

Sebastian CZYPIONKA

Jan BIAŁEK

## OKREŚLENIE STREF ZMIAN STRUKTURALNYCH GÓROTWORU WYWOŁANYCH DEFORMACJAMI CIĄGŁYMI

Streszczenie. W artykule w oparciu o rozwiązania analityczne określono rozkład składowych przemieszczeń i naprężeń dla zadanego kształtu fałdu. Otrzymany rozkład składowych naprężeń pierwotnego dodatkowego był podstawą do wyznaczenia stref zmian strukturalnych skał w górotworze z uwagi na zmiany znaku tych składowych. Ponadto przeprowadzono interpretację praktyczną tego zagadnienia.

### 1. WSTĘP

W wyniku działania sił tektonicznych na te warstwy skorupy ziemskiej, w których prowadzi się lub może być prowadzona eksploatacja złóż minerałów użytecznych, wytworzyły się obszary, które uległy zdeformowaniu. Są więc one ośrodkiem poprzecinanych systemem szczelin oraz zaburzonych różnorodnymi i zróżnicowanymi pofałdowaniami. Z dotychczasowych doświadczeń praktycznych przy eksploatacji pokładów węgla w synklinach lub antyklinach fałdów wynika, że istnieje duża zmienność struktury samego węgla jak i skał otaczających oraz zmienność stanu naprężenia w samym górotworze. Przesłanki praktyczne skłoniły do szukania przyczyny tego stanu górotworu w fakcie jego pofałdowania.

W górotworze pofałdowanym pozostały do chwili obecnej pewne szczątkowe wielkości naprężeń pierwotnych dodatkowych pochodzących z okresu działania sił tektonicznych. Wartości tych dodatkowych naprężeń pod względem ilościowym są z uwagi na relaksację naprężeń, w obecnym okresie bardzo trudne do ustalenia.

Jedynie bezpośrednie pomiary "in situ", przeprowadzone w górotworze pofałdowanym specjalnymi czujnikami, mogłyby dać informację co do wartości tych naprężeń. Możemy natomiast przeanalizować wpływ tych naprężeń dodatkowych w sposób jakościowy (z uwagi na znak składowych naprężeń pierwotnego dodatkowego). Rozmieszczenie obszarów w górotworze o dodatkowej koncentracji naprężeń wynikłych z pofałdowania jest szczególnie istotne w przypadku eksploatacji pokładów tąpniących, skłonnych do wyrzutów gazów i skał, zagrożonych wypływami wody lub kurzawki itp.

W niniejszym artykule w oparciu o sposób rozwiązania analitycznego podanego w pracy [1] określono obszary w górotworze, w których koncentracja naprężeń dodatkowych wywoła określone zmiany strukturalne w pokładzie wę-

gła i jego skałach otaczających, przy założeniu określonego kształtu pofałdowania. Ponadto przeprowadzono interpretację praktyczną otrzymanych rozwiązań.

## 2. KRÓTKI STAN ZAGADNIENIA

Badania w tej dziedzinie zapoczątkowała praca J. Goleckiego [2], której autor potraktował górotwór jako ośrodek liniowo sprężysty. Przyjął hipotezę odnośnie powstawania kształtu fałdu na pewnej głębokości wewnątrz górotworu, sprowadzając zagadnienie do przemieszczeniowego problemu dla półpłaszczyzny sprężystej, przy założonych warunkach brzegowo-początkowych. Uzyskane przez J. Goleckiego wzory zostały wykorzystane w pracy [3] potraktował górotwór pofałdowany jako liniowo-sprężysty jednorodny i izotropowy - sprowadzając zagadnienie do problemu przemieszczeniowego dla półpłaszczyzny sprężystej z zadaniem szczególnym kształtem fałdu przypominającym krzywą dzwonową typu Gaussowskiego z przemieszczeniowymi warunkami brzegowymi. Dobrane krzywe zakładają nieskończoną rozpiętość fałdu oraz dowolny rozkład składowej poziomej przemieszczenia na brzegu półpłaszczyzny. W rozwiązaniu zagadnienia oparł się na równaniach Neubera - Papkowicza. Przy zadanych warunkach początkowych - określił rozkład przemieszczeń i naprężeń dla tak dobranego kształtu fałdu.

