

Analiza wpływu parametrów sprężystości na warunki szczelinowania hydraulicznego w skałach rejonu Stężycy

Sławomir Jarzębski*, Joanna Pinińska*

Mimo zaawansowanych technik oceny parametrów wytrzymałościowych skał w warunkach laboratoryjnych, bardzo trudno jest określić na ich podstawie złożony stan naprężeń w masywie skalnym na znacznych głębokościach. Parametry sprężystości uzyskane na podstawie badań w trójosiowym stanie naprężeń — takie jak moduł Younga i współczynnik Poissona także są odmienne od uzyskanych w warunkach badań standardowych. Złożony stan naprężeń pozwalają zobrazować obwiednie wytrzymałościowe. Dane zmienności parametrów w złożonym stanie naprężeń są istotne przy projektowaniu zabiegów szczelinowania hydraulicznego, dla doboru krytycznego naprężenia oraz ciśnienia szczelinowania i prognozy geometrii projektowanej szczeliny. W pracy przedstawiono przykłady takich ustaleń dla warunków lubelskiego basenu sedymentacyjnego, gdzie z utworów namuru B w facji piaskowcowej, dzięki uprzejmości Przedsiębiorstwa Górnictwa Naftowego i Gazownictwa pobrano próbki do badań laboratoryjnych.

Słowa kluczowe: szczelinowanie hydrauliczne, wytrzymałość, obwiednia wytrzymałościowa, moduł Younga, współczynnik Poissona

Sławomir Jarzębski, Joanna Pinińska — **Influence of elasticity parameters for hydraulic fracturing in Carboniferous rocks of the Stężycza area (Lublin Basin, SE Poland).** Prz. Geol., 48: 1151–1155.

Sum m a r y. Nowadays, laboratory techniques used for evaluation of geomechanical parameters are sophisticated, still their application for assessment of triaxial stress state in rock massive is difficult. Elasticity parameters obtained from triaxial compression tests, as Young modulus and Poisson ratio, differ from these obtained from standard tests, that means unconfined compression tests. A strength envelope is a form of presentation of the triaxial stress state in massive. Variability of geomechanical parameters obtained in triaxial compression tests is crucial for design of hydraulic fracturing treatments: assessment of critical stress, evaluation of fracturing pressure and prognosis of designed fracture dimensions.

The paper presents example of that assessment for the Lublin basin reservoir rocks: samples for laboratory tests were taken from the Namurian B sandstones courtesy of Polish Oil & Gas Company.

Key words: hydraulic fracturing, strength, strength envelope, Young modulus, Poisson ratio

Jedną z metod intensyfikacji wydobycia ropy naftowej lub gazu ziemnego jest szczelinowanie. Polega ono na zwiększeniu przepuszczalności skał złożowych wokół odwiertu w warunkach sztucznego wytworzenia szczeliny w roponośnej formacji skalnej. Zabieg ten ma stworzyć dla medium złożowego, wysoko przewodzącą, ciągłą drogę przepływu. W większości przypadków inicjowanie szczeliny dokonywane jest przez hydrauliczne wytworzenie ciśnienia oddziaływującego na odsłoniętą w otworze powierzchnię wybranej formacji skalnej. Ciśnienie to musi przewyciężyć opory ośrodka skalnego i doprowadzić do jego spękania, nie naruszając równocześnie stateczności całego masywu skalnego. Powodzenie zabiegu zależy zatem od prawidłowego doboru ciśnienia szczelinowania do warunków wytrzymałościowych i odkształceniowych panujących w danym ośrodku skalnym, na danej głębokości. Dobór parametrów określających właściwości skał w warunkach ich występowania zależy z kolei od poprawności badań laboratoryjnych i ich weryfikacji na tle badań polowych. Ze względu na trudność doboru ciśnień badawczych dla warunków panujących na dużych głębokościach, istotne jest również ustalenie metod transpozycji danych wytrzymałościowych z warunków naprężeń jednoosiowych na złożone warunki naprężeń. Otrzymane parametry z tego typu badań pozwalają zinterpretować naprężeniowe kryteria zniszczenia skał dla różnych głębokości.

