

jednostkę pola -  $\text{kg/m}^2$ . Zwykle przyjmujemy  $\rho = 150 \text{ kg/m}^2$ .

Z rozważań analitycznych, których tu nie będziemy przytaczali<sup>x/</sup>, wypada, że rdzeń przekroju pierścieniowego jest kołem, którego środek przypada na osi komina, a promień wynosi

$$r = \frac{D}{8} \left[ 1 + \left( \frac{d}{D} \right)^2 \right],$$

gdzie litery mają znaczenie zgodne z rys. 148.

Dla największego naprężenia mamy zaś wzór:

$$\sigma_1 = \frac{R}{F} \left( 1 + \frac{8De}{D^2 + d^2} \right),$$

przyczem  $F$  oznacza pole przekroju komina, a  $e$  odległość punktu przyłożenia siły wypadkowej, działającej na stosując od osi komina;  $\sigma_1$  powinno być  $\leq K_c$ . Największe naprężenie  $\sigma_1$  można też znaleźć drogą wykreślną: por. "Technik" tom I str. 409.

## R O Z D Z I A Ł IX.

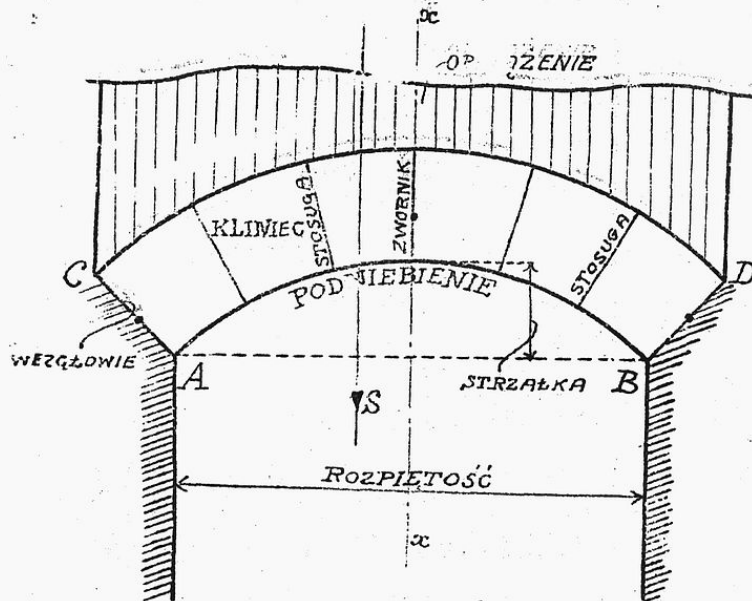
### SKLEPIENIA.

#### 159. OKREŚLENIA PRZEDMIOT ROZDZIAŁU. SKLEPIENIEM

NAZYWAMY KONSTRUKCJĘ Z BLOKÓW, KAMIENI LUB CEGIEŁ, SŁUŻĄCĄ DO POKRYCIA DANEJ PRZESTRZENI, O PEWNEJ ROZPIĘTOŚCI I PODTRZYMUJĄCĄ ZAZWYCZAJ /OPRÓCZ CIĘŻARU WŁASNEGO/ OBCIĄ-

x/ Por. Teorię wytrż. materiałów.

ŻENIE DODATKOWE W POSTACI MURU, NASYPU, CIĘŻARÓW STAŁYCH  
I RUCHOMYCH i t.d.



rys. 149.

Na rys.  
149 widzi-  
my typowe  
sklepienie  
"beczukowe".  
Kombinując  
kilka skle-  
pień beczuk-  
kowych otrzy-  
mamy sklepie-  
nie "krzyżo-  
we", "kasz-

torne" i t.p.

