

C z ę ś ć p i ą t a

MOSTY ŁUKOWE I WISZĄCE

Rozdział I

MOSTY ŁUKOWE

1. Charakterystyka mostów łukowych

Mosty łukowe pod względem konstrukcji podparcia dźwigarów na podporach mogą być: bezprzegubowe, dwuprzegubowe i trójpzigubowe. Dźwigary zarówno dwuprzegubowe, jak i trójpzigubowe, mogą być zaopatrzone we wsporniki.

Mosty bezprzegubowe stalowe o słupach płaskich, co zazwyczaj spotykamy w sklepieniach kamiennych, nie mają racji bytu, gdyż dźwigary o takim układzie są statycznie niewyznaczalne. Nie można ich w żadnym razie rozpatrywać jako łuki o stopach utwierdzonych i pod względem sił zewnętrznych trzykrotnie statycznie niewyznaczalnych. Aby stopy łuków były rzeczywiście umocowane, należałoby łuki takie zapuszczać w głąb podpór kamiennych i odpowiednio je zamurować.

Takie ustroje były w mostach dawniej budowanych, w których dźwigary wykonywano z żeliwa w postaci szeregu skrzyń, tworzących poniekąd kłince sklepień, otwarte u dołu; u góry miały one przykrycie dna z nadmurówką, jak na zwykłych sklepieniach kamiennych. Dźwigary łuków zapuszczone były w przyczółki kamienne na głębokość do dwóch metrów. Mosty te nie wymagały kosztownej konstrukcji ze względu na materiał żeliwny, który mało podlegał rdzewieniu. Należały one jednak do mostów ciężkich, choć były nieco lżejsze od mostów kamiennych.

Przy przebudowie takich mostów pocztawiono sam ustrój dźwigarów w postaci sklepienia, lecz dodano w stopach przeguby. Wprowadzenie przegubów odpowiadało rzeczywistej pracy dźwigarów, gdyż połączenie skrzyń zapuszczanych w przyczółki ze skrzyniami stopowymi niezupełnie zabezpieczało stopy przed ich rozwarciem; dlatego nie były to łuki całkowicie bezprzegubowe w sensie statycznym. Ponieważ zasadą jest, że obliczenie powinno odpowiadać konstrukcji, przeto obliczenie takiej nieokreślonej konstrukcji napotyka na duże trudności.

Nawet mosty łukowe bezprzegubowe o znacznych rozpiętościach, jak np. most pokazany na rys. 583, mają stopy zakotwione, gdyż w stopach powstaje znaczne rozciąganie. W tego rodzaju moście umocowanie stóp umożliw

wia zmontowanie konstrukcji na miejscu budowy bez rusztowań.

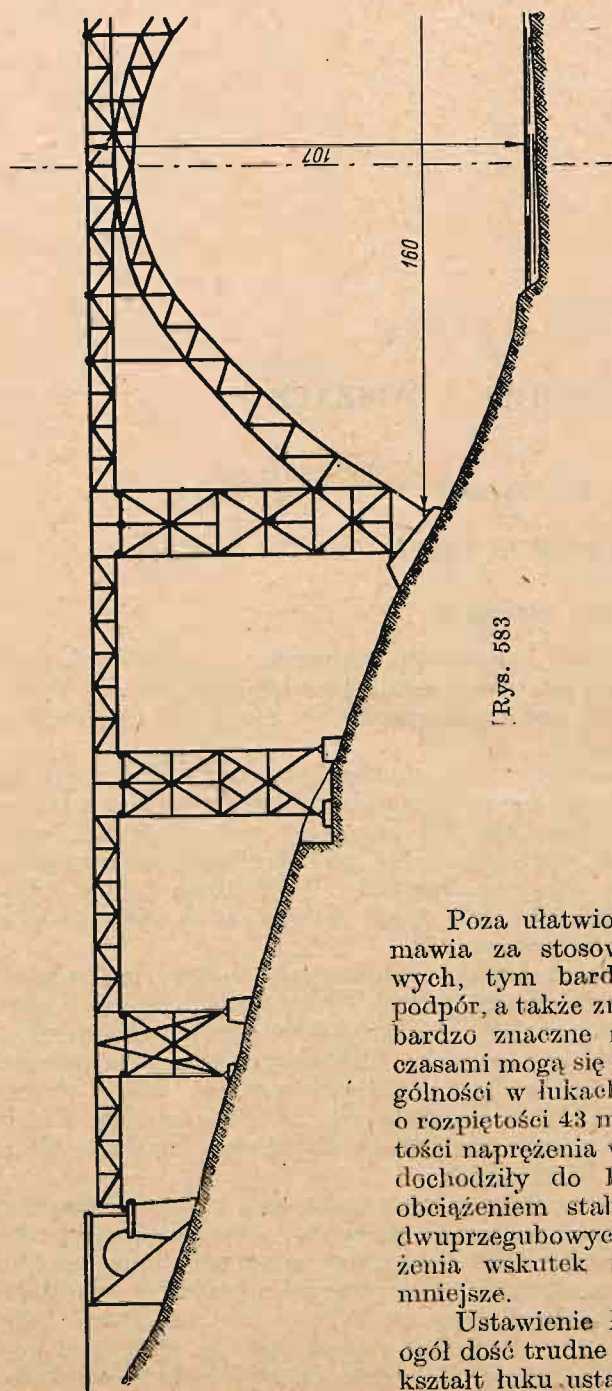
Względy łatwego montowania z uwagi na trudne warunki terenowe mogą oczywiście odegrać czasem decydującą rolę w wyborze systemu mostu. Zresztą przy stopach zakotwionych można przyjąć taki układ za trzykrotnie statycznie niewyznaczalny, jeżeli pominać wydłużenie kotew utwierdzenia przy ich rozciąganiu.

Mosty dwuprzegubowe przy odpowiednim dodatkowym założeniu podpór również mogą być montowane bez rusztowań.

Stosowanie kotew w przyczółkach lub w filarach związane jest ze znacznymi kosztami, a co najważniejsze z możliwością rdzewienia kotew stalowych, znajdujących się często niżej poziomu ziemi i niżej poziomu wód gruntowych lub rzecznych.

Poza ułatwionym montażem nie przemawia za stosowaniem łuków bezprzegubowych, tym bardziej, że niewielka niestalość podpór, a także zmiany temperatury powodują bardzo znaczne naprężenia dodatkowe, które czasami mogą się okazać niebezpieczne, w szczególności w łukach płaskich. Tak np. w moście o rozpiętości 43 m i strzałce równej $1/17$ rozpiętości naprężenia wskutek zmiany temperatury dochodziły do $1/3$ naprężeń powodowanych obciążeniem stałym i ruchomym. W łukach dwuprzegubowych tego samego kształtu naprężenia wskutek temperatury są $4 \div 5$ razy mniejsze.

Ustawienie łuków na podporach jest na ogół dość trudne i wymaga dużej ścisłości, aby kształt łuku ustawionego przy danej temperaturze miał odpowiednią strzałkę, gdyż nawet



niewielkie uchybienia powodują znaczne dodatkowe naprężenia, które w zasadzie nie są brane pod uwagę.

W mostach bezprzegubowych ustawienie łuków na podporach wymaga znacznie większej dokładności niż w mostach dwuprzegubowych, a tym bardziej w mostach trójpzigubowych, które na nieścisłość ustawiania łuków są mniej wrażliwe.

Z przytoczonych względów pomijamy omówienie szczegółów dotyczących mostów łukowych bezprzegubowych i rozpatrzymy tylko mosty łukowe dwuprzegubowe i trójpzigubowe.

Mosty trójpzigubowe należy stosować wówczas, gdy grunt, na którym stawiamy podpory mostu, nie zapewnia stałości podpór.

W mostach dwuprzegubowych z jazdą górą rozpatrzymy łuki o ścianie pełnej. Połączenie łuków z belkami podłużnymi w poziomie jezdni stosowane jest za pomocą słupków. Łączenie tych belek za pomocą kraty zastrzałowej lub prostokątnej należy stosować oględnie, zwłaszcza jeżeli chodzi o wygląd estetyczny mostu. Mosty łukowe o ścianie pełnej ze słupkami pionowymi są znacznie ładniejsze dla oka niż mosty łukowe kratowe, choć ostatnie są nieco lżejsze.

Rozpiętość łuków o ścianie pełnej ze słupkami waha się w dość szerokich granicach. Przy niewielkich rozpiętościach $20 \div 50$, a nawet do 100 metrów, należy w zasadzie stosować łuki o ścianie pełnej.

Należy zwrócić uwagę, że podawane tutaj dane, dotyczące tych lub innych układów, nie są dogmatyczne, lecz tylko orientacyjne, i wskazują jedynie, że właśnie dotychczas stosowano różne normy. Nie oznacza to, że poza ustalone normy nie należy wychodzić. Przeciwnie, nie tylko można, ale czasem należy je przekraczać poza ustalone normy, jeżeli warunki miejscowe do tego zmuszają lub jeżeli budowa będzie celowa, stateczna i estetyczna.

Najczęściej używany stosunek strzałki łuku do jego rozpiętości mieści się w granicach $\frac{f}{l} = \frac{1}{6}$ do $\frac{1}{12}$, choć nie wyłącza się stosunków $\frac{1}{2,5}$ i $\frac{1}{17}$. W szeregu wybudowanych mostach łukowych stosunek strzałki łuku do rozpiętości wynosi $\frac{1}{17}$.

Na dobrym gruncie można by doprowadzić stosunek $\frac{f}{l}$ do $1 : 20$, lecz nie należy zmniejszać go więcej. Łuki o niewielkiej strzałce sprawiają dobre wrażenie dla oka i są sztywne, lecz drogie, gdyż wymagają silnych, a przeto kosztownych podpór.

Na gruntach skalistych podpory mogą być mniej kosztowne i dlatego mosty łukowe można i należy stosować w tych warunkach.

W miejscowościach nizinnych z niewysokimi brzegami zarówno ze względów estetycznych, jak i z powodu warunków miejscowych należy stosować łuki bardziej płaskie, w miejscowościach górzystych odpowiednie są łuki strzeliste, jako lepiej dopasowane do charakteru krajobrazu.

2. Obliczanie mostów łukowych o ścianie pełnej

Mosty łukowe dwuprzegubowe pod względem sił zewnętrznych należą do układów jednokrotnie statycznie niewyznaczalnych. Za niewiadomą przyjmujemy zwykle składową poziomą reakcję podpór, którą znajdujemy z rozważania odkształceń łuku.

Wprowadzamy następujące oznaczenia (rys. 584).

R_A i R_B — pionowe składowe reakcji podpór,

H — pozioma składowa reakcji podpór, czyli tak zwany rozpór,

l — rozpiętość teoretyczna łuku, czyli odległość pomiędzy środkami przegubów stopowych,

f — strzałka łuku,

a — odległość siły $P = 1$ od lewej podpory,

y — rzędna łuku przy odciętej x_1 ,

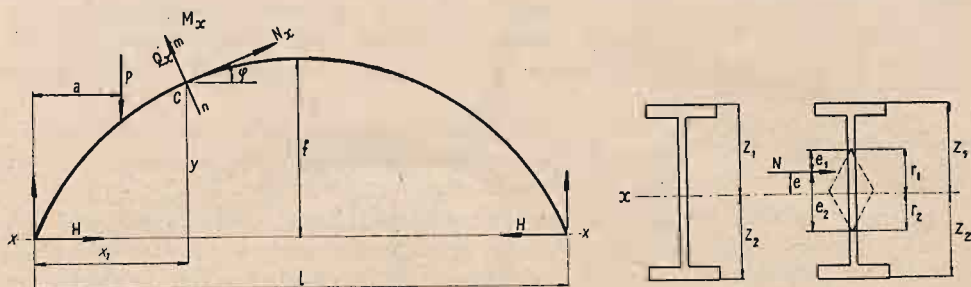
M — moment gnący w przekroju (x_1y) ,

N_x — siła osiowa i Q_x — siła poprzeczna w przekroju (x_1y) ,

F — pole przekroju łuku stałe na całej jego długości,

I — moment bezwładności przekroju łuku,

φ — kąt pomiędzy styczną do osi łuku w punkcie (x_1y) i osią $X-X$.



Rys. 584

W każdym przekroju łuku poza przegubami działają siły normalne (które łuk ściskają lub też rozciągają, co zachodzi również przy obniżeniu się temperatury) oraz siły poprzeczne i momenty gnące.

Z rzutów wszystkich sił, działających na odcinek AC , na normalną CN otrzymujemy siłę osiową N_x i siłę poprzeczną Q_x .

$$N_x = (R_A - P) \sin \varphi + H \cos \varphi; Q_x = (R_A - P) \cos \varphi - H \sin \varphi.$$

Moment gnący w przekroju $m-n$ jest $M_x = R_A x - P(x-a) - H_y$.

Największy wpływ na odkształcenie łuku mają momenty gnące i siły normalne (osiowe), siły zaś poprzeczne bardzo mało wpływają na odkształcenie łuku; pomijamy dlatego przy obliczeniu energii sprężystej siły poprzeczne.