Metody badawcze

Badania wytrzymałościowe prowadzono na próbkach pobranych z fragmentów rdzenia reprezentującego osady

namuru B w facji piaskowcowej z otworu wiertniczego Stężycza 2, odwierconego w latach 1993–1994 w obrębie lubelskiego basenu sedymentacyjnego. Na podstawie badań obejmujących oznaczenie: składu mineralnego, układu ziaren oraz kształtu porów i pustek w masie skalnej, badaną skałę określono jako piaskowiec zwięzły, drobnoziarnisty o spoiwie ilasto-krzemionkowym, z wkładkami piaskowca średnioziarnistego lokalnie przewarstwiony wkładkami ilastymi.

Z rdzeni pobranych z głęb. 2313–2321 wycięto próbki cylindryczne o średnicach: $D \approx 36$ i 20 mm i wysokościach: $h \approx 50$ i 45 mm. Smukłość badanych próbek wynosiła odpowiednio: 1,5 i 2,2. Wszystkie uzyskane próbki poddano niszczącym badaniom ultradźwiękowym oraz oznaczono parametry identyfikacyjne, charakteryzujące właściwości fizyczne i sprężyste badanych skał. Na tej podstawie określono gęstość objętościową (ρ), prędkość propagacji fali podłużnej (V_p), dynamiczny moduł sprężystości (E_d) oraz współczynnik anizotropii akustycznej skały (A).

Głównym celem było przeprowadzenie badań wytrzymałościowych w warunkach jedno- i trójosiowego ściskania (Łukaszewski i in., 1993). Na ich podstawie oznaczono: maksymalną wytrzymałość (R_c), moduł Younga (E_{st}), współczynnik Poissona (ν) oraz wytrzymałość na rozciąganie (R_t) (tab. 1). W trakcie badań ściskania, w celu kontroli przebiegu deformacji, prowadzono pomiar emisji akustycznej (AE).

Metody interpretacji obwiedni wytrzymałościowych i dyskusja nad wynikami

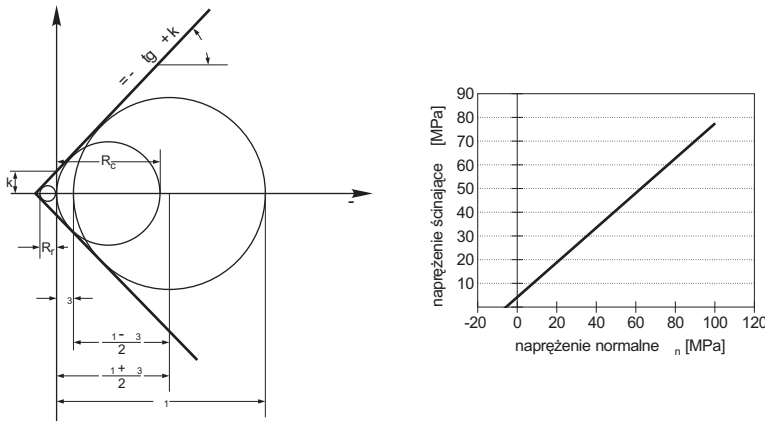
Badania na rozciąganie oraz ściskanie w różnych warunkach ciśnienia bocznego wykazały, że skały

*Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa

tworzące górotwór karboński w rejonie Stężycy zaliczyć można do grupy materiałów kruchych, charakteryzujących się wielokrotnie większą wytrzymałością na ściskanie od wytrzymałości na rozciąganie.

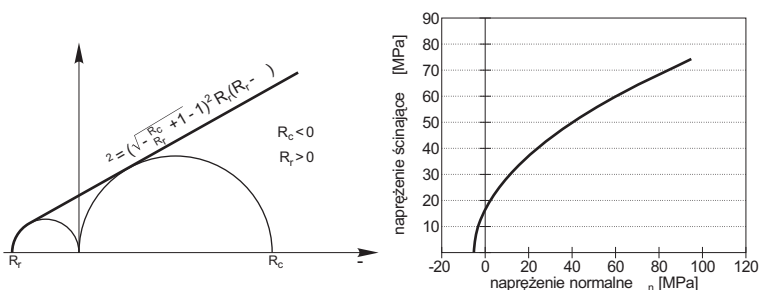
Graniczne wartości naprężeń i charakter spodziewanych deformacji opisuje właściwa danej skale obwiednia wytrzymałościowa. Można ją wyznaczyć korzystając z wyników badań laboratoryjnych. Stosując różne kryteria wytrzymałościowe w pracy porównano obwiednie wytrzymałościowe wyznaczone na podstawie interpretacji: Coulomba-Mohra, Fairhursta oraz Brace'a (Kłeczek, 1994).

