, 1967; Haimson, 1978; Zoback i in., 1980; Warpinski i in., 1981; Rumel i in., 1983; Engelder, 1993; Amadei & Stephansson, 1997) jak również uznawane są za najbardziej wiarygodną metodę wyznaczania wielkości naprężeń tektonicznych na dużych głębokościach. W literaturze polskiej poświęcono tej tematyce tylko krótkie wzmianki (Jarosiński, 1994; 1999).

Pierwsze zabiegi szczelinowania hydraulicznego ścian otworów wiertniczych dla zwiększenia drenażu ropy naftowej wykonywano już na początku XX w. (Engelder, 1993). We wstępnej fazie rozwoju metody uważano, że ściana otworu pęka pod ciśnieniem zbliżonym do litostatycznego, a zatem wnioskowano, że szczeliny hydrauliczne rozwierają zwykle położe powierzchni uławiczenia. Po latach obserwacji wykazano, że ciśnienie krytyczne propagacji szczelin jest w większości przypadków znacząco niższe od ciśnienia litostatycznego, oraz, że szczeliny hydrauliczne są zwykle pionowe (Hubbert & Willis, 1957). Lokalizację pęknięć hydraulicznych prowadzono wówczas przez

wypełnienie szczelin radioaktywnym piaskiem, a następnie rejestrację anomalii promieniowania gamma sondami geofizycznymi (Heck, 1960). Dopiero skonstruowanie pakera odciskającego relief ściany otworu (ang. *impression packer*) umożliwiło bezwzględną orientację tych spekań. Dzięki tej metodzie, Anderson & Stahl (1967) stwierdzili, że w złożach zachodniej części USA szczeliny hydrauliczne mają stabilny kierunek propagacji ENE–WSW, który może być wymuszony przez współczesne naprężenia tektoniczne. Po latach, innymi metodami wyznaczono kierunek oddziaływania kompresji w tej części USA, który pokrywa się z kierunkiem spekań hydraulicznych (Zoback & Zoback, 1980).

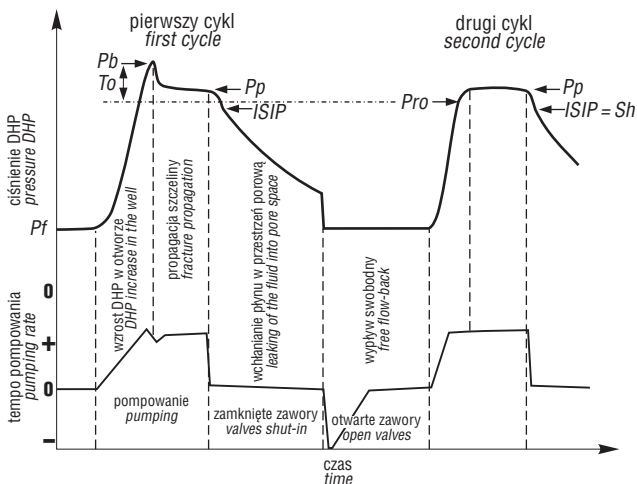
Metodyka badań

Przebieg typowego testu szczelinowania hydraulicznego. Szczelinowanie hydrauliczne polega na rozsadzeniu ściany otworu wiertniczego płynem technologicznym o podwyższonym ciśnieniu. Płyn tłoczy się w obręb uszczelnionego korkami hydraulicznymi (pakerami) fragmentu otworu. Podczas testu rejestrowana jest wydajność pomp i ciśnienie między pakerami — *DHP* (ang. *down-hole pressure*). W przypadku braku manometru w otworze, ciśnienie płynu mierzone jest na głowicy pompy i przeliczane następnie na ciśnienie w otworze, z uwzględnieniem obciążeń hydrostatycznych i hydrodynamicznych. Przy interpretacji wyników testów szczelinowania, zasadniczym problemem jest określenie, jakim zjawiskom odpowiadają poszczególne fragmenty krzywych ciśnienia (ryc. 1).

W pierwszej fazie testu, przed osiągnięciem punktu zniszczenia P_b (ang. *breakdown pressure*), wzrost ciśnienia *DHP* powinien być liniowy, co świadczy o szczelności pakerów i braku rozwartych szczelin tektonicznych. Zwykle, w celu uniknięcia infiltracji płynu w mikrospeknięcia lub pory w ścianie otworu, stosowany jest maksymalny gradient ciśnienia. Przenikanie płynu w ściany prowadzi do podwyższenia ciśnienia porowego w otaczającej skale i wystąpienia efektu poroelastycznego (Schmitt & Zoback, 1989). Jest on znaczący w skałach przepuszczalnych, znajdujących się na dużych głębokościach (powyżej 2,5 km); wówczas utrudnia on interpretację testu i jest źródłem dodatkowego błędu w obliczeniach.

Pik ciśnienia w punkcie P_b wskazuje na hydrauliczne rozsadzenie ściany otworu. Ostry pik jest potwierdzeniem

*Państwowy Instytut Geologiczny, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; marek.jarosinski@pgi.gov.pl



Ryc. 1. Schematyczny wykres ciśnienia płynu w otworze (*DHP*) oraz wydajności pomp podczas dwóch cykli testu szczelinowania hydraulicznego, wg Evansa i in. (1989), zmodyfikowane. Zaznaczono punkty i ciśnienia krytyczne, wykorzystywane do obliczania naprężeń tektonicznych: P_b — ciśnienie zniszczenia ściany otworu; P_{ro} — ciśnienie rozwarcia istniejącego pęknięcia; *ISIP* — ugięcie krzywej spadku ciśnienia, odpowiadające zwykle ciśnieniu zatrzaśnięcia szczeliny; P_p — ciśnienie propagacji szczeliny; T_0 — wytrzymałość tensyjna ściany otworu

Fig. 1. Schematic curves of the down-hole pressure (*DHP*) and the rate of pumping during two cycles of the hydraulic fracturing test, after Evans et al. (1989), modified. Marked are the characteristic points, utilized for tectonic stress calculations: P_b — borehole wall breakdown pressure; P_{ro} — reopening pressure of the pre-existing crack; *ISIP* — instantaneous shut-in pressure, usually corresponds to the closure of hydraulic fracture; P_p — fracture propagation pressure; T_0 — tensional strength of the borehole wall

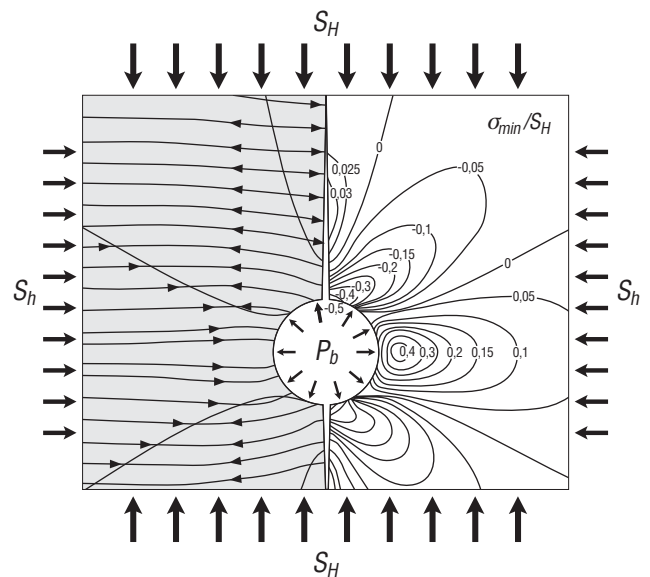
wystąpienia pierwotnego zniszczenia ściany. Gdy skała jest zniszczona tektonicznie, wówczas otwierane mogą być naturalne spęknięcia, które zorientowane są optymalnie względem największego naprężenia poziomego S_H . W takim przypadku rejestruje się ciśnienie rozwarcia szczeliny P_{ro} (ang. *reopening pressure*). Odpowiadający mu pik ciśnienia jest zaokrąglony lub w ogóle nie występuje, a pojawia się jedynie ugięcie wykresu wzrostu ciśnienia. Wyjątkowo, również w punkcie P_b może nie występować pik ciśnienia (Hickman & Zoback, 1983). Przyczyną tego może być silna tensja na powierzchni otworu, pochodna naprężenia dyferencjalnego ($S_H - S_h$), która powoduje, że ciśnienie zniszczenia skały może być wyraźnie niższe od najmniejszego naprężenia poziomego S_h , a zatem niższe również od ciśnienia propagacji szczeliny P_p (ryc. 2, 3).

W efekcie pęknięcia ściany otworu, dochodzi do ucieczki płynu, któremu towarzyszy chwilowy spadek ciśnienia (ryc. 1). Podczas dalszego pompowania, płyn ucieka w obręb propagującej się szczeliny, co powoduje utrzymanie się ciśnienia na względnie stałym poziomie P_p (ang. *propagation pressure*).

W kolejnej fazie zabiegu przerywa się pompowanie i zamyka zawory, co powoduje stopniowy spadek ciśnienia płynu wchłanianego w przestrzeń porową i spęknięcia w ścianie szczeliny hydraulicznej i otworu. Początkowo ciśnienie spada szybko, gdyż występuje duża różnica ciśnień pomiędzy naturalnym ciśnieniem porowym, a ciśnieniem płynu technologicznego. Następnie, gdy ciśnienie płynu spadnie poniżej wielkości prostopadłego do niej naprężenia w skałę, szczelina ulega zatrzaśnięciu, po czym spadek ciśnienia jest znacznie wolniejszy, ponieważ płyn już nie penetruje swobodnie szczeliny, a jest wchłaniany przez szczerkowo rozwarłe spęknięcia i przez ścianę otworu.

Punkt, w którym następuje największy gradient spadku ciśnienia (maksymalne ugięcie krzywej ciśnienia), zwany *ISIP* (ang. *instantaneous shut-in pressure*), uznaje się zwykle za ciśnienie zatrzaśnięcia szczeliny hydraulicznej. Ponieważ pionowe pęknięcie hydrauliczne rozwija się prostopadle względem kierunku oddziaływania najmniejszego naprężenia poziomego S_h (ryc. 2), zatem w momencie zatrzaśnięcia szczeliny ciśnienie *ISIP* = S_h .