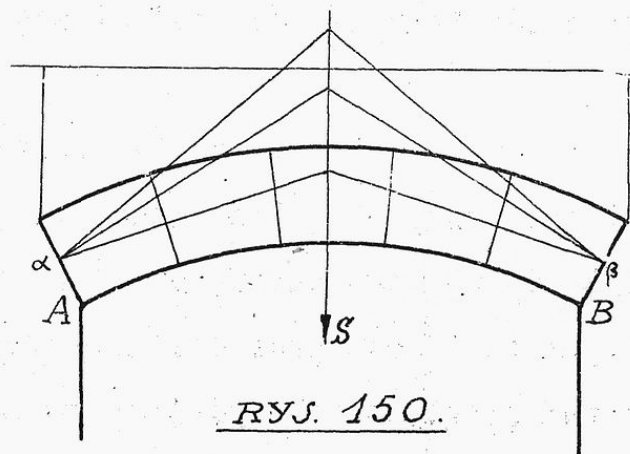
Poszczególne kamienie, tworzące sklepienie nazywamy KLINCAMI, powierzchnie ich zetknięcia STOSUGAMI; miejsce, w którym sklepienie opiera się o ścianę, nosi nazwę WEZGŁOWIA; najwyższy kliniec nazywamy ZWORNIKIEM; dolną powierzchnię sklepienia - PODNIEBIENIEM; pod ROZPIĘTOŚCIĄ sklepienia rozumiemy odległość poziomą, mierzoną w świetle między podpórami sklepienia. Wreszcie STRZAŁKĄ zwiemy odległość najwyższego punktu sklepienia od prostej AB.

Sklepienia rozróżniamy symetryczne względem osi i nie-

symetryczne. Poza tem rozpatrywać będziemy sklepienia obciążone symetrycznie i niesymetrycznie. Naprz. na rys. 149 mamy sklepienie symetryczne, lecz niesymetrycznie obciążone. Na rys. 153 widzimy sklepienie SYMETRYCZNE, SYMETRYCZNIE OBCIĄŻONE oraz na rys. 151 SKLEPIENIE NIESYMETRYCZNE, NIESYMETRYCZNIE OBCIĄŻONE. W dalszym wykładzie rozpatrzemy każde z nich oddzielnie.

Mówiąc o DŁUGOŚCI SKLEPIENIA będziemy mieli na myśli wymiar jego w kierunku prostopadłym do płaszczyzny rysunku. Długość tę przyjmujemy zwykle równą 1 metrowi.

160. ODDZIAŁYWANIA W WEZGŁOWIACH. Mur, o który opiera się sklepienie, będące w równowadze, wywiera nań oddzia-



RYŚ. 150.

ływanie. Jakiż jest kierunek i wartość oddziaływania? Aby odpowiedzieć na to pytanie weźmy pod uwagę sklepienie, przedstawione na rys. 150.

Przypuśćmy, że wypadkowa sił zewnętrznych, działających na to sklepienie, jest  $= S$ . Siła ta w przypadku równowagi sklepienia musi się zrównoważyć z oporami muru w

węzłowiach  $A$  i  $B$ , a więc te dwa oddziaływania i siła  $S$  powinny przecinać się w jednym punkcie. Punktem tym może być dowolny punkt, leżący na linii działania siły  $S$ , bo kierunki oddziaływań nie są niczem określone. I nie tylko kierunki! Nie wiemy nawet, gdzie znajdują się punkty przyłożenia  $\alpha$  i  $\beta$  tych oddziaływań, bo, rzecz jasna, mogą być niemi dwa którekolwiek punkty węzłowia  $A$  i  $B$ .

Ta nieoznaczoność kierunków i punktów przyłożenia oddziaływań stoi na przeszkodzie do ścisłego rozwiązania naszego zagadnienia.

Brak nam danych po temu, aby z pośród nieskończenie wielu kierunków linii działania i punktów przyłożenia w węzłowiach wybrać te lub owe, a tem samem nie możemy z całą pewnością wyznaczyć oddziaływań, co jest niezbędne dla potrzeb życia.

Możnaby tu skorzystać z pomocy t.zw. teorii sprężystości, która rozważa podobne przypadki, lecz temat ten, z jednej strony nie należy do naszego kursu, a z drugiej strony wyniki, do których ta teoria prowadzi, nie mogą mieć szerszych zastosowań praktycznych, gdyż własności materiału, rozważanego w teorii, bardzo daleko odbiegają od tych, jakie spotykamy w materiale stosowanym do sklepień, jak kamień, cegła, beton /nie żelazobeton/.