Na podstawie rozkładu składowych dodatkowego naprężenia pierwotnego w górotworze, autor wyznaczył trzy strefy z uwagi na znak tych składowych. Wyznaczony rozkład tych stref w górotworze pofałdowanym dla tak przyjętego kształtu fałdu daje szereg wskazówek na etapie projektowania eksploatacji.

## 3. SPORMUŁOWANIE ZAGADNIENIA I METODA JEGO ROZWIĄZANIA

Dla określenia rozkładu przemieszczeń i naprężeń w górotworze pofałdowanym traktujemy górotwór jako ośrodek liniowo-sprężysty, jednorodny i izotropowy. Jeżeli fałd przedstawiony na rys. 1 potraktujemy jako powierzchnię walcową, co odpowiada płaskiemu stanowi odkształceń w górotworze, wówczas rozkład przemieszczeń pionowych i poziomych może być opisany krzywymi o następujących równaniach:

przemieszczenia pionowe

$$w(x, 0) = \frac{ax}{b^2 + x^2} \quad \text{dla } x \in (-\infty, +\infty) \quad (3.1)$$

przemieszczenia poziome

$$u(x, 0) = \frac{k\partial}{\partial x} (x, 0) = \frac{ka(b^2 - x^2)}{(b^2 - x^2)^2} \quad (3.2)$$

dla  $x \in (-\infty, +\infty)$

oraz

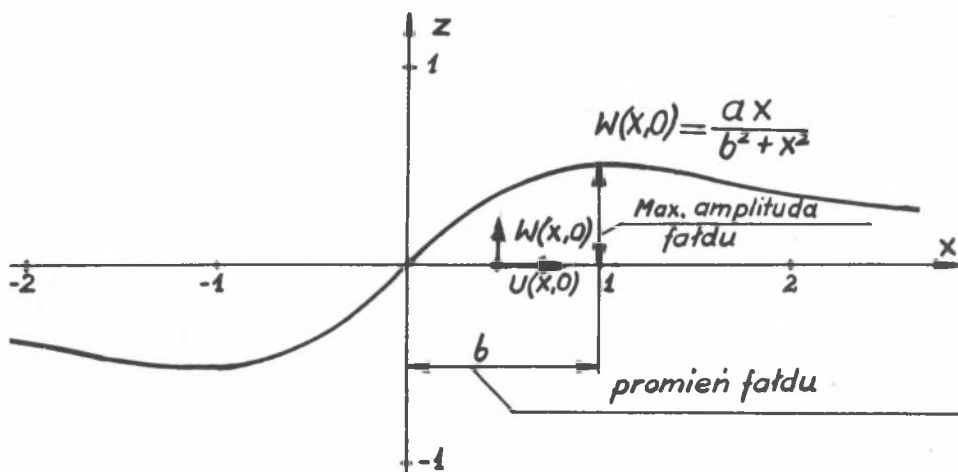
$$\lim (u, \sigma_x, \sigma_z, \tau_{xz}) \rightarrow 0 \text{ gdy } |z| \rightarrow \infty, \quad (3.3)$$

gdzie

a - parametr zależny od wielkości amplitudy fałdu,

b - promień fałdu,

k - parametr wyznaczony metodą minimalizacji całkowitej energii odkształcenia ciała sprężystego.



