go łuków. Wobec tego nad obu łukami jest zbudowany nowy łuk, takiej grubości by mógł przejąć na siebie ciężar ściany. Na dwa mniejsze łuki i podtrzymujący je słup jest przekazywany teraz tylko ciężar muru, znajdującego się pod łukiem wielkim i nad dwoma małemi.

Podobne warunki zachodzą, gdy mamy łuk płaski, który ze względów architektonicznych nie może być pogrubiony /Rys.173/. Układając nad nim łuk nowy, ze znaczną strzałką, możemy go odciążyć od parcia wyżej leżącej ściany, a nawet podtrzymać na żelaznym wieszarze.

Takie dodatkowe łuki nazywamy odciążającemi.

Czasami łuki służą dla wzmocnienia ścian lub kolumn, najczęściej w tych razach, kiedy są one węzgłowiami sklepień, albo innych łuków, przekazujących rozpory. Te ostatnie wywołują w węzgłowiach składowe poziome, dla przeciwdziałania którym buduje się łuki oporowe, tego kształtu, jak na rysunku 174.

§ 51. Sklepienia krzyżowe i klasztorne. Aby wyjaśnić powstawanie sklepień złożonych, rozpatrzmy przedewszystkiem przecięcie się wzajemne dwóch cylindrów A i B /Rys.175/ pod katem prostym. Rozważane powierzchnie przecinając się mogą utworzyć 2 rodzaje sklepień, a mianowicie: 1/ dwa odcinki walca A i dwa odcinki walca B, o ile są wydzielone z całości zgodnie z rys. 176 tworzą jedną zwartą powierzchnię. 2/ cztery odcinki tych samych walców, lecz wykrojone inaczej /rys.177/ tworzą powierzchnię wspartą w czterech punktach.

Zamieszczone rysunki tłomaczą powstawanie obu powierzchni, z których pierwsza jest powierzchnią wewnętrzną sklepienia klasztornego /rys.176/, druga zaś - krzyżowego /rys.177/.

Sklepienia klasztorne zwą także kopenkowatemi, lub zwartemi, odcinki zaś z których się składają kolebkami.

Sklepienia krzyżowe, lub jak je zrzadka nazywają otwarte składają się z czterech kozub. Różnica zasadnicza pomiędzy obu typami sklepień, polega na tem, że kolebki sklepienia klasztornego są oporowem czyli przylegają wszystkiemi punktami do węzgłowia budynku, /rys. 178/ kozuby zaś sklepienia krzyżowego są wyłącznie czołowe, t.j. opierają się tylko w pewnych punktach /rys.179/. Skąd łatwy wniosek, że sklepienie klasztorne musi mieć za węzgłowia ściany ciągłe, krzyżowe natomiast wspiera się na słupach.

Oba rodzaje sklepień mogą przykrywać płaszczyzny niekoniecznie kwadratowe, lecz wogóle wielokątne. Podany dla przykładu rys.180 wskazuje, jak sklepieniem klasztornem i krzyżowem można przykryć sześciokąt foremny.

Dla zbudowania sklepienia klasztornego nad jakimkolwiek wielokątem, postępujemy w sposób następujący /Rys.181/.

Zadajemy sobie wysokość strzałki h i znajdujemy punkt średnicowy sklepienia, który następnie łączymy z wierzchołkami wielokąta, dzieląc go przez to na trójkąty A, B, C, D, E. Nad każdym trójkątem dajemy specjalną kozubę, wyciętą z właściwego pół - walca. Dla trójkąta A bierzemy taki pół - walec ze strzałką h, aby jego górna tworząca przechodziła przez szczyt sklepienia, zaś dolne tworzące biegły przez punkty krańcowe podstawy trójkąta A. Walec taki otrzymamy wówczas, kiedy jego tworzące będą równoległe do prostej, łączącej wybrany punkt średnicowo-górny wielokąta /szczyt/ ze środkiem podstawy trójkąta A. W taki sam sposób znajdziemy właściwe półwalce dla innych trójkątów, poczem wycinając kozuby, utworzymy szukane sklepienie krzyżowe z zadaną z góry strzałką h.