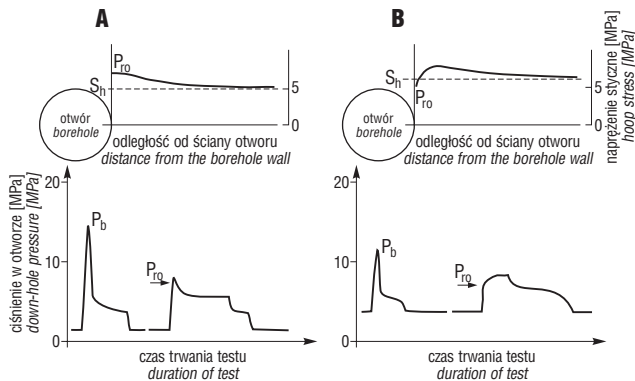
Postulowana zgodność ciśnienia *ISIP* z S_h dotyczy większości testów mikro- i miniszczelinowania hydraulicznego (Tunbridge, 1989), podczas których, w szczelinę wtłaczana jest mała objętość płynu (od kilku do kilkunastu m³). W przemysłowych zabiegach, służących do stymulacji produkcji, wykorzystuje się znacznie większe ilości płynów, a szczelina hydrauliczna osiąga długość kilkuset metrów. W takim przypadku, ze względu na dłuższy czas trwania zabiegu i znaczną objętość wtłoczonego do otworu płynu, następuje stopniowy wzrost ciśnienia porowego w otaczającej skałę. Zjawisko to powoduje spowolnienie wchłaniania płynu w przestrzeń porową po zakończeniu pompowania. Wówczas największy gradient spadku ciśnienia *ISIP* może wystąpić nie na skutek zatrzaśnięcia szczeliny, jak ma to miejsce w testach mniejszego kalibru, ale na skutek zaprzestania pompowania płynu (Detournay i in., 1987). Ze względu na inercję hydrodynamiczną, *ISIP* występuje z pewnym opóźnieniem po zakręceniu zaworów, ale ciśnienie w tym punkcie jest zwykle wyższe niż S_h . Różnica pomiędzy *ISIP* a S_h może być tym większa, im



Ryc. 2. Przykład zaburzeń trajektorii i wielkości najmniejszego naprężenia lokalnego (σ_{min}) wokół otworu wiertniczego, wg Hergeta (1988), zmienione. Szczelina hydrauliczna powstaje w miejscu gdzie naprężenia styczne na powierzchni otworu mają najmniejszą wartość (w tym przypadku są tensyjne) i propaguje się w kierunku prostopadłym do trajektorii najmniejszego lokalnego naprężenia σ_{min} , a zatem w kierunku oddziaływania S_H . Wielkość σ_{min} jest skalowana do maksymalnego regionalnego naprężenia poziomego S_H . S_h — najmniejsze naprężenie regionalne; P_b — ciśnienie płynu w otworze odpowiadające szczelinowaniu

Fig. 2. An example of minimum local

stress (σ_{min}) trajectories and stress magnitude disturbances in the vicinity of the borehole, after Herget (1988), changed. Hydraulic fracture is triggered in the place where the hoop stress at the borehole wall is minimum (tensional stress in this case). The fracture propagates in direction perpendicular to the trajectories of σ_{min} , that is, in direction of S_H . The magnitude of σ_{min} is calibrated to S_H . S_h — minimum regional stress; P_b — break off fluid pressure



Ryc. 3. Dwa warianty rozkładu lokalnych naprężeń koncentrycznych w kierunku propagacji szczeliny hydraulicznej i związane z nimi wykresy ciśnienia płynu podczas dwóch cykli testu szczelinowania, wg Huberta i Willis (1957). A — Pik ciśnienia P_{ro} przy otwarciu szczeliny występuje, gdy naprężenie styczne w punkcie zniszczenia jest większe od S_h . B — Ekstensyjna składowa naprężenia stycznego w punkcie zniszczenia, sprawia że ciśnienie rozwarcia szczeliny P_{ro} spada poniżej S_h , i wówczas pik ciśnienia P_{ro} w ogóle się nie zaznacza w drugim cyklu pompowania. W takim przypadku pik P_b jest wyłącznie efektem wytrzymałości tensyjnej skały

Fig. 3. Two examples showing relation of tangential stress magnitude in direction of the fracture propagation and the shape of related curves of the down-hole pressure during hydraulic fracturing test, after Hubert and Willis (1957), changed. A — The peak of P_{ro} is due to the hoop stress in the point of failure highest than S_h . B — Extensional component of hoop stress in the point of failure causes P_{ro} to be lower than S_h , which is the reason for a lack of the pressure peak in the second cycle of pumping. In this case the breakdown peak P_b is produced solely by tensional strength of the borehole wall

większa jest ilość zużytego do zabiegu płynu. Jeżeli chłonność otaczającej skały jest znikoma, to spadek ciśnienia jest powolny i punkt maksymalnego ugięcia krzywej spadku ciśnienia może być trudny do uchwycenia.

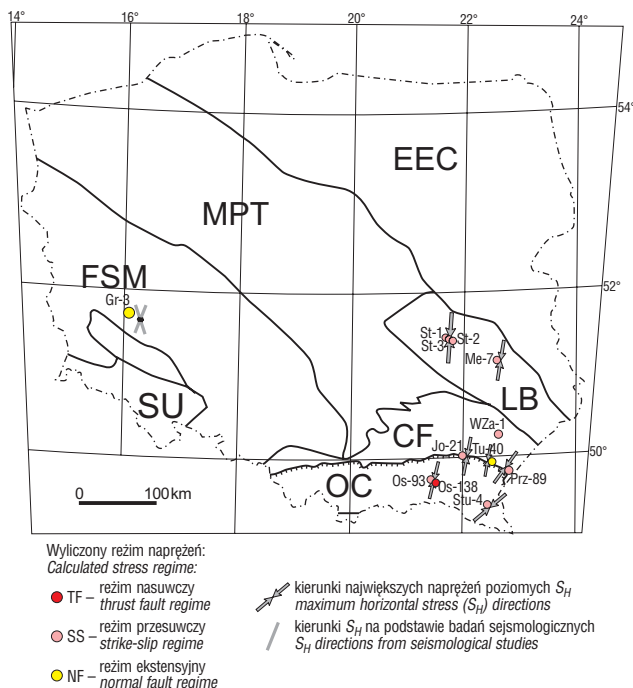
Po dłuższym czasie od zaobserwowanego punktu *ISIP*, zawory są odkręcane i ciśnienie *DHP* powraca do poziomu hydrostatycznego (ryc. 1). W tym czasie następuje wypływ wsteczny płynu technologicznego z masywu skalnego do

otworu. Jeżeli szczelina nie przebije poziomu odciętego pakera, na powierzchnię powraca zwykle do 80% wpompowanego do otworu płynu. Pozostała objętość zostaje uwięziona w przestrzeni porowej oraz w obrębie niedokładnie domkniętej szczeliny.

W testach wysokiej jakości, szczelinowanie powtarza się kilkakrotnie w tych samych odcinkach otworu. Sprzyja to lepszej identyfikacji punktów charakterystycznych na wykresach ciśnień. Ponadto, w kolejnych cyklach rozwiera się wcześniej już zainicjowana szczelina (ryc. 1). Umożliwia to wyznaczenie wytrzymałości tensyjnej skały na podstawie różnicy pomiędzy ciśnieniem pierwotnego pęknięcia skały i ponownego rozwarcia szczeliny $T_0 = P_b - R_{ro}$. Ze względu na udrożnienie kanałów filtracji płynu w skały otaczające, w kolejnych cyklach wyostrza się również punkt *ISIP*, który może być coraz bliższy S_h .

Po zabiegu zwykle wykonuje się rejestrację śladów powstałych pęknięć ściany otworu za pomocą skanerów otworowych lub pakarów odciskających, umożliwiającą również wyznaczenie kierunku propagacji szczeliny. Kartataże otworowe wykonuje się również przed testem w celu doboru właściwego interwału, w którym ściana otworu nie jest zniszczona ani technologicznie, ani tektonicznie.

Specyfika testów wykonywanych w Polsce. Pierwsze testy miniszczelinowania w Polsce przeprowadzono w połowie lat 90. Wszystkie testy zostały wykonane w otworach produkcyjnych, w celu zaprojektowania właściwych zabiegów, stymulujących dopływ bituminów do otworu. Nie są one, zatem, skonfigurowane optymalnie pod kątem badań geodynamicznych. Wymienić można wiele różnic pomiędzy testami przeprowadzonymi w Polsce, a testami najwyższej jakości, zaprojektowanymi na potrzeby analizy naprężeń. (1) Szczelinowania prowadzone były w otworach zarurowanych z perforacją, a nie na gołej ścianie otworu, co uniemożliwia rejestrację powstającej szczeliny. (2) Brak takiej rejestracji nie pozwala wykluczyć, że w wyniku testu rozwarte zostanie spękanie tektoniczne o kierunku odbiegającym od pierwotnego pęknięcia hydraulicznego. (3) W testach miniszczelinowania w Polsce zużywa się zwykle do kilkunastu m³ płynu, a zatem należą one do większych w swojej kategorii. Zwiększa to ryzyko wystąpienia rozbieżności pomiędzy *ISIP* i S_h . (4) Przeprowadzany jest tylko jeden cykl



Ryc. 4. Lokalizacja badanych otworów wiertniczych na tle szkicu tektonicznego Polski. Skrótów nazw otworów są umieszczone w tekście. Pokazano kierunki największych naprężeń poziomych S_H dla badanych otworów lub najbliższych im otworów, wg Jarosińskiego (2005) i Gibowicz (1984). Kolory punktów obrazują wyliczony reżim naprężeń. CF — zapadliśko przedkarpacie; EEC — kraton wschodnioeuropejski; FSM — monoklina przedsudecka; LB — basen lubelski; MPT — bruzda śródpolska; OC — Karpaty zewnętrzne; SU — Sudety. Symbole otworów — objaśnienia w tekście