Rys. 1

Przy tych założeniach zagadnienie sprowadza się do problemu przemieszczeniowego dla półpłaszczyzny sprężystej z zadаныmi warunkami brzegowymi. Zagadnienie rozwiązano, stosując funkcję naprężeń Airy'ego. Uwzględniając powyższe składowe przemieszczeń w płaskim stanie, otrzymujemy równanie w następującej postaci:

$$2G \frac{\partial u(x,z)}{\partial x} = (1-\nu) \frac{\partial^2 \phi(x,z)}{\partial z^2} - \nu \frac{\partial^2 \phi(x,z)}{\partial x^2}$$

$$2G \frac{\partial \phi(x,z)}{\partial z} = (1-\nu) \frac{\partial^2 \phi(x,z)}{\partial x^2} - \nu \frac{\partial^2 \phi(x,z)}{\partial z^2}$$

$$G \left[ \frac{\partial \phi(x,z)}{\partial x} + \frac{\partial u(x,z)}{\partial z} \right] = \frac{\partial^2 \phi(x,z)}{\partial z \partial x} \quad (3.4)$$

Równania (3.4) rozwiązać można metodą transformacji całkowej Fouriera. Zgodnie z przyjętym w sformułowaniu zagadnienia modelem górotworu, prze-

mieszczenia dla przyjętego ośrodka opisać można równaniem biharmonicznym Maxwella w postaci:

$$\nabla^4 \phi(x, z) = 0 \quad (3.5)$$

oraz warunkami brzegowymi (3.1), (3.2), (3.3).

Jeżeli równanie (3.5) pomnożymy przez  $e^{-\alpha x}$ , scałkujemy w granicach  $(-\infty, +\infty)$  względem  $x$ , uwzględnimy definicję prostej transformaty, obowiązującą dla transformat twierdzenie, wówczas otrzymamy:

$$\frac{\partial^4 \phi(\alpha, z)}{\partial z^4} - 2\alpha^2 \frac{\partial^2 \phi(\alpha, z)}{\partial z^2} + \alpha^4 \phi(\alpha, z) = 0. \quad (3.6)$$

Całką ogólną równania (3.6) jest wielokrotnie przytaczana w literaturze, a występujące w niej stałe wyznaczono z warunków brzegowych dla  $z = 0$ , uwzględniając twierdzenie o transformacie funkcji parzystej i nieparzystej. Po uwzględnieniu przemieszczeń zadanych na brzegu, definicji prostej transformaty Fouriera, po odwróceniu transformat oraz przeprowadzeniu przekształceń otrzymujemy wzory na składowe przemieszczenia w postaci:

$$w(x, z) = \frac{ax}{3-4\nu} \left[ \frac{3-4\nu}{A^2+x^2} + \frac{2A|z|}{(A^2+x^2)^2} + \frac{2kz(3A^2-x^2)}{(A^2+x^2)^3} \right] \quad (3.7)$$

$$u(x, z) = \frac{a}{3-\nu} \left\{ \frac{[k(3-4\nu) - z](A^2-x^2)}{(A^2+x^2)^2} + 2k|z| \frac{A(3x^2-A^2)}{(A^2+x^2)^3} \right\}, \quad (3.8)$$

gdzie

$$A = b + |z|.$$

Składowe naprężenia wyznaczyć można z ogólnego prawa Hooke'a.

$$\sigma_x = 2G \left[ \frac{\partial u}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right]$$

$$\sigma_z = 2G \left[ \frac{\partial w}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right]$$

$$\tau_{xz} = G \left[ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right]. \quad (3.9)$$

Różniczkując równania (3.7) i (3.8) oraz wstawiając je do równań (3.9), otrzymamy wzory na składowe naprężenia.

Ze względu na zbyt rozbudowaną postać tych wzorów nie cytujemy ich w niniejszym artykule

Równania te zawierają nieznaną parametr "k", który wyznaczyć można metodą minimalizacji całkowitej energii odkształcenia ciała sprężystego.