Kryterium Coulomba-Mohra zakłada, że zniszczenie wywołane jest naprężeniem (σ) przez poślizg w płaszczynach naprężeń stycznych (τ).



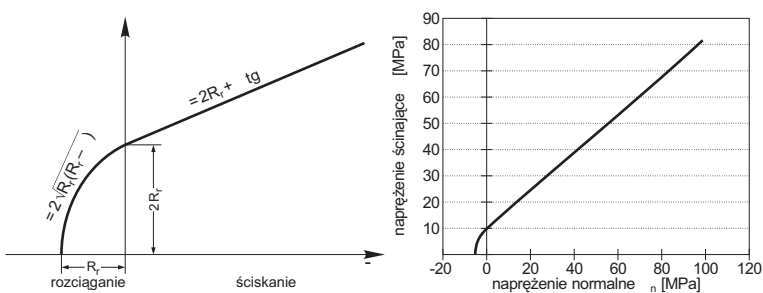
Ryc. 1. Krytyczny stan górotworu w świetle kryterium Coulomba-Mohra: A — schemat, B — na podstawie laboratoryjnych badań wytrzymałościowych piaskowców z otworu Stężycza 2

Fig. 1. Critical massive state according to the Coulomb-Mohr criterion: A — scheme, B — determined on basis of the laboratory tests for Stężycza sandstones



Ryc. 2. Krytyczny stan górotworu w interpretacji parabolicznej Fairhursta: a) schemat, b) na podstawie laboratoryjnych badań wytrzymałościowych piaskowców z otworu Stężycza 2

Fig. 2. Critical massive state as a Mohr circle envelope according to the Fairhurst parabolic interpretation



Ryc. 3. Krytyczny stan górotworu według kryterium Brace'a: A — schemat, B — na podstawie laboratoryjnych badań wytrzymałościowych piaskowców z otworu Stężycza 2

Fig. 3. Critical massive state according to the Brace criterion: A — scheme, B — determined on basis of the laboratory tests for Stężycza sandstones

Wychodząc z założenia, że podstawowymi parametrami wytrzymałościowymi dla skał jest ich wytrzymałość na ściskanie R_c oraz na rozciąganie R_r , w układzie współrzędnych $\tau = f(\sigma)$ wykreśla się okręgi o średnicach odpowiadającym wytrzymałościom R_c i R_r (ryc. 1). Styczne do tych okręgów, charakteryzują się współczynnikiem kątowym o wartości $\tan \phi$ i rzędną początkową o wartości k , gdzie zgodnie z interpretacją fizyczną konstrukcji Mohra ϕ jest kątem tarcia wewnętrznego, k zaś współczynnikiem kohezji.

Pomiędzy wyjściowymi parametrami R_c i R_r oraz wielkościami ϕ i k , można wykazać współzależności:

$$k = \frac{1}{2} \sqrt{R_c R_r}$$

$$\arctg \frac{R_c - R_r}{2\sqrt{R_c R_r}}$$

Jeżeli w górotworze panuje dowolny stan naprężenia opisany naprężeniami głównymi:

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$$

to dla spełnienia warunku równowagi każde koło Mohra zbudowane na średnicy ($\sigma_1 - \sigma_3$) musi mieścić się wewnątrz obszaru wyznaczonego prostymi:

$$\tau = -\sigma \tan \phi + k$$

Kryterium Fairhursta określa krytyczny stan górotworu na podstawie równania paraboli, której parametrami są wytrzymałość skały na jednoosiowe ściskanie R_c i rozciąganie R_r , przy założeniu, że:

$$\frac{R_c}{R_r} > 4$$

Obwiednia Fairhursta jest paraboliczną interpretacją kół Mohra (ryc. 2), wyrażoną formułą:

$$\tau = \sqrt{\frac{R_c}{R_r}} \left(\frac{\sigma}{2} + \sqrt{\frac{R_c}{R_r}} \right)$$

łączy zatem w sposób analityczny wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie (R_c) z jednoosiowym rozciąganiem (R_r) przyjmując, że wartość $R_c < 0$, a $R_r > 0$.

