ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1966
Seria: GÓRNICTWO z. 18 Nr kol. 163

WITOLD PARYSIEWICZ

TĄPANIA POKŁADOWE I SPĄGOWE

Streszczenie. W artykule autor określa przyczyny tąpań pokładowych i spągowych, omawia mechanikę powstawania tych tąpań oraz przedstawia sposoby zabezpieczenia przed ich powstawaniem. Artykuł jest kontynuacją publikacji "Przyczyny tąpań" zamieszczonej w Zeszycie Naukowym Politechniki Śląskiej Nr 124 Górnictwo z. 12.

1. Tąpania pokładowe

Dla wywołania zjawiska tąpnięcia w pokładzie, czyli nagłego zruszenia skał do wyrobiska, powinny być spełnione następujące warunki:

1) musi być przekroczona wytrzymałość R_c skał na ściskanie;

2) skały muszą mieć zdolność do akumulowania energii sprężystej przy małej wartości modułu sprężystości E. Wytrzymałość skały na ściskanie powinna być duża. Skała musi być krucha;

3) skały muszą mieć zdolność nagłego oddania akumulowanej energii;
im krótszy czas oddania energii zakumulowanej, tym większa moc tąpnięcia.

4) strop, pokład i spąg muszą mieć ograniczony stopień plastyczności nie pozwalający na rozproszenie akumulowanej energii sprężystości w pokładzie;

5) między stropem, pokładem a spągiem muszą wystąpić określone stosunki wytrzymałości;

6) skała musi mieć dostatecznie wysoki stopień makroskopowej jednorodności;

7) musi istnieć pewna grubość pokładu przy danej głębokości i przy danym rodzaju stropu. Jednak nie zawsze konieczne jest spełnienie wszystkich wymienionych warunków w przypadku pęknięcia stropu a następnie wskutek nagłego zaciążenia stropu na pokładzie, maleje stopień plastyczności, a więc "wzrasta" kruchość skały. Z powodu krótkotrwałego zadziałania energia nie zdoła ulec rozproszeniu w przeciwieństwie do powolnego, cisnącego działania stropu. Przy nagłym zadziałaniu stropu na pokład nawet niejednorodny maskropowo pokład może ulec tąpnięciu.

Rys. 1. Chodnik eksploatacyjny (wg Kabuschok - Niemczyk). Widać wyraźne uławicenia i łupności

Widzimy więc, że przy zmianie warunków reologicznych wywołanych nagłym zaciążeniem stropu na pokład zmieniają się również warunki konieczne do wywołania tąpnięcia w pokładzie.

Do wywołania tąpnięcia w przypadku wolno wzrastającego ciśnienia w pokładzie konieczne jest ściślejsze zachowanie warunków, niż w przypadku nagłego obciążenia pokładu stropem. Dlatego niejednokrotnie w pokładzie w którym nie powinny wystąpić tąpania przy pęknięciu stropu wystąpić mogą katastrofalne tąpania.

Tąpania pokładowe nazywamy również naprężeniowymi, gdyż wywołane są przekraczaniem granicznych naprężeń σ_z w pokładzie.

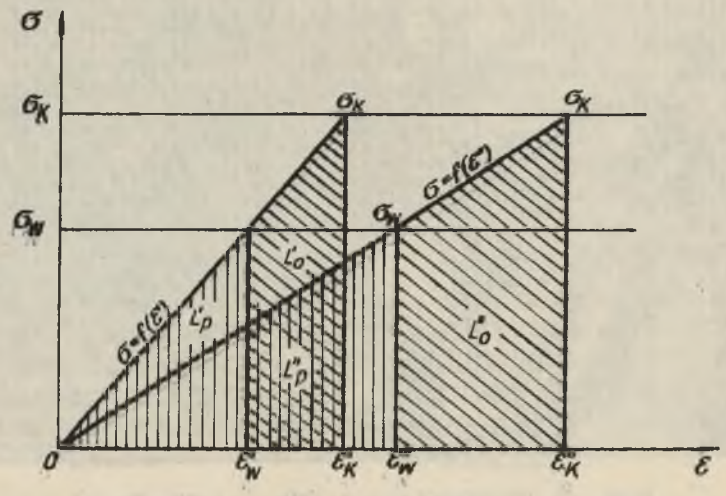
Przeanalizujemy poprzednio wymienione warunki.

Rys. 2. Spękanie ociosów wyrobiska

Pierwszy i drugi warunek

Przekroczenie wytrzymałości skały w pokładzie przebiega wolno. Skała uwarstwiona (rys. 1) najczęściej w wyrobisku chodnikowym zmienia swoją strukturę. Występują pionowe spękania (rys. 2). Skała, np. węgiel, wykazuje po pewnym czasie budowę słupową, często na głębokości do 10 m w głąb calizny i to głębiej od strony zbliżającego się frontu wybierania. Przy dalszym zbliżaniu się frontu i stale wzrastającym ciśnieniu następuje nagłe zruszenie ociosów do wyrobiska, połączone czasami z wypiętrzeniem spągu. Znański oraz inni badacze stwierdzili na podstawie badań laboratoryjnych, że część zakumulowanej w pokładzie energii a mianowicie energia odkształcenia postaciowego, zużywa się zgodnie z hipotezą Hubera na pokonanie spójności skały (ciała), a pozostała część tj. energia odkształcenia objętościowego zamienia się na energię kinetyczną powodującą silny odrzut spękanych skał (Budryk).

Rozpatrzmy warunki odkształcalności ε próbek dwóch ciał sprężystych w przedziale o + ε' i o ε'', przy założeniu, że wytrzymałości tych ciał są równe natomiast ich moduły sprężystości są różne (rys. 3). Znański zaobserwował, że pewne skały skłonne do tąpań, ściskane w warunkach skrępowanej



Rys. 3. Warunki stosunków energii ciał ściskanych o równej wytrzymałości

rozszerzalności na boki wskutek tarcia o płaszczyzny ścisku prasy, akumulują energię sprężystości w dwóch fazach. Przy osiągnięciu w ściskanej próbce naprężeń wartości σ_w następuje jej spękanie na pionowe słupy wzdłuż płaszczyzn równoległych do osi nacisku. Przy dalszym zwiększaniu obciążenia naprężenia w próbce wzrastają aż do wartości σ_k. W momencie osiągnięcia naprężenia σ_k następuje nagły rozpad próbki z wyzwoleniem mniejszej lub większej ilości energii Pole trójkąta $0\sigma_t\,\sigma_t$ przedstawia wartość całkowitej energii L' odebranej przez próbkę pierwszego ciała podczas ściskania. Pole trójkąta $0\sigma_w\,\varepsilon'_w$ przedstawia w przybliżeniu wartość energii L'_p zużytej na spękanie tej próbki w szereg pionowych słupów, (pierwsza faza). Natomiast sądzić należy, że znaczna część energii L'_o (pole figury $\varepsilon'_w\sigma_w\sigma_k\varepsilon'_k$) zużyta zostaje, po przekroczeniu granicznego naprężenia σ_k na eksplozywny rozpad próbki (druga faza). Część energii gromadzonej w próbce w obu fazach zostaje rozproszona, gdyż ani próbki, ani skały nie są ciałami idealnie sprężystymi, jak to założono na przedstawionym rys. 3.

Przebieg opisanego zjawiska, zakończonego tąpnięciem wywołanym w warunkach laboratoryjnych, wykazuje w obu fazach daleko idącą analogię z obserwowanymi zjawiskami tąpań w kopalni. Przy tąpaniach pokładowych również obserwuje się dwie fazy wzrostu naprężeń i akumulacji energii połączone ze zmianą struktury makroskopowej pokładu.