Niżej zobaczymy, że można sobie z góry zadać w węzło-

wiach punkty  $\alpha$  i  $\beta$  tak, aby oddziaływania musiały przez nie przejść, ale i to nie rozwiąże jeszcze sprawy, bo pozostaną nieznane kierunki oddziaływań. Zatem, kiedy mamy zamiar budować sklepienie należy iść drogą empiryczną, korzystając z wzorów i przykładów sklepień już zbudowanych, które okazały stateczność i wytrzymałość. Przytem wzorujemy się zwykle na dobrze poznanych sklepieniach, oddawna będących w służbie.

Pomimo, jednak, że do budowy sklepień przystępujemy, korzystając z wzorów starych, istnieje w nas żądza sprawdzenia dostępnymi nam środkami, czy i o ile projektowane sklepienie może być stateczne i wytrzymałe.

Badanie to, jak zobaczymy, polega na poznaniu możliwości wykreślenia wewnątrz sklepienia t.zw. linii ciśnień i następnie na wysnuciu wniosków, jakie wykreślona linja ciśnień dostarczy. Zresztą, bliższe szczegóły później.

#### 16.1. WYKREŚLNE SPRAWDZANIE SKLEPIEŃ W OGÓLNYM PRZYPADKU. SKLEPIENIE NIESYMETRYCZNE, NIESYMETRYCZNIE OBCIĄŻONE.

Sklepienie takie widzimy na rys. 151. Przypuśćmy, że sklepienie jest obciążone warstwą ziemi  $LA_0C_0B_0M$  i dajmy na to, że ciężar właściwy ziemi ( $q_z$ ) jest mniejszy od ciężaru właściwego kłińców ( $q_k$ ). Sklepienie dzielimy płaszczyznami stosug na kłińce:  $AA_0DD_0DD_0EE_0$  i t.d.

