

C z ę ś ć III.

Ł U K I I S K L E P I E N I A

Rozdział I.

RODZAJE SKLEPIEŃ I ICH CECHY.

§ 49. Zasady ogólne. Do przykrycia otworów w ścianach, przelotów między słupami, przestrzeni pomiędzy ścianami a słupami służą architrawy, łuki i sklepienia.

Architrawom /rys. 156 i 157/ nazywa się kamień w kształcie belki, która leżąc na dwóch najczęściej podporach przykrywa dany otwór. Powna ilość takich belek kamiennych, o ile przykrywa duże powierzchnie, tworzy stropy.

Zastosowanie architrawów znane było w odległej starożytności, w świetnym okresie wznoszenia pomnikowych budowli greckich i rzymskich architrawy miały dominujące znaczenie, a to dlatego, że belki drewniane, jako ulegające gniciu, nie nadawały się do budowy monumentalnych gmachów, żelazo zaś oraz inne sposoby budowania przykryć nie były jeszcze w użyciu.

Architraw, jak każda belka, podlegająca zginaniu

pracuje na ściskanie w warstwach górnych i na rozciąganie w warstwach dolnych. Kamienie, jak wiadomo, na rozciąganie pracować nie powinny, gdyż wytrzymałość ich na ten rodzaj pracy stanowi ósmą, a niekiedy dziesiątą część wytrzymałości na ściskanie. Dlatego też przykrycie architrawem jest technicznie biorąc nieuzasadnione.

Przy dużej rozpiętości przykrycia belki kamienne muszą być odpowiednio grube, a jako takie mogą posiadać pęknięcia wewnętrzne albo skazy, które stanowczo nie powinny mieć miejsca w ważnych konstrukcyjnie częściach budowli. Kamienie w tego rodzaju przykryciach powinny być tak ułożone, aby podlegały nie zginaniu, ale wyłącznie tylko siłom ściskającym.

Taki układ jest w łukach i sklepieniach, które są systematami ułożone z kliniasto ociosanych kamieni, utrzymujących się w równowadze dzięki wzajemnemu na siebie parciu /Rys. 158/. Przy takim rozmieszczeniu kamieni i kształcie, zarówno kliny ABC , jak i $A'B'C'$ ciążąc w dół, pod wpływem ciężaru własnego i obciążenia zewnętrznego, cisną na kliny sąsiednie i rozsuwają je, o ile jednak kamienie są dostatecznie wytrzymałe na ściskanie, a opory M i M_1 - nieruchome, to ciśnienie na kliny nie wywołuje ani przesunięcia ani zgniecenia,

cały zaś systemat pozostaje w równowadze.

Jeżeli tego rodzaju systemat przykrywa powierzchnie między ścianami, albo słupami, tworzącymi wielobok, wówczas powstaje sklepienie; przykrycie otworu w ścianie albo przestrzeni między słupami nazywa się łukiem. Można dać takie jeszcze określenie: łuk /podłęczce/ jest to sklepienie o długości równej grubości ściany.

Za twórców sklepień uważani są rzymianie, mianowicie pierwsi chrześcijanie; w Grecji długo opierano się ich zastosowaniu, ale stopniowo i tam weszły one w powszechne użycie. W każdym razie Rzym, a później Włochy dały największą ilość rodzajów sklepień, które rozpatrywać będziemy w niniejszej części kursu.

Uważając łuk jako ciało geometryczne, rozróżniamy w nim następujące powierzchnie /Rys. 159/:

Płaszczyznę $acbfed$ - czyli t. zw. czoło łuku.

Powierzchnię $bcaac'$, która nosi nazwę powierzchni wewnętrznej albo podniebienia łuku.

Linia acb jest krawędzią podnieb

Powierzchnię def nazywają powierzchnią zewnętrzną albo grzbietem, zaś krzywą, w szczególnych wypadkach pro-

stą *def* — krawędzią grzbietową
Linję *acb*, a czasami *def* nazywają głównymi
linjami lub obwodnicami.