Fig. 4. Location of the analysed boreholes on the background of tectonic sketch of Poland. Abbreviations of borehole names are explained in the text. Maximum horizontal stress (S_H) directions determined from borehole breakout data for the analysed wells and the neighbouring wells are shown (after Jarosiński, in press). CF — Carpathian Foredeep; EEC — East European Craton; FSM — Fore-Sudetic Monocline; LB — Lublin Basin; MPT — Mid-Polish Trough; OC — Outer Carpathians; SU — Sudetes. Well symbols explained in the text

szczelinowania, co może utrudnić prawidłowe rozpoznanie ciśnień krytycznych (P_b , P_{ro} i $ISIP$). (5) Ciśnienie w interwale szczelinowania nie jest mierzone bezpośrednio w otworze, lecz obliczane jako suma obciążeń hydrostatycznych, hydrodynamicznych (na głowicy) oraz oporów tarcia przepływu na instalacji, co stanowi dodatkowe źródło błędów. (6) Stosowano relatywnie długie interwały szczelinowania od kilkunastu do kilkudziesięciu metrów, co z jednej strony, obniża precyzję obliczeń, z drugiej zaś strony daje wynik uśredniony, lepiej charakteryzujący tektoniczne naprężenia regionalne niż testy przeprowadzone w pojedynczych ławicach.

Powyższe niedostatki testów przeprowadzonych w Polsce, na potrzeby badań geodynamicznych podnoszą ryzyko błędów interpretacyjnych. Pomimo to, uzyskane w analizowanych testach krzywe ciśnienia są, w większości przypadków czytelne i stanowią wystarczającą podstawę do wykonania obliczeń wielkości naprężeń. W wielu przypadkach, wyniki zabiegów szczelinowania stanowiły dodatkowe, cenne uzupełnienie danych z testów.

Analiza wielkości naprężeń z testów miniszczelinowania hydraulicznego

W niniejszym opracowaniu przyjęto, że pole naprężeń ma symetrię ortogonalną względem powierzchni ziemi, a zatem również względem pionowych otworów. Wówczas, osie naprężeń głównych odpowiadają osiom naprężeń poziomych S_H i S_h . Taki, ortogonalny układ naprężeń występuje powszechnie w pokrywie osadowej na obszarach platformowych. Lokalnych odchylenia osi naprężeń od pionu można spodziewać się w obszarach silnie zaburzonych tektonicznie, a zatem głównie w Karpatach.

Wokół otworu wiertniczego, naturalne pole naprężeń tektonicznych jest zaburzone przez wystąpienie pustki w skałe (ryc. 2). W sąsiedztwie otworu naprężenia główne ustawiają się stycznie i radialnie do jego ściany. Dochodzi ponadto do podwyższenia naprężeń w kierunku osi najmniejszego naprężenia tektonicznego i obniżenia naprężeń w kierunku osi największego naprężenia, zgodnie z ogólnymi równaniami Kirscha (1898). Wzory te zostały uproszczone przy założeniu, że oś otworu jest równoległa do jednej z osi naprężeń głównych (Hubert & Willis, 1957; por. też: Jarosiński, 1999) oraz uzupełnione o ciśnienie płynu otworowego, ciśnienie porowe oraz naprężenie termalne. W efekcie otrzymujemy równanie, które jest podstawą szacunkowych obliczeń największego naprężenia poziomego z testów szczelinowania hydraulicznego:

$$S_H = 3S_h - P_b - P_0 + T_0 - \sigma_T \quad [1]^*$$

gdzie: S_H i S_h to wielkości naprężeń poziomych, P_b — ciśnienie płynu w otworze, przy którym dochodzi do ekstensyjnego pęknięcia hydraulicznego ściany otworu, P_0 — naturalne ciśnienie porowe (złożowe), T_0 — wytrzymałość ściany otworu na zniszczenie tensyjne, σ_T — naprężenie termalne, wynikające z różnicy temperatury pomiędzy płynem w otworze, a ścianą otworu. Ponieważ do otworu włącza się zawsze płyn chłodniejszy od otaczającej skały, zatem σ_T jest zawsze tensyjne. Temperatura płynu nie jest kontrolowana w trakcie testu, dlatego wielkość tę można jedynie oszacować. Szacunkowe obliczenia (Moos & Zoback, 1990; Stephens & Voight, 1982) wskazują, że w

otworach wiertniczych o typowych średnicach, schłodzenie ściany o ok. 10°C może wzbudzić naprężenia ekstensyjne $\sigma_T < 5$ MPa. Naprężenia takie mają podrzędne znaczenie w otworach, których ściana jest spękana. Zwykle, słabo kontrolowanym parametrem jest również wytrzymałość tensyjna skały T_0 . Porównanie krzywych z testów i zabiegów szczelinowania wskazuje na niewielkie, realne wartości tego parametru dla ścian otworów wiertniczych $T_0 < 5$ MPa. Jest to prawdopodobnie związane z wcześniejszym, technologicznym zniszczeniem ścian otworów wiertniczych. Ponieważ σ_T i T_0 są tego samego rzędu, a we wzorze [1] występują z przeciwnymi znakami, dlatego w przypadku braku danych, można je ze sobą zredukować, bez ryzyka popełnienia większego błędów. Pozostałe parametry: P_{ro} lub P_b oraz S_h odczytywane są wprost z wykresu ciśnienia podczas testu. Z kolei ciśnienie złożowe, P_0 jest dobrze rozpoznane w procesie eksploatacji. Najślabszym ogniwem interpretacji naprężeń z testów szczelinowania hydraulicznego jest prawidłowe wskazanie na krzywej spadku ciśnienia punktu zatrzaśnięcia szczeliny, odpowiadającego S_h . Punkt ten nie zawsze jest jednoznacznie rozpoznawalny, a ma najistotniejszy wpływ na ostateczny wynik obliczeń.

W każdym przypadku starano się rozważyć czy istnieje możliwość alternatywnej interpretacji testu względem konwencjonalnego, reprezentowanego przez równanie [1]. Rozpatrywane były cztery przypadki (Shin i in., 1996):

1) podstawowy, zakładający wystąpienie pierwotnego zniszczenia ściany otworu i sprężystego rozwarcia szczeliny (zgodnie z równaniem [1]);

2) zakładający, że podczas testu rozwierane są wcześniej występujące w skałe spękania, a wówczas:

$$S_H = 3S_h - P_{ro} - P_0;$$

3) pierwotnie występująca w skałe szczelina nie jest domknięta i otwiera się pod wpływem ciśnienia równoważającego naturalne naprężenie tektoniczne: $P_{ro} = S_h$;

4) przy szczelinowaniu otwierana jest szczelina pozioma, gdy $P_{ro} = S_V < P_b$,

gdzie: S_V jest obciążeniem litostatycznym.

Wielkość S_V oszacowano na podstawie założenia, że w zależności od litologii i głębokości, gęstość skał nadkładu waha się w granicach 2,3–2,5 g/cm³, co sugeruje opracowanie statystyczne Szewczyka (2000). Przyjęcie skrajnych wartości w tym zakresie prowadzi do maksymalnej różnicy obciążenia litostatycznego 2 MPa/km. Obliczenia S_V wykonywano dla wartości średniej 2,4 g/cm³, w odniesieniu do środka interwału szczelinowanego. Na podstawie relacji wielkości naprężeń poziomych i pionowych wydzielono trzy reżimy naprężeń:

$S_V > S_H$ — reżim ekstensyjny;

$S_H > S_V > S_h$ — reżim przesuwczy oraz

$S_h > S_V$ — reżim nasuwczy.

Wyniki analizy naprężeń z testów miniszczelinowania ścian otworów

W pracy tej przedstawiono wyniki analiz wszystkich testów miniszczelinowania hydraulicznego w Polsce, dla których uzyskano czytelny zapis zmian ciśnienia. Badane otwory zgrupowane są w czterech obszarach (ryc. 4): w obrębie Karpat zewnętrznych, w obrębie zapadliska przedkarpacciego przed czołem lub poniżej czoła nasunięć karpaccich, w basenie lubelskim oraz jeden otwór na monoklinie przedsudeckiej. Jakość wyników analiz określono subiektywnie, kierując się czytelnością ciśnień krytycznych i stopniem zgodności wyników testów z wynikami zabiegów (tab. 1).

*W opracowaniu tym przyjęto konwencję, że wszystkie naprężenia, ciśnienia i wytrzymałości są dodatnie

Karpaty

Osobnica-93 (Os-93). Test i zabieg przeprowadzono w obrębie fliszu karpackiego. Szczelinowaniu poddano interwał głębokościowy o długości 14 m. W teście wystąpił wybitny pik zniszczenia P_b , a następnie zarejestrowano płaski wykres ciśnienia propagacji szczeliny (ryc. 5). Jako wytrzymałość tensyjną skały (pomniejszoną o naprężenie termalne) przyjęto różnicę pomiędzy ciśnieniem zniszczenia w teście, a ciśnieniem otwarcia szczeliny P_{ro} w zabiegu szczelinowania, wynoszącą: $T_0 - \sigma_T = 5$ MPa. Na krzywej spadku ciśnienia zarejestrowano wyraźne ugięcie ISIP, które zostało uznane za S_h . Ciśnienie odpowiadające S_h jest zbliżone do początkowego ciśnienia propagacji szczeliny, przy niskiej wydajności pomp. Z kolei ISIP z zabiegu jest o kilka MPa wyższe niż z testu i nie może służyć do weryfikacji powyższych założeń.

$$S_H = 3S_h - P_b - P_0 + T_0 - \sigma_T = 3 \times 23 - 29 - 12 + 5 = 33$$

Oszacowano, że w otworze Osobnica-93, w obrębie fliszu karpackiego panuje reżim naprężeń uskoków przesuwczych, o przeciętnym, dla tych głębokości naprężeniu dyferencjalnym: $S_H - S_h = 12$ MPa. Ze względu na niezgodność ciśnienia ISIP z testu i zabiegu, pomiarowi temu nadano niską jakość C.