Kryterium wytrzymałościowe zaproponowane przez Brace'a przyjmuje równanie obwiedni w postaci przedstawionej na ryc. 3, gdzie:

— w przedziale naprężeń rozciągających

$$\tau = \sqrt{R_r} \sqrt{R_r - \sigma}$$

— w przedziale naprężeń ściskających

$$\tau = 2R_r + \sigma \tan \phi$$

Porównanie przytoczonych rozwiązań dla granicy maksymalnego naprężenia przedstawia ryc. 4. Obrazuje on rozbieżności w określaniu granicy wytrzymałości skał w zależności od metody przyjętych kryteriów interpretacji obwiedni. Należy zwrócić uwagę, że w przedziale naprężeń do wartości $\sigma_n < 80$ MPa najniższe wartości stanów granicznych wyraża obwiednia Coulomba-Mohra, natomiast najwyższe — obwiednia Fairhursta.

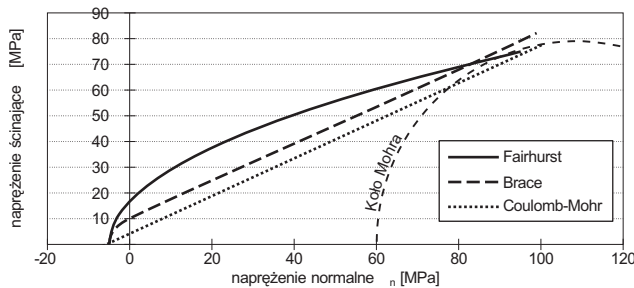
W celu rozwiązania warunków złożowych Stężycy przy ciśnieniu bocznym o wartości 60 MPa, odpowiadającemu w przybliżeniu ciśnieniu głęb. 3000 m, obwiednie wytrzymałościowe

wskazują zbliżone wartości krytycznego naprężenia ścinającego.

Wpływ przyjętych rozwiązań na warunki szczelinowania hydraulicznego

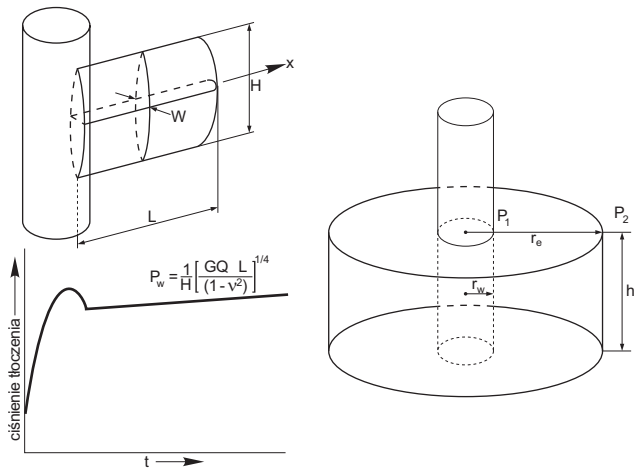
Podstawy teoretyczne. Projektowanie i przeprowadzenie zabiegu szczelinowania, wymaga ustalania parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych skał. W pierwszej kolejności niezbędne jest dobranie optymalnego ciśnienia szczelinowania do istniejących warunków geologicznych w taki sposób, aby nastąpiło spękanie masywu w założonej strefie złożowej, prowadzące do zwiększenia wydajności odwiertu. Aby to nastąpiło musi być naruszony stan równowagi określony obwiednią wytrzymałościową.

Ponieważ opis zjawisk towarzyszących mechanizmowi zniszczenia w skałach — ośrodkach niejednorodnych i anizotropowych jest bardzo trudny, tak w makroskali (uwarstwienie, porowatość, spękanie tektoniczne) jak i mikroskali (uziarnienie, złożona budowa kryształów, defekty budowy strukturalnej), każda z przyjmowanych teorii opisu zachowania się ośrodka oraz wynikające z niej kryteria zniszczenia stanowią uproszczenie zjawisk rzeczywistych. Hipotezy wytrzymałościowe są mało przystosowane do celów inżynierii złożowej, w której dla celów szczelinowania do scharakteryzowania cech geomechanicznych ośrodka skalnego korzysta się na ogół z kryteriów odkształceniowych w zakresie odkształceń liniowych, posługując się współczynnikiem Poissona ν oraz modułem Younga E_{st} .