Energia sprężysta dla całego łuku wyraża się wzorem:

$$T = \int_0^s \frac{M_x^2 ds}{2EI} + \int_0^s \frac{N_x^2 ds}{2EF}$$

Pochodna od T , względem siły H , jak wiadomo, daje przesunięcie rozporu H , które oznaczamy przez Δl :

$$\frac{dT}{dH} = - \Delta l = \int_0^s \frac{M_x}{EI} \frac{dM_x}{dH} ds + \int_0^s \frac{N_x}{EF} \frac{dN_x}{dH} ds$$

Z równania tego otrzymamy:

$$H = \frac{-EI \Delta l + \int_0^s M_0 y ds - \frac{I}{F} \int_0^s Q_0 \cos \varphi \sin \varphi ds}{\frac{I}{F} \int_0^s \cos^2 \varphi ds + \int_0^s y^2 ds},$$

gdyż

$$\frac{dN_x}{dH} = \cos \varphi; \quad \frac{dM_x}{dH} = -y; \quad M_x = M_0 - Hy$$

$$\text{ i } N_x = Q_0 \sin \varphi + H \cos \varphi,$$

przy czym M_0 i Q_0 oznaczają momenty gnące i siły poprzeczne w belce prostej swobodnie podpartej na dwóch podporach o rozpiętości l i obciążonej siłą P .

Jeżeli mamy do czynienia z łukami płaskimi, to możemy założyć, że $ds = dx$; $\cos \varphi = 1$; $\sin \varphi = 0$, gdzie s — długość łuku równa się l — rozpiętości teoretycznej łuku.

Jeżeli założymy, że łuk jest paraboliczny według równania

$y' = \frac{4f}{l^2} x(l-x)$ [i że podpory są stałe, tj. że $\Delta l = 0$, to po przeprowadzeniu całkowania w granicach od zera do a i od zera do $l-a$, otrzymamy:

$$\int_0^l y^2 dx = \frac{8}{15} f^2 l; \quad \int_0^l M_0 y dx = \frac{1}{3} Pa (l-a) \left(1 + \frac{a}{l} - \frac{a^2}{l^2}\right)$$

$$H = \frac{5a(l-a) \left[1 + \frac{a}{l} - \left(\frac{a}{l}\right)^2\right] P}{8f l \left(1 + \frac{15}{8} \cdot \frac{I}{8f^2 F}\right)}.$$

Za pomocą tego wzoru możemy znaleźć rozpór H od siły $P = 1$, zaczepionej w odległości a od podpory A oraz obliczyć H przy różnych odległościach a i tym sposobem mieć liczby wpływu, a następnie i linię wpływu rozporu H .

Przy wprowadzeniu wzoru dla rozporu H założyliśmy, że przekrój łuku i moment bezwładności są wielkościami stałymi.

Gdybyśmy mieli łuki o przekrojach zmiennych, wtedy należałoby łuk podzielić na odcinki o jednakowych przekrojach i w granicach jednakowych przekrojów i momentów bezwładności całkować wzór ogólny, jeżeli krzywa zastosowana do łuku pozwalałaby na proste całkowanie.

W praktyce nie jest to jednak konieczne. Zamiast całkowania możemy zastosować sumowanie za pomocą wzorów Cotesa lub Simpsona, lub wreszcie zwykłe sumowanie; otrzymane rezultaty są najzupełniej wystarczające dla ścisłości otrzymanych wielkości rozporu.

Jeżeli łuki są paraboliczne i dość płaskie, to przy wyżej wskazanych założeniach wzór na rozpór otrzyma postać:

$$H = \frac{\int_0^l M_0 y dx}{\frac{I}{F} \int_0^l dx + \int_0^l y^2 dx} = \frac{\int_0^l M_0 y dx}{i^2 l + \int_0^l y^2 dx},$$

przy czym i jest to promień bezwładności przekroju. Wielkość $i^2 l$ jest bardzo mała w porównaniu z wielkością $\int_0^l y^2 dx$ i dlatego może być pominięta i wtedy:

$$H = \frac{\int_0^l M_0 y dx}{\int_0^l y^2 dx} \quad [1]$$

Przy obciążeniu równomiernym p , rozłożonym na całej długości łuku, mamy

$$M_0 = \frac{1}{2} p x (l - x); \quad y = \frac{4f}{l^2} x (l - x) = \frac{8f}{pl^2} M_0,$$

stąd

$$M_0 = \frac{pl^2}{8f} y.$$

Jeżeli tę wartość wstawimy do wzoru (1), to otrzymamy:

$$H = \frac{\frac{pl^2}{8f} \int_0^l y^2 dx}{\int_0^l y^2 dx} = \frac{pl^2}{8f},$$

tj. w dwuprzegubowych łukach parabolicznych płaskich i przynajmniej w pierwszym przybliżeniu możemy przyjąć rozpór jak w łuku trójprzegubowym.

Zastąpienie całek sumami daje wzór ogólny przy przekrojach i momentach bezwładności zmiennych w następującej postaci:

$$H = \frac{\sum \frac{M_0 y \Delta s}{I} - \sum \frac{Q_0 \cos \varphi \sin \varphi \Delta s}{F}}{\sum \frac{y^2 \Delta s}{I} + \sum \frac{\cos^2 \varphi \Delta s}{F}}.$$

We wzorze tym wielkości M_0 , y , Q_0 , $\cos \varphi$, $\sin \varphi$, I , F należy brać średnie dla danego odcinka łuku, tj. wielkości na początku i końcu odcinka i sumy ich dzielić przez dwa.

Mając rozpór przy dowolnym położeniu siły P nie trudno znaleźć moment zginający i siły normalne w dowolnym przekroju łuku.

Ponieważ do obliczenia rozporu musimy mieć przekroje i momenty bezwładności łuku, przeto możemy obliczyć również i naprężenia w każdym przekroju od siły $P = 1$; stąd łatwo obliczyć liczby wpływu naprężeń, a zatem i linie wpływu naprężeń.

Ponieważ mamy do czynienia z naprężeniami złożonymi od momentu gnącego i od siły normalnej, przeto naprężenia będą dwojakie, inne w górnych włóknach przekroju łuku i inne w dolnych, a mianowicie:

$$\sigma_g = -\frac{Mz_1}{I} - \frac{N}{F} \quad \text{i} \quad \sigma_g = +\frac{Mz_1}{I} - \frac{N}{F};$$

$$\sigma_d = +\frac{Mz_1}{I} - \frac{N}{F} \quad \text{i} \quad \sigma_d = -\frac{Mz_1}{I} - \frac{N}{F};$$

znakiem minus oznaczamy ściskanie, znakiem plus rozciąganie. Otrzymamy zatem dwie linie wpływu naprężeń:

- 1) linię wpływu naprężeń w górnych włóknach przekroju łuku i
- 2) linię wpływu naprężeń w dolnych włóknach przekroju łuku.

Zamiast obliczenia naprężeń według linii wpływu naprężeń dla górnych i dolnych włókien przekroju łuku można obliczać naprężenia w przekrojach łuku według linii wpływu momentów względem skrajnych punktów rdzenia przekroju łuku.

Wprowadzimy następujące oznaczenia:

- z_1, z_2 — odległości skrajnych punktów przekroju od osi obojętnej,
 r_1, r_2 — odległości skrajnych punktów rdzenia od tejże osi obojętnej,
 e — odległości siły normalnej od osi obojętnej, czyli ramię momentu zginającego działającego w danym przekroju,
 e_1, e_2 — odległości siły normalnej od skrajnych punktów rdzenia,
 $i^2 = \frac{I}{F}$ — promień bezwładności przekroju łuku.

Wzory wyrażające naprężenia można przekształcić następująco:

$$\sigma_g = -\frac{Mz_1}{I} - \frac{N}{F} = -\frac{Nez_1}{I} - \frac{N}{F} = -\frac{N}{I}(ez_1 + i^2);$$

ponieważ $i^2 = r_2 z_1 = r_1 z_2$,

$$\text{to } \sigma_g = -\frac{N}{I}(ez_1 + r_2 z_1) = -\frac{Nz_1}{I}(e + r_2) = -\frac{Ne_2 z_1}{I} = -\frac{M_2 z_1}{I},$$

gdzie M_2 jest momentem zginającym względem dolnej granicy rdzenia przekroju łuku i

$$\sigma_d = \frac{Mz_2}{I} - \frac{N}{F} = \frac{N}{I}(ez_2 - i^2) = \frac{N}{I}(ez_2 - r_1 z_2) = \frac{Ne_1 z_2}{I} = \frac{M_1 z_2}{I},$$

gdzie M_1 jest momentem zginającym względem górnej granicy rdzenia przekroju łuku.

W ten sposób linie wpływu największych naprężeń w przekrojach łuku można obliczyć na podstawie momentów zginających, określanych nie względem osi łuku, lecz względem linii granicznych rdzenia przekrojów łuku. Dla naprężeń w górnych włóknach przekrojów określa się momenty zginające względem dolnej granicy i dla dolnych włókien przekrojów względem górnej granicy rdzenia tych przekrojów.

Oba powyższe sposoby dają jednakowe rezultaty. Drugi sposób obliczenia wymaga jednak ścisłego wyliczenia granic rdzeni przekrojów łuku, lepiej więc stosować pierwszy sposób obliczenia, gdyż w łukach płaskich często wypadają bardzo nieznaczne różnice w odciętych dla granic rdzenia, co może spowodować nieścisłości w liczbach wpływu naprężeń.

3. Wpływ temperatury na łuki

Przy zmianie temperatury długość łuku się zmienia. Ponieważ jednak na podporach łuk może wykonywać tylko obroty bez przesunięć, przeto w zworniku łuk się podnosi lub opuszcza.

Jeżeli założymy, że na łuk nie działają siły pionowe, a tylko działa zmiana temperatury, to otrzymamy następujące wyrażenia dla momentu gnącego i siły normalnej w łuku:

$$M_x = -Hy \text{ i } N_x = H \cos \varphi.$$

Jeżeli wstawimy te wyrażenia do pochodnej energii sprężystej względem siły H , to otrzymamy przesunięcie, które nastąpiłoby, gdyby łuk mógł się swobodnie przesuwąć w jednym końcu na wielkość $\alpha l t$ pod działaniem siły H , wywołanej zmianą temperatury. Przesunięcie to byłoby zawsze skierowane w stronę przeciwną działaniu siły H , przeto $\frac{dT}{dH} = \pm \alpha l t$, gdzie:

gdzie: α — jest współczynnikiem rozszerzalności liniowej materiału łuku,
 l — rozpiętość łuku,
 t — zmiana temperatury.

Na podstawie powyższego otrzymujemy ze wzoru ogólnego, że

$$H = \pm \frac{EI \alpha l t}{\frac{I}{F} \int_0^s \cos^2 \varphi ds + \int_0^s y^2 ds}.$$

Jeżeli temperatura wzrasta otrzymujemy rozpór dodatni, łuk stara się rozsunąć podpory, a nie mogąc tego uczynić podnosi się, czyli wygina się więcej do góry, co powoduje jego ściskanie.

Jeżeli temperatura się obniża, łuk się kureczy i stara się zbliżyć podpory. Ponieważ jednak te ostatnie są stałe, przeto łuk pod działaniem sił pionowych (obciążenie stałe) obniża się, co jest poniekąd równoznaczne z jego rozciąganiem.

Naprężenia od zmiany temperatury będą następujące:
 przy temperaturze wzrastającej

$$\sigma_n = + \frac{Mz_1}{I} - \frac{N}{F}$$

i

$$\sigma_d = - \frac{Mz_2}{I} - \frac{N}{F};$$

przy temperaturze spadającej

$$\sigma_n = - \frac{Mz_1}{I} + \frac{N}{F}$$

i

$$\sigma_d = + \frac{Mz_2}{I} + \frac{N}{F}.$$

Mówiąc o wpływie zmiany temperatury, musimy mieć na względzie następujące założenia: wszystkie obliczenia, jakie przeprowadzamy, jak również i kształt łuku stalowego przyjmujemy przy temperaturze 0°C .

Przy temperaturze 0°C naprężenia od temperatury są równe zeru i zarówno rozpiętość łuku, jak i jego strzałka, mają wymiary teoretyczne, przyjęte w projekcie i obliczeniach.

Montowanie łuku na miejscu może się odbywać przy różnych temperaturach. Bardzo ważną więc sprawą jest temperatura, przy której ostatecznie zmontowane przęsła stawiamy na łożyska. Aby praca łuku odpowiadała założeniom obliczeniowym, niezbędne jest, by kształt łuku w czasie ustawiania go na łożyska odpowiadał temperaturze w czasie ustawiania. W tym celu należy obliczyć przy różnych temperaturach, tak powyżej, jak i poniżej zera, zmiany strzałki f w zworniku i przy ustawianiu nadać łukowi strzałkę $f + \Delta f$ odpowiednio do temperatury.

Jak widać z powyższego, obliczenia statyczne łuku sprowadzają się właściwie do sprawdzenia już z góry przyjętych przekrojów łuku. Odpo-

wiednie założenie wielkości przekrojów łuku ma bardzo ważne znaczenie, gdyż od tego zależy pędsze lub dłuższe zakończenie obliczeń statycznych.

W pierwszym przybliżeniu zawsze można przyjąć przekrój łuku jednokowy na całej długości, co zresztą zachodzi zwykle w mostach o niewielkich rozpiętościach.

Wysokość łuku w zworniku przyjmuje się normalnie od $1/40$ do $1/60$ rozpiętości, a przy dużych rozpiętościach dochodzi nawet do $1/75$ l .

Przekrój łuku i moment bezwładności można otrzymać z założenia, że łuk jest trójprzegubowy, przy czym należy dobierać przekrój łuku, położony w odległości $1/3$ do $1/4$ l od podpory, gdzie zazwyczaj powstają największe momenty zginające, które z reguły decydują o przekroju łuku.

Przekrój otrzymany tą drogą należy zwiększyć nieco, mając na względzie wzrost naprężeń w łuku dwuprzegubowym od zmiany temperatury, przy czym im łuk jest bardziej płaski, tym przekrój powinien być większy. Przekrój należy zwiększyć w granicach od 10% do 15% .

