

Witold Cezariusz KOWALSKI

Wpływ stanu naprężeń i jego zmian w masywie skalnym na rozwój pustek krasowych

Obserwacje i pomiary w jaskiniach krasowych wykazały, że stan naprężeń w masywie skalnym wpływa istotnie na natężenie krasowienia oraz na kształt form krasowych. Wszystkie formy krasowe powstają z przekształcenia pierwotnych pustek skalnych. Poszerzenie pustek skalnych w wyniku długotrwałej korozji ścian, występujących poniżej maksymalnego i powyżej minimalnego poziomu wody podziemnej, prowadzi do powstania obszarów naprężeń rozciągających w stropie pustki, co – po przekroczeniu wytrzymałości na rozciąganie skał stropowych — powoduje opadanie ich fragmentów na dno w postaci ostrokrawędzistego gruzu i wykształcenie się samoczynnie eliptycznego stropu. Powyżej maksymalnego poziomu wody podziemnej w strefie odprężenia lub grawitacyjno-anizotropowego stanu naprężeń istniejące szczeliny pionowe poszerzają się; w wyniku łączenia się porów powstają pionowe szczelinki oraz kominy krasowe. Poniżej minimalnego poziomu wody podziemnej, przy grawitacyjnie anizotropowym stanie naprężeń, zwłaszcza zbliżającym się do stanu izotropowego, kształty pustek krasowych, na których obwodzie odbywa się stale spowolniona erozja, ulegają niewielkim zmianom; o postępie krasowienia decyduje przede wszystkim korozja, a udział samoczynnego, mechanicznego kształtowania się eliptycznego stropu zanika całkowicie w strefie izotropowego stanu naprężeń.

W wyniku badań laboratoryjnych, przeprowadzonych w końcu lat pięćdziesiątych na makro- i mikroskopowo litologicznie jednorodnych, zawsze tak samo przestrzennie zorientowanych próbkach górnourajskiego wapienia pelitycznego i górnokredowej opoki, stwierdzono dwa fakty, których znajomość pozwala szczegółowiej, niż było to możliwe dotychczas, opisać mechanizm powstawania i rozwoju pustek krasowych. Jednym z nich było wykazanie istnienia utajonych powierzchni osłabień wytrzymałościowych, ujawniających się w trakcie ściskania jednoosiowego oraz charakteryzujących się rozciągłościami i upadami równoległymi do rozciągłości i upadów powierzchni ciosowych i uskokuowych, pomierzonych w terenie, a dominujących wokół miejsca pobrania próbek (W.C.Kowalski, 1961, 1988). Drugim faktem było

wykazanie, że w obszarach występowania naprężeń rozciągających w skale — w wyniku ujawniania się utajonych i powstawania nowych powierzchni osłabień wytrzymałościowych — korozja krasowa jest intensywniejsza niż w obszarach odprężonych, a zwłaszcza wszechstronnie ściskanych (W.C.Kowalski, 1990).

Fakty te należało powiązać z rozważaniami na temat:

— kształtowania się pustek krasowych w trakcie przechodzenia ich w jaskinie krasowe;

— powstawania i utrzymywania się ostrokrawędzistości gruzu skalnego na znacznych częściach lub na całych, ale zawsze suchych, dnach jaskiń.

Z licznych danych zawartych w obszernej literaturze speleologicznej (np. J.Głazek, 1989; P.Courbon, 1979; P.Courbon, C.Chabert, 1976; W.N.Dubljański, 1977; W.N.Dubljański, W.W.Iljuchin, 1982; W.N.Dubljański, A.A.Łomajew, 1980; J.H.Gardner, 1935; J.Głazek i in., 1979, 1982; D.H.Jagnow, 1979; G.A.Maksimowicz, 1969; I.W.Radionow, 1958, 1960; Z.K.Tintiłow, 1976 i inni), a także z obserwacji i pomiarów, dokonanych przez autora w polskich, morawskich, słowackich, jugosłowiańskich, greckich, krymskich, kaukaskich i tureckich jaskiniach krasowych, wynika, że:

1. Stropy bardzo wąskich pustek krasowych, jeśli nie są od góry otwarte, to są przede wszystkim płaskie lub walcowate (fig. 1, I–III, fig. 2), natomiast stropy szerokich jaskiń krasowych, rozwiniętych w jednorodnej warstwie skalnej, zbliżone są do powierzchni elipsoidalnych, które w przekrojach poprzecznych odtwarzają części elips, charakteryzujące się stosunkami wysokości a (określonej przy dodaniu grubości leżącego na dnie jaskini ostrokrawędzistego gruzu) do szerokości $2b$ tych jaskiń z reguły nie mniejszymi niż 1,25 i nie większymi niż 2,75 (fig. 1, IV).

2. Ostrokrawędzisty gruz skalny, leżący zawsze na suchych częściach den jaskiń krasowych, stwierdza się we wszystkich większych jaskiniach krasowych różnych stref klimatycznych, w których ani obecnie, ani też w przeszłości, w plejstocenie, nie zaistniały warunki peryglacjalne.