Wyjaśnimy teraz w jaki sposób zbudować sklepienie klasztorne nad wielokątem nieforemnym /Rys.182/. Obieramy najdogodniejszy punkt średnicowy i strzałkę h, poczem dzielimy nasz wielokąt na trójkąty A

B, C, D, E. Dla przykrycia trójkąta A musimy obrać taki pół-walec, któregoby dolna tworząca zlewała się z podstawą trójkąta, a górna tworząca przechodziły przez szczyt sklepienia. Wysokość trójkąta powinna przeto wynosić połowę rozpiętości właściwego pół-walca, a podstawa biec wzdłuż tworzącej walca. Na mocy przytoczonych uwag, wymiary i kierunek walca jest całkowicie wyznaczony.

Jeżeli w wielokącie niektóre jego boki są równoległe, np. podstawy trójkątów C i F, wówczas mogą być one przykryte kolebką wyciętą z jednego półwalca C, którego dolne tworzące są wówczas przedłużeniem podstaw obu trójkątów. Chcąc aby szczyt sklepienia wypadł na górnej tworzącej, trzeba go wybrać na równych odległościach a od obu podstaw.

Projektując sklepienia nad wielokątami nieforemnem ograniczeni jesteśmy koniecznością zachowania jednakowej strzałki h dla wszystkich pół-walców, przy niejednakowym przelocie, który wynosi tyle, co odpowiedni bok wielokąta. Wskutek tego, jeżeli obwodnica jednej z kozub lub kolebek jest półkolem, to sąsiednia większa jest półelipsą lub odcinkiem koła, następna mniejsza - jakąś krzywą podwyższoną i t.d. lecz wszystkie te krzywe mają jedną i tę samą strzałkę h.

Przy przecinaniu się powierzchni pół-walców, powinniśmy otrzymywać krzywe płaskie, znajdujące się w płaszczyznach pionowych, poprowadzonych przez boki trójkątów A, B, C, D, E. Przecięcia takie otrzymamy wówczas, gdy będziemy mieli pół-walce o jednakowej strzałce, o ile zatem ten warunek będzie zachowany przy budowaniu sklepień, to krzywe przecięć będą płaskie.

Wielkość i kierunek sił działających w obu przytoczonych rodzajach sklepień, dają się łatwo wyznaczyć w sposób wspomniany wyżej dla sił działających w łukach. Zastosujmy go do każdego ze sklepień osobno.

Kolebkę sklepienia klasztornego /rys.183/ można uważać za składającą się z szeregu elementów, utworzonych przez płaszczyzny pionowe mn, $m'n'$, $m''n''$ i t.d. Każdy z tych elementów, będąc łukiem, ulega siłom ściskającym i posiada swoją krzywą ciśnień, przyczem większe ciśnienia ogniskują w większych elementach, tak iż maximum ciśnień działa u kątów podstawy sklepienia, zaś minimum w środku boków wielokąta wzdłuż AB. Należy sobie wyobrazić wewnątrz muru sklepienia rodzaj zwartej powierzchni utworzonych z poszczególnych składowych ciśnień. Pozatem każdy element kolebki ma swój rozpór. /Ryś 184/ Np. elementy $b \div b$

nie byłyby usztywnione, gdyby między niemi nie było warstwy sąsiedniej kolebki $a - a$. Warstwa ta spełnia niejako rolę zwornika w łuku $ba - ab$, przekazującego rozpór z jednej części na drugą. Rozważając element wzięty w kierunku prostopadłym do poprzedniego, widzimy, że warstewka $b' - b'$ utrzymuje w równowadze elementy a' i a' i t.d. Oczywiście, $a - a$ i $b' - b'$ ulegają z obu stron parciu, które przy jednakowych rozmiarach kolebek jest jednakowe.

O ile zachodzi potrzeba wybudowania u szczytu sklepienia otworu, w celu oświetlenia z góry danej budowli, wówczas wzamian kamienia szczytowego wstawia się ramę żelazną lub żelbetową, którąby nie uległa odkształceniu pod wpływem przekazywanych jej wszystkiemi kolebami rozporów, czyli spełni-ała dla sklepienia rolę szczytowego zwornika. W sklepieniu krzyżowem /Rys.185/ każdą kozubę uważamy za złożoną z elementów, utworzonych przez płaszczyzny pionowe $m \cdot n$, $m' \cdot n'$,....
Otrzymujemy przytem cały szereg krzywych ciśnień i sił, przekazywanych sąsiednim kozubom w płaszczyznach przekątnych, t.j. tych, których śladem na podstawie sklepienia są boki trójkąta, mające szczyt za wierzchołek.