Energia właściwa odkształcenia  $V_0$  wyraża się dla płaskiego stanu odkształcenia zależnością:

$$V_0 = \frac{1}{2} \lambda \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \right)^2 + G \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{1}{2} G \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 \quad (3.10)$$

całkowita energia odkształcenia ciała sprężystego wynosi:

$$V = \iint_D dx dz \quad D: \begin{cases} -\infty < x < \infty \\ 0 \leq z < \infty \end{cases} \quad (3.11)$$

Z równań (3.11) określono dla wyznaczenia parametru "k" minimum całkowitej energii odkształcenia górotworu.

$$\frac{dV}{dk} = 0 \quad (3.12)$$

Obliczenie występujących w równaniu (3.12) całek podwójnych jest bardzo pracochłonne i najłatwiej wykonać to można numerycznie. Wartość parametru "k" przy całkowaniu po całej płaszczyźnie jest równa zero.

#### 4. WYZNACZENIE STREF ZMIAN STRUKTURALNYCH SKAŁ

##### W GÓROTWORZE POFAŁDOWANYM

Obliczenia wartości składowych naprężeń pierwotnych dodatkowych wykonano na maszynie cyfrowej wg opracowanego programu. Do obliczeń przyjęto parametry  $a, b$  oraz  $G$  wyrażone we współrzędnych bezwymiarowych, a liczbę Poissona dla górotworu równa 0,20. Wykonane obliczenia były podstawą do sporządzenia rozkładów składowych naprężenia. Przykładowo rys. 2 obrazuje rozkład składowych naprężenia we współrzędnych bezwymiarowych dla wykonanego przekroju  $\frac{z}{a} = 0,25$ . Z wykonanych rozkładów składowych naprężenia w założonych przekrojach pionowych i poziomych, wyznaczono charakterystyczne strefy w górotworze pofałdowanym z uwagi na znak składowych naprężenia pierwotnego dodatkowego. Rozkład tych stref a tym samym rozkład stref zmian strukturalnych skał górotworu przedstawia rys. 3. Z rys. tego wynika, że dla tego typu kształtu fałdu istnieją 4 strefy i tak:

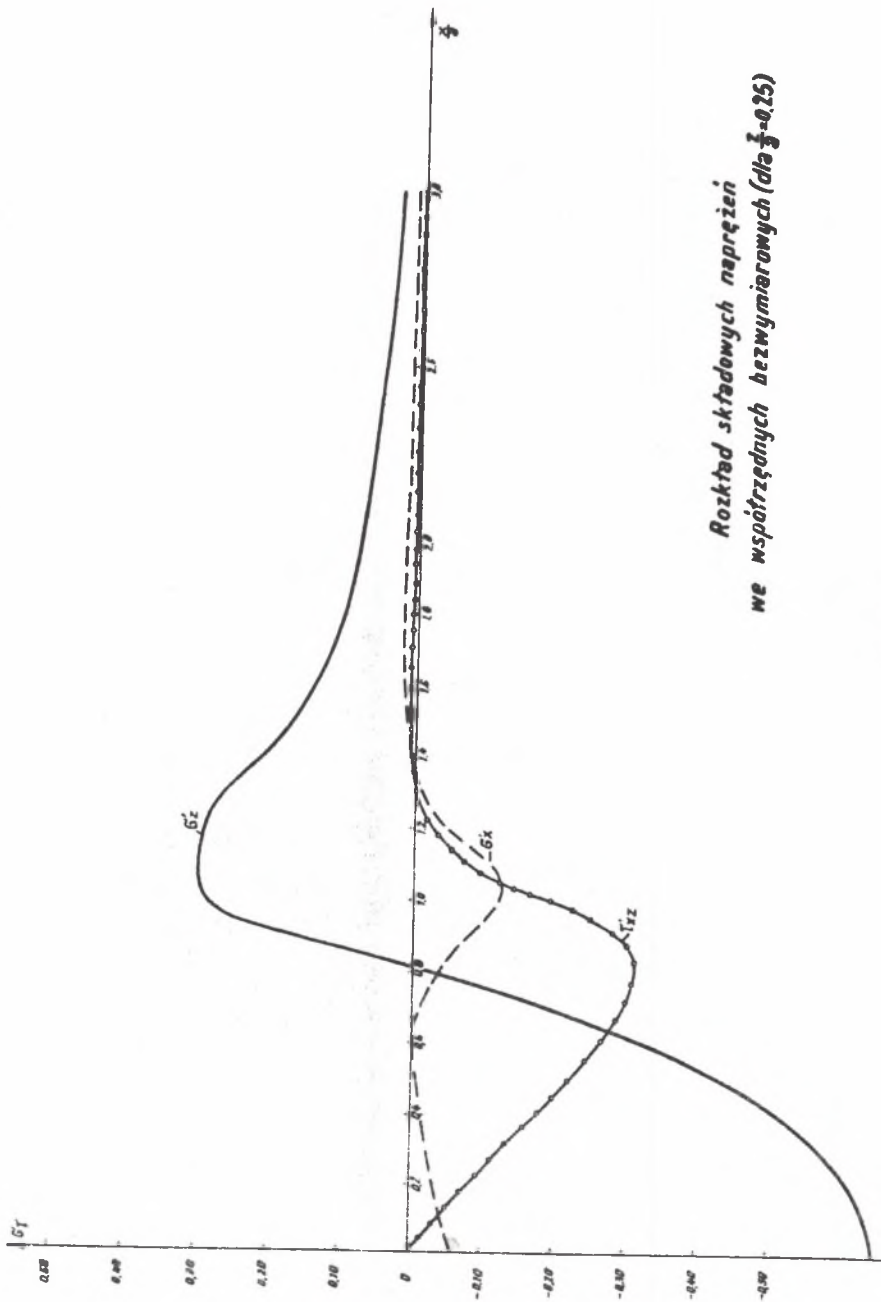
strefa I - w której obydwie składowe przyjmują znak rozciągania,