Analogiczne jest dla próbki wyciętej z drugiego ciała. Energia całkowita:

$$L'' = L''_p + L''_o$$

Przy założeniu, że wytrzymałość ciał jest równa, wartość nagromadzonej energii jest większa dla ciała o większej odkształcalności sprężystej, a więc o mniejszym module sprężystości. Im ciało jest mniej sztywne, to znaczy ma mniejszą wartość modułu sprężystości tym odkształcalność sprężysta jest większa. Wartość modułu sprężystości pomierzona w

laboratorium (Znański) przy jednościowym ściskaniu próbek, wynosi:

$$E_{(węgiel)} = 10^4 \text{ kG/cm}^2; \quad E_{(piaskowiec)} = 10^5 \text{ kG/cm}^2.$$

A więc akumulacja energii, dla równych naprężeń, będzie większa w węglu niż w piaskowcu. Przy powolnym jednoosiowym obciążaniu energia właściwa (na jednostkę objętości) w chwili rozpadania próbki wynosi średnio:

$$L_{(węgiel)} = 3.0 \text{ kG/cm/cm}^3; \quad L_{(piaskowiec)} = 1.5 \text{ kG/cm/cm}^3.$$

W warunkach naturalnych, wskutek niejednorodnej budowy pokładu i spągu, spękań i płaszczyzn osłabionej spoistości, pewnego stopnia plastyczności skał, tarcia itp., część energii zostaje rozproszona. Gdyby cała energia wyznaczona laboratoryjnie oddana została nagle przy tąpnięciu, wtedy moc tąpnięcia byłaby, jak łatwo obliczyć, monstrualna. Właśnie przy tąpaniach stropowych wywołanych pęknięciem stropu zbudowanego z piaskowców, następuje nagłe przekazanie energii przez strop w pokład bez możności rozproszenia i dlatego tąpnięcie stropowe ma katastrofalną moc. Zagadnienia ściskania dwóch ciał o równej wytrzymałości i różnych modułach sprężystości E, przedstawione schematycznie na rys. 3, można przedstawić analitycznie:

Energia ciała I $\quad L' = L'_p + L'_o$

Energia ciała II $\quad L'' = L''_p + L''_o$

Dla ciał sprężystych w określonym przedziale naprężeń odpowiednio wartość modułów

$$E_1 = \frac{d\sigma_w}{d\varepsilon'_w} = \frac{d\sigma_k}{d\varepsilon'_k}$$

$$E_2 = \frac{d\sigma_w}{d\varepsilon''_w} = \frac{d\sigma_k}{d\varepsilon''_k}$$

Całkowita wartość energii właściwej:

$$L' = L'_p + L'_o = w \int_0^{\varepsilon'_w} f(\varepsilon')d\varepsilon' + \int_{\varepsilon'_w}^{\varepsilon_k} f(\varepsilon')\, d\varepsilon'$$

$$L'' = L''_p + L''_o = w \int_0^{\varepsilon''_w} f(\varepsilon'')d\varepsilon'' + \int_{\varepsilon''_w}^{\varepsilon''_k} f(\varepsilon'')\, d\varepsilon''$$

ponieważ: $f(\varepsilon') = E_1 \cdot \varepsilon'$ oraz $f(\varepsilon'') = E_2 \cdot \varepsilon''$

więc po podstawieniu i scałkowaniu otrzymamy:

$$L' = E_1 \frac{\varepsilon'^2_k}{2} \quad \text{oraz} \quad L'' = E_2 \frac{\varepsilon''^2_k}{2}$$

Energia drugiej fazy:

$$L'_o = L' - L'_p = E_1 \left(\frac{\varepsilon'^2_k}{2} - \frac{\varepsilon'^2_w}{2}\right) = \frac{E_1}{2} (\varepsilon'^2_k - \varepsilon'^2_w)$$

$$L''_o = L'' - L''_p = E_2 \left(\frac{\varepsilon''^2_k}{2} - \frac{\varepsilon''^2_w}{2}\right) = \frac{E_2}{2} (\varepsilon''^2_k - \varepsilon''^2_w)$$

W warunkach sprężystych $\sigma = E \cdot \varepsilon$ $\quad \varepsilon = \frac{\sigma}{E}$

wartość energii sprężystej drugiej fazy dla ciał o równej wytrzymałości wynosi:

$$L'_o = \frac{E_1}{2}\left[\left(\frac{\sigma_k}{E_1}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_w}{E_1}\right)^2\right] = \frac{1}{2E_1} (\sigma_k^2 - \sigma_w^2)$$

$$L''_o = \frac{E_2}{2}\left[\left(\frac{\sigma_k}{E_2}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_w}{E_2}\right)^2\right] = \frac{1}{2E_2} (\sigma_k^2 - \sigma_w^2)$$

Ostatnie dwa wyrażenia przedstawiają wartość sprężystej energii drugiej fazy dla dwóch ciał różnej wartości modułu E. Praktycznie, wskutek rozproszania się energii wartości te będą mniejsze.
Jeżeli:

$$\frac{L'_o}{L''_o} = \frac{\frac{1}{E_2}}{\frac{1}{E_1}} = \frac{E_1}{E_2} > 1$$

to $$L''_o > L'_o \quad \text{a} \quad E_2 < E_1$$

Warunek trzeci

Jeżeli energia nagromadzona w pokładzie oddawana (przekazywana) jest powoli, to do nagłego wyładowania tejże energii nie dojdzie. Mówi się wtedy o rozproszeniu się energii. Niektóre skały kruche (węgiel, dolomit, itp.) mają zdolność nie tylko akumulowania energii, ale również jej nagłego oddania. Im czas oddawania energii jest krótszy, tym moc tąpnięcia większa. Moc tąpnięcia jest zależna również od prędkości akumulowania energii. Im krótszy jest czas akumulowania energii a tym samym prędkość odkształcania większa $\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}$, tym większa jest zdolność skał do akumulowania energii i przy danej kruchości materiału większa również moc tąpnięcia. Dlatego też, między innymi, tąpania stropowe wywołane pęknięciem grubych i mocnych warstw nadległych wykazują tak wielką moc. Wydaje się, że największą moc tąpania wykaże pokład w którym naprężenia cisnące σ_z dojdą wskutek rosnącego ciśnienia eksploatacyjnego stopniowo do granicznej wartości σ_k (rys. 3), a równocześnie nastąpi pęknięcie stropu tego pokładu powodujące nagłe dodatkowe akumulowanie energii z "podwyższeniem" granicznej wartości σ_k.

Warunek czwarty i piąty

Przy nagłym odkształceniu skały "maleje" jej plastyczność, a "zwiększa" się jej kruchość. Tym tłumaczy się tąpania w pokładach nie wykazujących cech tąpliwości wywołane pęknię-

ciem stropu i dynamicznym obciążeniem nagłego przyłożenia. Tak samo spąg o własnościach plastycznych, przy nagłym zaciążeniu pokładu "traci" swe własności plastyczne i nie zdąży rozproszyć energii przekazanej mu przez pokład. Zachowuje się jak ciało sprężyste. W przypadku powolnego wzrostu naprężeń w pokładzie, aby zaistniało zjawisko tąpnięcia, skały pokładu i spągu nie mogą wykazywać własności plastycznych, lecz sprężyste.

Jeżeli pokład skłonny do tąpań zalega na plastycznym spągu, to przy powolnym zwiększaniu się ciśnienia następuje rozproszenie energii przez równie powolnie przebiegające odkształcenia plastyczne spągu i do tąpnięcia zwykle nie dochodzi.

Również trudno doprowadzić do tąpnięcia przez powolny wzrost ciśnienia, a więc i naprężeń, pokład o własnościach plastycznych spoczywający nawet na sprężystym spągu.

Z powyższych krótkich rozważań można wyciągnąć następujące wnioski:

- do wywołania tąpnięcia, granica między stanem sprężystym a plastycznym musi przebiegać przy możliwie dużej wytrzymałości skały,
- pokład i skały otaczające pokład powinny znajdować się w fazie sprężystej,
- wielkość energii akumulowanej musi być większa niż energii rozpraszanej w czasie zwiększania ciśnienia.

W przypadku nagle przyłożonej siły energia rozproszona L_R ma małą wartość, naturalnie że energia akumulowana L_A będzie wtedy duża, a jeżeli czas działania energii będzie mały (nagłość zjawiska), to moc tąpnięcia będzie znaczna. Najsilniejsze efekty tąpnięcia w pokładzie otrzymamy gdy strop i spąg są znacznie wytrzymalsze od pokładu, z tym że wytrzymałość pokładu jest również znaczna.

Warunek szósty

Makroskopowa jednorodność pokładu oznacza wyraźną przewagę pewnych składników, tak co do wielkości ziarn, jak składu mineralogiczno-petrograficznego. Dla wywołania tąpnięcia muszą być spełnione również inne warunki, a przede wszystkim znaczna wartość wytrzymałości skały w pokładzie.