W świetle tych obserwacji słuszność tezy o związku między ostrokrawędzistością gruzu w jaskiniach krasowych a tylko peryglacjalnym jego pochodzeniem, jak chcą to przyjmować w badaniach klimatostratygraficznych niektórzy badacze osadów jaskiniowych, wydaje się bardzo wątpliwa. Peryglacjalne wietrzenie skał węglanowych, przypominające raczej łuszczenie, prowadzi do powstawania okruchów wyraźnie mniejszych i o innych kształtach niż fragmenty typowego ostrokrawędzistego gruzu krasowego. Należy też zauważyć, że peryglacjalne łuszczenie może i mogło zachodzić tylko przy wlotach do systemu jaskiń krasowych, gdzie wahania temperatury są częste i duże, a nie głębiej, wewnątrz jaskiń, gdzie temperatury są raczej stałe w cyklach dziennych, sezonowych, wieloletnich, a nawet wiekowych.

Ostrokrawędzistość gruzu wapiennego, pokrywającego dna jaskiń krasowych i niepoddawanego korozyjnemu oddziaływaniu oraz ewentualnemu transportowi wód krasowych, przepływających z odpowiednimi prędkościami, jego litologiczna identyczność ze skałami budującymi strop jaskiń bezpośrednio nad miejscem występowania gruzu, a także możliwość wskazania w stropie miejsca, z którego pochodzą poszczególne fragmenty (bloki) gruzu, wskazują, że powstał on nie w wyniku bezpośredniego korodującego działania wód krasowych na strop jaskiń, lecz wskutek

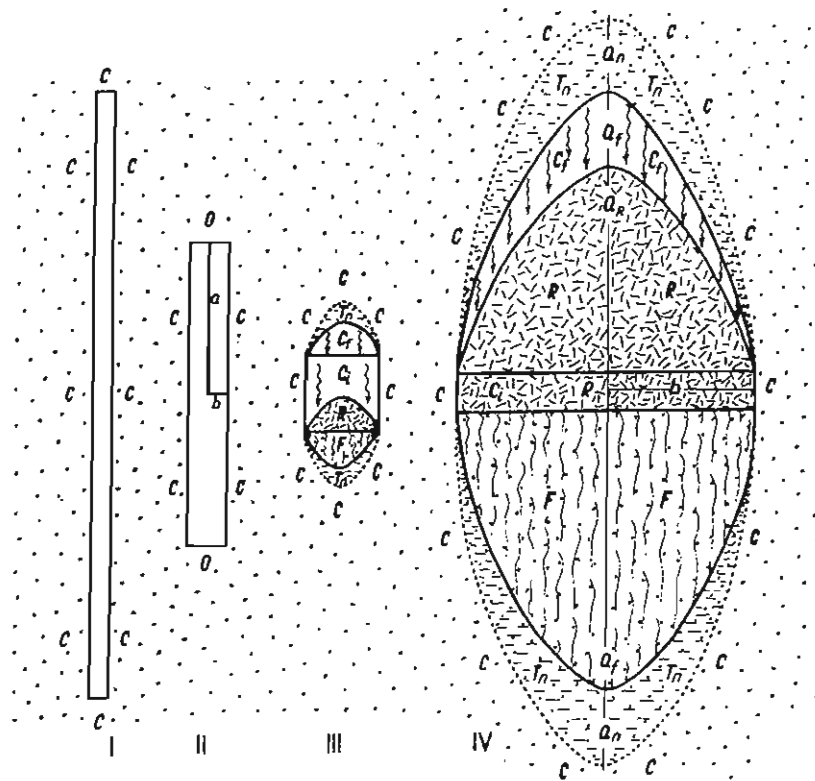


Fig. 1. Spękania w stropie i spągu pustki w masywie skalnym krasowiejącym w wyniku poszerzenia pustki (spękania, pory) w zależności od zmian stosunku jej wysokości (a) do szerokości (b)

Przejęcie od przedkrasowego kształtu pustki (I) do poszerzonej pustki krasowej (II) tylko w wyniku korozji ścian, podczas gdy w stropie i w spągu pustki brak poziomych naprężeń rozciągających, przewyższających wytrzymałość na rozciąganie skał stropowych i spągowych, oraz przekształcenie pierwotnej pustki w wyniku korozji i spękania stropu i spągu (po przekroczeniu odpowiedniego stosunku wysokości do szerokości) w jaskinię krasową z pękającym stropem (C_f) i spągami (F), z powstaniem rumoszu (R) na spękany spąg pierwotnej pustki (C_i) — III. W tym etapie jaskinia jakby przemieściła się ku górze. W końcowym etapie (IV) cała pierwotna pustka (jaskinia) zostaje zasypana gruzem, a jej strop uformowany jest w wyniku spękania, a nie korozji; C — obszar naprężeń ściskających; T_n — obszar naprężeń rozciągających, mniejszych niż wytrzymałość skał stropowych na rozciąganie; półosie elips, w których obrębie występują naprężenia rozciągające w odniesieniu do wytrzymałości na rozciąganie skał stropowych: a_n — mniejsze, a_f — większe; a_R — maksymalna wysokość rumoszu

Cracking in a roof and a floor a void in a karst massife, as a result of widening of the void (joint or pore) dependence on changes of the relation of its height (a) to width (b).