Otrzymany w ten sposób przekrój F łuku i moment jego bezwładności I należy wstawić do wzoru ogólnego, obliczyć rozpór i następnie sprawdzić, czy przyjęty przekrój jest odpowiedni. Jeżeli różnice w naprężeniach wypadają niewielkie i utrzymane są w granicach do $\pm 3\%$, to przekrój można zostawić jako ostateczny, w przeciwnym zaś razie należy dobrać przekroje łuku na nowo i już te wstawiać do wzoru określającego rozpór. Czasami operację powyższą trzeba wykonać dwa lub nawet trzy razy, dopóki nie otrzymamy dobrych rezultatów. Jest to sposób stopniowych przybliżeń, który zwykle stosujemy w obliczeniach statycznych dźwigarów statycznie niewyznaczalnych.

4. Obliczenie dwuprzegubowych łuków kratowych

W łukach kratowych mamy do czynienia z przekrojami prętów. Wprowadzamy następujące oznaczenia:

F_i — przekrój pręta dowolnego,

S_i — siła w tym pręcie od obciążenia $P = 1$ w założeniu, że układ łukowy został zastąpiony przez układ belkowy, tj. jeden z przegubów stopowych został zamieniony na łożysko przegubowo-przesuwne,

l_i — długość tego pręta,

σ_i — siła w pręcie od rozporu $H = 1$ zaczepionego do układu belkowego,

H — rozpór w układzie łukowym od siły zewnętrznej $P = 1$. Siły S_i i σ_i łatwo znajdziemy, gdyż mamy do czynienia z układem statycznie wyznaczalnym.

Przechodząc do układu łukowego, możemy napisać, że siła w dowolnym pręcie będzie równa $S_i + \sigma_i H$.

Energia sprężysta przy odkształceniu tego pręta określi się wielkością

$$T = \frac{(S_i + \sigma_i H)^2 l_i}{2 F_i E}.$$

W całym układzie łuku kratowego dla wszystkich jego prętów energia sprężysta określa się wzorem

$$T = \sum \frac{(S_i + \sigma_i H)^2 l_i}{2 F_i E}.$$

Pochodna od pracy sprężystej względem siły H da przesunięcie tej siły Δl . [Przy podporach stałych $\Delta l = 0$, a więc

$$\frac{dT}{dH} = \sum \frac{(S_i + \sigma_i H) \sigma_i l_i}{EF_i} = 0,$$

stąd

$$H = - \frac{\sum \frac{S_i \sigma_i l_i}{F_i}}{\sum \frac{\sigma_i^2 l_i}{F_i}}; \quad [2]$$

od zmiany temperatury $\Delta l = \pm \alpha l t$

i rozpór
$$H = \pm \frac{\alpha l t E}{\sum \frac{\sigma_i^2 l_i}{F_i}}. \quad [3]$$

Wzory powyższe zawierają, jako niewiadome, przekroje prętów. Przekroje te można dobrać, wychodząc pierwotnie z założenia, że mamy do czynienia z łukiem trójpřzegubowym, przy czym przegub w zworniku stawiamy w odległości $1/3 \div 1/4 h$ od punktu zaczepienia siły pasa górnego; h oznacza wysokość łuku w kluczu, którą można przyjmować jako równą $1/25 \div 1/40$ rozpiętości. W mostach kolejowych należy przyjmować większą wysokość łuku, w mostach zaś drogowych wysokość łuku może być mniejsza.

Zamiast ustalania bezpośrednio przekrojów prętów łuku można wprowadzić stosunek przekroju jednego pręta do wszystkich innych, np. przekroju pasa górnego w kluczu do pozostałych przekrojów łuku.

W mostach łukowych ze ściągiem zwykle przyjmujemy stosunek przekroju ściągu do wszystkich innych przekrojów prętów.

Stosunkami przekrojów prętów łuku należy posilkować się wówczas, gdy mamy jako wzór projekt podobny, już obliczony. Może to dać stosunek przekrojów prętów mało się różniący od stosunku przekrojów prętów łuku projektowanego i w ten sposób przyspieszyć obliczenia. Jeżeli licznik i mianownik wzorów (2) i (3) pomnożymy przez przekrój pręta F_0 , którego stosunek do innych znamy, to otrzymamy wzory:

$$H = \frac{\sum \frac{F_0}{F_i} S_i \sigma_i l_i}{\sum \frac{F_0}{F_i} \sigma_i^2 l_i} \quad \text{i} \quad H = \pm \frac{\alpha l t E F_0}{\sum \frac{F_0}{F_i} \sigma_i^2 l_i}. \quad [4]$$

Jeżeli przekroje prętów dla pierwszego przybliżonego obliczania bierzemy z łuku trójpřzegubowego, to można się zadowolić tylko przekrojami prętów pasów i to nie wszystkimi, lecz podzielić je na kilka serii i dla każdej serii przyjąć średni przekrój.

Kręta mało wpływa na wielkość H i dlatego w pierwszym przybliżeniu można jej wpływ na wielkość H pominąć. W następnych ściślejszych obliczeniach rozporu H należy kręta uwzględniać. Wzory (4) są najogólniejsze i dlatego też można się nimi zawsze posilkować.

Jeżeli mamy do czynienia z łukami ze ściągiem, to należy pamiętać, że dla ściągu siła σ równa się jedności, siła zaś S równa się zeru, gdyż przy określeniu sił S_i założyliśmy, że mamy do czynienia z układem statycznie wyznaczalnym, tj. bez ściągu.

5. Ugięcie łuków

Strzałka ugięcia określa się według ogólnego wzoru, stosowanego i do innych układów, a mianowicie:

$$f_0 = \frac{1}{E} \sum \frac{S_i S_0 l_i}{F_i},$$

jeżeli mamy łuki kratowe i

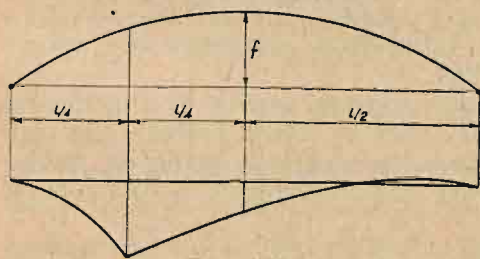
$$f = \frac{1}{E} \sum \frac{M_i M_0 \Delta s_i}{I_i} + \frac{1}{E} \sum \frac{N_i N_0 \Delta s_i}{F_i},$$

jeżeli mamy łuki o ściance pełnej.

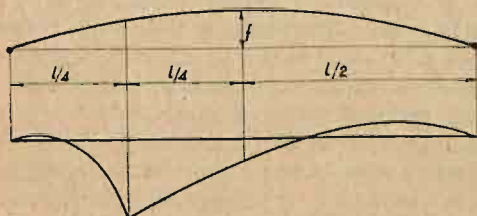
We wzorach tych poszczególne wielkości oznaczają:

- E — współczynnik sprężystości.
- S_i — siła w pręcie od obciążenia, wywołującego największe ugięcie łuku w danym węźle,
- S_0 — siła w prętach łuku od siły $P = 1$ zaczepionej w węźle, w którym szukamy ugięcia. Siła ta zawsze jest skierowana ku dołowi.
- l_i — długość pręta i F_i — jego przekrój,
- M_i — moment zginający (średni) na danym odcinku łuku Δs_i ,
- Δs_i — długość odcinka łuku,
- I_i — moment bezwładności przekroju łuku (średni dla odcinka Δs_i),
- N_i — siła normalna (średnia) w danym odcinku łuku Δs_i ,
- N_0 — siła normalna w danym odcinku od siły $P = 1$, zaczepionej w węźle ugięcia,
- F_i — przekrój łuku na odcinku Δs_i (średni).

Należy zwrócić uwagę, że największe ugięcie łuku zwykle wypada w odległości $1/3$ do $1/4$ rozpiętości od podpory, tj. tam, gdzie panują największe momenty gnące.



Rys. 585



Rys. 586

Aby otrzymać największe ugięcie łuku, należy ustalić liczby wpływu ugięcia dla danego węzła kratownicy i obciążyć łuk najniekorzystniej według linii wpływu ugięcia. Liczby wpływu ugięcia otrzymujemy na podstawie powyższych wzorów, ustawiając kolejno siłę $P = 1$ we wszystkich węzłach.

Kształt linii wpływu ugięcia w odległości $1/4$ rozpiętości od podpory dla łuków wyniosłych pokazany jest na rys. 585, dla łuków płaskich, bardziej sztywnych — na rys. 586.

Największe ugięcie łuku prawie zawsze powstaje przy częściowym obciążeniu rozpiętości łuku.

6. Konstrukcja jezdni w mostach lukowych z jazdą górą

Konstrukcja jezdni w kratowych mostach lukowych z jazdą górą nie czym się nie różni od ich konstrukcji w zwykłych mostach kratowych, co szczegółowo zostało opisane w części III. Obecnie omówimy tylko połączenie belek podłużnych naddźwigarowych z łukami o ścianie pełnej.

W mostach lukowych o ścianie pełnej z jazdą górą lub jak je czasami nazywano w łukach sztywnych, jezdnią wspiera się na słupkach, które podtrzymują belki podłużne nadłukowe (rys. 587).

Słupy te są przeważnie ściskane i połączenia ich z łukami dokonuje się za pomocą blach węzłowych f przynitowanych do kątowników k , które są umocowane do górnej powierzchni pasa lukowego. Długość tych kątowników zależy od liczby nitów, umieszczonych w bokach pionowych w tym celu, aby na te nity, pracujące na ścinanie i docisk, przenieść całą siłę ściskającą słupek. Takie samo połączenie można dać w górnym końcu słupka, gdzie belka podłużna łączy się ze słupkiem (rys. 587).

Niekiedy słupek przynitowuje się bezpośrednio do belki podłużnej nadłukowej (rys. 588). Ma to tę zaletę, że przedłużenie słupka u góry służy jednocześnie do przytwierdzenia belek poprzecznych,

ale dolne kątowniki belki podłużnej muszą być nad słupkami przerwane. Belka podłużna, która jest ciągła, traci nad słupkami na swej sztywności i dlatego pierwszy sposób należy uważać za bardziej racjonalny.

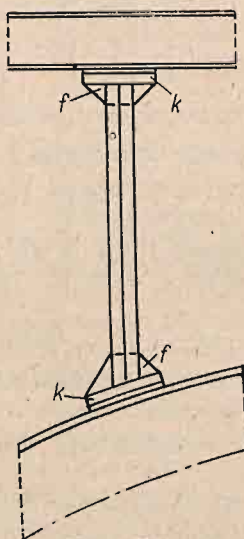
W mostach o małej rozpiętości, gdzie słupki mają niewielkie przekroje, kątowniki słupków obejmując środek belki podłużnej nie wymagają dodatkowej blachy węzłowej i dodatkowych kątowników poziomych, co wpływa nieco na zmniejszenie ciężaru konstrukcji.

W mostach zaś o większej rozpiętości mogą powstawać nad podporami belek podłużnych dość znaczne momenty ujemne, które niekiedy powodują nadmierne naprężenia w dolnych włóknach środka belki podłużnej, pozbawionego w miejscu największego ściskania właśnie dolnych kątowników pasowych.

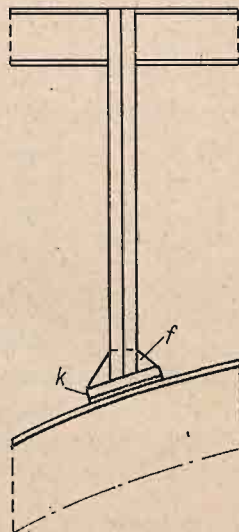
Powody te oraz dogodność składania konstrukcji na miejscu budowy skłaniają do stosowania sposobu połączenia słupka z belką według rysunku 587.

Przy projektowaniu połączeń słupków z łukami i belkami nadłukowymi należy brać pod uwagę wpływ temperatury na naprężenia w słupkach. Jeżeli temperatura się zmienia, długość łuku albo się zwiększa, albo się zmniejsza. Ponieważ rozpiętość łuku pozostaje bez zmiany, przeto strzałka łuku wzrasta lub maleje. W zworniku łuk się podnosi lub opuszcza, przy czym wahania te odbywają się w linii pionowej. Bardzo małe przesunięcie poziome powstaje tylko przy obciążeniach pionowych częściowych i jednostronnych.

Belka podłużna, złączona z łukiem w zworniku, wydłuża się lub skraca wskutek zmiany temperatury pociągając za sobą górne końce słupków, gdy

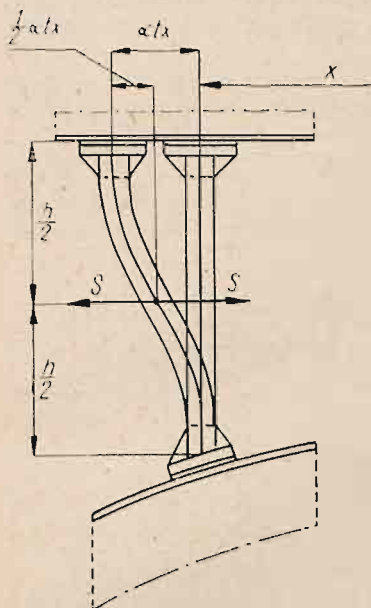


Rys. 587



Rys. 588

dolne, złączone z łukiem, mają bardzo mały przesuw poziomy przy obrotach łuku około przegubu stopowego. Nieznaczne przesunięcia podstaw słupków możemy pominąć. Wtedy przesunięcie górnej części słupka, odległego o x_m od zwornika, wskutek zmiany temperatury t wyrazi się wielkością $\pm \alpha t x$ przy współczynniku wydłużalności liniowej α .