Budowę drobnoziarnistą i jednorodną mineralogicznie wykazują spośród węgli kamiennych duryty, węgle sapropelowe, łupki kenelskie itp. W pokładach zbudowanych z tego rodzaju węgla tąpania mają najgwałtowniejszy przebieg. Są to pokłady pod względem budowy skłonne do tąpań. W pokładach natomiast w których występują warstewki węgli mało wytrzymałych o małej zwięzłości oraz budowie łuskowatej, blaszkowatej lub pylastej, jak np. fuzytów, trudniej wywołać tąpnięcie. W mniejszym stopniu osłabiają skłonność pokładu do tąpań warstewki klarytu i witrytu, które jakkolwiek są kruche, wykazują niższą wytrzymałość niż duryt. Również strop fałszywy składający się ze spękanych łupków o blaszkowatej budowie wyraźnie obniża tąpliwość pokładu. Wymienione warstwy w pokładzie, czy też w bezpośrednim sąsiedztwie pokładu, przyczyniają się do rozpraszania akumulowanej energii. Klasyczne próby laboratoryjne w tym kierunku przeprowadził Znański, badając wytrzymałość i tąpliwość różnych skał.

Skały magmowe, ze względu na wielkość ziarn składników głównych, którymi są: kwarc, skalenie, miki, dzieli się na grubo, średnio, drobno i zbito-ziarniste. Im skały są drobniej uziarnione i im bardziej wytrzymałe, tym ich tąpliwość jest wyższa. A więc, np. granity drobnoziarniste są bardziej tąpliwe niż granity średnioziarniste lub bazalty zbito-ziarniste są bardziej tąpliwe niż granity itd. Wytrzymałość bazaltów na ściskanie wynosi 3000 do 4000 kG/cm^2, a czasami do 5000 kG/cm^2.

Warunek siódmy

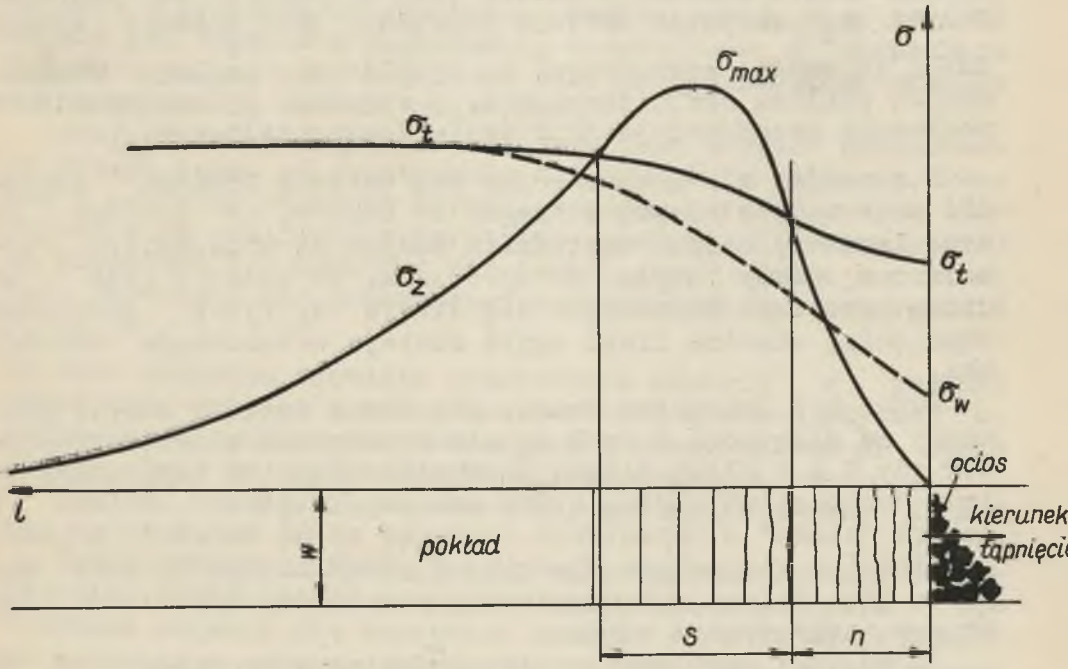
Pod wpływem ciśnienia powodującego przekroczenie wytrzymałości σ_w (rys. 3), skały w pokładzie, np. węgla zmieniają swoją strukturę na słupową. Im pokład ma większą grubość, tym większa jest smukłość tych słupów i tym mniejsza ich wytrzymałość na wyboczenie. Patteisky podaje, że według wzoru Eulera na wyboczenie, prawdopodobieństwo tąpnięcia rośnie z kwadratem grubości pokładu. Wielkość siły wyboczenia według tego wzoru

$$P_{kr} = P_{Eulera} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J}{4\,W^2}$$

jest słuszna tylko dla prętów pionowych i pionowo działającej siły. W górnictwie taki przypadek występuje bardzo rzadko. Słupy w pokładzie ze względu na ich pewne wgniatanie w strop i spąg oraz znaczne tarcia na ich końcach należy rozpatrywać jako pręty w obu końcach przegubuowo podparte lub umocowane. Wzór wówczas przybierze postać

$$P_{kr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J}{W^2}$$

Jednak w przypadku tąpnięcia nie wyzwala się tylko energia na skutek działania siły wyboczenia P_{kr}. Przede wszystkim słupy w pokładzie nie stoją luźno, tylko praktycznie przylegają na wielu częściach powierzchni do siebie, wsku-



Rys. 4. Schematyczny wykres warunków tąpnięcia w pokładzie

tek czego ich wytrzymałość na wyboczenie wzrasta (skrępowane wyboczenie), a więc akumulować mogą znacznie więcej energii niżby to wynikało z możliwości akumulacji przez poszczególne słupy. Im dalej w głąb calizny, tym pionowe płaszczyzny spękań stają się rzadsze, a przyleganie pojedynczych słupów ściślejsze wskutek zanikających względnych przesunięć poziomych pokładu.

Równocześnie jednak maksymalne ciśnienie eksploatacyjne nie występuje w ścianie wyrobiska tylko w głębi w pewnej od niej odległości. A więc wytrzymałość w głębi calizny wzrasta, ale wzrasta też do pewnej granicy wielkość ciśnienia eksploatacyjnego. Powyższe rozważania przedstawione schematycznie na wykresie (rys. 4).

Krzywa σ_z przedstawia rozkład naprężeń w pokładzie wynikły z działania stropu zasadniczego (wspornika lub belki) Krzywa σ_w przedstawia wartość naprężeń zależnie od odległości od czoła wyrobiska, potrzebnych do przekroczenia wytrzymałości pokładu i zmiany jego struktury na słupową. Krzywa σ_t obrazuje wartość naprężeń, jako funkcji odległości od czoła, potrzebnych do wywołania nagłego rozpadu słupów pokładu czyli tąpnięcia. W strefie s naprężenia w pokładzie przekraczają naprężenia dopuszczalne σ_t.

W strefie s "losowo", jak się wyraził Znański nastąpić może zawsze rozpad któregoś ze słupów, co pociąga za sobą lawinowy rozpad sąsiednich słupów ze zruszeniem rozkruszonej skały (węgla) do wyrobiska. Im dalej w głąb od czoła wyrobiska rozpoczyna się strefa s, tym w przypadku tąpnięcia, większa ilość węgla zostaje wrzucana do wyrobiska.

Autor był świadkiem tąpań, gdy ocios węglowy został zruszony na głębokość 2 do 3 m, ale obserwował również przypadek gdy 7 m w głębi ociosu nastąpiło właściwe tąpnięcie, to jest "eksplozja" węgla, która przesunęła górny ocios w jednym "bloku" w przestrzeń chodnika aż do dolnego ociosu, wypełniając całkowicie chodnik. Z przesuniętym blokiem węgla w głąb ociosu wytworzyła się przestrzeń wypełniona częściowo rozkruszonym węglem.

Im większa jest wartość dopuszczalnego naprężenia σ_t im większe jest ciśnienie stropu na pokład, im dalej w głąb od czoła wyrobiska przesunięta jest strefa przekroczenia naprężenia dopuszczalnego σ_t oraz im ta strefa będzie szer-

sza, tym należy się liczyć z większą energią tąpnięcia. Obrazowo można sobie wyobrazić strefę s jako materiał wybuchowy, a strefę przyociosową n jako nabój "śrutowy" wystrzelony w kierunku wyrobiska.