strefa II - składowa pozioma posiada znak ściskania, a składowa pionowa znak rozciągania,

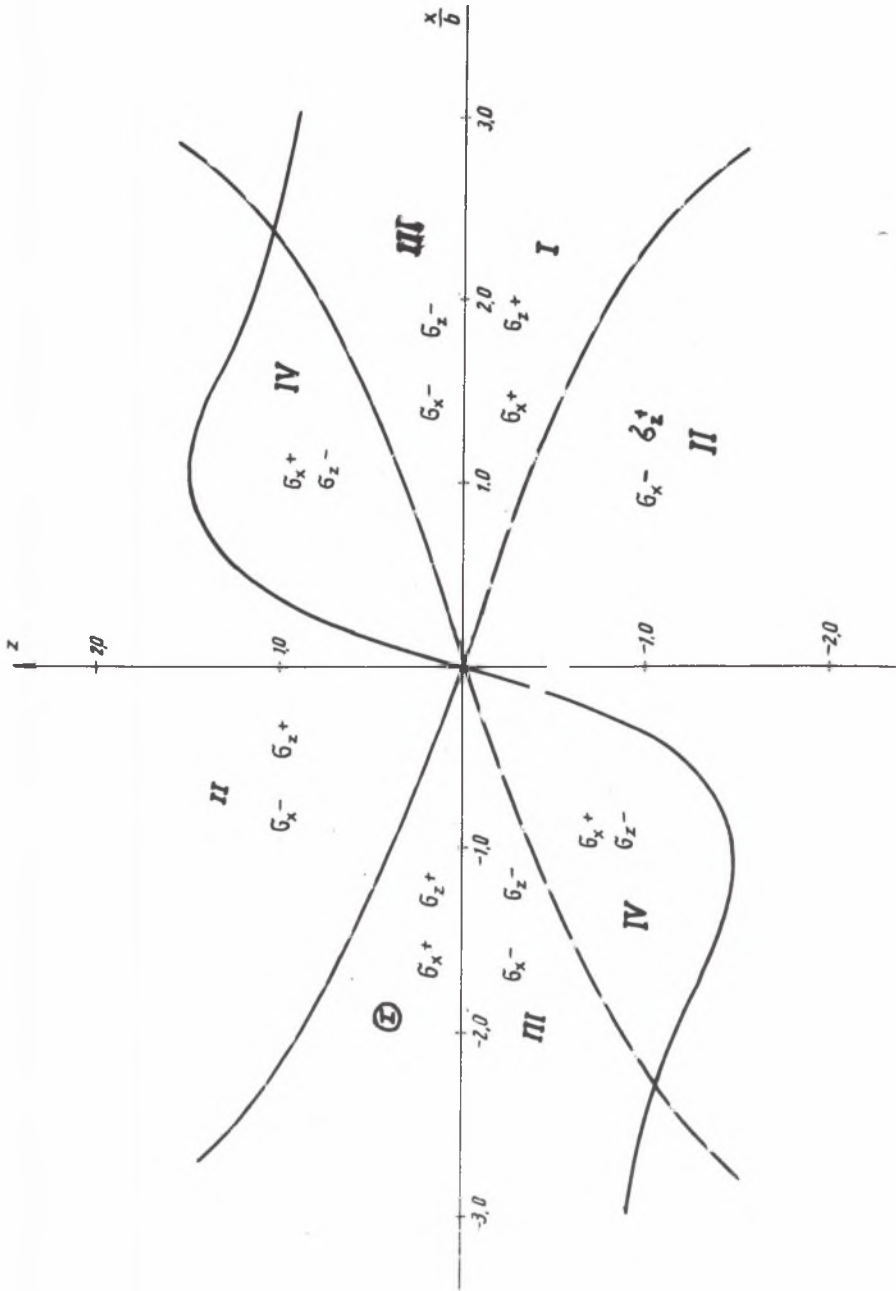
strefa III - obydwie składowe posiadają znak ściskania,