Osobnica 138 (Os-138). Test szczelinowania hydraulicznego wykonano we fliszu karpackim, w interwale o długości 39 m. Na krzywej wzrostu ciśnienia występuje wyraźny pik zniszczenia (ryc. 5), wskazujący na pierwotne pęknięcie ściany podczas testu. W otworze tym $S_V < P_{ro}$, co sugeruje, że rozwarła została szczelina pozioma (lub połoga) przy wytrzymałości tensyjnej skały $P_{ro} - S_V = 6,4$ MPa. Dlatego, do przypadku tego nie można stosować wzoru [1], odnoszącego się do szczelin pionowych. Z tego powodu, niemożliwe jest wyznaczenie wielkości S_H w tym otworze, ale mimo to stwierdzić można, że panuje tu reżim uskoków nasuwczych, gdyż S_h jest pionowe. Potwierdza to również wartość ciś-

nienia ISIP, która jest zbliżona do S_V . Przy mniej prawdopodobnym założeniu, że rozwierana jest szczelina pionowa, po podstawieniu do wzoru [1] wartości: $T_0 = 4$ MPa, $S_h = 43$ MPa, otrzymamy $S_H = 66$ MPa. Brak kontroli nad orientacją rozwartej szczeliny obniża jakość tego pomiaru do C.

Stuposiany-4 (St-4). Test przeprowadzono w otworze zlokalizowanym w obrębie fliszu płaszczowiny śląskiej, w interwale o długości 60 m. Na krzywej ciśnienia widać wyraźny pik zniszczenia $P_b = 18,5$ MPa (ryc. 5). Ciśnienie to jest porównywalne z obciążeniem litostatycznym S_V , ale ze względu na $P_p < S_V$ nie można podejrzewać rozwarcia szczeliny położej. Na krzywej spadku ciśnienia widoczne jest ugięcie ISIP = S_h , przy ciśnieniu ok. 15 MPa. Przyjęto założenia, że naprężenia termiczne na tak małej głębokości można zaniedbać, natomiast wytrzymałość tensyjną przyjęto na minimalnym poziomie $T_0 = 4$ MPa.

$$S_H = 3S_h - P_b - P_0 + T_0 = 3 \times 15 - 19 - 9 + 4 = 21$$

Dla otworu Stuposiany-4 obliczono reżim uskoków przesuwczych z przeciętną, dla tej głębokości, anizotropią naprężeń poziomych ok. 6 MPa. Należy jednak podkreślić, że przy tak małych głębokościach, niewielkie różnice w oszacowaniu wielkości któregoś z naprężeń mogą prowadzić do odmiennego reżimu tektonicznego. Ze względu na brak kontroli wytrzymałości tensyjnej ściany otworu jakość wyniku została obniżona do C.

Zapadlisko przedkarpackie

Tuligłowy 40 (Tu-40). Test i zabieg szczelinowania przeprowadzono w utworach mioceńskich zapadliska przedkarpackiego. Nietypowy kształt krzywej wzrostu ciśnienia w postaci łagodnie ugiętego łuku (ryc. 6), sugeruje, że w otworze tym nie doszło do hydraulicznego zniszczenia skały, a szczelina była prawdopodobnie otwarta. Wskazuje na to zarówno identyczne ciśnienie otwarcia szczeliny, jak i jej zamknięcia $P_{ro} =$ ISIP. Z tego powodu, do

Tab. 1. Zestawienie parametrów obliczeniowych i wyników obliczeń naprężeń z testów szczelinowania hydraulicznego
Table 1. Values of parameters and results of stress calculations from hydraulic fracturing test

Otwór Well	Głębokość depth [m]	Strat. Stratigraphy	P_0 [MPa]	Pro^* [MPa]	Pp [MPa]	S_h [MPa]	SH [MPa]	S_V [MPa]	SH/SV	SH/ S_h	SH- S_h	Reżim Regime	Q**
Karpaty (Carpathians)													
Osobnica-93	1145-1159	Ce	12	24	23-26	23	33	27	1,22	1,43	10	SS	C
Osobnica-138	1753-1792	Ce	18	49	49	?43	?66	43	?1,5	?1,5	?23	TF	C
Stuposiany-4	750-810	Ce	9	19	16,5	15	22	18	1,22	1,46	7	SS	C
zapadlisko przedkarpackie (Foredeep Basin)													
Tuligłowy-40	1253-1317	Ce	15	20	22	21	28	30	0,93	1,33	7	NF	C
Przemyśl-89	1215-1317	Ce	10	22	26	24	40	30	1,33	1,66	16	SS	A
Jodłówka-21	3159-3213	Ce	34	62	62-64	60	84	76	1,05	1,40	24	SS	B
Wola Zalew.-1	2546-2565	pCm	25	46	47-52	46	70	61	1,15	1,51	24	SS	C
basen lubelski (Lublin basin)													
Stężycza-1	2455-2473	C	25	47	54-59	54	90	60	1,50	1,66	36	SS	C
Stężycza-2	2313-2321	C	22	56	55	47	63	55	1,11	1,29	16	SS	B
Stężycza-3K	2500-2519	C	23	58	57	52	78	60	1,30	1,47	23	SS	B
Mełgiew-7K	4143-4205	D	42	90	86-89	86	126	100	1,26	1,46	40	SS	C
monoklina przedsudecka (Fore-Sudetic monocline)													
Grochowice-3	1634-1639	Pcz	17	32	31,2	28	35	39	0,89	1,25	7	NF	B

*W przypadku wystąpienia w teście ostrego piku zniszczenia P_{ro} jest szacowane na podstawie ciśnienia rozwarcia szczeliny podczas zabiegu, lub dla T_0 przyjmowano wartość średnią 5 MPa. **Q — jakość wyznaczenia reżimu naprężeń: A — dobra; B — średnia; C — niska; Reżimy tektoniczne: NF — uskoków normalnych; SS — uskoków przesuwczych; TF — uskoków nasuwczych; Ce — kenozoik

*In the case of the primary failure occurrence in the test P_{ro} is evaluated based on reopening pressure in the main hydrofracturing event or assuming mean T_0 value estimated on 5 MPa. **Q — quality of stress estimation: A — good; B — moderate; C — low; Tectonic regimes: NF — normal fault; SS — strike-slip fault; TF — thrust fault; Ce — Cenozoic

przypadku tego może nie stosować się wzór uwzględniający zaburzenie pola naprężeń w sąsiedztwie otworu. Niemniej jednak uznanie tej koincydencji za przypadkową upoważnia do obliczeń bez uwzględnienia wytrzymałości tensyjnej skały.

$$S_H = 3S_h - P_{ro} - P_0 = 3 \times 21 - 20 - 15 = 28$$

Otrzymany wynik wskazuje, że w sąsiedztwie tego otworu panuje ekstensyjny reżim naprężeń. Nie można jednak wykluczyć reżimu przesuwczego, gdyż S_H jest bliskie S_V . Do takich samych wniosków prowadzi analiza zabiegu szczelinowania hydraulicznego w tym otworze. Możliwość rozwarcia szczeliny o niewiadomej orientacji, oraz pewna niezgodność między wynikami testu, a wynikami zabiegu, decyduje o relatywnie niskiej jakości wyniku C.

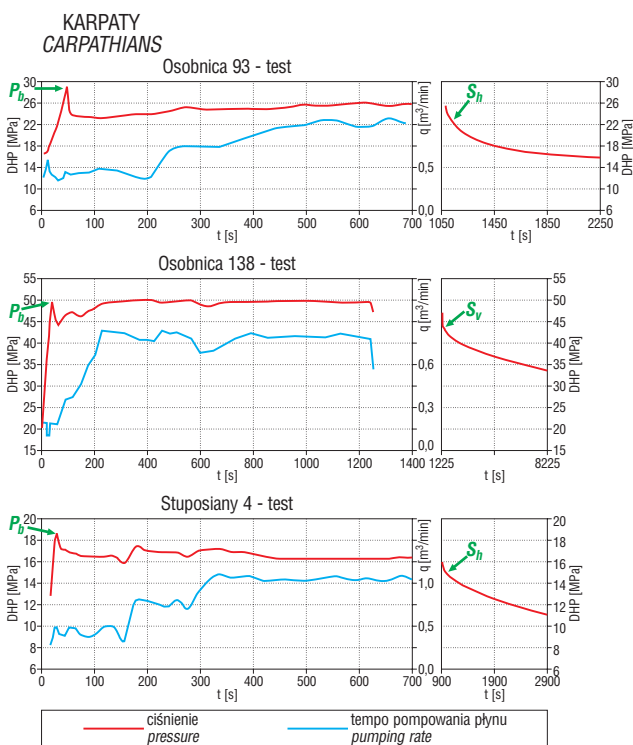
Przemyśl 89 (Prz-89). Test i zabieg przeprowadzono na odcinku otworu o długości 100 m, w miocenie zapadliska, pod czołem nasunięcia karpackiego. Otrzymano wyraźny pik zniszczenia P_b , świadczący o pierwotnym zniszczeniu ściany otworu podczas testu (ryc. 6). Z różnicy ciśnień pomiędzy P_b z testu, a P_{ro} z zabiegu, oszacowano wytrzymałość ekstensyjną skały $T_0 = 5$

MPa. Ze względu na niewielką głębokość i małą temperaturę złoża (40°C) naprężenia termiczne można uznać za zanedbywalne. Zarówno dla testu jak i dla zabiegu otrzymano bardzo wyraźne ugięcie krzywej spadku ciśnienia *ISIP* dla tych samych ciśnień 24 MPa.