Transformation from the primary void form before karst processes (I) to the broadened karst void (II) only as result of wall corrosion, when in the roof and floor no tensile stresses exist, that could not surpass the tensile strength value of the roof and floor rocks and transformation to a karst cave (III) with the cracking roof (C_f) and floor (F) and with falling debris (R) on the cracked floor of the primary void (C_i). The cave was as it were uplifted in this stage. The primary void — cave was quite filled with the sharp — edged debris. The roof of the karst cave was a result of cracking, but not corrosion (IV); C — compressive stress area; T_n — tensile stress area with values lower than the tensile strength of roof rocks; semi-axes of ellipses, within them tensile stresses exist in comparison with the tensile strength value of roof rocks: a_n — lower, a_f — greater; a_R — the greatest height of debris

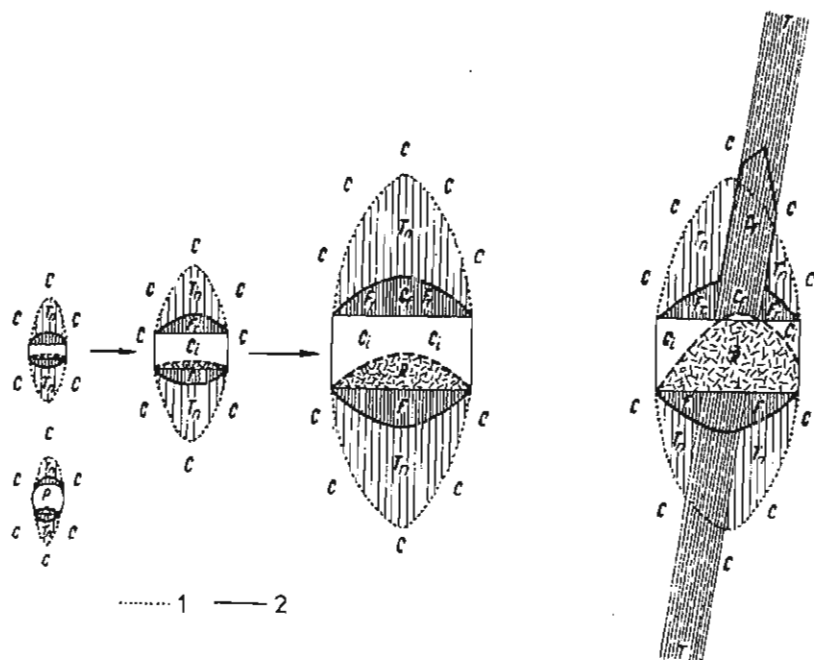


Fig. 2. Obszary spękań: w stropie (F_r) i w spągu (F) porów o przekrojach: prostokątnym — o szerokości w stropie i spągu dłuższej niż wysokość — i kołowym — o promieniu (a), oraz powstałych z ich rozszerzenia pustek krasowych (C_i), których spąg spękany w wyniku zmiany naprężeń (F), pokryty został zawaliskiem (R) ze spękanych skał stropowych (F_r)

T_n — obszar występowania naprężeń rozciągających mniejszych niż wytrzymałość skał, T — strefa uskokowa, spękana przed powstaniem pustki krasowej, C — obszar naprężeń ściskających; 1 — granica między obszarami naprężeń poziomych ściskających (C) i rozciągających (T_n); 2 — granica między obszarami naprężeń rozciągających — większych niż wytrzymałość na rozciąganie skał (R_r) w stropie w obszarze F_r oraz w spągu w obszarze F — a obszarem T_n

Cracking areas in roofs (F_r) and in floors (F) of voids-cavities with a rectangular form — the width of the roof and floor greater than the height — and with a circular one — with radius (a). Broadened karst cavities — caves (C_i), which cracked floors (F) were covered by the sharp-edged debris (R) from cracked roof rocks (F_r)

T_n — areas of the tensile stresses, smaller the tensile rock strength, T — fault zone, cracked before karst cavity develops, C — compression stress area; 1 — limit between the horizontal compressive stress area (C) and tensile one (T_n); 2 — limit between tensile stress area — greater than the value of the rock strength (R_r) in the area F_r above the primary roof and in the area F below the primary floor — and area T_n

mechanicznego odspojenia, odrywania i grawitacyjnego opadania poszczególnych fragmentów skał. Jaskinie te rozwinęły się z pierwotnych, często niewielkich pustek skalnych (pierwotnych porów i spękań), w wyniku korozyjnego oddziaływania przepływających wód krasowych (fig. 1, 2).

Biorąc pod uwagę masy ostrokrawędzistego gruzu zalegającego obecnie dna jaskiń krasowych oraz masy gruzu odprowadzone w wyniku korozyjnego oddziaływania, można stwierdzić, że udział mechanicznego pęknięcia stropów i samoczynnego odpajania oraz grawitacyjnego spadania poszczególnych jego fragmentów w rozwoju podziem-

nej formy krasowej — od pierwotnej, niewielkiej pustki skalnej (szczeliny, pory), do rozległej jaskini krasowej — jest znaczny i dotychczas niedoceniany.

Z teoretycznych rozważań mechaniki górotworu, rozumianej w sensie górnictwem (A.Heim, 1878; A.Sałustowicz, 1955; G.N.Sawin, 1956, 1961, 1968; K.Terzaghi, F.E.Richart, 1952; J.Talobre, 1957; L.Obert, W.I.Duvall, 1967), przy pominięciu drugiego postulatu M.Reinera (1958), a więc uznaniu górotworu za ośrodek tylko sprężysty (z pominięciem jego plastyczności i lepkości), można wyciągnąć następujące wnioski, ważne dla odtwarzania historii formowania się jaskiń krasowych:

1. W każdym punkcie górotworu, nienaruszonego robotami górnictwem (a więc i każdego masywu skalnego pozbawionego pustek skalnych), istnieją naprężenia wywołane działaniem sił grawitacji (ciężaru nadkładu nad tym punktem) i reakcji podłoża pod tym punktem, uniemożliwiającej ruch nadkładu ku środkowi ciężkości Ziemi. Naprężenia w każdym punkcie górotworu (a szerzej masywu skalnego) — zwłaszcza niepoddanego naciskom tektonicznym — są zależne przede wszystkim od głębokości, na której znajduje się ten punkt, i od odkształcalności skał w tym punkcie (ściślej od liczby Poissona, która także zmienia się z głębokością).