strefa IV - składowa pozioma o znaku rozciągania, a składowa pionowa o znaku ściskania.

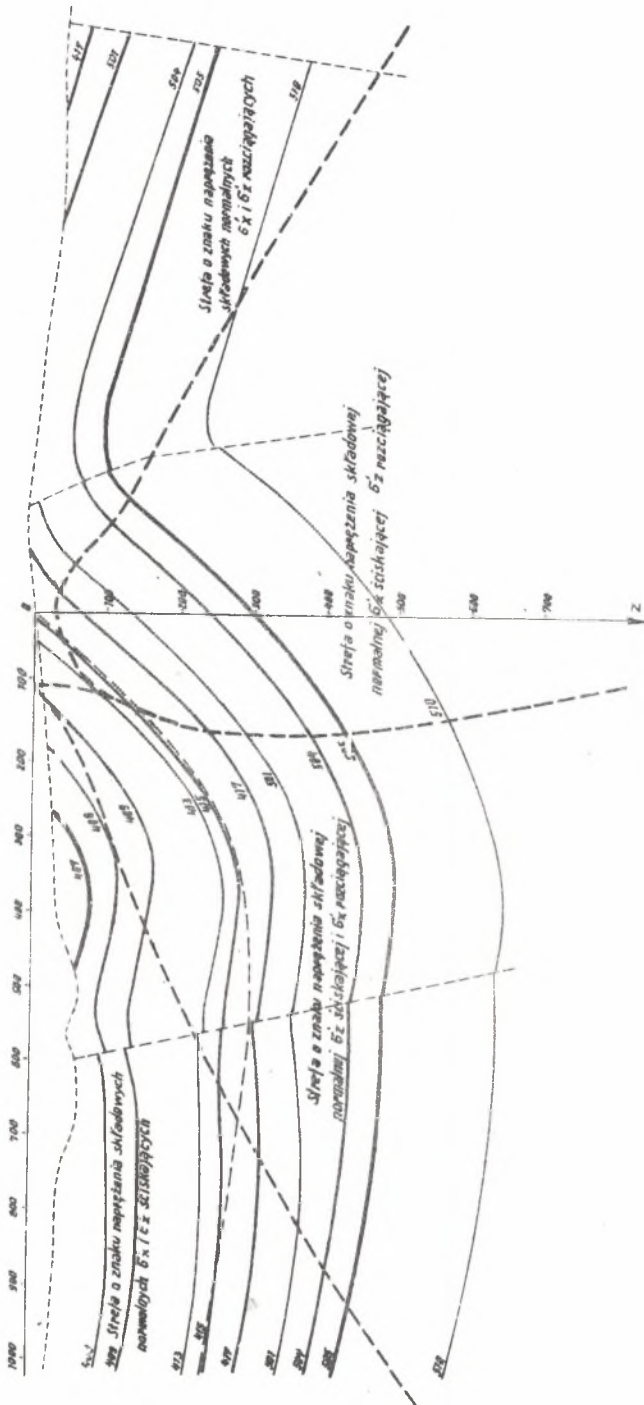
Rys. 4 przedstawia rozkład wyznaczonych stref dla konkretnego przekroju geologicznego Rybnickiego Okręgu Węglowego.