Rzut poziomy prostej, łączącej punkty początkowe
a i *b* obwodnicy wewnętrznej, nazywa się rozpięto-
ścią łuku; jeżeli linja *ab* jest pozioma, wówczas
rozpiętość równa się odcinkowi *ab*.

Linja *cc'* jest szczytem łuku, *cc* — jego
strzałką.

Płaszczyzna *daa'* od strony lewej i odpowia-
dająca jej od strony prawej *bb'*, czyli płaszczyz-
ny oporowe, noszą nazwę węzłowi łuku.

Poszczególne kamienie zwą się klinami, najniższy
z nich wsporą, albo nóżką, najwyższy — zwornikiem.

Szwy prostopadłe do czoła nazywają się wsporne,
równoległe doń — przyczelne. Przestrzenie o przekroju
trójkątnym, pomiędzy grzbietem a ścianą, zwą się pach-
winami albo pachami łuku.

Osią nazywamy linję, przechodzącą przez środek
rozpiętości, wzdłuż której przesuwają się punkty środkowy
obwodnicy wewnętrznej, tworząc podniebienie łuku, lub
sklepienia. Oś może być prostą lub krzywą, poziomą lub
pochyłą.

Obwodnica wewnętrzna może być półkolem, albo od-

cinkiem koła, elipsy, paraboli, hyperboli i innych krzywych. Jeżeli obwodnica składa się z odcinków o różnych promieniach, wówczas wykreślona w ten sposób krzywa nazywa się koszową. Takie krzywe mogą posiadać odcinki o trzech, pięciu, siedmiu i więcej promieniach krzywizny.

Czasami obwodnica bywa linią prostą; powstają wówczas tak zwane łuki płaskie /Rys. 160 i 161/.

W zależności od kształtu krzywej wewnętrznej, stanowiącej niewątpliwie główną krawędź łuku, rozróżniamy łuki: koliste, eliptyczne, koszowe i t.d.

Jeżeli strzałka e równa się połowie rozpiętości l t.j. $e = \frac{l}{2}$, wówczas mamy łuk półkolisty

M /Rys. 162/

Przy $e < \frac{l}{2}$ powstaje łuk spłaszczony N ,
przy $e > \frac{l}{2}$ — łuk podwyższony R , lub odcinkowy.
Łuki podwyższone o znacznej różnicy pomiędzy e i $\frac{l}{2}$
/ $e = 5l$ /nazywają się gotyckimi.

Łuk S — koszowy /kolebkowy/, łuk A — pełzający, B — Tudor, C — maurytański, D — pierścieniowy.

Pozatem /rys. 163/ jeżeli oś jest: poziomą i prostopadłą do czoła powstaje łuk prosty /I/, poziomą ale ukośną — łuk ukośny /II/, pochyłą i prostopadłą —

łuk wspięty /III/, pochyłą i ukośną - łuk wspięty i ukośny /IV/.

Przytoczone nazwy stosują się również do sklepień, mówimy przeto o sklepieniach, że są półkolistę, podwyższone, eliptyczne, wspięte i inne.

Jeżeli sklepienie jest tylko wydłużonym łukiem, t.j. gdy podniebienie stanowi powierzchnię walcową /cyłindryczną/, wówczas takie sklepienie nazywamy kolebczastem albo beczkowem. Sklepienia te są jednocześnie prostemi w odróżnieniu od złożonych, utworzonych z kilku odcinków łuków lub sklepień.

Rozróżniamy wiele odmian sklepień złożonych, a mianowicie sklepienia krzyżowe, klasztorne, żaglowe, zwierciadlane, wachlarzowe, kopulaste i inne.

§ 50. Sklepienia kolebczaste. Jak mówiliśmy wyżej sklepienia te mogą być różnych kształtów w zależności od wewnętrznej krzywej tworzącej czyli obwodnicy; co się zaś tyczy krzywej zewnętrznej, to może ona być równoległą do wewnętrznej, albo posiadać inną zgoła formę, albo nawet przechodzić w spoiny układanego nad sklepieniem muru.