2. W górotworze nie naruszonym robotami górnictwem (a zatem w naturalnym masywie skalnym) wyróżnia się 3 strefy, różniące się istotnie stanem naprężeń. Są to od góry:

— bezpośrednio przypowierzchniowa strefa naprężeń z reguły praktycznie najbardziej odprężona, w której naprężenia pionowe σ_z są stosunkowo niewielkie, a poziome σ_h bliskie zeru. Stan naprężeń można by sprowadzić w przybliżeniu do stanu naprężeń przy ściskaniu jednoosiowym (bez wyboczenia);

— pośrednia strefa naprężeń, w której — przy braku lub minimalnych bocznych naprężeniach tektonicznych — naprężenia pionowe σ_z są większe, a związane z nimi naprężenia poziome $\sigma_h \neq 0$ spełniają nierówności $\sigma_z > \sigma_h > 0$; w strefie tej przy anizotropowym ściskaniu panuje anizotropowy stan naprężeń odwzorowywany w górnych częściach tej strefy elipsoidami smukłymi (tj. o długich osiach pionowych), a w dolnych szerszymi (tj. coraz bardziej zbliżonymi do kuli);

— głęboka strefa naprężeń, w której naprężenia: pionowe σ_z i poziome σ_h są sobie równe ($\sigma_z = \sigma_h$); w strefie tej przy izotropowym ściskaniu istnieją naprężenia izotropowe, które odwzorowuje kula.

3. Wykonanie jakiegokolwiek wyrobiska zmienia naturalny, pierwotny stan naprężeń wokół każdego wyrobiska. Z tego wynika, że również w bezpośrednim otoczeniu każdej pustki skalnej (szczeliny, pory) stan naprężeń jest inny niż poza bezpośrednimi otoczkami pustek skalnych.

4. Wobec braku materiału skalnego zarówno w wyrobiskach, jak i w naturalnych pustkach skalnych naprężenia są zerowe, podczas gdy poza ich otoczkami w całym masywie skalnym — nadal wysokie. Różnica między pierwotnym ciśnieniem w górotworze a zerowym ciśnieniem w wyrobisku, a więc i w każdej naturalnej pustce skalnej, powoduje odkształcenie otaczających je skał i powstawanie na powierzchni oraz wokół wyrobisk pustek skalnych odprężonych otoczek, co sprzyja korodującemu działaniu wód krasowych (W.C.Kowalski, 1990).

5. W strefach naturalnego, pierwotnego, anizotropowego ściskania, zwłaszcza w strefie przypowierzchniowej, powstają ugięcia stropu i wygięcia ("wyciśnięcia") spągu

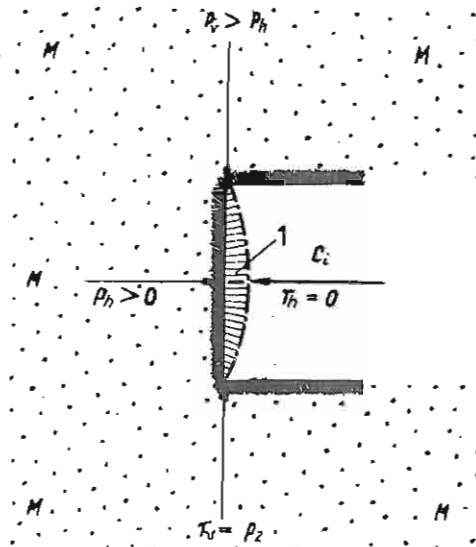


Fig. 3. Naprężenia i deformacja ściany pustki skalnej

Obszar naprężeń rozciągających(1) w ścianie pustki krasowej, obciążonej ciśnieniem pionowym p_v większym niż pierwotne ciśnienie pionowe p_z i reakcją podłoża r_v większą niż p_z , a równą p_v , oraz ciśnieniem poziomym bocznym p_h większym niż pierwotne ciśnienie poziome przy braku reakcji na ścianę od strony pustki $r_h = 0$ na ciśnienie poziome; M — masę krasowięjący, C_i — pustka krasowa

Stresses and deformation of a wall in a rock void

1 — a tensile vertical stress area in the deflected wall of a karst cavity, loaded with the vertical pressure p_v greater than the primary vertical pressure p_z and bed reaction r_v also greater than the primary vertical pressure. The wall is undergone the horizontal pressure p_h greater than the primary horizontal pressure without reaction on the horizontal pressure $r_h = 0$; M — karst massif; C_i — karst cavity

wyrobisk górniczych i pustek skalnych, a w nich obszary naprężeń rozciągających, w których ujawniają się, istniejące poprzednio oraz nowopowstające, utajone powierzchnie osłabień wytrzymałościowych; powierzchnie te sprzyjają z jednej strony silniejszemu, korozyjnemu oddziaływaniu wód krasowych (W.C.Kowalski, 1990), a z drugiej — w przypadku stropów — jednoczesnemu, mechanicznemu odpajaniu fragmentów skał, które na dnie wyrobiska lub jaskini krasowej tworzą ostrokrawędzisty gruz (fig. 1, 2).