Odległość strefy s od czoła wyrobiska zależy od sztywności stropu i współczynnika odkształcalności węgla ε. Dla warunków sprężystych $\sigma_k = E \cdot \varepsilon_k$ a więc przy stałym E, ze wzrostem ε_k wzrasta również σ_k. Przy bardzo sztywnym stropie strzałka ugięcia jest mała, a więc przekroczenie dopuszczalnego odkształcenia ε_k i dopuszczalnego naprężenia σ_k nastąpi głębiej poza czołem wyrobiska, strefa s będzie bardziej oddalona od czoła, a strefa przyczołowa n szersza. "Materiał wybuchowy" będzie miał większą energię, a nabój większy ciężar. Większa również będzie energia tąpnięcia.

Opisane wyżej zjawisko odnosi się do warunków wystąpienia tąpnięcia pokładowego w czole ściany. Zjawiska tąpnięć ociosów w wybieranych ścianach, chociaż znane, nie są tak częste jak tąpania w chodnikach, a zwłaszcza w chodnikach będących pod wpływem ciśnienia eksploatacyjnego wywołanego zbliżającym się czołem wybierania.

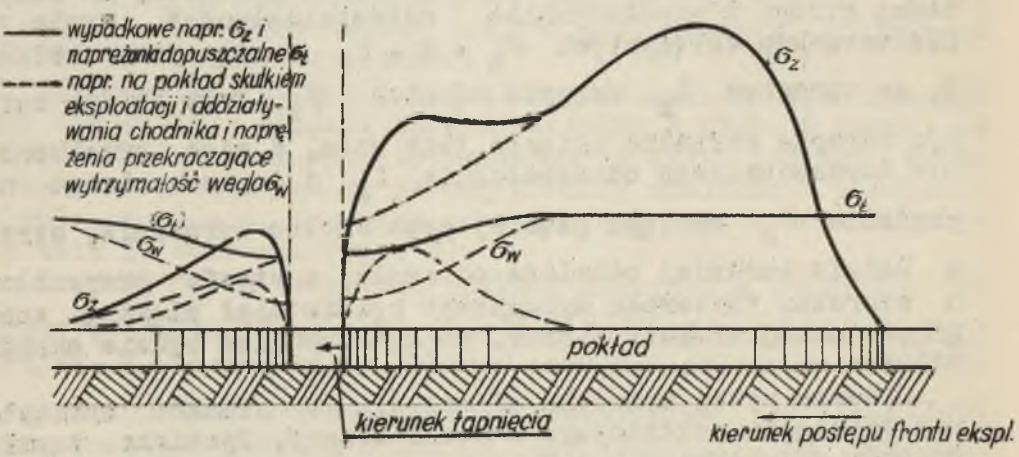
Przy stałym postępie ściany brak jest zwykle potrzebnego okresu czasu na wytworzenie się struktury słupowej. Długie i szerokie otwarcie stropu, pokładu i spągu wpływa korzystnie na możliwość rozproszenia energii. Stosując szczelną podsadzkę lub częsty i "głęboki" zawał stropu w zasadzie zapobiega się przekroczeniu dopuszczalnego naprężenia $\sigma_k (\sigma_k > \sigma_{max})$.

Na ogół zachodzą zjawiska wyładowania energii w postaci odsadzania ociosów w mniej lub bardziej grubych płytach ograniczonych pionowymi płaszczyznami równoległymi do czoła ściany, lecz do właściwego tąpnięcia dochodzi rzadko.

Inaczej kształtują się warunki, gdy czoło ściany zbliża się do chodnika (rys. 5).

Wokół wyrobiska chodnikowego wzrastają naprężenia w pokładzie, zwłaszcza od strony zbliżającego się frontu wybierania zmienia się struktura ociosów na słupową. Zwiększone naprężenia wskutek oddziaływania wyrobiska chodnikowego sumują się ze zwiększającymi się naprężeniami wskutek uginającego się stropu na krawędzi zbliżającego się frontu wybierania. Przy dostatecznym zbliżeniu się frontu wybierania następuje przekroczenie naprężenia dopuszczalnego σ_k.

Ponieważ naprężenia wzrastają szybko, nie może nastąpić dostateczne rozproszenie energii i w rezultacie wystąpi zjawisko tąpnięcia. Większe naprężenia występują w ociosie od strony zbliżającego się frontu wybierania, dlatego zazwy-



Rys. 5. Schematyczny wykres warunków tąpnięcia pokładowego w chodniku

——— wypadkowe naprężenia σ_z i naprężenia dopuszczalne σ_t,

– – – – naprężenie na pokład skutkiem eksploatacji i oddziaływania chodnika i naprężenia przekraczającego wytrzymałość węgla σ_w.

czaj tąpnięcie występuje z tej właśnie strony. Obserwuje się też tąpnięcia w obu ociosach. Im większa jest różnica między wartością naprężeń σ_t a σ_w tym większa jest zakumulowana energia tąpnięcia. Jeżeli naprężenia w pokładzie w pobliżu chodnika jest mniejsze niż σ_w, nie będą się tworzyć słupy w ociosie. Im większa będzie wartość dopuszczalnego naprężenia σ_k tym tąpnięcie będzie trudniejsze a nastąpi tylko wówczas, gdy zbliży się front wybierania tak, żeby suma naprężeń przekroczyła wartość dopuszczalnego naprężenia.

Jak z powyższych rozważań wynika, istnieć może szereg przypadków, w których wystąpią tąpania pokładowe, przy różnych stosunkach wytrzymałości i naprężeń.

Zawilgocenie pokładu zmniejsza jego wytrzymałość, a więc równocześnie i skłonność do tąpań, jak i energię tąpań. W kopalniach, gdzie pod ciśnieniem wtłacza się wodę w pokład dla zmniejszenia pyłowości tąpania nie występują.

Reasumując nasze rozważania możemy powiedzieć, że zjawisko tąpnięcia jest możliwe:

- gdy $\sigma_{max} > \sigma_k$ w pewnej strefie w głąb ociosu wyrobiska,
- gdy $L_A \gg L_R$, energia akumulowana musi być większa niż energia rozpraszania w czasie działania ciśnienia na pokład.

Zmiana struktury pokładu na słupową bez wywołania tąpnięcia nastąpi w przypadku, gdy ciśnienia przekroczą σ_w, lecz będą mniejsze w każdym punkcie w głąb ociosu od naprężenia dopuszczalnego σ_k. I takie zjawiska obserwuje się w praktyce.

2. Tąpania spągowe

Tąpania spągowe występują w dwojaki sposób:

- równoczesne tąpnięcie spągu i pokładu,
- tąpnięcie tylko spągu.

Wyróżnić należy jeszcze niewymienione przy opisie tąpań pokładowych tąpania spodkowe występujące w grubych pokładach z wyrobiskami najczęściej chodnikowymi, prowadzonymi w środku pokładu lub pod jego stropem.

I w takim przypadku tąpnięcia spodkowe wystąpić mogą w dwojaki sposób:

- równocześnie tąpnięcia spodku i ociosów wyrobiska,
- tąpnięcia tylko spodku.

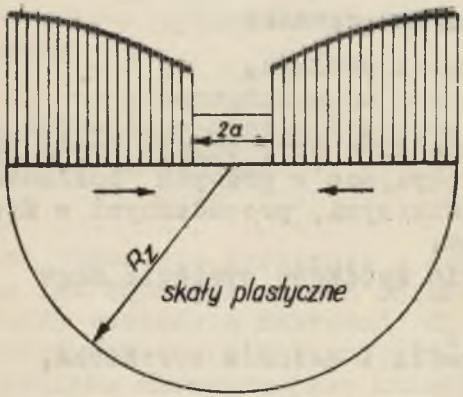
Nim przejdziemy do opisu poszczególnych przypadków tąpań spągowych lub spodkowych, zapoznamy się z fizyczną stroną ogólnego zjawiska ruchu skał spągowych.