Rys. 589

Rozpatrujemy trzy sposoby połączenia słupków z łukami i belkami podłużnymi:

1. Słupki połączone są sztywno z łukami, na których stoją, i z belkami, które podpierają (rys. 589).

Słupek znajdujący się w odległości x od środka łuku przesunie się o $\alpha t x$ albo w kierunku stopy łuku przy wzroście temperatury, albo ku środkowi łuku przy spadku temperatury. Ponieważ obydwa końce słupka są utwierdzone, przeto punkt przegięcia leży pośrodku i każdą połowę słupka można rozpatrywać jako belkę jednym końcem utwierdzoną i znajdującą się pod działaniem sił poziomych S , które wywołały ugięcia słupka o długości h_2 równe $1/2 \alpha t x$. Siłę S określimy z równania:

$$\frac{1}{2} \alpha t x = \frac{1}{3} \frac{S \left(\frac{h}{2} \right)^3}{EI} = \frac{1}{24} \cdot \frac{S h^3}{EI}, \quad [5]$$

gdzie: E — współczynnik sprężystości,
 I — moment bezwładności przekroju słupka względem osi prostopadłej do płaszczyzny dźwigara,
 h — wysokość słupka.

Z równania (5) otrzymamy $S = \frac{1}{h^3} \cdot 12 \alpha t x EI$.

Mając siłę S znajdziemy moment zginający w przekroju utwierdzenia:

$$M_o = \frac{1}{2} S h \text{ i dodatkowe naprężenie w słupku } \sigma_y = \frac{M_o}{W}.$$

Całkowite zatem naprężenie w słupku wypadnie:

$$\sigma_c = \frac{M_o}{W} + \frac{P}{F_q},$$

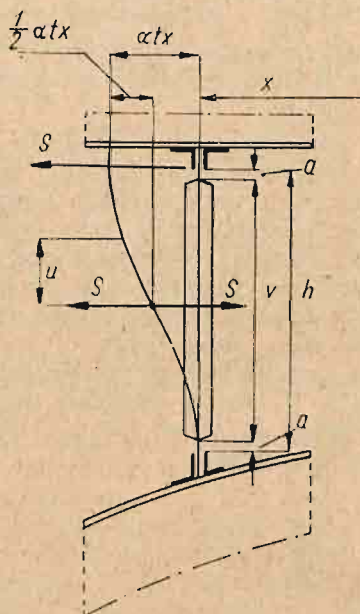
gdzie q oznacza współczynnik zmniejszenia przekroju wskutek możliwości wyboczenia.

Przy obliczeniu nie uwzględniliśmy okoliczności, że naprężenia od zginania i od ściskania nie są niezależne, gdyż moment zginający zależy również i od siły pionowej, która przy pewnej strzałce ugięcia słupka moment ten zwiększa. Do celów jednak praktycznych można się zadowolić tym uproszczonym obliczeniem.

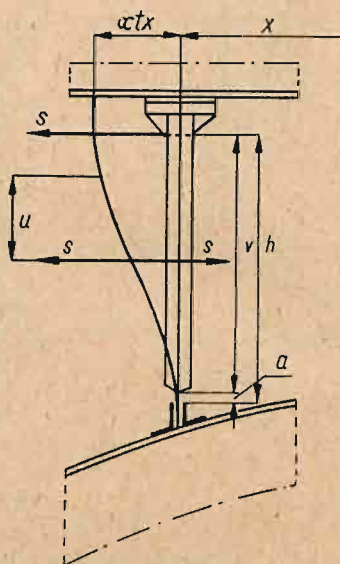
2. Słupki mają połączenie z łukami i belką podłużną za pomocą przegubów blaszanych (rys. 590).

Zachowując poprzednie oznaczenia (rys. 589) oznaczmy ponadto moment bezwładności przekroju przegubu względem osi prostopadłej do płaszczyzny dźwigara przez I_1 , wysokość słupka pomiędzy kątownikami, umocowującymi przeguby blaszane przez h , długość zaś części sztywnej słupka przez v .

Wobec symetrii słupka możemy założyć, że punkt przegięcia słupka leży pośrodku wysokości, gdzie moment zginający jest równy zeru i gdzie działają siły S .



Rys. 590



Rys. 591

Na górny koniec półsłupka działa siła skierowana w lewą stronę, a na dolny koniec taka sama siła, tylko skierowana w prawo. W odległości u od środka słupka powstaje moment zginający Su . Energię potencjalną określa się wzorem:

$$T = \int_0^{v/2} \frac{(Su)^2 du}{2EI} + \int_{v/2}^{h/2} \frac{Su^2 du}{EI_1},$$

a siłę S otrzymamy z równania: $S = \frac{12EI\alpha x}{v^3 + \frac{I}{I_1}(h^3 - v^3)}$.

Po wstawieniu do tego wzoru $h = v + 2a$ i pomijając wielkość $\frac{a}{v}$ i a w drugiej i trzeciej potęgce, jako małe w porównaniu do potęgi pierwszej, otrzymamy:

$$S = \frac{12EI\alpha x}{v^3 \left(1 + \frac{6Ia}{I_1 v}\right)}.$$

Mając siłę S znajdziemy moment utwierdzenia w przegubie równy $1/2 Sh$, a następnie i naprężenia w słupku od zginania i od ściskania.

3. Słupek u góry przytwierdzony jest sztywno do belki podłużnej oraz za pomocą przegubu do łuku (rys. 591).

Oznaczenia pozostawiamy poprzednie.

Energia sprężysta przy odkształcaniu słupka wyraża się wzorem:

$$T = \int_0^v \frac{M_u^2 du}{2EI} + \int_v^h \frac{M_u^2 du}{2EI_1}.$$

Przez $M_u = M_0 - Su$ oznaczyliśmy moment zginający w przekroju w odległości u od płaszczyzny utwierdzenia słupka. M_0 jest momentem utwierdzenia. Do znalezienia dwóch niewiadomych M_0 i S mamy następujące równania:

$$\frac{dT}{dS} = \alpha l x \quad \text{i} \quad \frac{dT}{dM} = 0; \quad \text{oraz} \quad \frac{dM_u}{dS} = -u \quad \text{i} \quad \frac{dM_u}{dM_0} = 1,$$

stad

$$\alpha l x = - \int_0^v \frac{M_u u du}{EI} - \int_v^h \frac{M_u u du}{EI_1}$$

i

$$\int_0^v \frac{M_u du}{EI} + \int_v^h \frac{M_u du}{EI_1} = 0.$$

Po wstawieniu pod znaki całkowania zamiast M_u jego wartość $M_0 - Su$ i po wykonaniu całkowania otrzymamy:

$$2S \left[v^3 + \frac{I}{I_1} (h^3 - v^3) \right] - 3M_0 \left[v^2 + \frac{I}{I_1} (h^2 - v^2) \right] = 6EI \alpha l x \quad [6]$$

$$S = \left[v^2 + \frac{I}{I_1} (h^2 - v^2) \right] = M_0 \left[v + \frac{I}{I_1} (h - v) \right]$$

i

$$S = 2M_0 \frac{v + \frac{I}{I_1} (h - v)}{v^2 + \frac{I}{I_1} (h^2 - v^2)} = 2\beta M_0.$$

Po wstawieniu do równania (6) zamiast S jego wartość $2\beta M_0$ otrzymamy:

$$M = \frac{6EI \alpha l x}{4\beta \left[v^3 + \frac{I}{I_1} (h^3 - v^3) \right] - 3 \left[v^2 + \frac{I}{I_1} (h^2 - v^2) \right]}$$

$$M_u = M_0 - Su = M_0 - 2M_0 \beta u = M_0 (1 - 2\beta u).$$

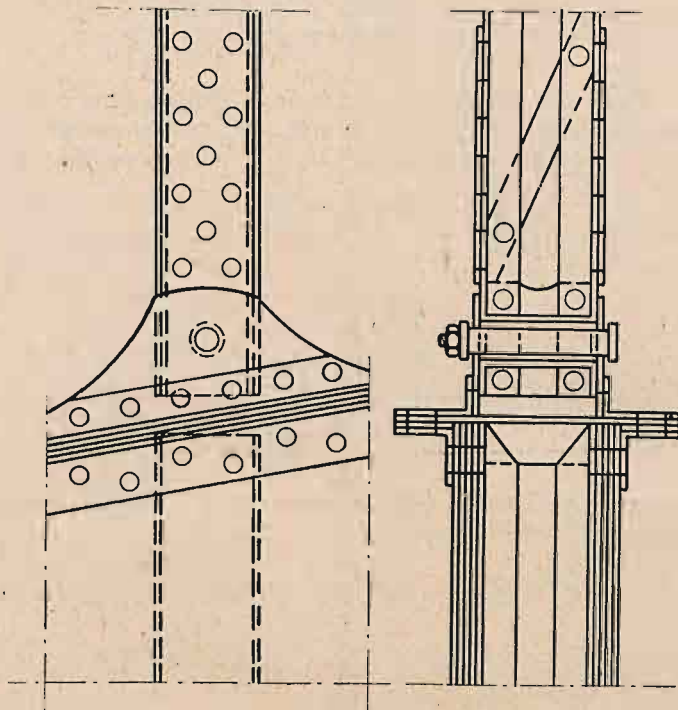
Ostatnie równanie pozwala nam znaleźć moment zginający w dowolnym przekroju słupka w zależności od wielkości u .

Przy $u = h$ otrzymamy moment utwierdzenia w blasze przegubowej.

Naprężenia otrzymamy jak w pierwszym przypadku, przy czym należy brać pod uwagę zmniejszenie przekroju tak słupka, jak i przegubu, mnożąc przekrój przez współczynnik wybożenia q .

4. Połączenie słupka z łukiem może być wykonane za pomocą przegubów bolcowych, np. jak na rys. 592.

Obliczenie w tym przypadku będzie odpowiadać obliczeniom połączenia słupka według sposobu 3 z tą różnicą, że moment utwierdzenia przegubu, otrzymany ze wzoru $M_u = M_0(1 - 2\beta u)$, nie może być większy od momentu tarcia słupka w przegubie, które jest zależne od współczynnika tarcia i promienia bolca przegubowego.



Rys. 592

Gdyby przeguby bolcowe były wykonane na obu końcach słupków, to obliczenie odpowiadałoby obliczeniu połączenia słupka według sposobu 2) również z zastrzeżeniem, że moment w przegubie $1/2 S_k$ nie może być większy od momentu tarcia.

Jeżeli słupki mają znaczną sztywność na zginanie w płaszczyźnie łuku, to przy obliczaniu momentów utwierdzenia należy uwzględnić wpływ odkształcenia postaciowego. Uwzględnienie tego wpływu da znacznie mniejsze obliczeniowe momenty utwierdzenia.

Sztywność słupka obustronnie utwierdzonego, uwzględniając odkształcenie postaciowe, wynosi:

$$K = \frac{4EI}{l} \frac{1 + \frac{3Elk}{l^2GA}}{1 + 12 \frac{Elk}{l^2GA}} = K^0 \frac{1 + 3\alpha}{1 + 12\alpha},$$

gdzie: K^0 — wzorcowa sztywność słupka, tj. sztywność bez uwzględnienia odkształcenia postaciowego,

k — współczynnik liczbowy, zależny od kształtu przekroju słupka (dla prostokąta $k = 1,2$),

l — wysokość słupka,

$$\alpha = \frac{E}{2(1 + \mu)},$$

μ — współczynnik Poissona,
 I — moment bezwładności słupka,
 A — pole przekroju poprzecznego słupka.

Jak łatwo obliczyć, przy przekroju prostokątnym, już przy stosunku szerokości słupka do wysokości $\frac{b}{c} = 0,172$, stosunek $\frac{K^0}{K} = 0,95$, czyli otrzymamy różnicę w wielkości momentu utwierdzenia, wynoszącą 5%.

Przy $\frac{b}{c} > 0,172$ różnica ta szybko rośnie, np. przy $\frac{b}{c} = 1$ otrzymamy $\frac{K^0}{K} = \frac{1,6}{3,4} = 0,47$, czyli moment utwierdzenia zmniejszy się o 53%.

Stąd można przyjąć zasadę, że jeżeli stosunek szerokości słupka (w płaszczyźnie łuku) do wysokości słupka jest większy od 0,17 należy przy obliczaniu momentów utwierdzenia słupka uwzględnić odkształcenie postaciowe (przyp. red.).

Belki podłużne nadłukowe, umocowane na słupkach, są belkami ciągłymi wieloprześłowymi na podporach sprężystych. Reakcje podpór mogą w nich być dodatnie i ujemne. Aby przy ujemnych podporach belka nie mogła się podnosić ze słupkiem lub odechodzić od słupka, przeguby powinny być tak skonstruowane, aby mogły pracować na siły skierowane zarówno w dół, jak i do góry. Taką konstrukcję przedstawia rys. 592.

Na rysunku 593 pokazane jest połączenie słupków z belkami podłużnymi i łukami za pomocą blach.

Ważną rzeczą jest, aby w zworniku wysokość ustrojowa mostu była jak najmniejsza. Pozwala to bowiem przy niewysokich brzegach i niewielkiej wysokości ustrojowej na podporach uzyskać możliwie większą strzałkę łuku, a dzięki temu zmniejszenie rozporu i rozmiarów podpór.