6. Skały ścian wyrobisk w górotworze (i pustek w naturalnym masywie skalnym) w wyniku zwiększania się ciśnienia pionowego p_z z głębokością i jednostronnego działania ciśnienia poziomego p_h (związanego z ciśnieniem pionowym p_z) skierowanego do wnętrza wyrobiska (lub pustki skalnej) przemieszczają się do środka wyrobiska lub pustki skalnej, z jednoczesnym powstawaniem wewnętrznych ścięć w tych skałach, które odkształcając się ulegają odprężeniu, co łącznie ułatwia korozyjne oddziaływanie wód krasowych na te skały (fig. 3).

7. W rozważaniach nad rozwojem krasu warto zauważyć, że wartość i rozkład naprężeń w najbliższym otoczeniu wyrobisk chodnikowych w górotworze, a więc w masywach skalnych także wokół naturalnych pustek, zależą od ich kształtów. Jeśli szerokości ich przekrojów są odpowiednio duże w stosunku do ich wysokości, to w stropie i spągu występują naprężenia rozciągające, a w ich ścianach następuje koncentracja naprężeń ściskających. Należy pamiętać, że dotyczy to zarówno małej pory, jak i wielkiej jaskini krasowej.

8. W strefach pierwotnie anizotropowego stanu naprężeń — a szczególnie w strefie bezpośrednio przypowierzchniowej — w wyniku powstawania obszarów naprężeń rozciągających w stropie i w spągu wyrobisk górniczych (a więc i naturalnych pustek skalnych o poprzecznych przekrojach kołowych, prostokątnych i eliptycznych, zwłaszcza o dłuższej osi poziomej) po ujawnieniu się pierwotnych i nowopowsta-

jących utajonych powierzchni osłabień wytrzymałościowych i po przekroczeniu wytrzymałości (R_r) pierwotnego stropu, zbudowanego ze skał o znanej liczbie Poissona i jej odwrotności (m), następuje zawalenie stropu. Formuje się wówczas samoczynnie nowy strop o zarysie eliptycznym (o osi pionowej a i poziomej b), spełniającym zgodnie z teorią sklepienia ciśnieni warunki:

$$\frac{a}{b} = \frac{m-2}{2} + \frac{m-1}{2} \frac{R_r}{p_z}$$

jeśli skały stropowe nie były spękane (fig. 1).

Jeśli zaś skały stropowe były pierwotnie spękane (fig. 2), to strop przyjmuje samoczynnie postać bardziej smukłej elipsy, spełniającej warunek:

$$\frac{a}{b} = \frac{m-2}{2}$$

przy którym w stropie i w spągu pustek skalnych zanikają obszary naprężeń rozciągających, a pionowe naprężenia ściskające σ_z na ścianach pustek stają się maksymalne:

$$\sigma_{zmax} = (p_z + p_h) \frac{m}{m-2}$$

w strefach przypowierzchniowych z reguły nie przekraczające wytrzymałości skał na ściskanie R_c : $R_c > \sigma_{zmax}$.

Z rozważań teoretycznych z zakresu mechaniki górotworu wynika, że na ostateczny trwały kształt stropu pustki skalnej wpływa w sposób istotny stan naprężeń panujący wokół tej pustki w masywie skalnym. Jej pierwotny strop przekształca się samoczynnie w strop stateczny w przekroju poprzecznym o kształcie:

— półelipsy wydłużonej w kierunku pionowym, o smukłości zmniejszającej się z głębokością wszędzie tam, gdzie ciśnienie pionowe p_z jest większe od ciśnienia poziomego p_h ($p_z > p_h$) i odwrotność liczby Poissona $m < 4$, a więc w strefie grawitacyjnego anizotropowego stanu naprężeń;

— półelipsy wydłużonej w kierunku poziomym wszędzie tam, gdzie ciśnienie pionowe p_z jest mniejsze od ciśnienia poziomego p_h ($p_z < p_h$) i $m < 4$, a więc w strefach zmienionego tektonicznie stanu naprężeń;

— półkola w strefie izotropowego stanu naprężeń, panującego z reguły na większych głębokościach (orientacyjnie poniżej ok. 1000 m) wszędzie tam, gdzie $m = 4$.

Odwrotności liczby Poissona (m) wyznaczone dla różnych skał wynoszą od 2 do 20. Ch. Jaeger (1979) podaje, że zwykle wartości te zawarte są między 3,3 i 5 ($0,2 < \nu < 0,3$). J. Sepiła (1975) określił liczbę Poissona dla stropowych skał rejonu olkuskiego $\nu = 0,15$; odwrotność tej liczby $m \approx 7$. W warunkach rejonu olkuskiego kształt statycznego spękane go stropu pustki skalnej w przekroju poprzecznym określa zatem półelipsa, której osie spełniają warunek:

$$\frac{a}{b} = \frac{m-2}{2} = \frac{7-2}{2} = \frac{5}{2} = 2,5$$

co oznacza, że stosunek wysokości samotworzącego się, statecznego stropu pustki skalnej do jej szerokości jest nie większy niż 1,25. Jeśli m jest równe 20, 4 lub 3 to stosunek wysokości statecznego stropu pustki skalnej do jej szerokości jest kolejno: nie większy niż 4,5 (w przekroju bardzo smukła półelipsa); równy 0,5 (w przekroju półokrąg); nie większy niż 0,25 (w przekroju spłaszczona elipsa).