Wskutek przekroczenia wytrzymałości skał spągowych następuje ich ruch do wyrobiska. W zależności od charakteru tego ruchu przyjęto różne nazwy na jego określanie: pęcznienie spągu, wyciskanie spągu, pęknięcie i podnoszenie się spągu w wielkich płytach; przy czym pęknięcie może nastąpić w osi wyrobiska chodnikowego lub na jednym z jego ociosów.

Dwa pierwsze rodzaje ruchu tj. pęcznienie i wyciskanie mają zwykle przebieg powolny a mimo to spąg po pewnym czasie może wypełnić całe wyrobisko aż pod strop. W przypadku pęknięcia i podnoszenia się spągu w wielkich płytach, po ustaniu nadmiernych ciśnień, np. dzięki oddaleniu się frontu wybierania może zjawisko ustać lub gdy nastąpi dalszy wzrost ciśnień, może nastąpić gwałtowne wypchnięcie spągu w górę często aż pod strop wyrobiska. Otóż taki gwałtowny przebieg zjawiska nazywamy tąpnięciem spągowym. Tąpania spągowe występują zawsze przy dużych ciśnieniach. Opisane wyżej rodzaje ruchu spągu zachodzą przy stosunkowo wolno wzrastającym ciśnieniu eksploatacyjnym. W przypadku nagłego wzrostu ciśnienia, np. przy pęknięciu stropu, nawet spągi o skałach wykazujących cechy plastyczne (łupki) mogą nagle zruszyć się do wyrobiska z cechami tąpnięcia, podobnie jak w przypadkach tąpań pokładowych.

Spągi natomiast wytrzymałe i kruche (piaskowcowe, łupki piaszczyste) przy nagłym wzroście ciśnienia tąpią bardzo silnie, bez uprzedniego dzielenia się i podnoszenia w dużych dachówkowo na siebie zachodzących płytach zmniejszając przekrój wyrobiska często do 100%.

Oprócz innych warunków opisanych już przy tąpaniach pokładowych, jak zdolność akumulacji energii itp., zjawisko tąpnięcia i tu zależy również od prędkości odkształceń, a więc od własności skał a przede wszystkim od wytrzymałości.



Rys. 6. Rozkład naprężeń w czole wyrobiska przy plastycznym spągu (wg Sałustowicza)

Powolny ruch skał spągowych może odbywać się tylko w fazie plastycznej po przekroczeniu granicy sprężystości. Wykres naprężeń obwodowych na granicy skał twardych i plastycznych według Sałustowicza przedstawiono na rys. 6.

Widzimy, że przy spągu zbudowanym ze skał plastycznych maksimum naprężeń nie występuje w ociosie wyrobiska, na odległość, lecz w głębi.

$$R_z = a \cdot e^z$$

gdzie:

2a - szerokość wyrobiska,

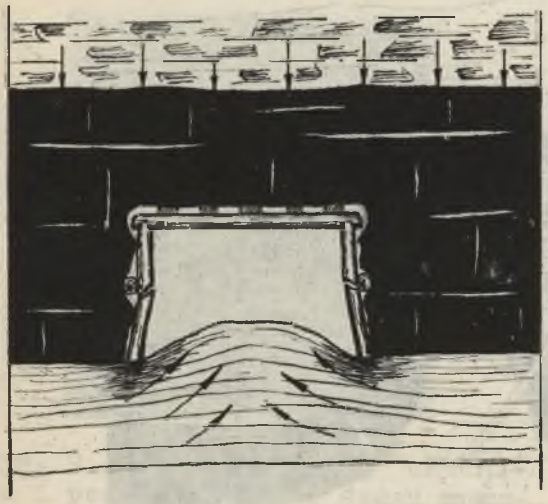
z - współczynnik

$$z = \frac{p - \frac{2}{\sqrt{3}} k}{\frac{4}{\sqrt{3}} k}$$

gdzie:

2k - granica plastyczności przy ściskaniu,

p - ciśnienie.



Rys. 7. Wyciskanie spągu plastycznego

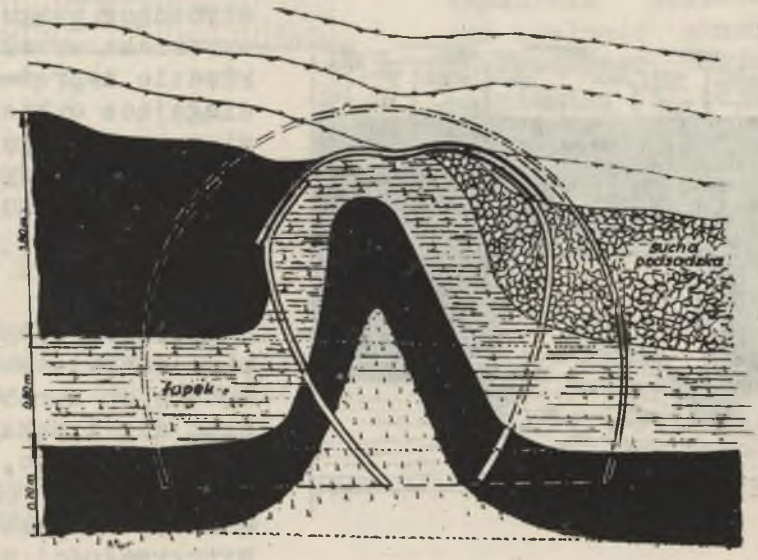
Ruch materiału plastycznego spągu w stronę wyrobiska wywołuje w pokładzie naprężenia rozciągające o kierunku poziomym. Zmniejsza się przez to wytrzymałość pokładu w pobliżu ociosów (rys. 7).

W przypadku tworzenia się struktury słupowej w ociosach zostają one powoli wgniatane i przesuwane do wyrobiska, krusząc się i pękając, jednak nie tąpiąc, gdyż ich rozkruszenie następuje wskutek przekroczenia wytrzymałości na zginanie, a nie na ściskanie.

Zdarza się też przy bardziej wytrzymałych skałach w pokładzie, że spąg pełznąc w stronę wyrobiska powoduje odrywanie się od calizny płyt różnej grubości łamiących obudowę. Wskutek własności plastycznych spągu, objawiających się pełzaniem w stronę wyrobiska, następuje rozproszenie energii akumulowanej i do tąpań w pokładzie nie dochodzi ($L_A < L_R$). Również nie może tąpnąć spąg w fazie plastycznej. Wysokość, na którą został wyciśnięty spąg, wynosi

$$s = \frac{\pi \cdot a \cdot e^{2z} \cdot k \cdot \sqrt{3}}{2E}$$

Z wzoru tego wynika, że natężenie zjawiska wyciskania spągu zależy od wielkości ciśnienia, granicy plastyczności i modułu sprężystości, jak również od szerokości wyrobiska. Im wyrobisko jest szersze, tym wyciskanie mniejsze. Ostatnie twierdzenie jest słuszne wówczas, gdy grubość plastycznej warstwy spągu jest w porównaniu z szerokością wyrobiska bardzo duża. Jednak gdy grubość jest mniejsza, intensywność wyciskania plastycznego spągu maleje wraz ze wzrostem szerokości wyrobiska.



Rys. 8. Zaciśnięte wyrobisko przy spągu plastycznym

Zależnie od szerokości filarów f w polu rozciętym dla wybierki filarowo-zabierkowej lub filarowo-ubierkowej istnieć mogą dwa przypadki. Gdy $f > 2R_z$ wtedy każdy z chodników ma swoją własną strefę wpływów; ustala się po pewnym czasie określony stan równowagi ze stanem naprężenia w sąsiedztwie chodnika (patrz rys. 6), a w każdym filarze występują dwa maksima naprężeń. Gdy $f < 2R_z$, wtedy obszary wpływów zachodzą na siebie. Wskutek tego występuje tylko jedno maksimum naprężeń i to w środku filaru. Stan równowagi w takich warunkach nie jest możliwy, a wyciskanie spągu trwa aż do zupełnego wypełnienia przekroju chodników między filarami. Typowy przykład całkowitego powolnego zaciśnięcia chodnika zaobserwowany w kopalni Campine w Belgii uwidoczniono na rys. 8. Pod wpływem wzrastającego ciśnienia eksploatacyjnego chodnik obudowany w łukach stalowych został całkowicie wypełniony. Końce łuków zostały wgniecione do spągu. Spąg podniesiony aż do stropu. Tak podsadzka z dolnego ociosu, jak i pokład węgla (górny ocios) zostały wyciśnięte w kierunku osi chodnika.