$$S_H = 3S_h - P_b - P_0 + T_0 = 3 \times 24 - 27 - 10 + 5 = 40$$

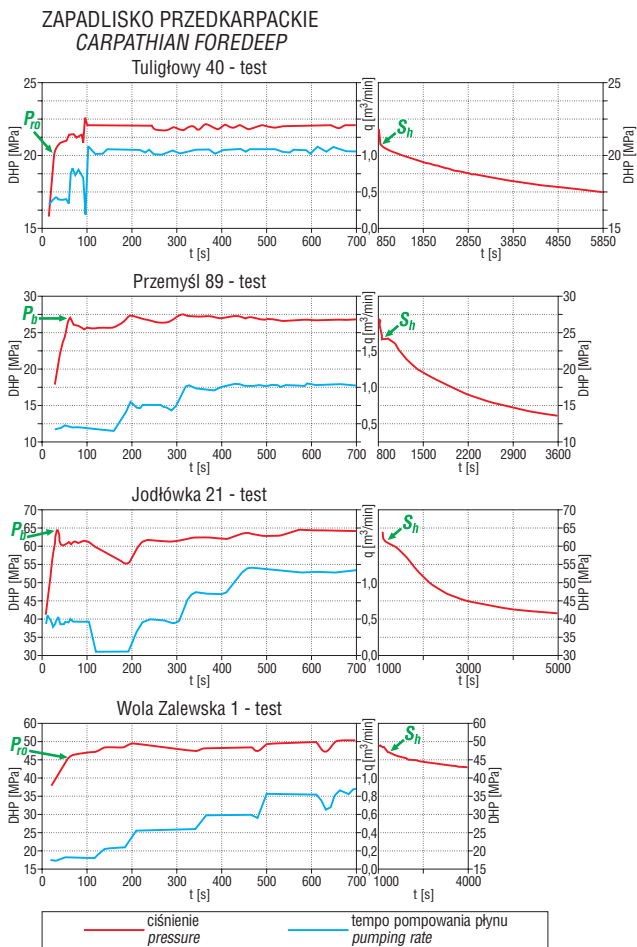
Oszacowano, że wokół otworu Przemyśl-89, panuje reżim kompresyjny uskoków przesuwczych, z przeciętną wielkością naprężenia dyferencjalnego $S_H - S_h = 16$ MPa. Dobra czytelność ciśnień krytycznych i porównywalność wyniku testu i zabiegu decyduje o relatywnie wysokiej jakości wyniku A.

Jodłówka 21 (Jo-21). Test szczelinowania przeprowadzono w interwale o długości 54 m, w utworach miocenu zapadliska przedkarpackiego, u czoła nasunięcia Karpat. W trakcie testu pojawił się wyraźny pik zniszczenia $P_b = 65$ MPa, świadczący o pierwotnym zniszczeniu ściany podczas testu (ryc. 6). Ponieważ przy zabiegu szczelinowania maksimum takie nie występuje, można się spodziewać rozwarcia szczeliny przy ciśnieniu $P_{ro} = 62$ MPa. Różnica: $P_b - P_{ro} = 3$ MPa, jest miarą wytrzymałości tensyjnej ściany otworu, pomniejszonej o ekstensję termiczną, która może być znacząca na tej głębokości. W teście, po ok. 2 min nastąpiła przerwa w pompowaniu, skutkiem czego nastąpiło, prawdopodobnie, zamknięcie szczeliny przy *ISIP* 60 MPa. Następnie, wskutek podwyższenia tempa pompowania, szczelina została rozwarta przy ciśnieniu 61 MPa. Ciśnienie to jest zgodne z P_{ro} uzyskanym w zabiegu szczelinowania. W końcowej fazie



Ryc. 5. Wykresy ciśnienia i tempa pompowania płynu dla testów szczelinowania w otworach zlokalizowanych w Karpatach. Wykresy spadku ciśnienia mają inną skalę czasu niż wykresy etapu zatłaczania płynu do otworu. *ISIP* — ciśnienie w punkcie maksymalnego ugięcia wykresu spadku ciśnienia; P_b — ciśnienie zniszczenia ściany; P_{ro} — ciśnienie rozwarcia istniejącej w ścianie otworu szczeliny; S_h — wielkość najmniejszego naprężenia poziomego, jednoznaczna z ciśnieniem zatrzaśnięcia pionowej szczeliny hydraulicznej; S_V — wielkość naprężenia pionowego, jednoznaczna z ciśnieniem zatrzaśnięcia poziomej szczeliny hydraulicznej

Fig. 5. Diagrams of a pressure and a pumping rate for the hydraulic fracturing tests from wells located in the Carpathians. Right-hand side diagrams recording pressure decrease have different time co-ordinates than the left-hand side diagrams. *ISIP* — instantaneous shut-in pressure, often related to the closure of the hydraulic fracture; P_b — borehole wall break off pressure; P_{ro} — reopening pressure of the pre-existing crack; S_h — minimum horizontal stress coincides with the closure pressure of the vertical hydraulic fracture; S_V — vertical, lithostatic pressure, corresponds to the closure pressure of the horizontal hydraulic fracture



Ryc. 6. Wykresy ciśnienia i tempa pompowania płynu dla testów szczelinowania w otworach zlokalizowanych w zapadlisku przedkarpackim u czoła Karpat (objaśnienia jak na ryc. 5)

Fig. 6. Diagrams of a pressure and a pumping rate for the hydraulic fracturing tests from wells located in the Carpathian Foredeep basin sequence or for a substratum (see fig. 5 for explanation)

testu, na krzywej spadku ciśnienia widoczne jest ugięcie *ISIP* przy ciśnieniu 61 MPa, które jest bliskie uzyskanemu podczas pompowania.

$$S_H = 3S_h - P_{ro} - P_0 = 3 \times 60 - 61 - 34 = 85$$

Na podstawie testu szczelinowania, ustalono, że w otoczeniu otworu Jodłówka 21 występuje reżim uskoków przesuwczych, z niskim, dla danej głębokości, naprężeniem dyferencjalnym $S_H - S_h = 24$ MPa. Czytelność punktów charakterystycznych przy jednoczesnym braku weryfikacji zabiegiem decyduje o średniej jakości wyniku B.

Wola Zalewska-1 (WZa-1). Test szczelinowania przeprowadzono w 19 m długości profilu prekambryjskich zmetamorfizowanych łupków ilastych w podłożu zapadliska przedkarpackiego. W teście tym nie uzyskano piku zniszczenia, a ciśnienie rozwarcia szczeliny $P_{ro} = 46$ MPa jest mniejsze od ciśnienia jej propagacji P_p (ryc. 6). Bez względu na przyjęte kryteria rozpoznania S_h mieści się ono w wąskich granicach 45–47 MPa.

$$S_H = 3S_h - P_{ro} - P_0 = 3 \times 47 - 46 - 25,5 = 69,5$$

Otrzymany wynik wskazywałby na występowanie w tym otworze reżimu przesuwczego z przeciętnym naprężeniem dyferencjalnym: $S_H - S_h = 24$ MPa. Ponieważ jednak ciśnienie rozwarcia szczeliny jest równe ciśnieniu jej zamknięcia, a krzywa wzrostu ciśnienia w pierwszej fazie testu jest łagodnie nachylona, dlatego istnieje podejrzenie, że szczelina była otwarta już w trakcie wykonywania testu. Wówczas do przypadku tego nie można by zastosować wzoru [1], a S_H trzeba by uznać za nieoznaczone. Ze względu na powyższą niepewność wynik analizy w tym otworze ma niską jakość C.

Basen lubelski

Stężycza-1 (St-1). Testu miniszczelinowania przeprowadzono w piaskowcach karbońskich w odcinku otworu o długości 18 m. W teście tym krzywa wzrostu ciśnienia ma wyjątkowo nieregularny przebieg (ryc. 7). Ze względu na łagodne ugięcia tej krzywej przyjęto, że otwarta została wcześniej występująca w skale szczelina. Jednak ugięcie takie może być również spowodowane dużą anizotropią naprężeń ($S_H - S_h$). Punkt otwarcia szczeliny P_{ro} został wyznaczony w miejscu odchylenia krzywej wzrostu ciśnienia od przebiegu prostoliniowego. $S_h = 54$ MPa wyznaczono na podstawie słabo widocznego miejsca ugięcia krzywej.

$$S_H = 3S_h - P_{ro} - P_0 = 3 \times 54 - 47 - 25 = 90 \text{ MPa}$$

Dla otworu Stężycza-1 wyznaczony został reżim uskoków przesuwczych z wysokim naprężeniem dyferencjalnym $S_H - S_h = 37$ MPa. Ze względu na słabą czytelność punktów charakterystycznych i brak weryfikacji zabiegiem wynik ten ma niską jakość C.