Istota krasu podziemnego polega na korozyjnym powiększeniu istniejących uprzednio pustek skalnych. Jeśli stropy tych pustek były stateczne, a postęp korozji na całym obwodzie pustki był stale jednakowy, to chociaż cała pustka powiększała się, jej kształt nie zmieniał się i stan naprężeń w całym masywie oraz najbliższym otoczeniu wyrobiska pozostawał ten sam. W tych warunkach strop skrasowiałej pustki skalnej był nadal stateczny. Jeśli jednak korozji ulegały tylko ściany i spąg pustki skalnej, to pustka stawała się coraz szersza i zmieniał się stosunek jej wysokości do szerokości. Doprowadzało to do powstawania, a następnie zwiększania się naprężeń rozciągających w stropie pustki, aż do osiągnięcia wartości przekraczających wytrzymałość na rozciąganie skał. Spękane wówczas skały stropowe opadają na dno pustki. W ten sposób w strefie grawitacyjnego anizotropowego stanu naprężeń strop pustki przybiera kształt eliptyczny (fig. 1, 2, 4) bez bezpośredniego oddziaływania korozji krasowej. Potwierdzają to pomiary w większych jaskiniach, wykazujące znaczną zgodność z obliczeniami teoretycznymi. Idealnej zgodności wyników pomiarów w jaskiniach i teoretycznych obliczeń być nie może, gdyż masywy skalne nie są ani idealnie sprężyste, ani też idealnie jednorodne (w różnych warstwach ich podatność na korozję i odkształcalność mechaniczną są różne — fig. 4). Są one również w różnym stopniu i w różnych kierunkach spękane (fig. 2). Rzeczywisty kształt stropu dużych jaskiń odbiega więc z natury rzeczy od idealnej dla danego stanu naprężeń elipsy. Przyczynę istniejących odchyień z reguły jednak łatwo uchwycić. W wyniku grawitacyjnego opadania stropu jaskini jej pierwotny spąg przykryty jest ostrokrawędzistym gruzem, którego górna powierzchnia stanowi nowe dno leżące niejednokrotnie wyżej niż jej pierwotny strop. Sprawia to wrażenie podniesienia się całej jaskini ku górze (fig. 1, 2, 4).

Porównując objętość pierwotnej pustki krasowej z objętością opadłego grawitacyjnie na dno tej pustki gruzu, łatwo zauważyć, że ubytek masy na ścianach i w dnie w wyniku korozji krasowej może być — i w przypadku dużych jaskiń krasowych jest — niejednokrotnie znacznie mniejszy niż masa grawitacyjnie opadłego gruzu.

Powstawanie większych jaskiń uwarunkowane jest więc poziomym przepływem wody z większymi prędkościami przez pustkę tylko częściowo wypełnioną wodą. Warunki takie panują w przypowierzchniowej strefie, częściowo odprężonej, częściowo będącej w anizotropowym stanie naprężeń i jednocześnie znajdującej się w strefie wahań poziomu zwierciadła wody podziemnej, zwłaszcza przy większych spadkach hydraulicznych.

W strefie bezpośrednio przypowierzchniowej powyżej maksymalnego zwierciadła wody podziemnej większe jaskinie nie mogą powstawać, mimo że od powierzchni terenu przepływa przez nią woda opadowa nasycona CO_2 , a nie elementami korodo-

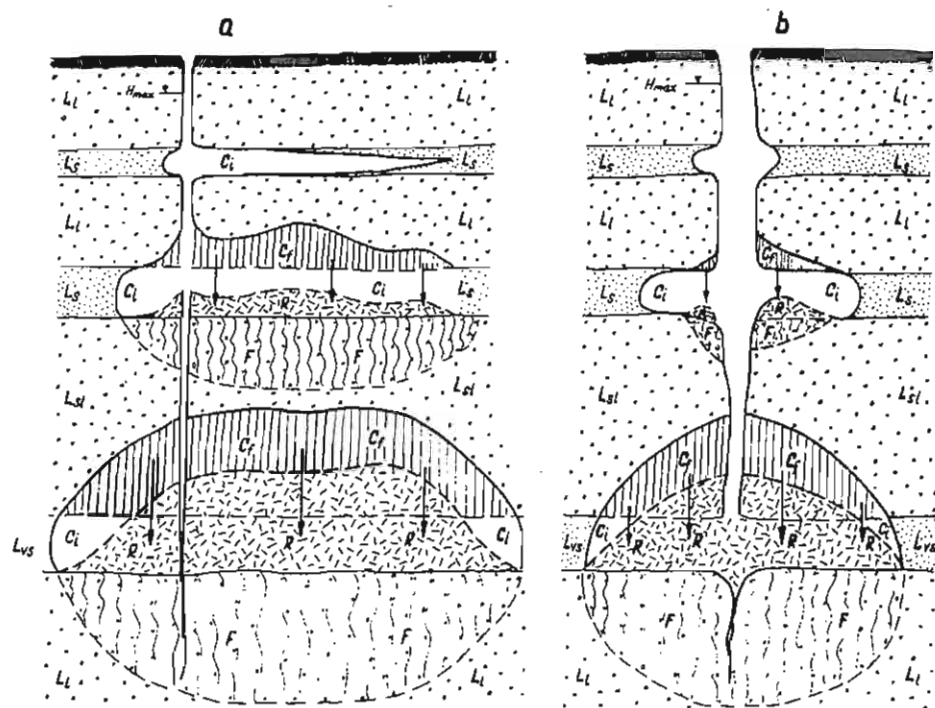


Fig. 4. Komin krasowy, rozwinięty na przecięciu dwóch szczelin i związane z nim jaskinie: a — przekrój podłużny wzdłuż szczeliny o rozciągłości zgodnej z kierunkiem sphywu wód krasowych, przecinający szczelinę poprzeczną; b — przekrój poprzeczny przez szczelinę poprzeczną o rozciągłości prostopadłej do kierunku sphywu wód krasowych