Ryc. 4. Porównanie obwiedni wytrzymałościowych, otrzymanych na podstawie laboratoryjnych badań wytrzymałościowych piaskowców z otworu Stężycza 2, według interpretacji: Coulomba-Mohra, Fairhursta oraz Brace'a

Fig. 4. Comparison of strength envelopes obtained on basis of the laboratory tests for Stężycza sandstones according to the Coulomb-Mohr, Fairhurst and Brace criteria



Ryc. 5. Schemat modelu PKN (wg Perkinsa & Kerna, 1961)
Fig. 5. The model PKN (after Perkins & Kern, 1961)

W światowej i obecnie polskiej praktyce inżynierskiej do celów projektowania wartości ciśnienia służącego do zabiegu szczelinowania, najczęściej stosowana jest następująca formuła (Murphy, 1988):

gradient ciśnienia pęknięcia [kPa/m]

$$P_{fg} = \frac{\nu}{1-\nu} \frac{v - P_o}{Z} \frac{P_o T_o}{Z}$$

gdzie:

$\sigma_v = \gamma Z$ naprężenie pionowe

$h = \frac{\nu}{1-\nu} v$ lub

$h = \frac{\nu}{1-\nu} \frac{v - P_o}{Z} \frac{P_o T_o}{Z}$ naprężenie poziome

ν — współczynnik Poissona

α — parametr ciśnienia bocznego

P_o — ciśnienie porowe

T_o — czynnik geologiczny

Z — głębokość

γ — gęstość objętościowa

Jednocześnie dla określenia ciśnienia propagacji szczeliny oraz jej wymiarów stosuje się formułę, odpowiednią dla przyjętego modelu rozwoju szczeliny:

— dla modelu płaskiego Perkinsa, Kerna i Nordgrenaa – 2D PKN (ryc. 5):

ciśnienie propagacji szczeliny [kPa]:

$$P_w = \frac{0,0112}{h} \frac{G^3 Q x_f}{1-\nu^3} t^{1/4}$$

geometria szczeliny: pół-długość [m]

$$x_f = 0,39 \frac{GQ^3}{1-\nu h^4} t^{4/5}$$

geometria szczeliny: szerokość [m]

$$w = 1,69 \frac{1-\nu Q^2}{Gh} t^{1/5}$$

gdzie:

σ_1 — najmniejsze naprężenie główne

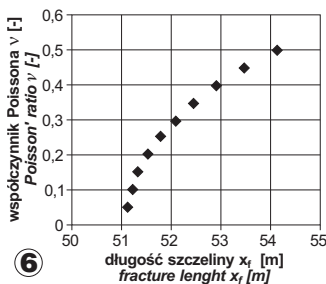
$G = \frac{E_{st}}{2(1-\nu)}$ — moduł ścinania

Q — wydatek iniekcji

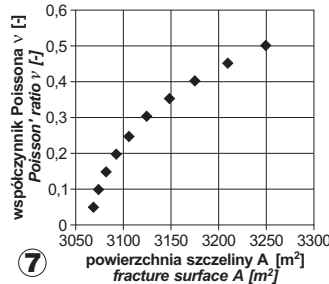
μ — lepkość cieczy szczelinującej

Tab. 1. Zakresy parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych uzyskane w badaniach prowadzonych w jedno- i trójosiowych warunkach ściskania

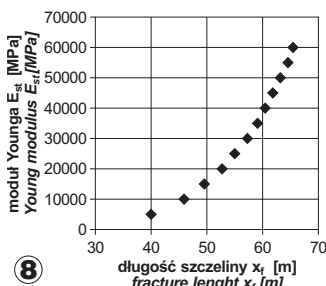
	Badania prowadzone w jednoosiowym stanie naprężenia	Badanie prowadzone w trójosiowym stanie naprężenia
Liczba badań	21	12
Wytrzymałość na ściskanie R_c [MPa] Zakres (średnia)	73–100 (90)	82–135 (99)
Moduł Younga $E_{st} \times 10^4$ [MPa] Zakres (średnia)	1,43–2,00 (1,72)	1,45–2,37 (1,97)
Współczynnik Poissona ν [-] Zakres (średnia)	0,19–0,36 (0,27)	0,05–0,2 (0,13)
Liczba badań	8	
Wytrzymałość na rozciąganie R_t [MPa]	3,9–6,1 (4,8)	



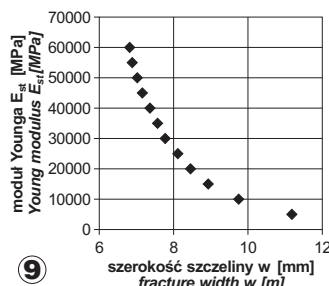
Ryc. 6. Zależność długości szczeliny (x_f) od zmienności współczynnika Poissona (ν)