Podobne zjawisko zaobserwowano przy braku pokładu towarzyszącego w spągu. Zauważyć należy, że wzrost zawilgocenia spągu wywołany, np. wodą podsadzkową, obniża jego wytrzymałość, powodując plastyczne pełzanie do wyrobiska. Ze wzrostem zawilgocenia spągu zmniejsza się niebezpieczeństwo tąpnięcia.

Rys. 9. Pęknięcie w osi chodnika i podnoszenie się spągu znacznej wytrzymałości (wg Mueverta)

Wraz ze wzrostem wytrzymałości i kruchości spągu zanikają zjawiska ciągłych i plastycznych ruchów powodujących wypełnianie wyrobiska.

Przy wzroście naprężeń powyżej wytrzymałości następuje pęknięcie i podnoszenie się spągu w wielkich płytach z jego pęknięciem w środku osi chodnika (rys. 9), lub wzdłuż ociosu (rys. 10). Jeżeli pęknięcie nastąpiło wzdłuż ociosu, to najczęściej od strony zbliżającego się frontu wybierania.

Rys. 10. Podnoszenie spągu z pęknięciem wzdłuż ociosu

Badania Kormana stanu napięcia w spągu wybieranego pokładu wykazały, na podstawie hipotezy wytężenia Hubera, że wielkość jednostkowej energii odkształcenia postaciowego

$$\Phi_f \cong \frac{1,5}{E} \cdot \tau^2_{max}$$

gdzie:

τ - naprężania styczne.

Korman przyjmuje wartość Φ_f jako miernik niebezpieczeństwa zniszczenia spągu.

Ważny wniosek wyciąga Korman ze swoich badań: zaburzenia w spągu w pobliżu krawędzi (czoła, ociosu) mają charakter lokalny i już na głębokości z = l (szerokości strefy eksploatacyjnej) wartość ciśnienia pionowego wynosi tylko 1,1 pz a wartość wytężenia jest prawie równa zeru. Miejsce maksymalnego wytężenia znajduje się pod krawędzią czoła w odległości pionowej równej 1/8 L.

W spągu, wskutek niemożliwości rozszerzenia się na boki, powstaje ciśnienie boczne równe

$$p_x = p_y = \frac{p_z}{m-1},$$

przy czym m jest odwrotnością liczby Poissona ν dla górotworu. A więc ciśnienia p_z oraz i p_y określają pierwotny trójwymiarowy stan napięcia w spągu.

Na obecnej głębokości eksploatacji 200 do 800 m można przyjąć $\nu = 0,33$ wtedy $p_x = p_y \frac{1}{2} p_z$.

W niedużej odległości w głąb spągu naprężenia styczne wykazują znaczne wartości. Warstwy leżące bezpośrednio pod krawędzią i w głąb ociosu starają zruszyć się w kierunku wyrobiska. Ponieważ to samo zjawisko odbywa się z dwu stron wyrobiska po przekroczeniu wytrzymałości spągu następuje jego wypiętrzenie między ociosami wskutek niemożności ruchu w głąb (rodzaj skrępowanego wyboczenia). Każda warstwa spągu podnosząc się ciśnie (wygina) na warstwę nad nią zachodzącą. Ponieważ naprężenia boczne p_x szybko maleją w głąb

spągu, więc też i zjawisko wypiętrzenia na pewnej głębokości zanika.

W skałach plastycznych zjawiska te mają charakter ciągły - pełzania; w skałach kruchych nieciągły - pękań i nagłych wypiętrzeń. Jednak w obu przypadkach skały dążą do wypełnienia wyrobiska. Rozkład naprężeń w obu przypadkach, jak wykazały modele analogowe o różnych własnościach reologicznych, jest w zasadzie zawsze identyczny.

Przy mocnych skałach spągowych i jeszcze bardziej wytrzymałym pokładzie nastąpi nagłe wypiętrzenie zwane tąpnięciem spągowym.

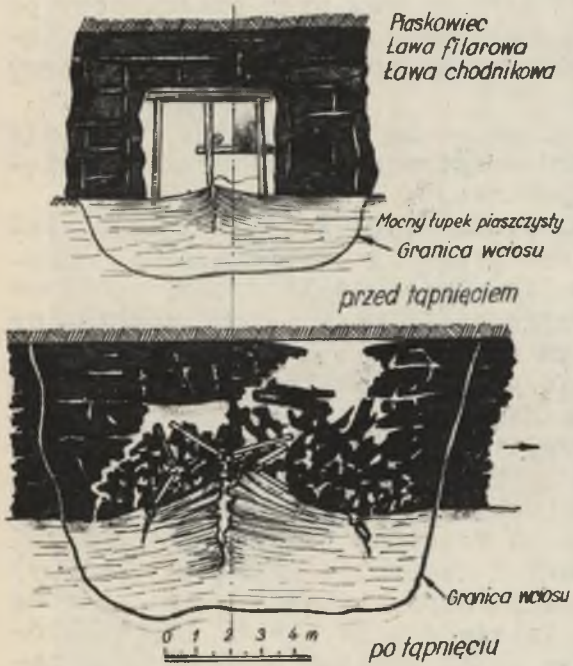
Ciągłe, plastyczne ruchy nie wywołują drgań ani w pełzającym ciele, ani w ciałach otaczających. Ruchy natomiast nieciągłe, pękania, nagłe przesunięcia i uderzenia w samym ciele i w ciałach otaczających wywołują drgania mogące powodować przenoszenie zjawiska tąpnięcia. Zadrganie spągu może spowodować tąpnięcie w pokładzie naprężonym do granic wytrzymałości σ_k.

Tąpnięcie w pokładzie z kolei może wywołać drgania w stropie. Ponieważ wskutek tąpnięcia tak spągu, jak i pokładu, podporność pod stropem nagle zmalała, może nastąpić jego pęknięcie a następnie zaciążenie na pokładzie wzdłuż linii pęknięcia i wtórne tąpnięcie w innym wyrobisku i to w krótkim odstępie czasu.

Często katastrofalnym i rozległym powierzchniowo tąpnięciem może być tąpnięcie w stropie, pokładzie lub spągu. W każdym przypadku jednak "roznosicielem" jest pękający wzdłuż płaszczyzn łupliwości strop. Wzdłuż tych linii występują jednocześnie w wyrobiskach tąpnięcia. Tąpnięcia w pokładzie lub spągu ma zawsze charakter lokalny i bez współdziałania pękającego stropu nie może przenieść się na inne wyrobisko. Wyjątek stanowić może wybieranie kostek lub filarów otoczonych zrobami.

Autor obserwował również taki porządek zjawisk: uderzenie spągu, odrzut ociosów przy czym oba te zjawiska przebiegały prawie jednocześnie; po kilkunastu sekundach - silny wstrząs spowodowany pęknięciem stropu i zawalenie dotychczas mocnych ław węglowych aż do stropu. Dla zorientowania się w zachowaniu skał otaczających w najbliższym sąsiedztwie wyrobisk górniczych, autor obserwował kilkakrotnie wcios wykonany w spągu powierzchni przed i po tąpnięciu (rys. 11). Wciosy wykonano w tej części powierzchni w której przewidywano możliwość tąpnięcia. Przed tąpnięciem

wykonano wcios w obu ociosach aż do zupełnie twardego węgla. W naszym przykładzie lewy ocios spękany był na głębokości 2 do 3 m, prawy od strony frontu wybierano na głębokości 3 do 4 m.



Rys. 11. Tąpnięcie spągu i pokładu

Należy zwrócić uwagę, że spękania przebiegały wzdłuż pionowych płaszczyzn dzielących pokład na słupy, wykazujące w głąb coraz wyższe naprężenia. Dopiero dalej w głąb ociosów węgiel wykazywał wyraźne uławicenie poziome.