Warstwy skał o rozpuszczalności: L_{st} — poniżej przeciętnej, L_l — przeciętnej, L_s — powyżej przeciętnej, L_{vs} — znacznie większej niż przeciętnej; C_i — jaskinie powstałe tylko w wyniku korozji, C_f — większe jaskinie (pieczary) powstałe w wyniku korozji i spękań; R — zwaliny na dnie jaskiń, powstałe z mechanicznie odsponowanych stropów jaskiń, w wyniku czego podnosi się strop jaskini i podwyższa jej dno; pozostałe objaśnienia jak na fig. 1

A karst pit, developed on a crossing of two joints and connected with it karst caves: a — a long section along the joint with the strike concordant with the karst water outflow direction, with the transverse joint, b — a long section along the joint with the strike perpendicular to the karst water outflow direction, with the transverse joint

Rock beds with different solubilities: L_{st} — less than average, L_l — average, L_s — above average, L_{vs} — much more than average; C_i — caves, developed only as a result of corrosion; C_f — caves, developed as results of corrosion and cracking; R — debris on the cave floor, remaining explanations the same as for Fig. 1

wanych skał (korozyjnie najbardziej agresywna) oraz mimo że w strefie tej skały są najbardziej odprężone. Woda albo wnika tu w szczeliny, przez które przepływa ze stosunkowo dużymi prędkościami w efekcie korodując powoli ich ściany, albo też wsiąka w system porów i przenika powoli ku dołowi, stając się prędko roztworem nasyconym. Powoduje to jednocześnie powolne łączenie się sąsiadujących w pionie porów w łańcuchy podobne do kanalików lub szczelinek. Dla tej strefy charaktery-

styczne są więc poniżej powierzchni terenu rozwarłe szczeliny i kominy krasowe, a na powierzchni bogaty mikro- i mezorelief krasowienia.

Poniżej minimalnego położenia zwierciadła wody podziemnej — zwłaszcza w strefach izotropowego lub prawie izotropowego stanu naprężeń w masywie skalnym (szczególnie wobec powolnego z reguły przepływu i pełnego nasycenia wody podziemnej rozpuszczalnymi elementami skał) — nierównomierna korozja krasowa praktycznie zanika, a kształt pustek nie zmienia się.

WNIOSKI

1. Stan naprężeń w masywie skalnym wpływa w istotny sposób na natężenie krasowienia masywu oraz kształt form krasowych.

2. Wszystkie formy krasowe powstają z przekształcenia pierwotnie istniejących w masywie pustek skalnych (szczelin, porów).

3. Poszerzanie pustek skalnych w wyniku długotrwałej korozji ścian pustek, występujących poniżej maksymalnego i jednocześnie powyżej minimalnego położenia zwierciadła wody podziemnej, prowadzi do powstawania obszarów naprężeń rozciągających w stropie pustki, co po przekroczeniu wytrzymałości na rozciąganie skał stropowych powoduje opadanie ich fragmentów na dno w postaci ostrokrawędzistego gruzu i wykształcenie się eliptycznego stropu. W strefie tej udział samoczynnego mechanicznego kształtowania się eliptycznego stropu przewyższa udział korozji (fig. 1, 4), co powoduje jakby podnoszenie się jaskiń ku górze.

4. Powyżej maksymalnego położenia zwierciadła wody podziemnej w strefie odprężania lub grawitacyjno-anizotropowego stanu naprężeń szczeliny pionowe poszerzają się, powstają pionowe szczelinki, a w wyniku łączenia się sąsiadujących w pionie pierwotnych porów powstają kominy krasowe.

5. Poniżej minimalnego zwierciadła wody podziemnej, przy grawitacyjno-anizotropowym stanie naprężeń, zwłaszcza zbliżającym się do izotropowego, kształty pustek krasowych, na których obwodzie odbywa się stale spowolniona korozja, ulegają niewielkim zmianom. Są one prawie konforemne z pierwotnymi; o postępie krasowienia decyduje przede wszystkim korozja, a udział samoczynnego mechanicznego kształtowania się eliptycznego stropu zanika całkowicie z głębokością w strefie izotropowego stanu naprężeń.

Podziękowania: Autor czuje się w obowiązku podziękować doc.drowi hab. R.Kaczyńskiemu, specjalście w zakresie mechaniki gruntu i skał, i drowi hab. J.Głazkowi, znawcy krasu polskiego, za dyskusję nad poruszonymi w rozprawie problemami, oraz p. p. T.Krasnodębskiemu, K.Lecewicz i mgrowi inż. A.Niedkowi za wykonanie rycin i slajdów.