*Rozkład składowych naprężeń  
we współrzędnych bezwymiarowych (dla  $\beta=0.25$ )*



Rys. 3



Rys. 4



## 5. INTERPRETACJA PRAKTYCZNA OTRZYMANYCH STREF W GÓROTWORZE POFAŁDOWANYM

Jak podano w poprzednich punktach artykułu zmianie znaku składowych naprężenia pierwotnego dodatkowego może towarzyszyć również zmiana struktury samego górotworu. Takie zmiany strukturalne wcześniej niezlokalizowane mogą być przyczyną całego szeregu trudności natury technicznej przy wybieraniu złoża, a nawet doprowadzić do groźnych w skutkach przypadków tapnięć, zawałów, wyrzutów, wdarć wody itp. W niniejszym punkcie przeanalizujemy jakiego rodzaju zagrożenia oraz zmiany litologiczne mogą wystąpić w poszczególnych strefach.

W strefie I w wyniku dodatkowych naprężeń rozciągających możliwe jest wystąpienie w górotworze serii drobnych szczelin lub nawet uskoków. Jeżeli wybierany jest pokład w którego stropie zalegają słabe skały iłowe, należy się spodziewać z wystąpieniem dużych trudności z utrzymywaniem stropu w przestrzeni roboczej wyrobiska wybierkowego (możliwe kominowanie już na ścieżce kombajnowej). Inaczej przedstawia się zagadnienie, jeżeli w strefie tej prowadzimy eksploatację pokładu o dużej zawartości metanu. Już w trakcie wykonywania robót przygotowawczych wystąpi zwiększony wpływ metanu, a tym samym zwiększy się zasięg i skuteczność odmetanowania.

W przypadku, gdy powyżej wybieranego pokładu znajduje się zbiornik wodny w pokładzie eksploatowanym tej strefy, należy spodziewać się zwiększonego wypływu wody.

Strefa II, to strefa największego wyłężenia górotworu. Struktura górotworu w tej strefie może wykazywać odmienne własności w porównaniu do strefy I, możliwe jest łatwiejsze rozwarstwienie górotworu.

Bardzo niebezpieczna jest strefa zaliczona w naszym podziale do III, w której obydwie składowe przyjmują znak ściskania. W obszarze górotworu objętym tą strefą w pokładzie tąpającym lub skłonnym do wyrzutów, istnieje potencjalnie największe niebezpieczeństwo. Może zaistnieć przypadek np. niewybrania pokładu tąpającego, bez uprzednio wykonanej eksploatacji odprężającej górnego lub dolnego pokładu, bądź zawałowej warstwy podstropowej w pokładzie grubym. Podobnie przedstawia się zagadnienie w przypadku pokładu skłonnego do wyrzutów gazu i skał. W pokładach metanowych możliwe są przypadki wystąpienia ze słabym nasileniem wyrzutów metanu w trakcie prowadzenia pierwszych wyrobisk przygotowawczych. Hipotezę tę potwierdziły obserwacje praktyczne. Ostatnia ze stref, której składowa pionowa posiada znak ściskania, a pozioma rozciągania należy również do zwiększających z uwagi na zmiany struktury skał, zagrożenie w pokładach tąpających lub wyrzutowych. Na skutek działania sił tektonicznych należy się spodziewać wystąpienia w tej strefie licznych makro i mikro-szczelin. Jeżeli wybierany będzie pokład z zawałem, w którego stropie zalega ława piaskowcowa o grubości dochodzącej do kilkudziesięciu metrów (szczególnie niebezpieczne 10-20 m), w trakcie eksploatacji mogą wystąpić niekontrolowane propagacje tych szczelin, a tym samym zawały w ścianach. W pokładzie tąpającym zwiększa się również prawdopodobieństwo wystąpienia tąpnięć stropowych. Oczywiście jest, że z powyższych sformułowań nie należy wyciągnąć wniosku,