Najmniejsze siły ogniskują w elementach, złożonych z niewielkich łuków, czyli u szczytu sklepienia.

największe zaś w elementach czołowych.

W płaszczyźnie przecięcia się dwóch przylegających do się kozub, która jak wiadomo, jest prostopadłą do płaszczyzny pokrywanego sklepieniem czworoboku lub innego wielokąta i przecina go wzdłuż przekątnych, działają wypadkowe parcia elementarnych łuków. /Rys.186/. Wypadkowa wszystkich elementarnych sił działa na oporę. Zależnie od kształtów i charakteru sklepienia, oraz obciążenia jakiemu ono podlega, linja działania całkowitej wypadkowej jest pionowa lub pochyła. W razie tej drugiej ewentualności wypadkowa posiada składową poziomą, która dla statyczności opory jest wielce szkodliwa.

Dla przykładu rozpatrzmy działanie na opory czterech sklepień krzyżowych: $BCAJ$, $CDEA$, $AEFG$ i $JAGH$, /Rys.187/ przykrywających płaszczyznę $BDFH$ i podtrzymywanych dziewięciu słupami.

Rozważając kierunek działania sił widzimy, że na słup A w płaszczyznach przekątnych działają dwie pary wypadkowych w przeciwnych sobie kierunkach. Jeżeli teraz siły te będą sobie równe i jednakowe pochyłe, to dadzą w rezultacie jedną wypadkową, skierowaną pionowo. Słup A będzie wówczas ulegał ściskaniu, pod wpływem obciążenia pionowego. Na słupy B, D, F i H działają wypadkowe parcia w płaszczyznach przekątnych AB, AD, AF, AH. Wypadkowe te są zwykle pochyłe, dają przeto składowe poziome, które starają się wywrócić słupy w kierunkach pokazanych na rysunku strzałkami. Pozostałe słupy C, E, G i J ulegają parciu dwóch wypadkowych, działających w płaszczyznach JC i EC, CE i GE, JG i EG, CJ i GJ, które dają w płaszczyznach prostopadłych do BD, DF, HF i BH wypadkowe ogólne. Te ostatnie mają składowe poziome, których lot wskazują na rys.187 strzałki. A zatem jeden tylko słup A można liczyć na zwykłe ściskanie, pozostałe zaś słupy, jako ulegające pozatem gięciu, potrzebują odpowiednich wzmocnień, niweczących działanie sił gnących. Kończąc dział o sklepieniach krzyżowych i klasztornych zajmiemy się jeszcze wyznaczeniem tak zwanej <u>krawężnicy</u>, czyli krzywej, jaka powstaje na płaszczyźnie przekątnej w przecięciu się jej z pół-walcem /Rys.188/.

Poziomym rzutem krawężnicy, jako znajdującej się w płaszczyźnie pionowej, jest przekątna AB, poziomym zaś - krzywa $A'o'B'$.

W sklepieniu krzyżowem, z którem mamy do czynienia na rysunku, linja $A'o'B'$ jest krzywą wewnętrzną, czyli obwodnicą kozuby czołowej, w klasztornym natomiast - obwodnicą dwóch kolebek bocznych.

Kształt obwodnic ustalamy zawczasu przystępując do projektowania sklepienia, kontur zaś krawężnicy, jako zależny od nich, wyznaczamy później.

Załóżmy, że przez AB przechodzi płaszczyzna pionowa, którą obracać będziemy dokoła osi AB dotąd, aby się stała poziomą; wówczas krawężnica uzyska w tym rzucie wielkość naturalną. Punkty A i B pozostaną na swych miejscach, natomiast punkt Oo', leżący dawniej na powierzchni walca, znajdzie się na prostopadłej do osi AB w odległości $Oo = O'o' = h$, punkt Nn' - również na prostopadłej w odległości $N'n' = Nn$ i t.d. Wyznaczywszy w ten sposób pewną ilość punktów i połączywszy je linją ciągłą otrzymamy szukany kontur krawężnicy.

Jeżeli przecinając płaszczyzną przekątną walce, z jakich jest utworzone sklepienie, otrzymujemy elipsę, wówczas możemy wykreślić krawężnicę na AB, jako na wielkiej osi, czyniąc małą oś równą strzałce h.