W każdym razie statyczność sklepienia zależy od przekazywanych wzajemnie przez kliny sił ciskających, których działanie i kierunek określa się w następują-

cy sposób. /Rys. 164/. Przypuśćmy, że łuk $ABCDEF$ jest w równowadze, w takim razie statyczność jego polega na tem, że połowa $BCDE$, opuszczając się w dół pod wpływem ciężaru własnego i obciążeń dodatkowych, naciska na część łuku $ABEF$, utrzymując ją przez to w stanie nieruchomym. Oczywiście, że taka sama siła cisnąca, lecz skierowana odwrotnie, bo od strony $ABEF$, równoważy działanie łuku $BCDE$. Ciśnienia, z jakimi oddziałują na siebie wzajemnie obie połowy łuku w płaszczyźnie BE , stopniowo zostają przekazane za pośrednictwem klinów wężglowiom AF i DC .

Jeżeli łuk jest symetryczny, wówczas ciśnienia przekazywane przez jedną część /połowę/ łuku drugiej są jednakowe.

Chcąc określić ich wielkość i kierunek działania rozpatrzmy lewą połowę łuku t.j. $ABEF$, usuwając prawą $BCDE$; dla zachowania równowagi, wpływ odrzuconej części musimy zastąpić poziomą siłą

Q , równą co do wielkości parciu części $BCDE$. Tę siłę Q , równoważną działaniu prawej połowy, nazywamy rozpoorem łuku.

Równowaga $ABEF$ będzie trwale zachowana, o ile pod działaniem ciężaru własnego P , skierowa-

nego pionowo, nie nastąpi obrót tej bryły około osi poziomej, prostopadłej do płaszczyzny rysunku, na której os ta znaczy ślad F .

Równanie momentów przybiera następującą postać:

$$QH = P \cdot x, \text{ gdzie } H - \text{odległość punktu za-} \\ \text{czepienia siły } Q, - \text{ zaś } x - \text{ramię siły } P \text{ wzglę-} \\ \text{dem krawędzi } F. \text{ Skąd } Q = \frac{P \cdot x}{H}$$

Uważając siły P i Q za składowe, łatwo otrzy-
mać wypadkową R , a następnie dzieląc łuk na poszcze-
gólne kliny, znaleźć warunki równowagi dla każdego z
nich. /Rys. 165/.

Naprzykład, dla połowy łuku, składającej się z
pięciu kamieni, rozpór Q wyniesie na mocy poprzed-
nich danych $Q = \frac{\sum p \cdot x}{H}$, gdzie $\sum p$ jest
sumą obciążeń wszystkich kamieni, a x — ramieniem
wypadkowej względem krawędzi oporowej.

Rozpór Q wraz z ciężarem górnego kamienia p
dają wypadkową Q' , ta zaś z ciężarem drugiego ka-
mienia p_1 tworzą wypadkową Q'' i t.d.

W rezultacie wypadkowa Q^F określa całkowite
parcie połowy łuku, przekazywane oporze /węzłowi/,
a krzywa, owijająca siły $Q, Q', Q'' \dots$ wyznacza
kierunek ogólny przekazywanych przez kamienie ciśnień
i nosi nazwę krzywej ciśnień danego łuku.

Należy zaznaczyć, że punkt wyjścia rozporu Q , t.j. punkt krzywej położony najwyżej, nie może być znaleziony dokładnie. przy obliczeniach zakładamy go zwykle na odległości, wynoszącej trzecią część grubości zwornika od górnej jego krawędzi.

Analizując równanie $Q = \frac{P \cdot x}{H}$ dla łuków: podwyższonego, półkolistego i spłaszczonego /Rys. 166/, łatwo zauważyć, że przy jednakowym P , czyli ciężarze łuku i jednakowym jego przełocie, ułamki $\frac{x}{H}$, $\frac{x'}{H'}$, $\frac{x''}{H''}$ są w takim stosunku: $\frac{x}{H} < \frac{x'}{H'} < \frac{x''}{H''}$ skąd wnioskujemy, że rozpór Q jest najmniejszy przy łuku podwyższonym, a największym przy spłaszczonym. Z powyższego wynika, że grubość łuku podwyższonego jest również najmniejsza, półkolistego - średnia, a spłaszczonego największa.