PIŚMIENICTWO

- COURBON P. (1979) — Atlas des grands gouffres du Monde. Marseille.
- COURBON P., CHABERT C. (1976) — The great caves in the World. Bull. British. Cave Research Assoc., 12.
- DUBLJAŃSKI W.N. (1977) — Karstowye pieszcziery i szachty Gornogo Kryma. Nauka. Moskwa.
- DUBLJAŃSKI W.N., ILJUCHIN W.W. (1982) — Krupniejszyje karstowye pieszcziery i szachty SSSR. Moskwa.
- DUBLJAŃSKI W.N., ŁOMAJEW A.A. (1980) — Karstowye pieszcziery Ukrainy. Kijew.
- GARDNER J.H. (1935) — Origin and development of limestone caverns. Bull. Geol. Soc. Amer., 46.
- GŁĄZEK J. (1989) — Paleokarst of Poland. In: P.BOSAK, D.C.FORD, J.GŁĄZEK, I.HORAČEK (red.) Paleokarst a systematic and regional review. Academia — Praha. Elsevier. Amsterdam.
- GŁĄZEK J., GRADZIŃSKI R., PULINA M. (1982) — Karst and caves of Poland. In: Kras i speleologia. Pr. Nauk. UŚI, nr 532, Kras i Speleol., 4, p. 9–18.
- GŁĄZEK J., GRODZICKI J., RUDNICKI J., WÓJCIK Z. (1979) — Kras tatrzański. Prz. Geol., 27 p. 377–381, nr 7.
- HEIM A. (1878) — Mechanismus der Gebirgsbildung. Basel.
- JAEGER Ch. (1979) — Rock mechanics and engineering. Second edition. Cambridge Univ. Press. Bath.
- JAGNOW D.H. (1979) — Cavern development in the Guadalupe Mountains. Columbus. Ohio. USA.
- KOWALSKI W.C. (1961) — Wytrzymałość na ściskanie budowlanych skał senońskich przelomowego odcinka Wisły Środkowej na tle ich litologii. Biul. Geol. Wydz. Geol. U.W, 1, cz. 2, p. 3–149.
- KOWALSKI W.C. (1988) — Geologia inżynierska. Wyd. Geol. Warszawa.
- KOWALSKI W.C. (1990) — Zróżnicowanie korozji krasowej w zależności od kształtu korodowanej masy skalnej i jej stanu naprężeń. Kwart. Geol., 34, p. 511–534, nr 3.
- MAKSIMOWICZ G.A. (1969) — Osnowy karstowiedienija. Perm.
- OBERT L., DUVAL W.I. (1967) — Rock mechanics and design of structures in rock. New York.
- REINER M. (1958) — Reologia teoretyczna. Warszawa.
- RODIONOW I.W. (1958) — Inżynierno-geologiczeskije isledowanija w karstowych rajonach. Leningrad.
- RODIONOW I.W. (1960) — Osnowy gidrogeologiczeskogo i inżynierno-geologiczeskogo rajonirowanija Jewropejskoj czasti SSSR. Moskwa.
- SAŁUSTOWICZ A. (1955) — Mechanika górotworu. Wyd. AGH. Katowice.
- SAWIN G.N. (1956) — Spannungserhöhung am Rande von Löchern V.E.B. Berlin.
- SAWIN G.N. (1961) — Stress concentrations around Holes. Oxford.
- SAWIN G.N. (1968) — Raspredielenije napriazhenij okolo otwierstii. Naukowa Dumka. Kijew.
- SEPIOŁA J. (1975) — Próba makroskopowej klasyfikacji skał stropowych rejonu olkuskiego. Zesz. Nauk. AGH, nr 475. Górnictwo, z. 71.
- TALOBRE J. (1957) — La mécanique des roches. Paris.
- TERZAGHI K., RICHART F.E. (1952) — Stresses in rock around cavities. Géotechnique, 3, p. 57–99.
- TINTIŁOZOW Z.K. (1976) — Karstowye pieszcziery Gruzji. Tbilisi.

Witold Cezariusz KOWALSKI

INFLUENCE OF STRESSES AND THEIR CHANGES ON KARST CAVITIES DEVELOPMENT IN ROCK MASSIFS

S u m m a r y

Results of many measurements of some form of studied karst cavities — especially their roofs — and observations of sharp — edged debris on their bottoms and also results of some executed theoretical studies in the field of rock mechanics were compared. On the ground of these data one can come to the following conclusions:

1. Stresses in rock massifs influence essentially on karst forms.
2. Every karst form arises from transformation of a primary rock void to a karst cavity.
3. Widening of a rock void results in course of the long-lasting corrosion of void walls below the maximal and above the minimal positions of the ground-water table and effects formation some tensile stress areas above the void roof and below the void floor, what can cause falls of the sharp-edged roof rock fragments on the void floor, when the tensile stress values overcomes the tensile strength of the roof rocks, and form automatically some elliptic roofs. In this case the contribution of the automatic mechanical formation of some elliptic roofs is predominant in this zone, and causes some kind of the cave upward movement (Fig. 1, 2, 4).
4. Widening of the existing vertical joints and formation of new vertical fissures, as the result of junction some pores, being each over, take place in the relaxed or gravitationally anisotropic stress zones, above the maximal ground water table.
5. Forms of karst voids and cavities change only slowly and equal in each direction below the minimal ground water table position in zones less gravitationally anisotropic zones, especially near to the isotropic one (the contribution of the karst corrosion is, first of all, predominant over the mechanical formation of elliptic roofs in this zone). Thus the contribution of the mechanical formation of elliptic roofs is diminishing in depth and disappears entirely in the zone of isotropic stresses.

Translated by the Author