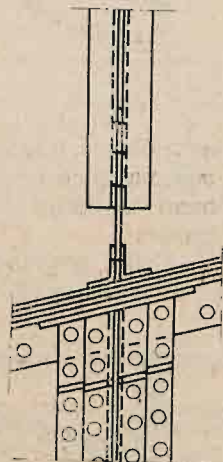
W przypadkach dostatecznej wysokości ustrojowej należy dążyć do niewielkiej wysokości łuków w zworniku ze względów estetycznych, gdyż łuki o znacznej stosunkowo wysokości w zworniku sprawiają wrażenie konstrukcji ciężkiej.

Najmniejsza wysokość ustrojowa w zworniku przy nawierzchni ciężkiej łukowych mostów drogowych wynosi $h + 24$ cm, gdzie h oznacza całkowitą wysokość łuku w zworniku. Przy nawierzchni z desek wysokość tę można by sprowadzić do $h + 16$ cm, jeżeli belki poprzeczne opuści się poniżej pasa górnego łuku, co nie jest wskazane, gdyż wiąże one słabiej dźwigary główne (łuki) ze sobą.

W mostach kolejowych przy opuszczeniu podłużnic jezdni poniżej pasów górnych łuku wysokość ustrojową w zworniku można sprowadzić do wielkości h . Poprzecznice pomiędzy dźwigarami głównymi mogą być tak przynitowane do dźwigarów, aby znajdowały się poniżej pasa górnego dźwigarów na wysokości szyny, podłużnice zaś opuszczone o tyle, aby mostownice i szyny chowały się poza dźwigar. Jeżeli poprzecznice będą ułożone w poziomie pasa górnego łuku, co jest wskazane, gdyż daje to możliwość dobrego połączenia dźwigarów ze sobą, to wysokość ustrojowa będzie wynosić h plus wysokość szyny i plus $2 \div 3$ cm luzu pomiędzy stopką szyny a wierzchem poprzecznicy.

Najmniejszą wysokość ustrojową w zworniku w mostach łukowych o nawierzchni stałej ciężkiej otrzymamy według rys. 594.

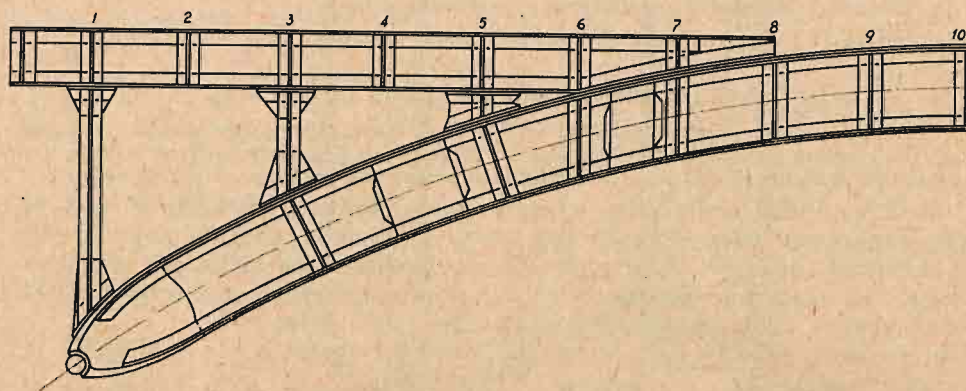
Belka podłużna stykając się z łukiem stopniowo zmniejsza swą wysokość i pas dolny belki staje się krzywy odpowiednio do krzywizny górnego pasa



Rys. 593

luku. Koniec belki wystaje nad górnym pasem luku na wysokość od 80 do 100 mm.

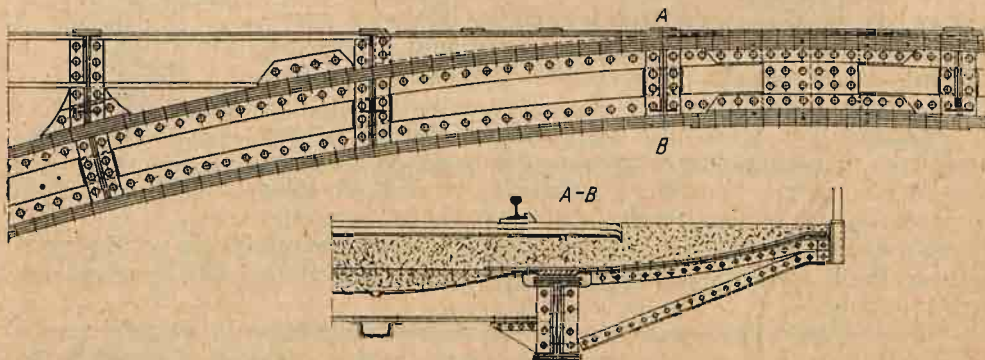
W zworniku najmniejsza grubość warstwy betonu ponad pasem luku powinna wynosić 60 mm. Warstwę betonu tej samej grubości układa się ponad pasami belek podłużnych. Jeżeli przeprowadzimy linię styczną do



Rys. 594

pasa górnego luku w zworniku, która jest linią spodu betonu, to belka podłużna powinna mieć początek w punkcie, w którym wysokość jej wypadnie 80 mm ponad tą linię i nad jedną z belek poprzecznych usztywniających dźwigary lukowe.

Belka poprzeczna, od której zaczyna się belka podłużna, ma kątowniki górne w różnych poziomach: jeden kątownik leży w poziomie górnej kra-



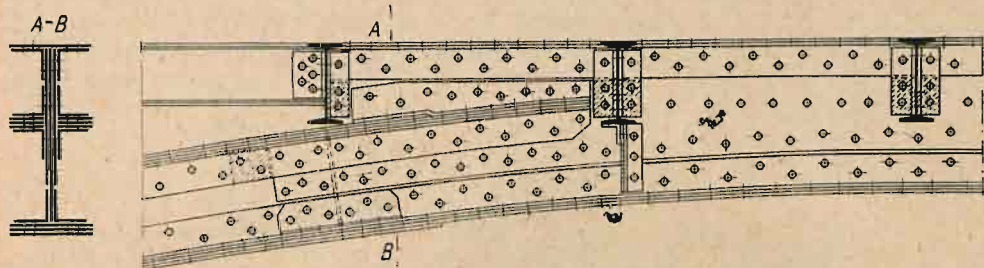
Rys. 595

wędzi pasa luku, drugi zaś w poziomie górnej krawędzi belki podłużnej. Blachy nieckowe przymocowuje się na pasach luków, a beton wyrównywa wgłębienie niecki poniżej pasa podłużnicy.

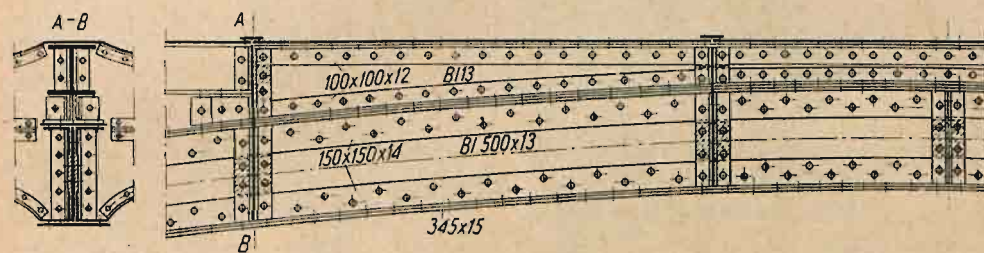
Na rys. 594 pokazane jest połączenie podłużnicy z łukiem, w którym jeden przedział 8—9 może mieć blachy nieckowe, obrócone wypukłością do góry, gdyż wysokość do spodu linii betonu na to pozwala. Zmniejszy się przez to objętość betonu i unika się odrywania główek nitów, gdyż niecki pracują jak łuki i dociskają kątownik, na którym wspierają, do środka belki poprzecznej.

Rysunek 595 przedstawia również belkę podłużną, której wierzeh leży w poziomie wierzchu łuku w zworniku. Niekiedy belkę podłużną prowadzimy ponad zwornikiem, co zmniejsza wysokość ustrojową belki.

W połączeniu, przy którym sam łuk przechodzi na pewnej długości od zwornika w belkę podłużną, średnik łuku i średnik belki podłużnej składają



Rys. 596



Rys. 597

się z jednej blachy kształtowej (rys. 596). Blachy poziome łuku na długości *ab* mają przeciętą szczelinę szerokości równej grubości średnika i za pomocą dodatkowych kątowników są przytwierdzone do średnika.

Na rysunku 597 belka podłużna przechodzi nad łukiem, mając wysokość $160 \div 200$ mm, i łączy się z łukiem, poprzecznice zaś z belką i łukiem.

We wszystkich trzech przypadkach, gdy belka podłużna przechodzi na łuk, musi ona pracować łącznie z łukiem i na odcinku stykającym się z łukiem schodzi ze swej teoretycznej osi. Również we wszystkich tych trzech przypadkach najmniejsze odchylenie ma oś łuku przy połączeniu z podłużnicą według rys. 594 i dlatego to połączenie jest najbardziej wskazane do stosowania.

7. Łożyska mostów łukowych

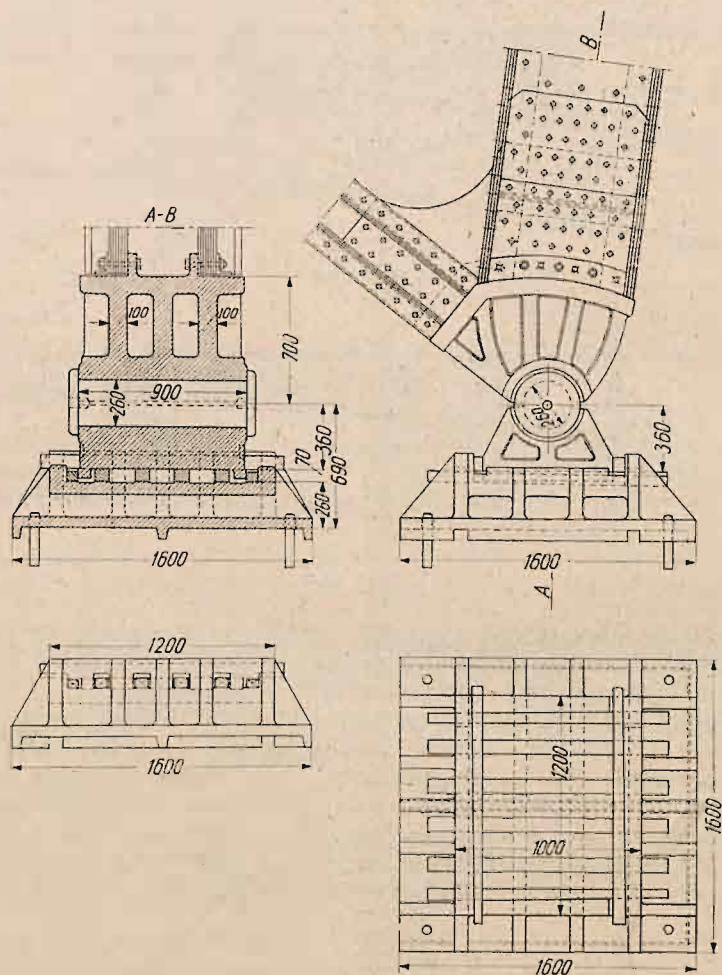
Łożyska mostów łukowych różnią się nieco od łożysk mostów belkowych, przeważnie sposobem przytwierdzenia wahacza, i wymagają wskutek tego niektórych zmian w jego konstrukcji.

Kadłuby łożysk zasadniczo mogą być takie same jak w mostach belkowych; powinny być jedynie zaopatrzone w kliny, jak to bywa w mostach o belkach ciągłych; nadto muszą one leżeć nie bezpośrednio na ciosach podporowych, lecz na płytach, które przynajmniej z dwóch stron i u góry powinny mieć obrzeża i kliny do podnoszenia lub opuszczania kadłuba.

Mosty łukowe wymagają szczególnie dokładnego ustawienia dźwigarów na podporach. Wszelkie zwiększenie lub zmniejszenie rozpiętości pociąga za sobą wzrost naprężeń nie branych pod uwagę przy obliczeniach.

Ponieważ regulowanie rozpiętości klinami pociąga za sobą jednocześnie podnoszenie lub opuszczenie osi przegubu stopowego, przeto kliny płytowe służą do regulowania wysokości (rys. 558).

Jak poprzednio zaznaczono, ustawianie powinno być dokładne w granicach możliwości technicznych; zaleca się wykonywać ustawienia nie podczas dnia słonecznego, lecz w dzień pochmurny.



Rys. 598

W dzień słoneczny nagrzewanie dźwigarów jest niejednakowe i trudno wtedy nadać łukom prawidłową strzałkę. Same dźwigary mają niejednakową temperaturę na całej swej długości, gdyż jedne częściej mogą się znaleźć na słońcu, inne zaś w cieniu. Jeżeli na szerokości mostu jest kilka dźwigarów, to każdy poszczególny dźwigar może mieć różną temperaturę i wtedy ustawienie dźwigarów jeszcze bardziej się komplikuje.