Kierunek ostatniego elementu krzywej ciśnień może być poziomy dla łuków podwyższonego i półkolistego, lecz pochyły dla spłaszczonego.

Ponieważ wypadkowa Q , Q' , Q'' wzrasta w miarę zbliżania się ku węzłowi łuku, przeto grubość klinów winna się także stopniowo zwiększać.

W małych łukach, gdzie różnica pomiędzy pierwszą wypadkową Q , a ostatnią Q_n nie jest znaczna, nadajemy zwykle klinom jednakowe rozmiary, przystosowane

do największego naprężenia ściskającego t.j. do σ_n ;
w wielkich łukach grubość kamieni zwiększamy stopniowo
lub też dzielimy łuk na części i każdą z nich buduje-
my z kamieni jednakowej grubości, w taki jednak spo-
sób, by wzrastała ona w kierunku od zwrotnika ku węż-
głowi. /Rys. 167 i 168/.

Pierwszy sposób najczęściej jest stosowany w łu-
kach betonowych, albo z kamienia ciosanego, drugi -
w łukach z cegły.

Dla racjonalnej pracy klinów, krzywa ciśnień win-
na się znajdować w rdzeniu łuku t.j. w środkowej trze-
ciej jego części. x/

x/ Ze statyki budowli wiadomo, że jeżeli siła P /Rys.
169/ działa wzdłuż linii, przechodzącej przez środek
przekroju /punkt ten jest także środkiem ciężkości/,
to naprężenie ciąża $ABDC$ jest jednostajne; je-
żeli zaś $Am = 2mC$ t.j. $Am = \frac{1}{3} AC$, wówczas
włókna leżące wzdłuż AB są naprężone dwa razy sil-
niej, niż to miało miejsce przy naprężeniu jednostajnem,
zaś włókna CD nie są wtedy ani ściskane, ani roz-
ciągane.

Przy $Am < \frac{1}{3} AC$ ściskanie przy AB zwię-
kszy się, a przy CD przybierze wartości ujemne,
czyli przejdzie w rozciąganie

Dlatego wykreślając tę krzywą nadajemy klinom taką grubość, aby krzywa nie wykraczała poza granice rdzenia. W takich razach często zachodzi potrzeba zmiany konturu zewnętrznej i wewnętrznej obwodnic, przyczem tej ostatniej dajemy wówczas kształt zbliżony do krzywej ciśnień, w ten sposób krzywe: wewnętrzna /obwodnica/ i ciśnień, są prawie równoległe. To, jak będzie wyjaśnione niżej, ułatwia podział łuku na oddzielne kliny.

Warunek, aby krzywa ciśnień znajdowała się w środku części łuku, jest wywołany chęcią uniknięcia sił rozciągających, któreby powstały w razie zbliżenia się krzywej ciśnień do którejkolwiek z obwodnic. Przykłady powierania się łuków przy zbliżeniu krzywej ciśnień do zewnętrznej lub wewnętrznej obwodnicy podane są na rysunku 170.

Wskutek niejednostajnego obciążenia, jakiemu nieraz całe sklepienie podlega, zachodzi potrzeba wzmocnienia niektórych jego części przez wprowadzenie częściowego zgrubienia, czyli tak zwanego podłącza /zobra/ wewnętrznego P , lub zewnętrznego H /Rys. 171/.

Niekiedy łuki wymaganego kształtu i rozmiarów nie są w stanie utrzymać leżącego nad nimi ciężaru, np. na wzorze /Rys. 172/ szerokość pionowego słupa nie pozwalała na zwiększenie grubości podtrzymywanych przez nie-

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 małymi.

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

Takie dodatkowe łuki nazywamy odciążającymi.

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

§ 51. Sklepienia krzyżowe i klasztorne. Aby wyjaśnić powstawanie sklepień złożonych, rozpatrzmy przede wszystkim przecięcie się wzajemne dwóch cylindrów A i B /Rys. 175/ pod kątem prostym. Rozważane powierzchnie przecinając się mogą utworzyć 2 rodzaje sklepień, a mianowicie: 1/ dwa odcinki walca A i dwa odcinki