Ryc. 7. Zależność powierzchni szczeliny (A) od zmienności współczynnika Poissona (ν)



Ryc. 8. Zależność długości szczeliny (x_f) od modułu Younga (E_{st})



Ryc. 9. Zależność szerokości szczeliny (w) od modułu Younga (E_{st})

- h — wysokość szczeliny
- ν — współczynnik Poissona
- t — czas

Wartości stałych ν i E_{st} wprowadzane są zatem do formuł obliczeniowych w celu określenia optymalnej wartości ciśnienia zewnętrznego, które ma wywołać pęknięcie calizny skały na długości niezbędnej do polepszenia właściwości zbiornikowych masywu. Parametry te powinny być zatem dokładnie wyznaczane w nawiązaniu do geologicznych warunkowań zmienności górotworu i panujących tam ciśnień.

W istniejącej zatem pragmatyce inżynierskiej, współczynnik Poissona i moduł Younga, a nie wytrzymałość skały, są tymi wartościami, które wywierają bezpośredni wpływ na dobór ciśnienia szczelinowania. Od ich wartości zależy ocena parametrów geometrii szczeliny, takich jak: długość jej skrzydła, szerokość, objętość oraz

powierzchnia. Jak jednak wiadomo w zależności od stanu naprężenia, wartości współczynnika Poissona i modułu Younga są różne. Jak ich zmienność wpływa na zmianę geometrii szczeliny w serii piaskowcowej namury w rejonie Stężycy przedstawiono poniżej w zakresie zmienności współczynnika Poissona (ν) od 0,05 do 0,50 oraz modułu Younga (E_{st}) od 5 000 do 60 000, starając się wariantowo określić wpływ każdego z tych parametrów.

Obliczenia wykonano przy użyciu równań podstawowych dla modelu płaskiego Perkinsa, Kerna i Nordgrena (2D-PKN).

Dla założonej wysokości szczeliny 15 m wyznaczono zależności funkcyjne:

$$x_f = f(\nu); w = f(\nu); A = f(\nu); V = f(\nu)$$

oraz

$$x_f = f(E_{st}); w = f(E_{st}); A = f(E_{st}); V = f(E_{st})$$

gdzie:

- x_f — długość szczeliny
- V — objętość szczeliny
- w — szerokość szczeliny
- ν — współczynnik Poissona
- A — powierzchnia szczeliny
- E_{st} — moduł Younga

Rezultaty analizy.

Wpływ wartości współczynnika Poissona na geometrię szczeliny. Teoretyczne, symulacyjne obliczenia modelowych parametrów geometrii szczeliny w piaskowcach ze Stężycy dla różnych wartości współ. Poissona przy założonej średniej wartości $E_{st} = 17500$ MPa przedstawia tab. 2.

Teoretycznie we wszystkich przypadkach wartość współ. Poissona ma podobny wpływ na długość, szerokość i powierzchnię szczeliny (ok. 6%). Jednak mimo że w wartości bezwzględnej rozwarłość wytworzonej szczeliny praktycznie nie ulega zmianie, to im wyższa jest wartość ν , tym dłuższa powstaje szczelina (ryc. 6) W warunkach Stężycy zwiększenie wartości współ. Poissona o 0,1 powoduje np. wydłużenie jednego skrzydła szczeliny o ok. 0,5–1 m. Jednocześnie o ok. 45 m² wzrasta jej powierzchnia (ryc. 7).

Wpływ wartości modułu Younga na geometrię szczeliny

Wyniki obliczeń modelowych zależności parametrów geometrii szczeliny od zmiennej wartości modułu Younga E_{st} w piaskowcach ze Stężycy przy założonej średniej wartości $\nu = 0,14$ uzyskanej dla tych skał przedstawia tab. 3.

Geometria wytworzonej szczeliny, tj. prognozowana długość skrzydła, szerokość i powierzchnia, jest znacznie bardziej zależna od przyjętej wartości modułu Younga niż wartości współczynnika Poissona. Ogólnie, im wyższa jest wartość E_{st} , tym dłuższa i węższa będzie szczelina (ryc. 8, 9).

W analizowanym przedziale wartości modułu Younga, przy przyjętych założeniach długość skrzydła szczeliny wzrasta od wartości 40 m do ponad 65 m, co oznacza aż 65% błąd wartości oszacowania.