Aby uprościć sobie zadanie, zastępujemy warstwą ziemi

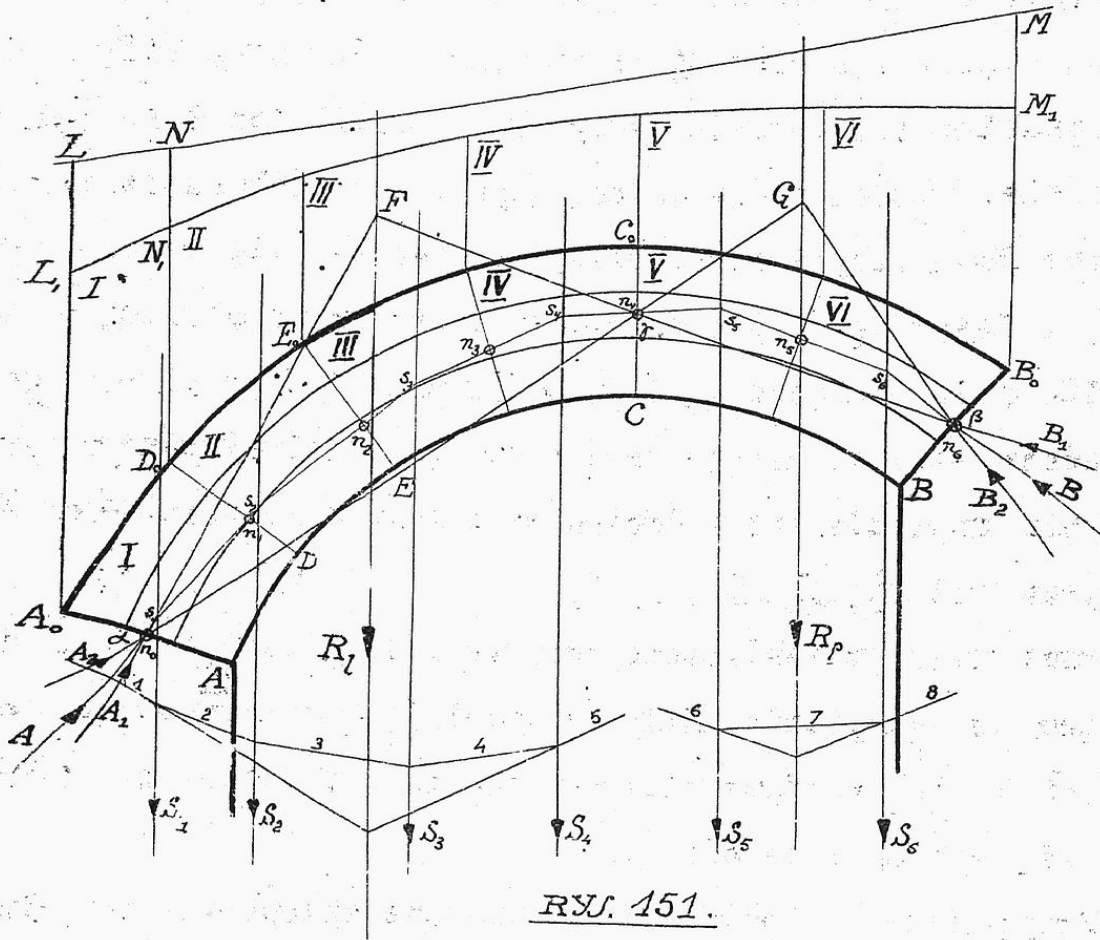


$LA_0C_0B_0M$  inną, o ciężarze właściwym takim, jaki mają klince. Aby zachować przytem pierwotny ciężar, należy nadać zastępczej warstwie mniejszą wysokość. Oczywiście jest rzeczą, że wysokość ta jest równa wysokości pierwotnej, zmniejszonej w stosunku  $\frac{q_1}{q_2}$ . Zmniejszając w ten sposób wszystkie rzędne pola  $LA_0C_0B_0M$  otrzymamy nową linię obciążeń, t.zw. sprowadzoną LINIĘ OBCIĄŻEŃ  $L_1M_1$ .

Obecnie będziemy postępować tak, jak gdyby sklepienie było obciążone bryłą ziemi  $L_1A_0C_0B_0M_1$ . Na każdy kliniec przypada część tej bryły, zawarta pomiędzy dwiema płaszczyznami pionowymi, poprowadzonymi przez górne krawędzie odpowiednich klinców. Tak więc np. kliniec I jest obciążony warstwą ziemi  $A_0L_1N_1D_0$ , której ciężar, dodany do ciężaru klinca, daje wypadkową  $S_1$  - jedną z sił, działających na sklepienie. Podobnie postępujemy z klincami II, III i t.d., przyczem otrzymamy wypadkowe  $S_2, S_3, \dots, S_6$ .

Zanim pójdziemy dalej, wyjaśnimy w paru słowach, na czem polega udogodnienie, które nam daje sprowadzona linja obciążeń:

Gdybyśmy jej nie mieli, wówczas, aby wyznaczyć siłę  $S_1$ , trzebaby obliczyć pole  $A_0L_1N_1D_0$ , pomnożyć je przez ciężar właściwy ziemi  $q_2$  /długość bryły - w kierunku prostopadłym do rysunku - jest równa 1 m./ i otrzymaną stąd siłę przyłożyć w środku ciężkości tego pola. Następnie na-



leżałoby zrobić to samo z klincem, mnożąc pole  $A_0 D_0 DA$  przez ciężar właściwy  $\gamma_2$ ; otrzymalibyśmy nową siłę, której punktem przyłożenia byłby środek ciężkości tego pola; wreszcie, musielibyśmy dodać, za pomocą wieloboku sznurowego owe dwie siły i otrzymalibyśmy wówczas siłę wypadkową

$S_2$ . Mając zaś linię sprowadzoną wystarczy obliczyć całkowite pole obciążeń  $L_1 A_0 ADD_0 N_2$  i pomnożyć je przez  $\gamma_2$ . Wypadnie stąd odrazu ta sama siła  $S_2$ , której punkt przyłożenia znajdzie się w środku ciężkości tego pola. To samo dotyczy sił  $S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$ .

Mamy więc już obliczone wszystkie siły zewnętrzne, działające na sklepienie. Siły te wywołują oddziaływania /odpory/  $A$  i  $B$  w odpowiednich węzłach. Zobaczymy teraz, jak się wyznaczają te odpory.

Przypuśćmy, że podzieliliśmy zadane sklepienie na dwie części stosugą  $CC_0$ ; założmy, że części te stykają się ze sobą tylko w jednym, zgóry zadany punkcie  $J$  w stosudze  $CC_0/$  i że zetknięcie się skrajnych klinców z węzłowami zachodzi także TYLKO w punktach  $\alpha$  i  $\beta$ . Oczywiście, przez punkt  $J$  przechodzą oddziaływania wzajemne części prawej i lewej sklepienia, a przez punkty  $\alpha$  i  $\beta$  - odpory węzłowi  $A$  i  $B$ .