Wcios wykonany w spągu wykazywał wąskie pęknięcie w osi dowierzchni od strony prawej i lekkie wyciśnięcie, zanikające na głębokości około 1,0 m. Podczas przebudowy dowierzchni po tąpnięciu wykonano wcios, który odsłonił charakterystyczne, makroskopowe przemiany w skałach otaczających dowierzchnię. Spąg został gwałtownie wyciśnięty. Pęknięcie pogłębiło się i poszerzyło. Wygięte warstwy spągu sięgały do 3 m głębokości. Obudowa była zupełnie zniszczona i połamana. Ociosy, które przed tąpnięciem miały budowę słupową, zostały skruszone i eksplozywnie wypełniły przekrój dowierzchni, szczególnie ocios od strony zbliżającego się czoła wybierania. Rynny zostały wywrócone i pogięte. Od strony prawej obie ławy w pokładzie zostały przerwane aż do stropu. Oprócz pęknięcia spągu nastąpiło również tąpnięcie pokładowe.

W nowo utworzonych ociosach węgiel był spękany we wszystkich kierunkach. Należy zwrócić uwagę na szczeliny poziome powstałe między pokładem a stropem. Szczeliny te wskazywałyby na nagłe dynamiczne zaciążenie stropu na pokładzie. Wskazują na to przełamane mocne ławy pokładu. Opisane tąpnięcie znajdowało się na jednej z linii pęknięcia stropu, ustalono, wykonując mapę tąpnięć tej partii pokładu.

Rysunki 12 i 13 ilustrują wygląd spągu sztywnego i kruchego (łupek piaszczysty) po tąpnięciu. Na rys. 12 uwidoczniony jest chodnik w obudowie łukowej po tąpnięciu spągu z pęknięciem na ociosie. Spąg spiętrzony jest w wielkich płytach; w niektórych miejscach płyty spągu sięgały łuków stropowych chodnika. Rysunek 13 przedstawia spąg piaskowcowy po niezwykle silnym tąpnięciu w chodniku. Uwidocznione pęknięcie spągu w osi chodnika odpowiada warunkom opisanym przy rys. 11.

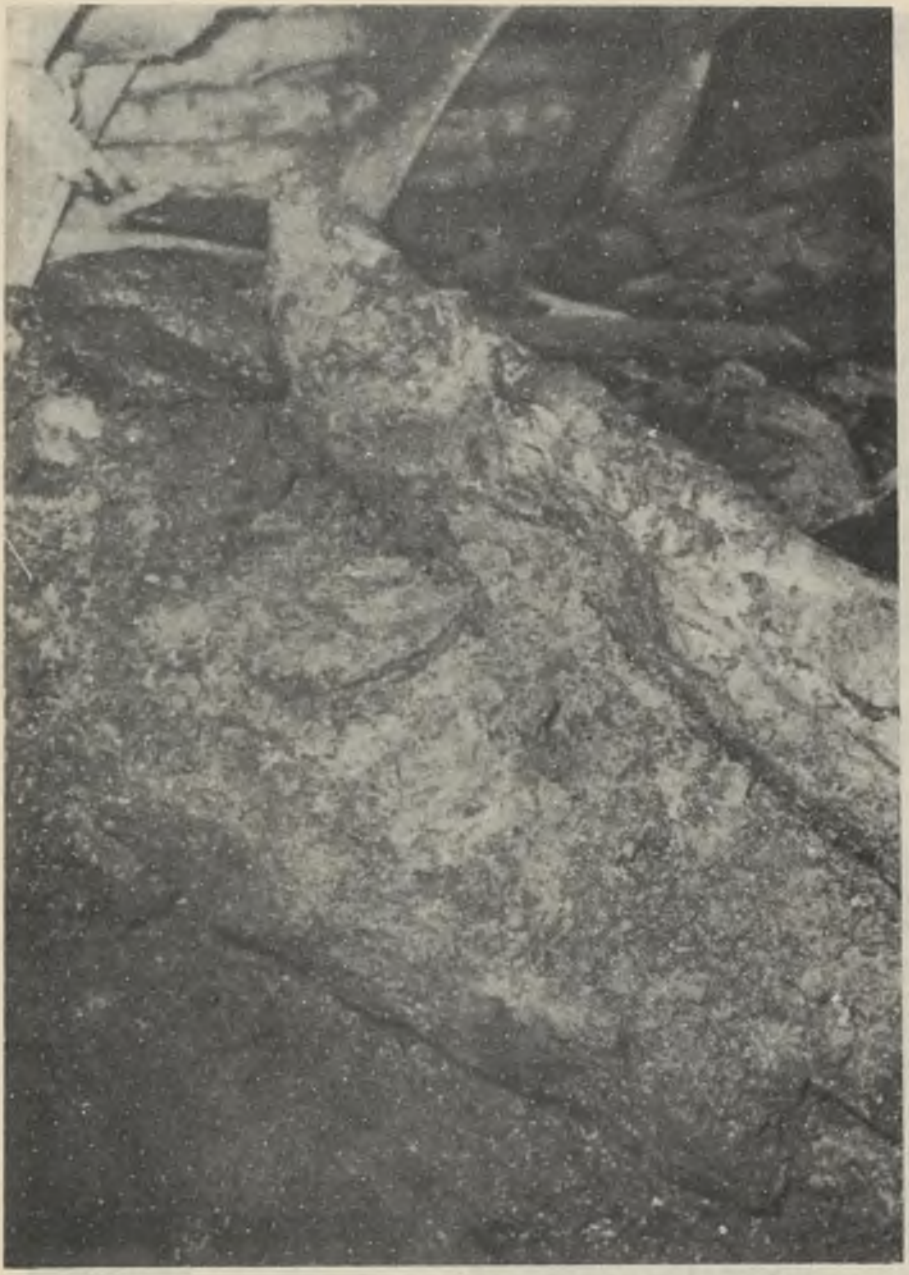
Z lewej strony rysunku widoczne są przesunięte lecz nie spiętrzone warstwy piaskowca spągowego, które przed tąpnięciem zalegały pod ociosem pokładu.

Galanka, Gehler, Gridss, Jenkins,Sałustowicz i inni badacze zajmowali się fizyczno-mechaniczną stroną zagadnienia obciążania elementem o skończonej powierzchni, podłoża o różnej wytrzymałości i sztywności. Wszyscy oni doszli do wniosku, że pod obciążającym elementem tworzy się w podłożu obszar kompresji w kształcie pryzmatu lub odcinka walca, działający rozrywająco i ścinająco na podłoże. Im bardziej wzrasta wytrzymałość podłoża, tym bardziej pryzmat Gehlera staje się "płytszy", a kąt α bardziej rozwarty; w końcu klin przekształca się w odcinek walca Sałustowicza (rys. 14a). Na rys. 14b, c, pokazano rozkład obszarów naprężeń przed i po tąpnięciu. Obszary I kompresji naprężeń (kliny) działają na obszary II, usiłujące przesunąć się w stronę obszaru III i równocześnie działające na obszar IV, w którym według Kormana następuje w dół szybkie wyrównanie naprężeń. Wskutek takiego układu strefa III musi ulec wypiętrzeniu. Wierzchołki obszarów II są osobliwymi punktami (A) układu o momentach równych zeru, w których końce płyt spągu mają swoje punkty obrotu wypiętrzania do wyrobiska (patrz rys. 10).

W przypadku przekroczenia wytrzymałości spągu pod jednym tylko ociosem np. od strony zbliżającego się czoła wybierki, tąpnięcie będzie jednostronne, z jednostronnym punktem obrotu wyciskanego spągu i pęknięciem tego spągu wzdłuż ociosu.