Stężycza-2 (St-2). Test szczelinowania przeprowadzono w klastykach karbońskich na odcinku o długości zaledwie 8 m. Wykres wzrostu ciśnienia kończy się łagodnym pikiem, który sugeruje rozwarcie istniejącego w skale spękania (ryc. 7). Jako punkt otwarcia P_{ro} wskazano miejsce inicjalnego ugięcia prostej przy ciśnieniu 56 MPa, co wskazuje na resztkową wytrzymałość ekstensyjną skały rzędu 3 MPa. Wystąpienie drugiego wierzchołka rozwarcia szczeliny jest spowodowane przez gwałtowny wzrost tempa pompowania płynu. Krzywa spadku ciśnienia ukazuje dwa ugięcia, które można by uznać za S_h . Do obliczeń przyjęto $S_h = 47$ MPa, gdyż przyjęcie niższej wartości prowadziłoby do sprzeczności: $S_h > S_H$.

$$S_H = 3S_h - P_{ro} - P_0 = 3 \times 47 - 56 - 22 = 63 \text{ MPa}$$

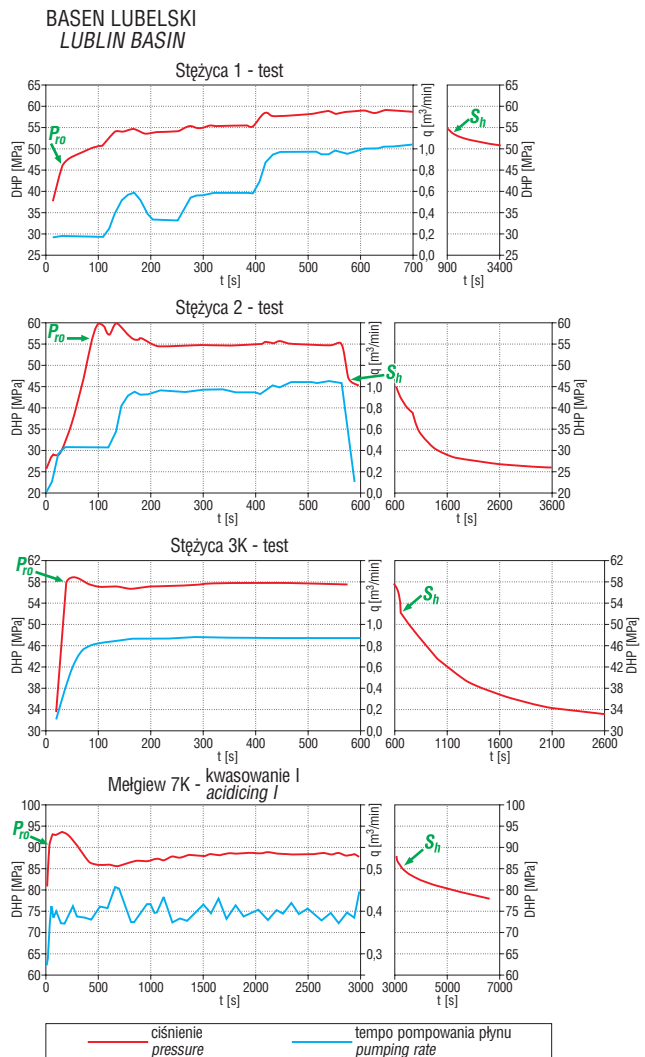
Test w otworze Stężycza-2 wskazuje na słaby reżim uskoków przesuwczych, o niewielkim, dla danej głębokości, naprężeniu dyferencjalnym: $S_H - S_h = 16$ MPa. Ze względu na czytelność ciśnień krytycznych, przy braku dodatkowej kontroli ze strony zabiegu, wynik ma jakość średnią B.

Stężycza 3K (St-3). Test i zabieg szczelinowania przeprowadzono w klastykach karbonu, w krótkim, 19 m odcinku otworu. W teście uzyskano łagodny pik krzywej wzrostu ciśnienia (ryc. 7), wskazujący na rozwarcie istniejącej szczeliny pod ciśnieniem $P_{ro} = 58$ MPa. Niespodziewanie, wyższe ciśnienie $P_{ro} = 61$ MPa uzyskano w trakcie zabiegu szczelinowania. Na wykresie spadku ciśnienia w teście widoczne jest wyraźne ugięcie krzywej, które wskazuje na $S_h = 53$ MPa.

$$S_H = 3S_h - P_{ro} - P_0 = 3 \times 53 - 58 - 23 = 78$$

Dobrej jakości dane z otworu Stężycza-3K wskazują na oddziaływanie reżimu uskoków przesuwczych przy umiarkowanym naprężeniu dyferencjalnym: $S_H - S_h = 26$ MPa. Dobra czytelność ciśnień krytycznych i częściowe ich potwierdzenie testem sprawia, że wynik ma jakość średnią B.

Melgiew-7K (Me-7). W otworze tym przeprowadzono dwa zabiegi kwasowania, które mogą być mniej odpowiednie do obliczania wielkości naprężeń niż zwykle szczelinowanie, gdyż trawienie chemiczne skały zaciera efekty dynamicznego rozwierania i zamykania szczelin. Zabiegowi poddano odcinek otworu długości 62 m w obrębie dolomitów górnodewońskich. Na wykresie wzrostu ciśnienia podczas pierwszego kwasowania występuje zaokrąglony pik (ryc. 7), wskazujący rozwarcie ist-



Ryc. 7. Wykresy ciśnienia i tempa pompowania płynu dla testów szczelinowania w otworach zlokalizowanych w basenie lubelskim (objaśnienia jak na ryc. 5)

Fig. 7. Diagrams of a pressure and a pumping rate for the hydraulic fracturing tests from wells located in the Lublin Basin (see fig. 5 for explanation)

niejącej szczeliny pod ciśnieniem $P_{ro} = 90$ MPa. Przy drugim kwasowaniu widoczne jest ugięcie krzywej już przy ciśnieniu 75 MPa, co wskazuje na wystąpienie efektu poroelastycznego na skutek ucieczki płynu w obręb wytrawionych chemicznie kawern w dolomicie. Na krzywej spadku ciśnienia pierwszego kwasowania występuje wyraźne ugięcie $ISIP = 87$ MPa. Ponieważ jednak początkowe ciśnienie propagacji szczeliny $P_p = 86$ MPa jest niższe od $ISIP$, dla S_h przyjęto wartość niższą. Rozbieżność pomiędzy $ISIP$ a S_h może być spowodowana dużą objętością ilością wpompowanego płynu, przekraczającą 20 m^3 .

$$S_H = 3S_h - P_{ro} - P_0 = 3 \times 86 - 90 - 42 = 126$$

Na podstawie testu kwasowania, w kompleksie górnego paleozoiku otworu Mełgiew-7 stwierdzono oddziaływanie reżimu uskoku przesuwczych, o przeciętnej dla danej głębokości anizotropii naprężeń poziomych $S_H - S_h = 36$ MPa. Zabiegi kwasowania dają niską jakość wyniku obliczeń naprężeń C.

Monoklina przedsudecka

Grochowice-3 (Gr-3). Test miniszczelinowania przeprowadzony został w 5-cio metrowym interwale kompleksu wapienia podstawowego i czerwonego spągowca, zlokalizowanym koło Głogowa. Charakterystyczny dla tego testu jest brak ostrego piku zniszczenia ściany otworu (ryc. 8), sugerujący rozwarcie naturalnej szczeliny tektonicznej. W pierwszej fazie testu do ok. 400 sek. utrzymuje się podwyższone ciśnienie propagacji szczeliny $P_p = 33$ MPa, a następnie obniża się ono do 31,2. Zjawisko to nie koreluje się ze zmianą tempa zatłaczania płynu, a zatem może mieć przyczynę w początkowym rozwieraniu szczelin tektonicznych, skośnych względem S_h , które z czasem przyjmują typową orientację, kontrolowaną kierunkiem naprężeń tektonicznych. Na wykresie spadku ciśnienia obserwuje się ugięcie $ISIP = S_h = 28$ MPa.

$$S_H = 3S_h - P_{ro} - P_0 = 3 \times 28 - 32 - 17 = 35 \text{ MPa}$$

Ponieważ na głębokości przeprowadzonego testu $S_V = 39$ MPa, jest większe od $S_H = 35$ MPa, poniżej soli cechsztyńskich, w sąsiedztwie otworu Grochowice-3, może panować reżim ekstensyjny z relatywnie niewielką składową tektoniczną, manifestującą się naprężeniem dyferencjalnym: $S_H - S_h = 7$ MPa. Podczas zabiegu szczelinowania w tym otworze uzyskano zbliżone wartości P_p i $ISIP$, które potwierdzają prawidłowość powyższego rozwiązania i sprawiają, że można im nadać średnią jakość B.

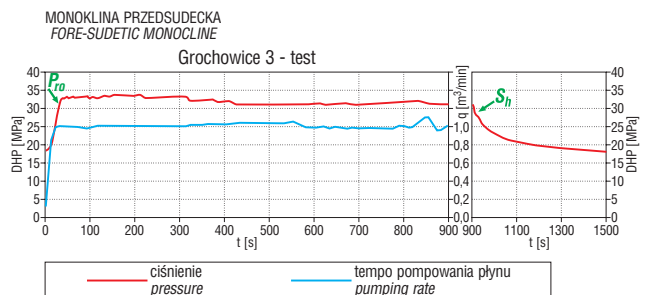
Dyskusja wyników

Mimo słabej jakości niektórych testów, otrzymane wyniki dla poszczególnych obszarów są spójne (tab. 1). Zakres możliwych błędów, w większości przypadków nie powinien wpłynąć na otrzymany reżim naprężeń. Błąd wyznaczenia S_V oszacowano na 1 MPa/km w zależności od głębokości. Zakres możliwego błędu dla S_h zależy od kształtu krzywej spadku ciśnienia. W wielu przypadkach jest on mniejszy od 1 MPa, ale są testy, w których występuje więcej niż jedno miejsce ugięcia krzywej. Wówczas S_h przyjmowano na podstawie eliminacji tych ciśnień, dla których rozwiązanie równania [1] dawało wynik sprzeczny: $S_H < S_h$. Błąd w oszacowaniu S_H jest sumą wielu błędów, a mianowicie błędów w wyznaczeniu P_{ro} oraz P_0 , a także trzykrotnie zwielokrotnionego błędu wyznaczenia S_h . W niektórych przypadkach należy do tego dodać błędy wynikające z zaniedbania naprężeń termicznych. Wydaje się, że suma tych błędów, w niektórych przypadkach może przekroczyć 5 MPa. Niedokładność tego rzędu może mieć znaczenie dla określenia reżimu naprężeń, zwłaszcza na

małych głębokościach, przy małych różnicach pomiędzy naprężeniami głównymi.