że w każdym przypadku zjawiska wyżej opisane wystąpią. Taki wniosek byłby równie błędny jak i założenie, że pofałdowanie nie wywołuje żadnych zmian strukturalnych skał górotworu. Każde zjawisko zachodzące w górotworze, w czasie prowadzenia w nim robót górniczych jest skutkiem działania całego układu przyczyn trudnych w sposób wymierny do rozdzielenia.

## 6. WNIOSKI KOŃCOWE

Przeprowadzone w artykule rozważania analityczne oraz ich interpretacja praktyczna pozwalają na sformułowanie niżej podanych wniosków:

- dodatkowe naprężenia pierwotne wywołane pofałdowaniem górotworu mogą wpływać na zmianę jego struktury w określonych obszarach,
- dla tak dobranego kształtu fałdu istnieją w górotworze cztery charakterystyczne strefy zmian strukturalnych skał z uwagi na znak składowych naprężenia pierwotnego dodatkowego,
- w sposób analityczny nie jest możliwe określenie ilościowego rozkładu składowych naprężeń pierwotnych dodatkowych w górotworze, z uwagi na relaksację naprężeń jaka wystąpiła,
- z punktu widzenia ważności zagadnienia dla praktyki górniczej, celowym jest przeprowadzenie badań nad analitycznym rozwiązaniem przestrzennego zagadnienia przy uwzględnieniu anizotropowości w górotworze, a także prowadzenie badań "in situ" nad opracowaniem metody pomiaru ilościowego naprężeń pierwotnych dodatkowych w górotworze pofałdowanym.

## LITERATURA

- [1] Czyptionka S.: Określenie rozkładu przemieszczeń i naprężeń w górotworze pofałdowanym. Praca doktorska, Gliwice 1972.
- [2] Golecki J.: O przybliżonej metodzie określenia rozkładu naprężeń wokół fałd. Arch.Górn. I.IX 1961.
- [3] Krawiec A.: O pewnej możliwości ujęcia rozkładu przemieszczeń i naprężeń w górotworze pofałdowanym. Praca doktorska, Kraków 1969.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОН СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ГОРНОЙ ПОРОДЫ, ВЫЗВАННЫХ ПОСТОЯННЫМИ ДЕФОРМАЦИЯМИ

### Р е з ю м е

В статье, опираясь на аналитические решения, определяется разложение составляющих перемещений и напряжений для заданной формы складки. Полученное разложение составляющих первичного дообвочного напряжения явилось основой

для определения зон структурных изменений пород в горной породе из-за изменения знака этих составляющих. Кроме того проводится практическая интерпретация этой проблемы.

DETERMINATION OF STRUCTURAL CHANGES ZONES IN A ROCK-MASS,  
CAUSED BY CONTINUOUS DEFORMATIONS

S u m m a r y

In the article, basing on the analytic solutions, a distribution of component displacements and stresses for the given shape of a fold, has been determined.

The obtained components distribution of a primary additional stress was the basis for determining structural changes of rocks in a rock-mass, on account of the change of mark of these components. Moreover a practical interpretation of this problem has been carried out.