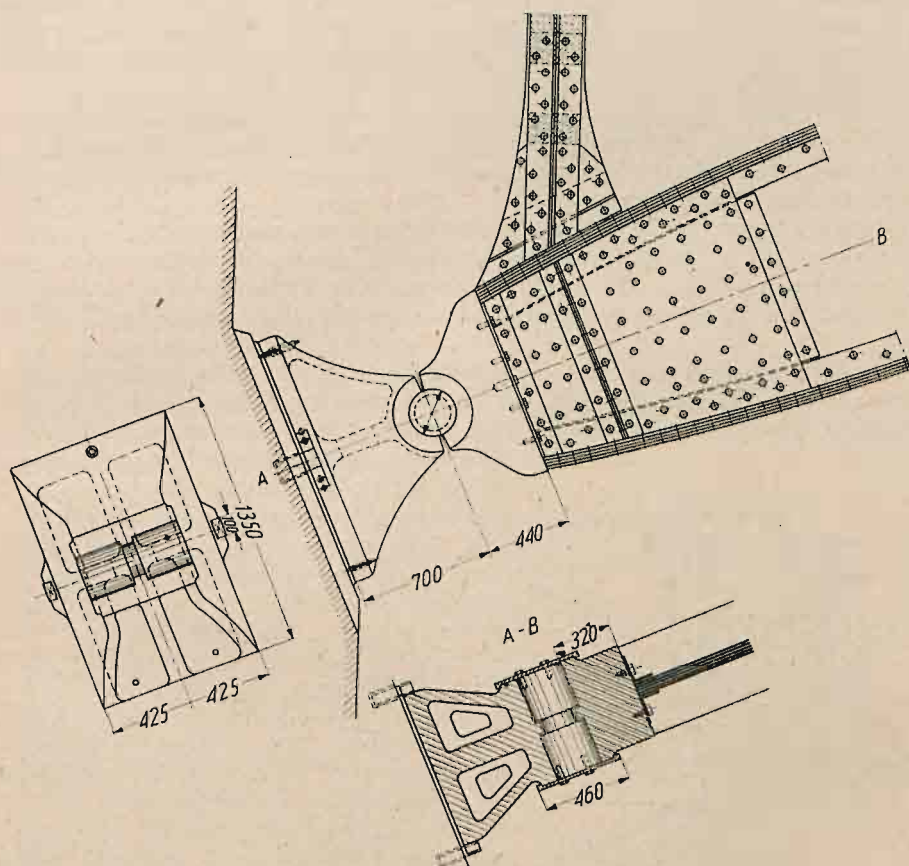
Podczas pogody pochmurnej można przyjąć, że wszystkie dźwigary mają taką temperaturę, jaka panuje w powietrzu.

Ciśnienie od łożyska na ciosy podporowe powinno być możliwie prostopadle, przynajmniej wówczas, gdy jest ono największe.

Ze wzoru $R = \sqrt{V^2 + H^2}$ widać, że ciśnienie R jest wypadkową reakcji pionowej V i rozporu H ; wielkości te są zmienne.

Aby znaleźć największe R , najlepiej jest wykreślić linię wpływową R i odpowiednio ją obciążyć, aby otrzymać max R . Największe odchylenia wypadkowej, które otrzymuje się raz przy max V i odpowiednim H i drugi raz przy max H i odpowiednim V , zwykle nie wychodzą poza granicę kąta tarcia materiału łożyska o cios podporowy tak, że płyta podkadłubowa mogłaby nie być przytwierdzona do ciosu podporowego.

W praktyce płyty te przytwierdza się najlepiej za pomocą trzpieni (rys. 599) wpuszczonych w ciosy podporowe. Przed ustawieniem dźwigarów,



Rys. 599

przynajmniej prowizorycznym, nie należy zalewać trzpieni zaprawą cementową lecz pozostawić je luźno i dopiero po dokładnym ustawieniu zalać zaprawą. Przed ostatecznym uregulowaniem łożysk za pomocą klinów nie należy usuwać rusztowań, na których zmontowane są luki, gdyż podbijanie lub wybijanie klinów przy pełnym nacisku dźwigarów na łożyska jest prawie niemożliwe.

Ponieważ tarcie pomiędzy klinami jest tak duże, że podbijanie ich za pomocą uderzeń nie doprowadza do celu, należy zmniejszyć ciśnienie na kliny podważając dźwigary w zworniku i następnie lekkimi uderzeniami przesuwając klin w jednym lub drugim kierunku.

Najwłaściwiej jest stosować jeden klin, umieszczony bezpośrednio pod przegubem, gdyż ustawienie kadłuba na trzech i więcej klinach powoduje, że nie wszystkie kliny są naciskane jednakowo. W niektórych jednak przypadkach stosuje się trzy i więcej klinów, np. w mostach łukowych wspornikowych, o czym będzie mowa dalej.

Na rysunku 598 widać, że płyta, na której leży klin, jest nieco podniesiona nad dolną płytą, leżącą na ciosie podporowym, a to w tym celu, aby przez żebra i ścianki pionowe osiągnąć równomierne rozłożenie ciśnienia z klina na dolną płytę i na cios.

Przegub może mieć ścięcie klinowe odpowiednio do spadzistości klina. Grubość płyty podklinowej powinna być odpowiednia, aby płyta nie ulegała ścięciu na bokach przylegających do ścianek pionowych; grubość płyty dolnej powinna odpowiadać wymaganiom równomiernego rozłożenia ciśnienia na cios podporowy.

Przegub może być walcowy, tj. taki jaki zwykle stosuje się w mostach prostych, w których oś jest prostopadła do osi podpór.

W mostach ukośnych lepiej jest stosować przeguby kuliste, gdyż praca ich jest bardziej ześrodkowana.

Dźwigary mostowe, połączone ze sobą tężnikami podłużnymi i poprzecznymi, tworzą jakby jedną bryłę, która, jak wiadomo, może dokonywać obroty tylko około jednej osi. Aby temu wymaganiu uczynić zadość, należałoby osie wszystkich przegubów sprowadzić do jednej linii, równoległej do osi podpór.

W moście ukośnym oś przegubu znalazłaby się pod pewnym kątem odpowiednio do kąta skośności osi mostu do osi podpór. Takie położenie byłoby niedogodne, gdyż powodowałoby obrót mostu pod wpływem sił poziomych.

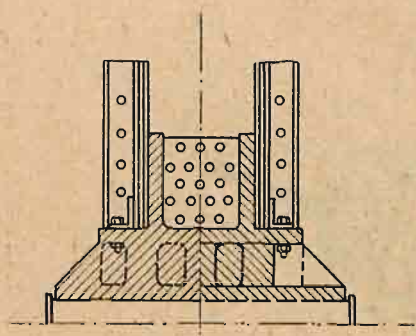
Stosując zaś osie przegubów prostopadle do osi dźwigarów, zmuszamy bryłę do wykonywania, wprawdzie minimalnych obrotów, lecz około kilku osi równoległych. Te obroty nadwężają wiązania pomiędzy dźwigarami, czego w dużej mierze można unikać stosując przeguby kuliste.

Ustrój kadłuba przy przegubie kulistym jest taki sam jak i przy przegubie walcowym, z tą różnicą, że wymiary w górnej części kadłuba przy przegubie kulistym tak w kierunku osi mostu, jak i w kierunku prostopadłym są jednakowe.

Wahacze łożysk mostów łukowych zasadniczo są dwóch typów: pierwszy, w którym wahacz łączy się z dźwigarami łukowymi za pomocą nitów (rys. 600),

przez które przenosi się prawie całkowite ciśnienie od łuku na wahacz, i drugi typ, w którym wahacz jest odpowiednio przycięty do stóp łuków i przejmuje ciśnienie przez bezpośredni docisk czoła końca łuku do odpowiednio wyrobionej powierzchni wahacza (rys. 598).

Pierwszy typ stosuje się w mostach małych i średnich rozpiętości. Przy większych rozpiętościach dość trudno przekazać duże ciśnienie za pośrednictwem nitów, które są o znacznej średnicy i w dużej ilości. W niektórych jednak przypadkach ten typ stosowano w większych mostach. W mostach łukowych wspornikowych stosuje się ten typ wahacza łożysk, choć można używać i typu drugiego.



Rys. 600

W mostach o niewielkich rozpiętościach wahacz można wykonać z odlanych blach policzkowych, obejmujących dwuteowy przekrój łuku z dwóch stron, jak to przedstawia rys. 601.

Odlew policzkowy ma kształt korytka, które ściankami swoimi obejmuje środnik i kątowniki pasowe łuku, półki zaś korytka łączą się za pomocą nitów z bokami poziomymi kątowników pasowych i blachami poziomymi.

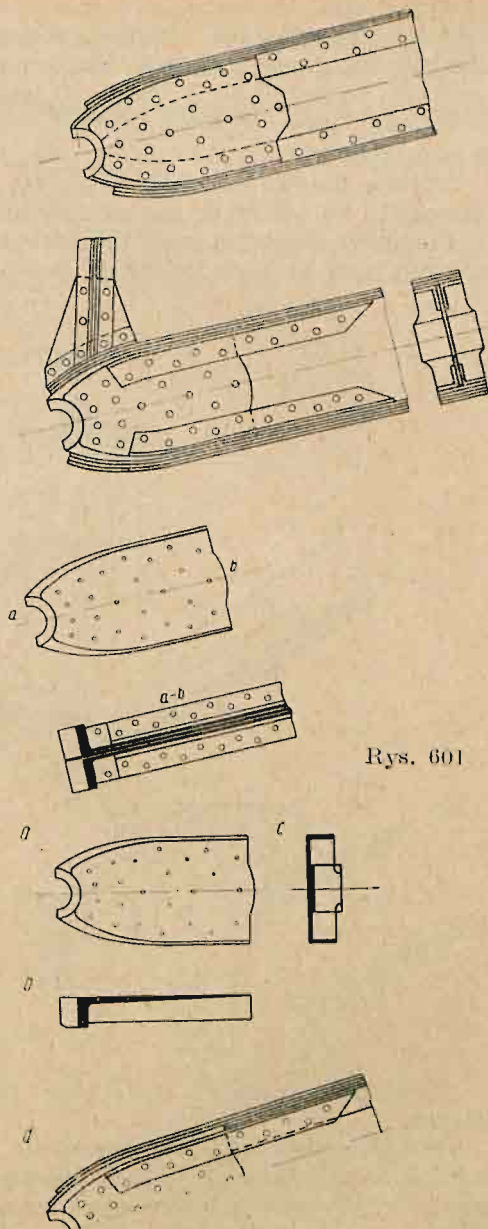
Na rysunku 602 podany jest wahacz mostu ukośnego łukowego z przegubami kulistymi o rozpiętości 48 m. Wahacz ma na końcu wydrążenie w postaci czałszy kulistej o promieniu o dwa lub trzy mm większym niż promień przegubu (rys. 602 *a*, *c*, *d*). Następnie kształt wahacza zmienia się w przekrój dwuteowy (rys. 602 *e*, *g*) odpowiednio do przekroju łuku, ze stopniowym zmniejszeniem grubości tak ścianki pionowej, jak i pólek dwuteownika.

Grubość ścianki z $30 \div 50$ mm zmniejsza się stopniowo do grubości 12 mm odpowiednio do grubości pojedynczej blachy środnika (rys. 602 *b*, *h*).

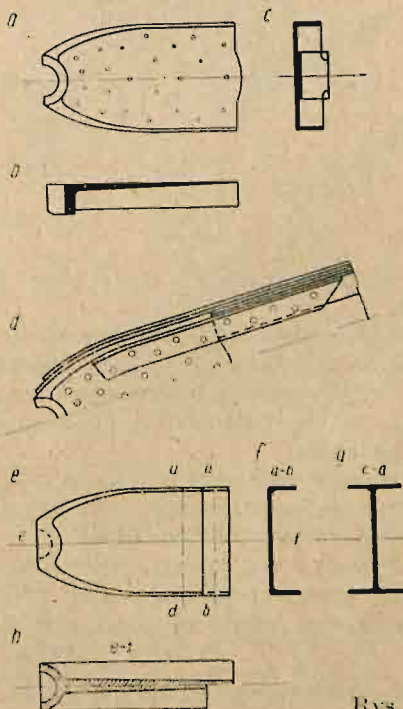
W pewnej odległości, jak to widać z rysunku 602 *e*, *f*, przekrój dwuteowy przechodzi w przekrój korytkowy; przy tym grubość ścianki korytka odpowiada grubości blachy pionowej środnika, grubość zaś boków odpowiada grubości kątowników pasowych. Kształt taki nadany jest wahaczowi dlatego, aby można było zastosować styk stopniowy w połączeniu wahacza z łukiem.

Połączenie łuków z wahaczem na nity można wykonywać nie tylko przy przekrojach łuków dwuteowych, lecz stosować również i w przekrojach skrzynkowych.

Na rysunku 603 pokazany jest wahacz dostosowany do przekroju skrzynkowego.