Podobnie powierzchnia szczeliny wzrasta od 2400 m² do prawie 4000 m² (zmiana 63% — ryc. 10). W mniejszym stopniu zmienia się jej rozwarłość — zmniejszenie od ok. 11 mm do poniżej 7 mm (39% zmiana w stosunku do wartości wyjściowej). Ogólnie, zwiększenie wartości modułu Younga o 10 000 MPa powoduje prognozę wzrostu długości jednego skrzydła szczeliny o ok. 5

Tab. 2. Zależność parametrów geometrii szczeliny od wartości współczynnika Poissona w badaniach modelowych

Założenia	Współ. Poissona ν [-]	Dł. szczeliny x_f [m]	Szer. szczeliny w [mm]	Objętość szczeliny V [m ³]	Pow. szczeliny A [m ²]
$\mu=0,8$ Pa s $V=10$ m $Q=3,6$ m ³ /min $h=15$ m $E_{st}=17$ 500MPa	0,05	51,14	8,72	7,88	3068,60
	0,10	51,22	8,71	7,88	3073,24
	0,15	51,35	8,68	7,87	3081,06
	0,20	51,54	8,65	7,87	3092,21
	0,25	51,78	8,61	7,87	3106,91
	0,30	52,09	8,56	7,88	3125,46
	0,35	52,47	8,50	7,88	3148,28
	0,40	52,93	8,42	7,87	3175,90
	0,45	53,48	8,34	7,88	3209,05
	0,50	54,15	8,24	7,88	3248,71

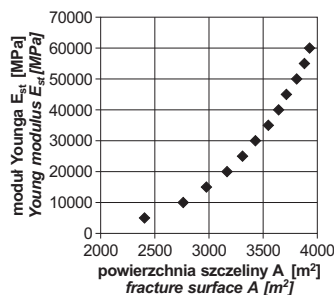
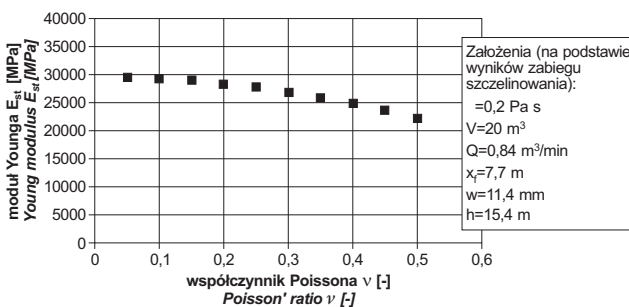
Tab. 3. Zależność parametrów geometrii szczeliny od wartości modułu Younga w badaniach modelowych

Założenia	Moduł Younga E_{st} [MPa]	Dł. szczeliny x_r [m]	Szer. szczeliny w [mm]	Objętość szczeliny V [m ³]	Pow. szczeliny A [m ²]
$\mu=0,8$ Pa s	5000	39,95	11,16	7,87	2396,78
$V=10$ m ³	10 000	45,89	9,72	7,88	2753,18
	15 000	49,76	8,96	7,87	2985,75
$Q=3,6$ m ³ /min	20 000	52,71	8,46	7,88	3162,57
	25 000	55,12	8,09	7,88	3306,91
$h=15$ m	30 000	57,16	7,80	7,87	3429,72
	35 000	58,95	7,56	7,87	3537,11
$\nu=0,14$	40 000	60,55	7,36	7,86	3632,84
	45 000	61,99	7,19	7,87	3719,44
	50 000	63,31	7,04	7,87	3798,64
	55 000	64,53	6,91	7,88	3871,75
	60 000	65,66	6,79	7,87	3939,72

m. Jednocześnie o ok. 250 m² wzrasta oszacowanie jej powierzchni.

Jak wskazują przeprowadzone obliczenia wariantowe, zależnie od przyjętych wartości modułu Younga (E_{st}) oraz współczynnika Poissona (ν) mogą wystąpić niedokładne prognozy efektów zabiegu szczelinowania hydraulicznego. W zakresie ocen parametrów E_{st} i ν wywołanych w złożu Stężycy zmiennym stanem naprężeń długość szczeliny może być niedoszacowana w 6% ze względu na zmiany współczynnika Poissona i ponad 60% ze względu na zmienność modułu Younga, w przedziale ciśnienia bocznego do 60 MPa.