Rozpatrzmy naprzód lewą część sklepienia, uważając część prawą wyłącznie, jako konstrukcję geometryczną.



NIEWAŻKĄ, lecz mogącą wywierać odpór ( $B_1$ ) na pozostałą część sklepienia. Odpór ten przechodzi, oczywiście, przez punkty  $\beta$  i  $\gamma$  i musi się przeciąć z odporem  $A_1$  węgłowia  $A$  na wypadkowej  $R_1$  sił  $S_1, S_2, S_3, S_4$ , działających na lewą część sklepienia. Wyznamy więc za pomocą wieloboku sił i wieloboku sznurowego /rys.151 i 152/ ową wypadkową; połączmy z punktem  $\alpha$  punkt przecięcia się wypadkowej  $R_1$  z prostą  $\beta\gamma$ , otrzymamy linię działania odporu  $A_1$ . Wartość i lot jego znajdziemy z wieloboku sił /rys.152/, w którym  $\overline{ae} = R_1$ ,  $\overline{ek} = B_1$ ,  $\overline{ka} = A_1$ .

Zupełnie tak samo rozpatrzmy część lewą sklepienia, jako nieważką i wywierającą jedynie odpór ( $A_2$ ) na część pozostałą. Odpór ten przejdzie przez punkty  $\alpha$  i  $\gamma$  i przecnie się z odporem  $B_2$  węgłowia  $B$  w punkcie  $Q$  wypadkowej  $R_p$  sił  $S_5$  i  $S_6$ ; należy więc wyznaczyć wypadkową  $R_p$ , za pomocą wieloboku sznurowego i wieloboku sił /rys.151 i 152/. Prosta  $\beta Q$  jest linią działania odporu  $B_2$ . Wartość i lot jego wyznaczymy z nowego wieloboku sił /rys.152/, gdzie  $\overline{eg} = R_p$ ,  $\overline{gk} = B_2$ , a  $\overline{k_e} = A_2$ .

Ostatecznie znaleźliśmy cztery oddziaływania  $A_1, A_2, B_1$  i  $B_2$ ; z nich  $A_1$  i  $B_1$  wywierają węgłowia, gdy prawa część sklepienia jest nieważką i bez obciążenia, a  $A_2$  i  $B_2$  - gdy nieważką i bez obciążenia jest część lewa. W rzeczywistości, obydwie części sklepienia są obciążone, a więc w istocie działają jednocześnie wszystkie cztery siły

$A_1, A_2, B_1, B_2$ , przy czem  $A_1$  i  $A_2$  wywiera wezglowie  $A$ , a  $B_1$  i  $B_2$  - wezglowie  $B$ . Aby więc wyznaczyć całkowite odpory wezglowi trzeba odpowiednie siły dodać. Wykonujemy to za pomocą wieloboku sił na rys. 152, prowadząc przez punkt  $K_1$  równoległą do  $e\bar{k}_2 = A_2$ , a przez  $K_2$ , równoległą do  $e\bar{k}_1 = B_1$ . W przecięciu tych dwóch równoległych otrzymamy punkt  $\Omega$ ; oczywiście, odcinki  $\bar{\Omega}a$  i  $g\bar{\Omega}$  są odpowiednio równe szukanym odporom całkowitym wezglowi  $A$  i  $B$ . Ich linie działania przechodzą przez punkty  $\alpha$  i  $\beta$  wezglowi  $A$  i  $B$ .

Kiedy wyznaczyliśmy oddziaływania wezglowi, przechodzimy do rozpatrzenia równowagi poszczególnych klinów, przy czem postępujemy w podobny sposób, jak przy ścianach oporowych /par. 154/.