Rys. 601

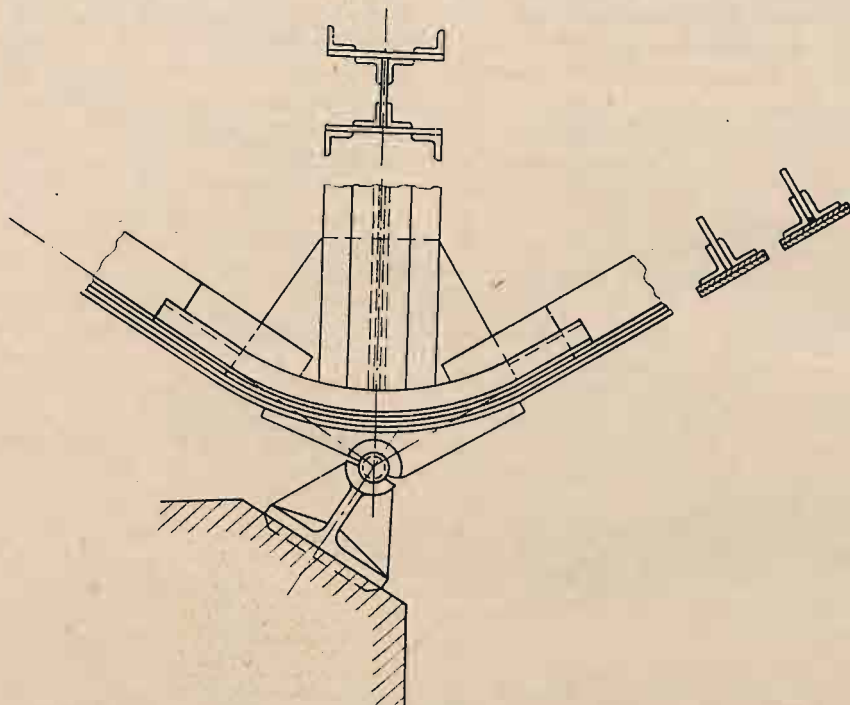


Rys. 602

Typ drugi wahacza może być stosowany w mostach łukowych, ponieważ w pobliżu przegubu łuk nie ulega rozciąganiu. Siła normalna jest tu duża, momenty zaś gnące znikome; dlatego w naprężeniu otrzymanym ze wzoru $\sigma = \pm \frac{M_z}{I} - \frac{N}{F}$ naprężenie normalne zawsze jest większe od naprężenia wskutek zginania.

Miejsce dotyku wahacza z czołem łuku może mieć wykrojenie różne: prostopadłe do osi łuku, kuliste lub wieloboczne.

Ponieważ w pobliżu przegubu naprężenia w łuku spadają, przeto wysokość przekroju łuku przy podejściu do przegubu zwykle się zmniejsza.



Rys. 603

Czoło łuku powinno być ściśle dopasowane do powierzchni dotyku wahacza.

Obróbkę czoła łuku wykonywa się przeważnie w warsztatach na odpowiednich obrabiarkach i dlatego końcowe części łuku nie powinny być zbyt długie, aby nie utrudniać manipulowania w warsztacie. Ostateczną obróbkę wykonuje się po znitowaniu, gdyż wtedy tylko można otrzymać prawidłowo wyrobione czoła.

Połączenie wahaczy z łukami kilkoma nitami, śrubami lub wkrętkami ma na celu jedynie ułatwienie montowania, aby wahacz trzymał się na odpowiednim miejscu stopy łuku.

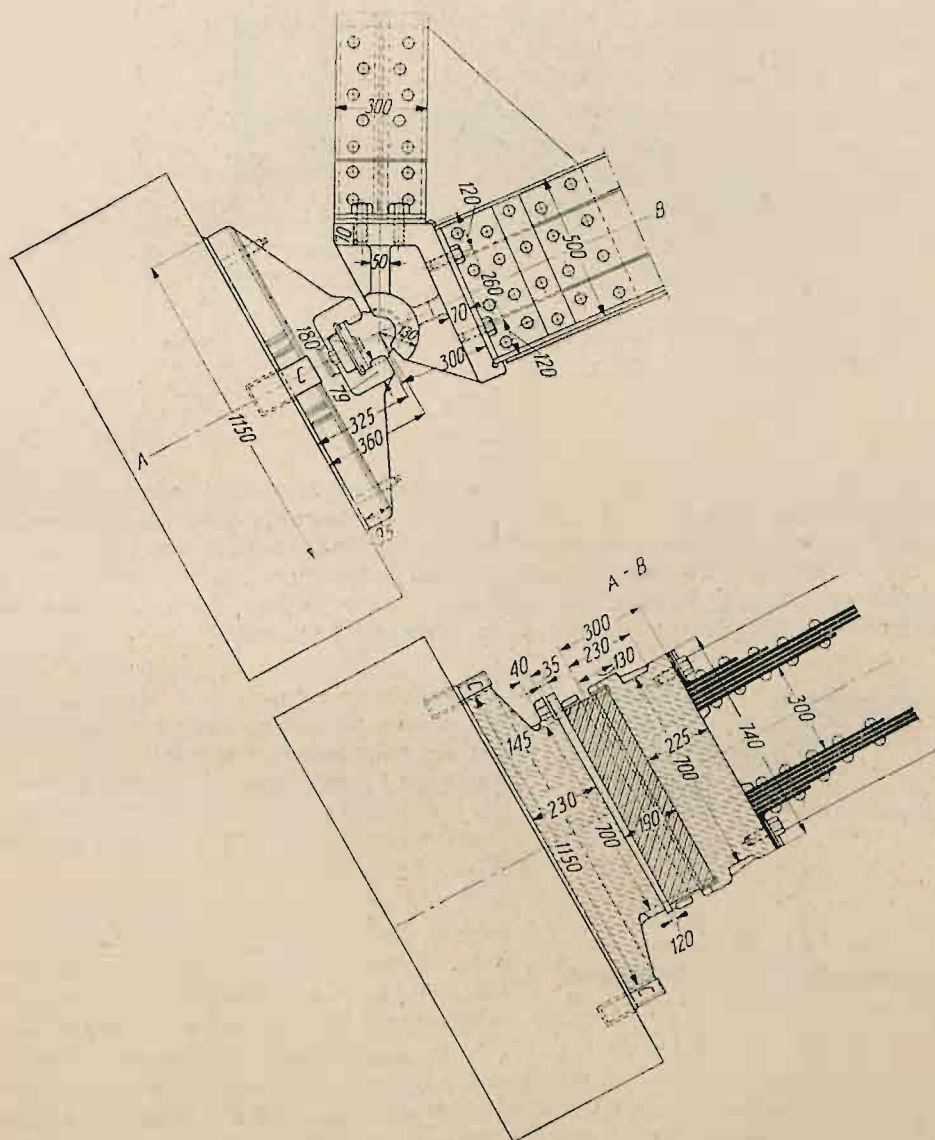
Na rysunku 604 podany jest wahacz o ścięciu prostopadłym do osi łuku. Od spodu ma on poziomą półkę, która przeciwdziała zsunięciu się stopy łuku z wahacza. Może ona być obliczona na siły poprzeczne

$$T = (A - P) \cos \varphi - H \sin \varphi.$$

Śruby odgrywają tu rolę, o której była mowa poprzednio.

Na rysunku 598 wahacz jest ukształtowany kolisto o takim promieniu, przy którym przekroje pasów są prostopadłe do powierzchni wahacza.

Połączenie wahacza ze stopami łuków wykonane jest za pomocą dodatkowych nakładek blaszanych, przytwierdzonych nitami do pasów łuku dwuteowego i śrubami do występów odlewu wahacza.

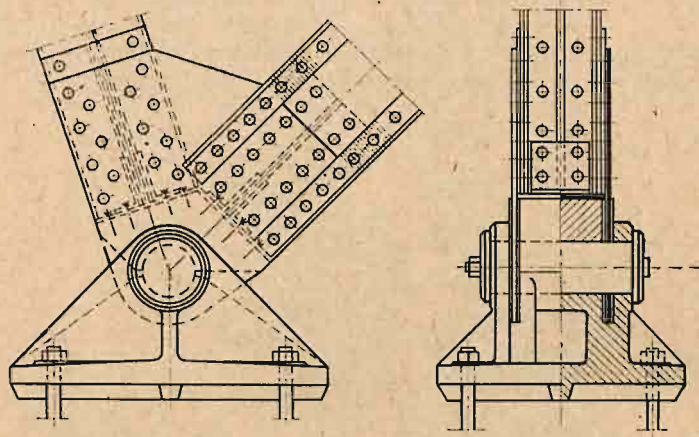


Rys. 604

Na rysunku 604 zakończenie łuku i odpowiednie wyrobienie powierzchni dotyku wykonane jest według odcinków prostych, tak że skrajne odcinki mają takie pochylenie, aby kątowniki pasów były pod kątem prostym do powierzchni dotyku. Kątowniki okalające stopy łuku służą raczej do przytwier-

dzenia wahacza za pomocą wkrętów do łuku, a nie do przekazywania ciśnienia, gdyż odbywa się ono przez bezpośredni dotyk.

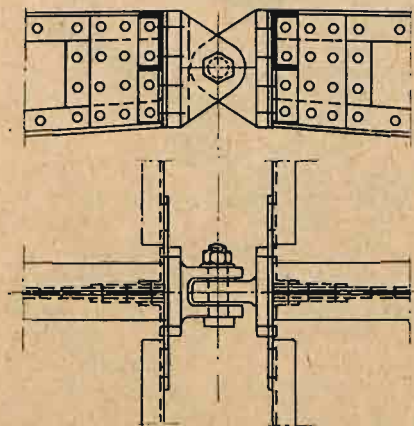
Oddzielnie wypada rozpatrzyć ustrój łożysk przegubowych w mostach łukowych wspornikowych. W ustroju tym, jak to wynika z linii wpływu dla rozpór, rozpór może być zarówno dodatni, jak i ujemny. Zwykle dąży



Rys. 605

się do tego, aby przy obciążeniu stałym i ruchomym rozpór, nawet niewielki, otrzymać dodatni, ponieważ rozpór ujemny wymaga specjalnego zakotwienia łożysk do podpór, co jest zawsze związane z dużymi trudnościami i kosztowne.

Z obliczenia liczb linii wpływu reakcji podpory R i po wykreśleniu linii wpływu otrzymamy skrajne znaczenia R , które wskażą, jaka powinna być powierzchnia łożyska przylegająca do ciosu podporowego.



Rys. 606

odlewów kadłuba, wskutek czego w kierunku poprzecznym.

Ponieważ dolny pas zarówno wspornika jak i łuku przy podporze jest zawsze ściskany, przeto można w tym przypadku zastosować połączenie wahacza z dźwigarem przez docisk, jak w układzie zwykłym łukowym.

Ponieważ reakcja podpory R przy obciążeniach wsporników daje reakcję R_1 prawie pionową, przy obciążeniu zaś przesła pomiędzy przegubami stopowymi powstaje największe odchylenie reakcji R_2 od pionu, przeto kadłub musi mieć dwie płaszczyzny: jedną prostopadłą do R_1 i drugą prostopadłą do R_2 .

Dla regulacji łożysk stosuje się kliny tak w jednej, jak i w drugiej płaszczyźnie. Jedne z nich służą do zmniejszenia lub zwiększenia rozpiętości, drugie zaś do podnoszenia lub opuszczania stóp łuku.

Rysunek 605 przedstawia łożysko stosowane w mostach łukowych wspornikowych. Specjalne blachy, przymocowane do łuku, obejmują przegub łożyska, który jest utrzymywany za pomocą

łuk nie może się podnosić ani przesuwac

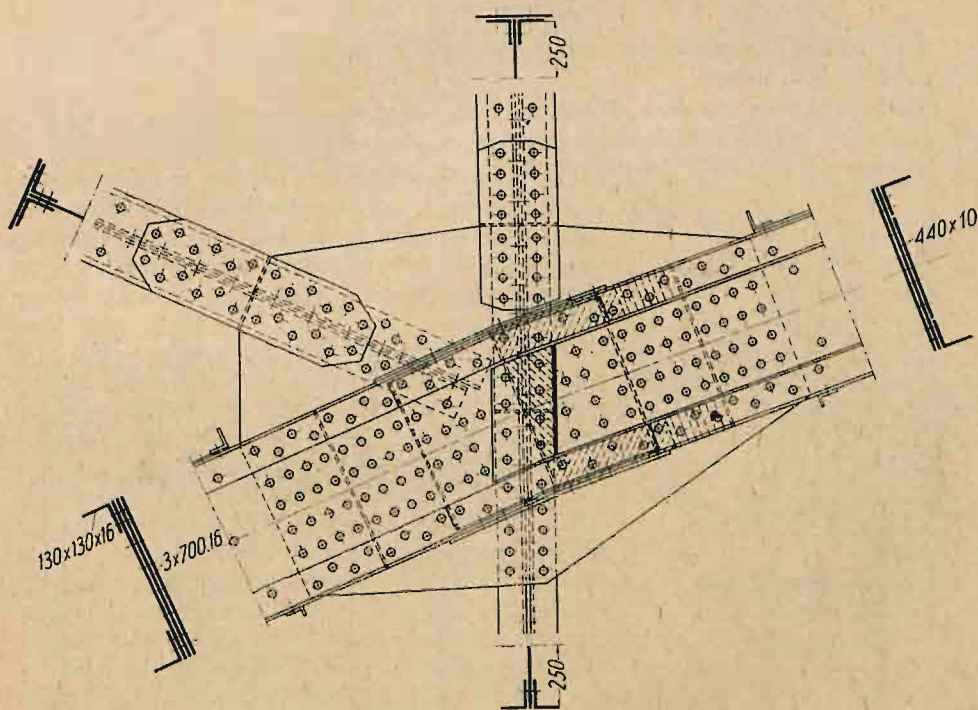
Na rysunku 606 pokazany jest najprostszy typ przegubu środkowego łuku trójprzegubowego, składający się z dwóch odlewów i bolców.

Poza opisanymi typami mogą istnieć różne odmiany typów, według uznania konstruktora.

8. Mosty łukowe z jazdą dołem

W mostach łukowych z jazdą dołem najczęściej stosuje się łuki kratowe ze ściągiem, chociaż nie wyłącza się użycia w tych mostach dźwigarów zwykłych łukowych, częściowo opuszczonych na końcach poniżej jezdni.

W mostach łukowych, w poziomie dolnej krawędzi ciosów podporowych, podpory powinny być o znacznym ciężarze, aby okazywać dostateczny opór tak przeciw wywracaniu, jak i przeciw zsuwaniu części podpory znajdującej się powyżej poziomu dolnej krawędzi ciosu podporowego. Stąd wynika, że stopy tych łuków opuszcza się niżej jezdni.