Weryfikacja wyników. Aby zweryfikować poprawność ocen parametrów sprężystości, w warunkach złożowych Stężycy na podstawie rzeczywistych wartości, posłużono

**Ryc. 10.** Zależność powierzchni szczeliny (A) od modułu Younga (E_{st})**Fig. 10.** Effect of Young modulus (E_{st}) value on the fracture surface (A)**Ryc. 11.** Zależność modułu Younga (E_{st}) od wartości współczynnika Poissona (ν) określonych metodą „wstecz” na podstawie wyników zabiegu szczelinowania w otworze Stężycy 2**Fig. 11.** Young modulus (E_{st}) vs. Poisson ratio obtained by means of back analysis on basis of results of the fracturing treatment made in the Stężycy 2 well-bore

się metodą „wstecz”. Analizując dane z przebiegu szczelinowania przeprowadzonego w otworze Stężycy 2 w 1995 r. (Miezin, 1995), ze znanej wartości długości, szerokości i wysokości szczeliny, powstałej w trakcie zabiegu szczelinowania, określono wartość modułu Younga dla partii masywu skalnego objętej zabiegiem.

Obliczenia przeprowadzono przy wykorzystaniu równań podstawowych dla modelu 2D Perkins-Kern-Nordgren (PKN), przekształconych do postaci:

$$E_{st} = f(\nu, x_r, w, h)$$

Na podstawie przyjętych: długości, szerokości i wysokości szczeliny, określono uzyskane dla warunków Stężycy wartości modułu Younga E_{st} . Przyjęte dane wyjściowe oraz wyniki obliczeń (w zakresie zmian współczynnika Poissona ν od 0,05 do 0,5) przedstawiono na ryc. 11.

Wartość modułu Younga, dla skał okruchowych z otworu Stężycy 2 na głęb. 2313–2321 m ppt. wynosi od 22500 do 30000 MPa. Są to zatem wartości zbliżone do tych, które uzyskano w badaniach laboratoryjnych przeprowadzonych w warunkach trójosiowego ściskania przy ciśnieniu bocznym 60 MPa.

Podsumowanie

Intensyfikacja wydobycia złóż węglowodorów poprzez szczelinowanie hydrauliczne, wymaga precyzyjnego poznania parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych w złożonym stanie naprężeń, zatem dla celów inżynierii złożowej, istotna jest rola badań laboratoryjnych przeprowadzonych w trójosiowym stanie naprężenia. Badania tego typu są bardzo czasochłonne i kosztowne oraz wymagają specjalistycznego sprzętu, dlatego przy ograniczonej ich liczbie, ważną rolę odgrywa możliwość interpretacji pełnego zakresu stanu naprężeń przy zastosowaniu obwiedni wytrzymałościowej. Z przedstawionej analizy różnych metod interpretacji obwiedni wynika, że dla warunków złożowych w otworze Stężycy 2, niezależnie od przyjętego kryterium, praktycznie nie występują różnice w ocenie wartości naprężenia ścinającego. Równocześnie w warunkach zastosowanego ciśnienia bocznego do 60 MPa, moduł Younga (E_{st}) wzrasta z 14500 do 23700, czyli o 39%. Ponieważ wartość E_{st} ma decydujący wpływ na geometrię szczeliny, należy rozważyć czy wyniki laboratoryjne są porównywalne z rzeczywistymi. Ocena metodą „wstecz” pozwoliła stwierdzić, że wartości modułu Younga określone w warunkach rzeczywistych są porównywalne z parametrem E_{st} uzyskanym dla warunków laboratoryjnych przy ciśnieniu bocznym o wartości 60 MPa.

Literatura

- KŁECZEK Z. 1994 — Geomechanika górnicza. Śląskie Wyd. Techniczne. Katowice.
 ŁUKASZEWSKI P., PINIŃSKA J., GÓRKA H. & WEWIÓR J. 1993 — Badania wytrzymałości i odkształcalności w zmodyfikowanym systemie MTS. Mat. Konf. OBRTG. Warszawa.
 MURPHY D.L. 1988 — Fracturing. International Human Resources development Corporation Publishers. Boston.
 MIEZIN S. 1995 — Analiza testu mikroszczelinowania w odwiercie Stężycy 2. Inst. Górn. Naft. i Gaz., Krosno.
 PERKINS T.K. & KERN I.R. 1961 — Widths of hydraulic fractures. J. Petr. Tech. (September): 271–276.