Dla płaszczyzn Karpát zewnętrznych otrzymano reżim naprężeń przesuwczy lub nasuwczy. Na złożu Osobnica, gdzie wykonane zostały testy szczelinowania w dwóch otworach, stwierdzono ciekawą zależność reżimu naprężeń od lokalizacji względem głównego nasunięcia, znajdującego się w spągu antyklinalnej pałapki złożowej. Stwierdzono, że w otworze Osobnica-138, w stropowym skrzydle nasunięcia panuje silny reżim nasuwczy, podczas gdy w otworze Osobnica-93, na głębokości odpowiadającej spągowemu skrzydłu tego nasunięcia, panuje reżim przesuwczy. Przyczyną takiego zjawiska może być odklucie wzdłuż reaktywowanego współcześnie nasunięcia. A zatem, na podstawie tych nielicznych danych przypuszczać można, że w strefach kumulacji naprężeń kompresyjnych panuje reżim nasuwczy, podczas gdy pozostała część orogenu poddana jest kompresji w reżimie przesuwczym, o względnie wysokiej anizotropii naprężeń poziomych: $S_H/S_h = 1,46$. Anizotropia naprężeń w płaszczyźnie pionowej, w kierunku maksymalnej kompresji, jest niższa i wynosi: $S_H/S_V = 1,30$. Podobne wnioski dotyczące reżimów naprężeń wynikają z analizy mechanizmu wstrząsów sejsmicznych koło Krynicy (Wiejacz, 1994), gdzie stwierdzono sejsmogeniczne przemieszczenia transpresyjne (ze składową nasuwczą i przesuwczą) w spągowej części przyzmy akrecyjnej Karpát zewnętrznych. W otworze Osobnica-138 stwierdzono, ponadto, występowanie *breakouts* (Jarosiński, 2005), które są dodatkowym świadectwem anizotropii naprężeń poziomych.

U czoła nasunięć Karpackich, w obrębie miocenu zapadliskowego i jego podłoża, również stwierdzono dominację reżimu przesuwczego z lokalnym odchyleniem w kierunku reżimu ekstensyjnego (w otworze Tuligłowy-40). W tym przypadku niejednorodność pola naprężeń wiązać można z relacją względem czoła nasunięć Karpackich. W obrębie przyzmy osadów zaburzonych przed czołem orogenu, w otworze Przemysł-89, występuje silna anizotropia naprężeń poziomych: $S_H/S_h = 1,66$ i pionowych: $S_H/S_V = 1,33$. Dla kompleksu niezaburzonego tektonicznie, wartości średnie analogicznych współczynników są znacząco niższe: $S_H/S_h = 1,42$ oraz $S_H/S_V = 1,04$. A zatem dla tego obszaru, średnia anizotropia naprężeń poziomych jest na poziomie zbliżonym do Karpát, zaś pionowych znacznie mniejsza. Podobnie jak w Karpatach, również przed czołem orogenu kumulacja naprężeń tektonicznych zachodzi w strefach predysponowanych strukturalnie. W innych otworach zlokalizowanych na tych samych



Ryc. 8. Wykresy ciśnienia i tempa pompowania płynu dla testów szczelinowania w otworach zlokalizowanych na monoklinie przedsudeckiej (objaśnienia jak na ryc. 5)

Fig. 8. Diagrams of a pressure and a pumping rate for hydraulic fracturing tests from the well located on the Fore-Sudetic Monocline (see fig. 5 for explanation)

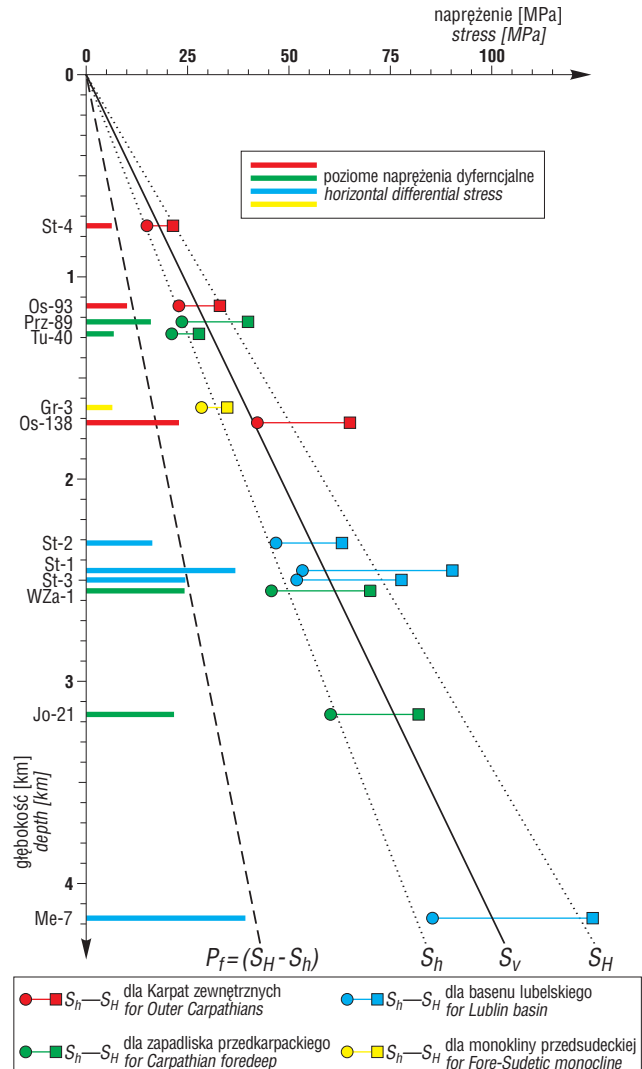
złożach, w których wykonano testy szczelinowania: Przemysł–277, Jodłówka–15 oraz Tuligłowy–37 stwierdzono występowanie długich profili *breakouts*, które potwierdzają znaczną anizotropię naprężeń poziomych (Jarosiński, 1999, 2005).

Dla centralnej części basenu lubelskiego, z testów szczelinowania w czterech otworach wiertniczych, jednoznacznie wyznaczono reżim uskoku przesuwczego. Średnie wartości współczynników anizotropii naprężeń poziomych $S_H/S_h = 1,48$ i pionowych $S_H/S_V = 1,29$ są bardzo zbliżone do tych wyznaczonych dla Karpat. Jak w każdym z obszarów, występuje tu znaczne zróżnicowanie wielkości tych współczynników, świadczące o niejednorodności pola naprężeń. Największą różnicę stwierdzono pomiędzy blisko siebie położonymi otworami: Stężycza–1 i Stężycza–2. Z karotażu upadomierza z tych otworów wynika, że podwyższona koncentracja naprężeń tektonicznych w otworze Stężycza–1 występuje powyżej głównej niezgodności kątowej, zlokalizowanej na głębokości 2478 m, podczas gdy, względna relaksacja w otworze Stężycza–2, występuje poniżej niezgodności kątowej, jaką stwierdzono na głębokości 2313 m. Poniżej tej niezgodności, raptownie urywa się również ciąg *breakouts* (Jarosiński, 1999), co wskazuje na relaksację naprężeń poziomych w spągowym skrzydle uskoku (lub nagły wzrost wytrzymałości skały). Powyższe obserwacje, jak również inne spostrzeżenia, np. korelujące występowanie *breakouts* z waryscyjskimi nasunięciami w otworze Pliszczyn–1 (Jarosiński, 1999), sugerują, że w basenie lubelskim zróżnicowanie naprężeń tektonicznych jest również uwarunkowane strukturalnie. Długie profile *breakouts* zarówno w otworach Stężycza–1 i Stężycza–2, jak również w innych otworach w tym regionie (Jarosiński, 2005), potwierdzają występowanie dużej anizotropii naprężeń poziomych.

Na monoklinie przedsudeckiej, wyniki analizy szczelinowania z pojedynczego otworu, wskazują na występowanie reżimu ekstensyjnego poniżej cechsztyńskich ewaporatów. Obliczenia wskazują na niewielką anizotropię naprężeń poziomych i pionowych: $S_H/S_h = 1,25$ oraz $S_H/S_V = 0,89$. Wynik ten jest spójny z dotychczasowymi rezultatami analizy *breakouts*, które wskazują, że na monoklinie przedsudeckiej poniżej ewaporatów struktury tego typu występują rzadko (Jarosiński, 1999), co sugeruje niską anizotropię naprężeń poziomych. Nie jest to jednak argument rozstrzygający, gdyż brak struktur *breakouts* może być również spowodowany czynnikami technologicznymi, np. podwyższonym ciśnieniem płuczki, które stabilizuje ścianę otworu (Santarelli & Brown, 1987).

Zestawienie zmienności naprężeń z głębokością (ryc. 9) wskazuje na istotne prawidłowości. Do głębokości przeprowadzonych testów (4 km), zaznacza się wyraźny trend wzrostu poziomych naprężeń na obszarze SE Polski, tzn. bez uwzględnienia testu z otworu na monoklinie przedsudeckiej, który wyraźnie odbiega od reszty wyników. Dla przyjętego trendu wzrostu S_V : 24 MPa/km, przyrost naprężeń poziomych można aproksymować prostymi: $S_H = 1,2S_V$ — co daje: 29 MPa/km oraz $S_h = 0,8S_V$, co odpowiada przyrostowi: 19,5 MPa/km. Z powyższych wyliczeń wynika, że średni wzrost poziomego naprężenia dyferencjalnego ($S_H - S_h$) z głębokością wynosi 9,5 MPa/km, a zatem jest bliski przyrostowi ciśnienia hydrostatycznego. W zestawieniu tym widać również, że relatywnie do głębokości, wartości naprężeń poziomych i dyferencjalnych w zapadlisku przedkarpackim są niższe niż w Karpatach lub na Lubelszczyźnie. Może mieć to związek zarówno z

mniej kompetencją słabo zdiagenezowanego kompleksu miocenijskiego zapadliska, jak również z sąsiedztwem wyniesienia czoła nasunięć karpackich, które może lokalnie zaburzać pole naprężeń. Od wyraźnego trendu zmienności naprężeń dla SE Polski wyraźnie odstaje wynik uzyskany dla monokliny (ryc. 9). Świadczy on o wyjątkowo niskim poziomie naprężeń tektonicznych, manife-



Ryc. 9. Zestawienie wartości naprężeń w funkcji głębokości dla badanych otworów wiertniczych (skróty nazw otworów podane są w tekście), pogrupowanych w jednostki strukturalne: Karpaty (czerwone); zapadlisko przedkarpackie (zielone); basen lubelski (niebieskie); monoklina przedsudecka (żółte). Dla orientacji naniesione zostały trendy zmienności: P_f — ciśnienia hydrostatycznego; S_V — obciążenia litostatycznego dla średniej gęstości nadkładu 2,4 g/cm³; S_h i S_H — najmniejszego i największego naprężenia poziomego (bez danych z monokliny) oraz $(S_H - S_h)$ — naprężenie dyferencjalne

Fig. 9. Compilation of the stress calculation results showing stress variation with depth for separated areas: the Carpathians (red marks), the Carpathian Foredeep (green marks), the Lublin Basin (blue marks) and the Fore-Sudetic Monocline (yellow marks). For comparison the straight lines are drawn, that indicate trends: P_f — hydrostatic pressure; S_V — lithostatic pressure for assumed mean density of the overburden 2,4 g/cm³; S_h and S_H — minimum and maximum horizontal pressure, respectively for SE Poland (without data from the Fore-Sudetic Monocline) and $(S_H - S_h)$ — differential horizontal stress. Abbreviations of borehole names are given in the text

stującym się tu zarówno małymi wartościami S_h i S_H względem S_V , jak również niskim naprężeniem dyferencjalnym.