Bierzemy więc naprzód pod uwagę kliniec I. Działają nań siły  $A$  i  $S_1$  i oddziaływanie klinca II  $P_1$ . Wartość i kierunek siły  $P_1$  wyznaczymy z warunków równowagi, z trójkąta sił  $\bar{\Omega}ab$  /rys. 152/, w którym boki  $\bar{\Omega}a$  i  $ab$  są znane, równe, mianowicie, siłom  $A$  i  $S_1$ , trzeci bok  $b\bar{\Omega}$  /zamykający/ daje oddziaływanie klinca II na I, t.j. siłę  $P_1$ . Linia działania siły  $P_1$  przechodzi przez punkt  $s_1$  przecięcia się siły  $A$  z  $S_1$  i jest równoległa do  $b\bar{\Omega}$ . Linia działania  $P_1$  przecina stosugę  $DD_0$  w punkcie  $n_1$  który, podobnie, jak dla ściany oporowej, nazywamy ŚRODKIEM



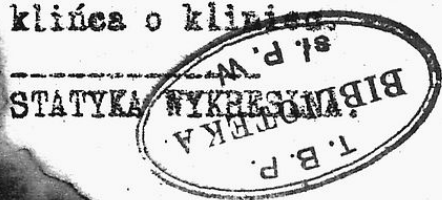
CISNIEN w tej stosudze. Dalej rozważamy kliniec II. Dzia-  
ła nań siła  $S_2$ , o której była mowa poprzednio oraz od-  
działywania klinców I i III. Pierwsze z nich jest już znane:  
co do wartości i linii działania jest równe  $P_1$ , lecz lot  
ma odwrotny, równe jest, mianowicie, odcinkowi  $\overline{ab}$  w wie-  
loboku sił /rys.152/. Siła  $S_2$  wyznaczona jest odcinkiem  
 $\overline{bc} = S_2$ ; oddziaływanie zaś klinca III na II wyznaczymy,  
jako odcinek  $\overline{c\Omega} = P_2$ , budując trójkąt  $\overline{abc}$ . Linia dzia-  
łania siły  $P_2$  przechodzi przez punkt  $S_2$  przecięcia się  
sił  $S_2$  i  $P_1$  i jest równoległa do odcinka  $\overline{c\Omega}$ . Siła ta  
przecina stosugę, odgraniczającą kliniec II od III w punk-  
cie  $n_2$ , który jest nowym środkiem ciśnień.

Tak samo postępujemy z klincami III, IV, V i VI, otrzy-  
mamy przytem nowe środki ciśnień  $n_3, n_4, n_5$  i  $n_6$ . Jeśli  
budowa jest wykonana prawidłowo, to środki ciśnień  $n_4$  i  $n_6$   
powinny upaść na punkty  $\beta$  i  $\gamma$ .

Połączmy ze sobą kolejne środki ciśnień linią ciągłą,  
otrzymamy wówczas LINJĘ CISNIEN rozważanego sklepienia.  
Linja ta odgrywa tu podobną rolę, jaką posiada przy badaniu  
ścian oporowych linja środków ciśnień.

A zatem:

1/ Stateczność sklepienia wymaga, aby linja ciśnień  
przecinała stosugi pod kątami nie większemi od kąta tarcia  
klinca o kliniec.



2/ Należy nadać sklepieniu takie wymiary, żeby większe naprężenie w stosudze, wywołane przez składową normalną /do płaszczyzny stosugi/ oddziaływania wzajemnego przyległych klinów, nie przekraczało dozwolonych granic.

3/ Aby naprężenia w stosudze były wyłącznie ściskające, należy dążyć do tego, iżby linja ciśnień przebiegała wewnątrz rdzenia sklepienia, t.j. wewnątrz środkowej trzeciej części sklepienia /dla stosugi o przekroju prostokątnym/.

W przykładzie, przedstawionym na rys.151, ostatni warunek dla części sklepienia między II i III klinem nie jest spełniony.

#### 162. SKLEPIENIE SYMETRYCZNE, SYMETRYCZNIE OBCIĄŻONE.

/rys.153 i 154/. W tym przypadku sposób postępowania jest prostszy niż poprzednio, ze względu na symetrię zarówno sklepienia, jak i obciążenia.

Wystarczy wobec tego rozpatrzyć tylko jedną połowę sklepienia, np. lewą. Działają na nią następujące siły: siły  $S_1, S_2, S_3, S_4$  /pochodzące od ciężaru własnego klinów I, II, III, IV oraz obciążenia zewnętrznego/, odpór węzłowa  $A$  i oddziaływanie  $H$  prawej połowy sklepienia. Zakładamy, że siła  $H$  przechodzi przez punkt  $J$ . Siła  $H$ , którą nazywamy też rozporem, musi być pozioma.