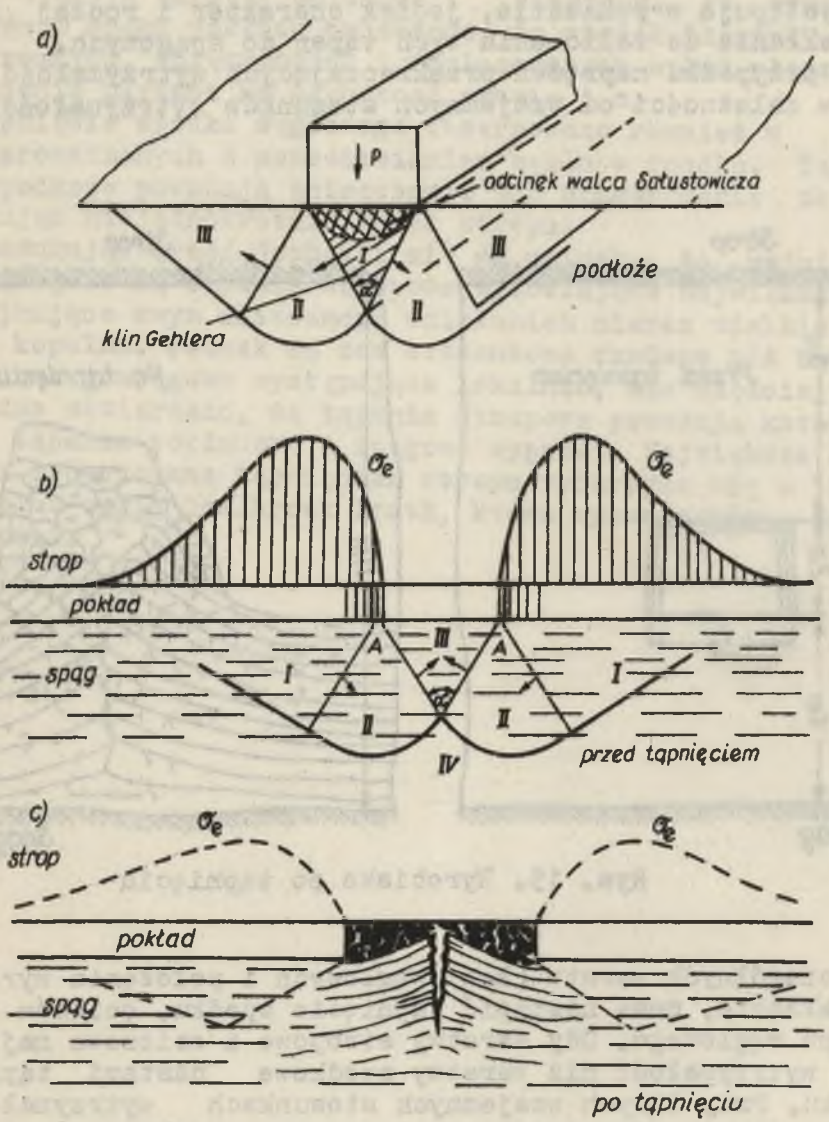
Im spąg ma większą zdolność do akumulowana energii i im większa prędkość odkształceń (obciążeń) oraz im krótszy czas wyładowania energii, tym większa moc tąpnięcia spągowego.

Oprócz tąpań spągowych w przypadku założenia wyrobiska w grubym pokładzie pod stropem lub w środku pokładu występują również tąpania spodkowe (rys, 15). Mimo że tąpania spodko-



Rys. 12. Tąpnięcie w wyrobisku

Rys. 13. Tąpnięcie spągu

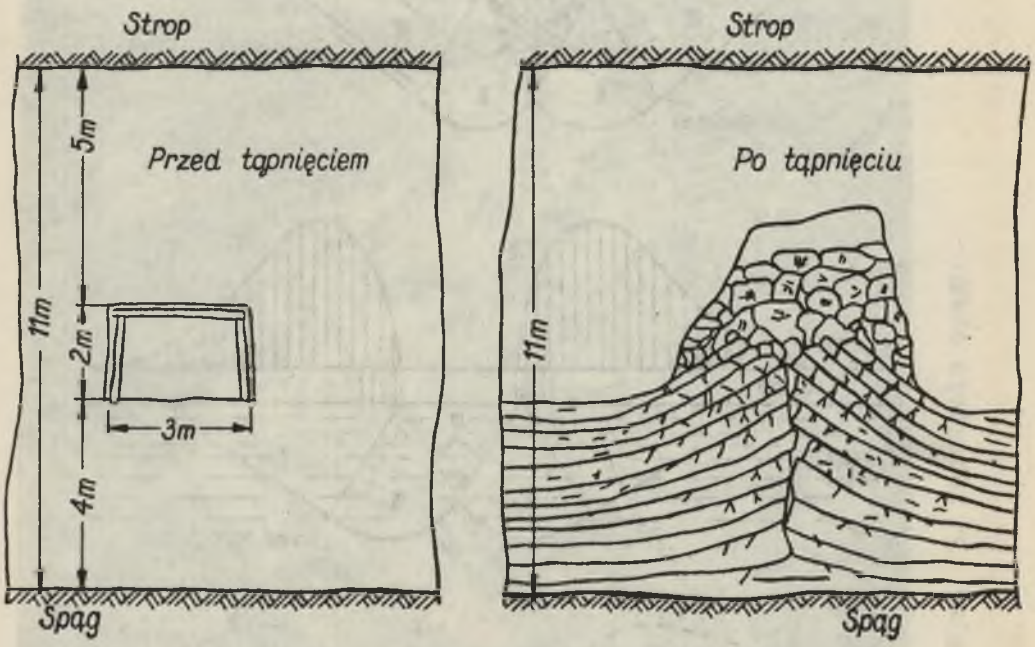


Rys. 14. Schemat mechaniki tąpnięcia spągowo-pokładowego

a - schemat działania resztki pokładu na spąg wyrobiska
b - schemat obciążenia spągu przed tąpnięciem,
c - schemat obciążenia spągu po tąpnięciu

we występują w pokładzie, jednak charakter i rodzaj zjawiska skłania do zaliczenia tych tąpań do spągowych.

W przypadku naprężeń przekraczających wytrzymałość węgla, w zależności od wzajemnych stosunków wytrzymałościowych



Rys. 15. Wyrobisko po tąpnięciu

poszczególnych warstw (ław) węglowych i położenia wyrobiska w pokładzie, może nastąpić tąpnięcie spodku, ociosów lub stropu węglowego. Gdy warstwy stropowe i ociosowe mają większą wytrzymałość niż warstwy spodkowe nastąpi tąpnięcie spodku. Przy innych wzajemnych stosunkach wytrzymałościowych wystąpią odpowiednio analogicznie jak w opisanych przypadkach tąpań stropu, ociosów lub spągu inne rodzaje tąpań.

Zobrazowane na rys. 15 tąpnięcie zaobserwował autor w jednej z dowierzchni w pokładzie o grubości 11 m. Przyczyną zupełnego zawalenia wyrobiska było tąpnięcie spągu, które pociągnęło za sobą częściowy odrzut ociosów i zawalenia stropu węglowego. Z efektów tąpnięcia można wnioskować, że najmniejszą wytrzymałość miały warstwy spodkowe pokładu,

nieco większą warstwy ociosowe i stropowe. Po wykonaniu wciosów w spągu pokładu zauważono, że spodek "zjeżył" się w nieforemnych, spiętrzonych i rozluzowanych wzłuż płaszczyzn uławicenia płytach na głębokość prawie 4 m.

Tąpnięcie spodku węglowego obserwowano również w ścianach prowadzonych z pozostawianiem węgla w spodku. Tąpnięcia spodkowe powodują zniszczenie lub przewrócenie obudowy wywołując niejednokrotnie zawał stropu.

Reasumując treść dochodzi się do wniosku, że najniebezpieczniejsze są tąpania stropowe wyzwalające największą moc i obejmujące swym niszczącym działaniem nieraz wielkie obszary kopalni. Jednak są one stosunkowo rzadsze niż tąpania pokładowe i spągowe występujące lokalnie, ale częściej.

Można stwierdzić, że tąpania stropowe powodują katastrofy, a tąpania pokładowe i spągowe wypadki. Największa katastrofa spowodowana tąpnięciem stropu wydarzyła się w 1960 r. w kopalni węgla Coalbrook North, która spowodowała śmierć 437 ludzi.

ПЛАСТОВЫЕ И ПОЧВЕННЫЕ ГОРНЫЕ УДАРЫ

Р е з ю м е

В статье автор определяет причины пластовых и почвеных горных ударов, разбирает механику восставания этих горных ударов представляет способы обеспечения перед их восставанием. Статья является продолжением публикации "Причины горных ударов" помещенной в Научных Билютенях Силезского Политехнического Института Нр: 124 (Горное дело журнал 12)

THE CRUMPS OF THE LAYER AND OF THE FLOOR

S u m m a r y

In the article the auther determines the causes of layer crumps and floor crumps. Further he discusses the mechanics of their origins and gives some ways how to secure mines against the crumps. The paper is a continuetion of the article "Causes of crumps" published by the Scientific Papers of the Silesien Institute of Technology (Mining Publications no 12).