Wnioski

Mimo, iż jakość testów szczelinowania hydraulicznego na potrzeby badań współczesnej geodynamiki w Polsce jest dość niska, to względnie jednorodne wyniki dla poszczególnych jednostek strukturalnych podnoszą zaufanie do wykonanych analiz.

Dla wszystkich otworów, w których przeprowadzono testy szczelinowania hydraulicznego, stwierdzono występowanie znacznej anizotropii naprężeń poziomych, świadczącej o oddziaływaniu czynnika tektonicznego. Średnie wartości anizotropii dla Karpat, zapadliska przedkarpacciego i basenu lubelskiego, mieszczą się w wąskim przedziale: $S_H/S_h = 1,45-1,48$. Anizotropia ta została dodatkowo potwierdzona przez analizę struktur *breakouts*, z badanego obszaru (Jarosiński, 1999). Stwierdzono również występowanie trendu przyrostu poziomych naprężeń dyferencjalnych wraz z głębokością (do głęb. 4 km), który dla Karpat i Lubelszczyzny wynosi ok. 10 MPa na 1 km, a jest nieco mniejszy dla zapadliska przedkarpacciego. Dla analizowanej SE części Polski, stwierdzono dominację reżimu uskoków przesuwczych, przy czym w Karpatach stwierdzono lokalne przejście do reżimu nasuwczego, a przed czołem Karpat, ku reżimowi ekstensyjnemu. Wewnętrzne wahania intensywności naprężeń tektonicznych w obrębie poszczególnych jednostek zostały wstępnie skorelowane z niejednorodnością mechaniczną ośrodka, wynikającą z obecności odwróconych uskoków epoki alpejskiej i waryscyjskiej. Systematycznie, do kumulacji naprężeń dochodzi w stropowych skrzydłach tych uskoków.

Pojedynczy pomiar z kompleksu podcechsztyńskiego monokliny przedsudeckiej sugeruje występowanie reżimu ekstensyjnego o małej składowej naprężenia tektonicznego.

Dane do tego opracowania zostały udostępnione przez Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo. Wykresy ciśnień i wydajności pomp w otworach wiertniczych zostały obliczone przez Stanisława Miezińskiego z Instytutu Górnictwa Naftowego i Gazownictwa w Krośnie. Za udostępnienie materiałów i ich wstępną obróbkę autor składa serdeczne podziękowania. Badania przeprowadzone zostały w ramach grantu KBN 9 T12B 020 13 oraz badań statutowych PIG 6.20.9214.00.0.

Literatura

AMADEI B. & STEPHANSSON O. 1997 — Rock Stress and its Measurement. Chapman and Hall London, New York, Tokyo: 476.
ANDERSON T.O. & STAHL E.J. 1967 — A study of induced fracturing using an instrumental approach. [In:] Journal of Petroleum Technology, 19: 261–267.
DETOURNAY E., ROEGIERS J.C. & CHENG A. 1987 — Some new examples of poroelastic effects in rock mechanics. [W:] Rock Mechanics, 28 U.S. Symposium on Rock Mechanics, A.A. Balkema, Rotterdam: 575–584.
ENGELDER T. 1993 — Stress regimes in the lithosphere; Princeton University Press: 449, Princeton, New Jersey.
EVANS K., ENGELDER T. & PLUMB R.A. 1989 — Appalachian Stress Study I: A detailed description of in situ stress variations in Devonian Shales of the Appalachian Plateau; J. Geoph. Res., 94: 1729–1754.

GIBOWICZ S.J. 1984 — The mechanism of large mining tremors in Poland. [In:] Guy N.C. & Wainwright E.M. (ed.) — Proceedings of the 1st International Congress on Rockburst and Seismicity in Mines. Johannesburg, 1982, SAIMM: 17–28.
GUTERCH B. & LEWANDOWSKA-MARCINIAK H. 1975 — Sejsmiczność Polski. [In:] Liszkowski J. & Stochlak J. (ed.) — Współczesne i neotektoniczne ruchy skorupy ziemskiej w Polsce, t. 1: 29–32. Wyd. Geol.
HAIMSON B.C. & FAIRHURST C. 1967 — Initiation and extension of hydraulic fractures. Soc. Petrol. Eng. J., 7: 310–318.
HAIMSON B.C. 1978 — The hydrofracturing stress measuring method and recent field results; Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 15: 167–178.
HECK E.T. 1960 — Hydraulic fracturing in light of geological conditions [In:] Producers Monthly, 24: 12–19.
HICKMAN S.H. & ZOBACK M.D. 1983 — The interpretation of hydraulic fracturing pressure-time data for in situ stress determination: [In:] Zoback M.D. & Haimson S.H. — Hydraulic Fracturing Stress Measurements, Washington D.C. National Academy Press: 44–54.
HUBBERT M.K. & WILLIS D.G. 1957 — Mechanics of hydraulic fracturing [In:] Trans. AIME: 153–166.
JAROSIŃSKI M. 1994 — Metody badania współczesnych naprężeń skorupy ziemskiej w głębokich otworach wiertniczych. Prz. Geol., 42: 564–569.
JAROSIŃSKI M. 1998 — Contemporary stress field distortion in the Polish part of the Western Outer Carpathians and their basement. Tectonophysics, 297: 91–119.
JAROSIŃSKI M. 1999 — Badania współczesnych naprężeń skorupy ziemskiej w głębokich otworach wiertniczych w Polsce metodą analizy struktur *breakouts*. Instrukcje i Metody Badań Geologicznych, 56: 144.
JAROSIŃSKI M. 2005 (w druku) — Ongoing tectonic reactivation of the Outer Carpathians and its impact on the foreland: results of borehole breakout measurements in Poland. Tectonophysics.
KIRSCH G. 1898 — Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre. [In:] Zeitschr. VDI; 42: 707.
LISZKOWSKI J. 1982 — Przyczyny pionowych ruchów skorupy ziemskiej w Polsce. Rozprawy Uniwersytetu Warszawskiego, 98: 1–179.
MOOS D. & ZOBACK M.D. 1990 — Utilisation of the observation of well bore failure to constrain the orientation and magnitude of crustal stress. J. Geoph. Res., 95: 9305–9325.
RUMEL F., BAUMGARTNER J. & ALHEID H.J. 1983 — Hydraulic fracturing stress measurements along the eastern boundary of the SW — German Block. [In:] Zoback M.D., Haimson B.C. — Hydraulic Fracturing Stress Measurements, Washington, D.C., National Acad. Press: 3–17.
SANTARELLI F.J. & BROWN E.T. 1987 — Performance of deep wellbores in rock with a confining pressure-dependent elastic modulus; Proc. VI International Congress on Rock Mechanics, 2: 1217–1222, Montreal.
SHIN K., LI F. & OKUBO S. 1996 — Hydro-fracturing measurements in intact granitic rock. [In:] Barla (ed.) Eurock'96, Balkema, Rotterdam: 427–434.
SCHMITT D.R. & ZOBACK M.D. 1989 — Laboratory tests of the effects of pore pressure on tensile failure. [In:] Maury V., Fourmaintraux D. (eds.) — Rock at great depth: 883–889; A.A. Balkema, Rotterdam.
STEPHENS G. & VOIGHT B. 1982 — Hydraulic Fracturing Theory for Conditions of Thermal Stress. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geom. Pergamon Press Ltd, Great Britain: 279–283.
SZEWCZYK J. 2005 (w druku) — Gęstości objętościowe a syntetyczne profilowania gęstości. Bul. PIG.
TUNBRIDGE L. 1988 — Interpretation of the shut-in pressure from the rate of pressure decay. Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences, 26: 457–460.
WARPINSKI N.R., SCHMIDT R.A., NOTHRUP D.A. 1981 — In situ stresses: The predominant influence on hydraulic fracture containment. J. Petrol. Technology; t. 34: 653–664.
WIEJACZ P. 1994 — An attempt to determine tectonic stress patterns in Poland. Acta Geophys. Pol., 3: 169–176.
ZOBACK M.D., TSUKAHARA H. & HICKMAN S. 1980 — Stress measurements at depth in the vicinity of the San Andres Fault: implications for the magnitude of shear stress at depth; J. Geophys. Res., 85: 6157–6173.
ZOBACK M.L. & ZOBACK M. 1980 — State of stress in the Conterminous United States; J. Geophys. Res. 85: 6113–6156.
ZUCHIEWICZ W. 1995 — Neotectonics of Poland: a state-of-the-art review. Folia Quaternaria, 66: 7–37.