Rys. 607

Niezależnie od ustroju samego dźwigara łukowego, czy to kratowego, czy w postaci blachownicy, układy te powinny mieć zawsze pasy podłużnych tężników w poziomie jezdni (patrz część IV, rozdział I). Pasy te jednak zawieszone na wieszakach nie mogą być łączone z pasami łuku, gdyż pracowałyby jako ściągi. Przy podejściu do łuków pasy te, jak również i tężniki podłużne, są zwykle wolno zawieszone i mają przesuw podłużny, jak to zresztą bywa i przy połączeniu belek zawieszonych na wspornikach (patrz część IV, rozdział I).

Łukowe mosty kratowe ze ściągiem należą do układów jednokrotnie statycznie niewyznaczalnych.

Jeżeli w ogólnym wzorze, podanym w p. 4, zauważymy, że w ściągu $\sigma_c = 1$, zaś $S_i = 0$, to ostatecznie wzór można przepisać w postaci:

$$H = - \frac{\sum \frac{A_o}{A_i} S_i \cdot \sigma_i \cdot l_i}{\sum \frac{A_o}{A_i} \cdot \sigma_i^2 \cdot l_i + \frac{A_o}{A_s} \cdot l}$$

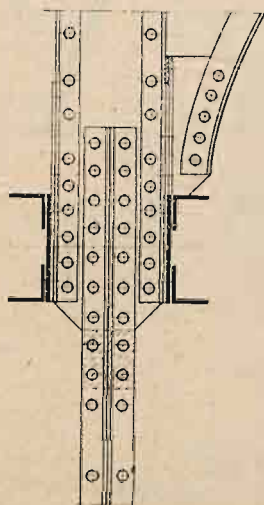
gdzie: l — rozpiętość luku,
 A_s — przekrój ściągu.

Jeżeli A_o przyjmiemy równą A_s , co zwykle bywa, to wzór otrzyma postać:

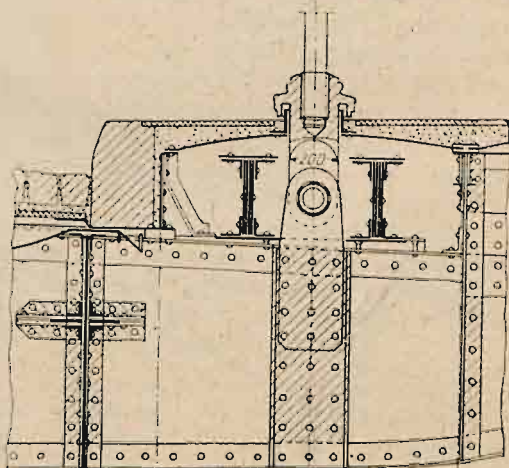
$$H = - \frac{\sum \frac{A_s}{A_i} S_i \cdot \sigma_i \cdot l_i}{\sum \frac{A_s}{A_i} \sigma_i^2 \cdot l_i + l}$$

Jak widać z tego wzoru, rozpór w luku ze ściągiem jest nieco mniejszy niż w luku bez ściągu.

Pod względem ekonomicznym luki ze ściągiem są mniej korzystne w porównaniu z belkami swobodnie podpartymi na dwóch podporach, gdyż są one cięższe od układów zwykłych belkowych od 8 do 12%.



Rys. 608



Rys. 609

Należy zwrócić uwagę, że układy dźwigarów o trzech pasach są zawsze cięższe od układów dwupasowych, tj. belek zwykłych i można je stosować tylko w tym przypadku, gdy warunki miejscowe nie pozwalają na budowę mostu z jazdą górą.

Konstrukcja dźwigarów łukowych ze ściągiem nie przedstawia żadnych osobliwości w porównaniu z belkowymi mostami kratowymi.

Wszystko to, co omawiano przy rozpatrywaniu mostów belkowych, ma całkowite zastosowanie również w kratowych mostach łukowych. Wieszaki, na których są zawieszone poprzecznice jezdni, przeważnie projektuje się o prze-

Kroju dwuteowym, gdy pasy dźwigarów są skrzynkowe. Jeżeli przekroje pasów są teowe, to wieszaki mają przekrój krzyżowy, choć nie wyłączone są wieszaki o przekroju kołowym.

Połączenie wieszaków z dźwigarami do pasa dolnego łuku, który zwykle jest albo rurowy, otwarty z dołu i z góry, albo też haowy, jest łatwe do wykonania, gdyż blachy węzłowe, wypuszczone z dołu pasa łuku, umożliwiają przytwierdzenie wieszaków (rys. 607).

Przymocowanie wieszaka krzyżowego do pasa rurowego może być wykonane według rysunku 608.

Wieszaki okrągłe powinny kończyć się gwintami albo być nieco rozplaszczone z otworem lub mogą kończyć się widelkami z otworami. We wszystkich trzech przypadkach do dźwigarów muszą być przytwierdzone specjalne odlewy, które umożliwiają połączenie z wieszakami.

Na rysunku 609 podany jest przykład połączenia na gwint wieszaka okrągłego z odlewem i następnie odlewu za pomocą bolca poziomego z dwiema blachami, wzmacniającymi środek poprzeczny.

Przy wieszakach dwuteowych i teowych połączenie jest proste. W miejscach przytwierdzenia środek wieszaka zamienia się na blachę kształtową, którą łączy się z taką samą blachą, wystającą ponad pasem górnym poprzecznic za pomocą słupka wahadłowego i dwóch bolców (rys. 610).

Przy wieszakach dwuteowych i teowych przymocowanie belek poprzecznych jezdni do ściągów w niczym się nie różni od połączeń sztywnych poprzecznic jezdni z pasami dźwigarów kratowych przy jeździe dołem (rys. 611).

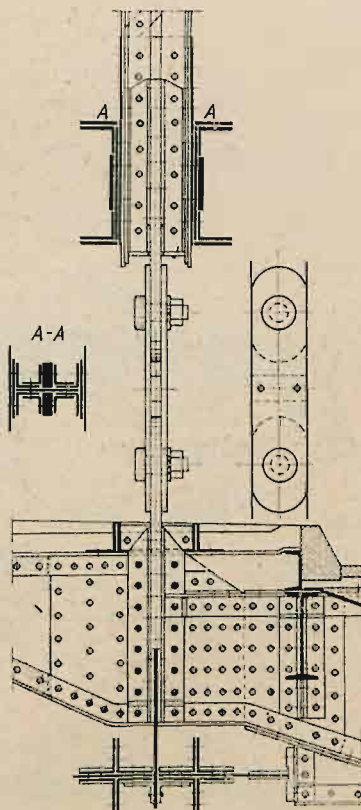
Tężniki podłużne w tych układach przymocowuje się w poziomie pasów górnych, a poprzeczne we wszystkich węzłach i na wysokości dźwigara od pasa górnego do pasa dolnego w tych przekrojach, gdzie skrajnia budowli na to pozwala, lub poza skrajnią budowli.

Pomiędzy wieszakami nie należy umieszczać tężników poprzecznych.

Na podporach umieszcza się ramownice, przez które parcie wiatru przenosi się z tężników podłużnych górnych na podpory.

W poziomie jezdni umocowuje się tężniki podłużne dolne, przy czym ściągi służą jako pasy tej poziomej kratownicy tężnikowej.

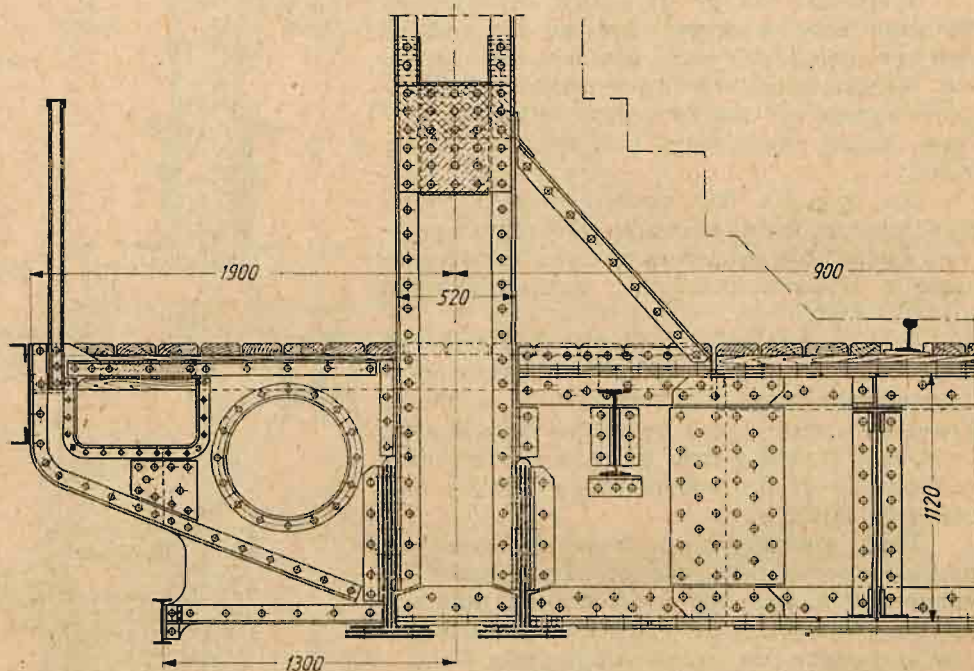
Dlatego więc przy zawieszaniu przegubowych części przejazdowych na wieszakach i zawieszaniu luźnym ściągów na belkach poprzecznych ściągi powinny mieć specjalne odlewy boczne, za pomocą których mogłyby przekazywać ciśnienie wiatru na poprzecznicę, które w tych przypadkach odgrywa rolę rozpórek pomiędzy pasami, tj. mogą pracować tylko na ściskanie, przekątne zaś na rozciąganie (rys. 385).



Rys. 610

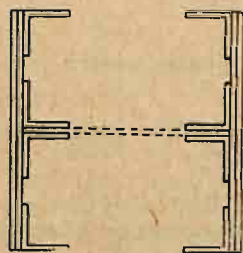
Z boku ściągu są niewielkie odlewy z wypukłościami w rodzaju łożysk kulistych, opierających się na innych specjalnych odlewach, przytwierdzonych do czołowych części belek poprzecznych.

Wysokość mostów łukowych ze ściągiem na podporach waha się w granicach $H = \frac{1}{12}$ do $\frac{1}{17} l$; należy jednak dążyć, aby na podporach można było dać ramownice, zwłaszcza gdy rozpiętość dźwigarów nie jest mała, a zatem gdy H zależna jest od wysokości skrajni budowli.



Rys. 611

Wysokość łuku w kluczu utrzymuje się w granicach $h = \frac{1}{25}$ do $\frac{1}{45} l$; przy tym im większe jest obciążenie ruchome, tym większa jest wysokość. W mostach kolejowych stosujemy wysokość bliżej granicy $\frac{1}{25} l$, w mostach drogowych bliżej $\frac{1}{45} l$.



Rys. 612

Strzałka łuku ma granice $\frac{1}{6}$ do $\frac{1}{8} l$. Przy strzałce w granicach $\frac{1}{6} l$ dźwigary są zwykle lżejsze.

Przekroje ściągów są przeważnie rurowe, otwarte z góry i z dołu.

Prócz tego ściągi mogą być o przekroju haowym ze szczeliną (rys. 612).

Nie wyłączony jest również przekrój ściągu skrzynkowy z dwóch gałęzi otwartych u dołu, aby nie zatrzymywał wody, śniegu i wszelkich nieczystości.

Za najlepszy dla ściągn należy uważać przekrój rurowy. Jeżeli chodzi o wzmocnienie tego przekroju, to może ono być wykonane w postaci dodatkowych kątowników pośrodku wysokości przekroju na wewnątrz, gdyż zewnętrzne kątowniki komplikowałyby przytwierdzenie belek poprzecznych do ściągnów, które odgrywają rolę pasów dolnych dźwigarów belkowych.

Rozdział II

MOSTY WISZĄCE

1. Charakterystyka mostów wiszących

Mosty wiszące należą do układów rozporowych i tym się różnią od mostów łukowych, że rozpór ich skierowany jest w stronę odwrotną, tj. na zewnątrz dźwigarów.

O ile dźwigary łukowe starają się rozsunąć podpory, o tyle układy mostów wiszących dążą do zbliżenia podpór.

Mosty wiszące są mostami wyłącznie z jazdą dołem (rys. 613).



Rys. 613

Ponieważ łańcuchy oraz wieszaki mają na zewnątrz mostu niewielkie wymiary, a wieszaki zwykle dość rzadko rozstawione, przeto konstrukcja mostów wiszących, wznosząca się ponad jezdnią, nie zasłania widoku otoczenia i przy zwieszających się łańcuchach oraz przy dużej rozpiętości sprawia wrażenie budowli majestatycznych.



Rys. 614

Do zalet mostów wiszących należą:

- 1) możliwość montowania mostu na miejscu budowy bez rusztowań;
- 2) stateczność, gdyż środek ciężkości całego przęsła leży znacznie niżej niż punkty podparcia łańcuchów;
- 3) materiał użyty do najważniejszej części składowej tych mostów, mianowicie stal w łańcuchach, pracuje odpowiednio do swych właściwości, tj. na rozciąganie;
- 4) możliwość budowania przęsła o dużej rozpiętości. Mimo tych zalet mosty wiszące mają jednak i wady.

Najważniejszą ich wadą jest mała sztywność oraz znaczne przesunięcia pionowe i przesunięcia poziome. Dlatego też konstrukcje wiszące nie nadają