Należy uważać, by krzywe te nie tworzyły ostrych kątów z przekątną poziomą.

<u>§ 52. Podłęcza i żebra.</u> Mówiliśmy wyżej, że nie-

które części sklepień są nieraz naprężone bardziej niż inne i dlatego potrzebują należytych wzmocnień, które polegają na nadaniu im większych rozmiarów w porównaniu z mniej naprężonemi.

Takie zwiększenie rozmiarów nie jest trudne do wykonania, gdy budujemy sklepienie z ciosów, którym można nadać dowolne wymiary, jak również w sklepieniach betonowych, na znaczne dopiero trudności napotykamy przy murach z cegły, gdzie zgrubienie musi być dostosowane do wielkości pół-cegły. Musimy wówczas dzielić sklepienie na działki, różniące się od siebie o podaną grubość muru.

Wobec takich trudności, a zarazem wskutek potrzeby wzmacniania sklepień w pewnych kierunkach, stosuje się tak zwane podłęcza lub żebra. Są to łuki lub zgrubienie muru, wystające wewnątrz lub na zewnątrz z powierzchni sklepienia, przytoczone poprzednio na rys. 171. Najbardziej typowe są podłęcza sklepień krzyżowych /Rys.189/.

W tych sklepieniach wypadkowe sił działają w płaszczyznach przekątnych, w tych więc kierunkach należy dać sklepieniom większą grubość, co się daje uskutecznić wprowadzeniem występujących w górę i w dół podłęczy B .

Czasami podłęcza są zwykłym zgrubieniem muru; np. sklepienie wykłada się grube na pół cegły, a podłęcza - jedną; w innych znów razach podłęcza stanowią oddzielne łuki, które tworzą rodzaj szkieletu sklepienia, a dopiero przestrzenie między niemi wypełnia się ściankami kozub.

Biorąc pod uwagę, że w tych samych sklepieniach największe, a przeto najbardziej naprężone są elementy czołowe, należy również zwiększyć ich grubość, skąd częste są podłęcza A , otaczające jak rama całe sklepienie.

W sklepieniach klasztornych najbardziej naprężone są elementy środkowe, które potrzebują wzmocnień w kierunkach $A-B$. /Rys.190/.

Podłęcza, które występują wewnątrz, urozmaicają podniebienie sklepień; daje się im zwykle bogate profilowanie, które przechodzi na podtrzymujące je słupy lub ściany. Czasami takie podłęcza są podtrzymywane przez specjalne konsole /Rys.191/.

Podłęcza, występujące wewnątrz, najczęściej zwą żebrami, skąd bierze początek nazwa sklepień żebrowych. Jeżeli między głównemi żebrami znajdują się żebra drugorzędne, tworzące siatkę, to powstają sklepienia siatkowe /Rys.192/, gdy zaś w rzucie poziomym dają gwiazdę

- sklepienia gwiaździste /Rys.193/.

§ 53. Sklepienia kopulaste. Kopuły /Rys.194/. Jeżeli podniebienie sklepienia jest powierzchnią obrotową, powstałą przez ruch płaskiej krzywej abc około osi pionowej OT , to takie sklepienie nazywa się kopulastem, albo kopułą. Ostatnia nazwa jest używana częściej przy mniej skomplikowanych formach tego rodzaju sklepień.

Wszystkie punkty krzywej abc , oprócz górnego a , który jako leżący na osi jest nieruchomy, opisują koła, wobec czego każdy przekrój poziomy kopuły, czyli jej wieniec, jest okręgiem koła.

Co się zaś tyczy obwodnicy zewnętrznej, to podobnie jak w rozpatrzonych już typach sklepień, może mieć ona kształt dowolny.

Jeżeli krzywa tworząca jest ćwiartką koła, podniebienie jest półkulą, a kopuła - kolistą przy $Oa>Oc$ mamy kopułę podwyższoną /ostrołukową/, przy $Oa<Oc$ — powstaje kopuła spłaszczona. Zależnie od kształtu krzywej rozróżniamy kopuły eliptyczne, paraboliczne, koszowe i inne. Zazwyczaj kopuły przykrywają budowle o przekrojach kolistych, pomimo to jednak pewne odmiany sklepień kopulastych mogą przykrywać także wielokąty.

Kopułę możemy otrzymać zwiększając do nieskończo-