

с) - искомая поперечная линия влияния прогиба средней балки $f(x)$.

Обязательным требованием к двухосной испытательной нагрузке должна быть заметная разница в давлении на переднюю P_1 и заднюю P_2 её оси, а так же необходимо при испытании зафиксировать прогибы средней и крайних балок пролётного строения при движении нагрузки слева направо кабиной вперёд $F_1(x)$, а затем в том же направлении кузовом вперёд $F_2(x)$.

Если эти условия соблюдены, то система уравнений для средней балки

$$\begin{cases} F_1(x) = P_1 f(x+a) + P_2 f(x) \\ F_2(x) = P_2 f(x+a) + P_1 f(x) \end{cases} \quad (1),$$

в которой неизвестными являются искомая функция (поперечная линия влияния прогиба) $f(x)$ и функция $f(x+a)$, будет иметь единственное решение:

$$f(x) = \frac{P_2 F_1(x) - P_1 F_2(x)}{P_2^2 - P_1^2} \quad (2).$$

Заметим, что выражение (2) определяет функцию $f(x)$ на отрезке $[0, l-a]$ (см. рис. с). Несложно показать, что на отрезке $[a, l]$ функция $f(x)$ определяется выражением:

$$f(x) = \frac{P_2 F_2(x-a) - P_1 F_1(x-a)}{P_2^2 - P_1^2} \quad (3).$$

Таким образом, ординаты искомой поперечной линии влияния прогиба средней балки пролётного строения могут быть вычислены и линия построена для всей той части ширины пролётного строения l , над которой находились колёса грузовика во время испытаний.

Аналогично, по формулам (2) и (3) рассчитываются ординаты поперечных линий влияния для прогибов крайних левой и правой балок поперечного сечения. Эти линии влияния так же, как и для средней балки, становятся известными на участке проезжей части шириною l .

Линии влияния прогибов для средней и двух крайних балок пролётного строения на основании теоремы о взаимности перемещений дополняют друг друга. Это позволяют построить поперечную линию влияния прогиба средней балки не на части, а на всей ширине испытываемого пролётного строения. Ординаты такой линия влияния полностью совпадают (на основании всё той же теоремы о взаимности перемещений) с ординатами вертикальных перемещений точек контура поперечного сечения, упруго деформирующегося под действием единичной силы приложенной над средней балкой (по оси пролётного строения).

Вся дальнейшая процедура нахождения коэффициента упругости основании k и изгибной жёсткости EI условной поперечной балки и, далее, расчета по ним ординат поперечных линий влияния коэффициентов распределения усилий для каждой из главных балок (плит) пролётного строения ничем не отличается от вышеописанной процедуры обработки данных статических испытаний [1].

В заключение отметим, что предлагаемый способ построения поперечных линий влияния в пролётных строениях эксплуатируемых автодорожных мостов с большой шириной проезжей части, ориентирован на использование современных измерительных систем и программ, позволяющих регистрировать, сохранять, обрабатывать и анализировать получаемые данные о фактическом характере работы конструкций под временными нагрузками. Он существенно сокращает необходимое число точек фиксации прогибов, а значит время и трудозатраты на подготовку к испытаниям и их проведению. При этом, используя те же установленные на конструкции датчики, можно решать сопутствующие задачи, например, получать динамические характеристики сооружения под проходящим автотранспортом: частоты его свободных и вынужденных колебаний, максимальные амплитуды, динамические коэффициенты и т.п.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Сухоруков Б. Д. Метод построения поперечных линий влияния коэффициентов распределения усилий в пролётных строениях мостов по данным статических испытаний. // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научн. трудов. Вып. №37. - Дн-вск., ПГАСА, 2006. - С.480-485.
2. Сухоруков Б. Д. Нахождение коэффициентов распределения усилий в пролётных строениях эксплуатируемых мостов методом «условной поперечной балки». // Сб. «Дороги і мости», вип.7, в 2-х т., т.2.-К.: ДерждорНДІ, 2007. С.228-236.
3. Сухоруков Б. Д. Метод «условной поперечной балки» и его точность применительно к железобетонным мостовым пролётным строениям. // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научн. трудов. Вып. №43. - Дн-вск., ПГАСА, 2007. - С.544-550.
4. Рудницин М. Н., Артёмов П. Я., Любошин М. И. Справочное пособие по сопротивлению материалов. – Минск: Высшейш. школа, 1970. – 630 с.
5. Сухоруков Б. Д. Построение линий влияния по осциллограммам загрузки мостовых конструкций медленно движущейся испытательной нагрузкой. // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научн. трудов. Вып. №47. - Дн-вск., ПГАСА, 2006. - С.640-648.

УДК 624. 21

РАСЧЕТ УСИЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ГЛАВНЫХ ФЕРМ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МОСТОВ ПРИ НЕДОСТАТОЧНОЙ ИХ ГРУЗОПОДЪЁМНОСТИ

к.т.н., доц. Тарасенко В. П.

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна

Металлические мосты, эксплуатируемые на сети железных дорог Украины, строились в разное время по разным расчётным нормам и имеют различное физическое состояние в связи с наличием повреждений, возникающих в процессе эксплуатации от воздействия подвижного состава, атмосферных воздействий и

других причин. На протяжении продолжительного периода эксплуатации мостов изменялся подвижной состав железных дорог, появлялись новые нагрузки, превышающие расчетные нагрузки, принятые при проектировании мостов.

Для обеспечения безопасности движения по мостам современных нагрузок возникает необходимость установления режима эксплуатации мостов с учётом их технического состояния, а при недостаточной грузоподъёмности проведение усиления или замены пролётных строений. С учётом этого правилами технической эксплуатации железных дорог [1] предусматривается определение фактической грузоподъёмности всех несущих конструкций эксплуатируемых мостов и сравнение её с величинами обращающихся поездных нагрузок.

В соответствии с отраслевым стандартом Украины ГСТУ 32.6.03.111-2002 «Правила визначення вантажопідйомності металевих прогонових будов залізничних мостів» [2] проверка грузоподъёмности металлических пролётных строений проводится методом классификации. При этом определяются классы K всех элементов пролётных строений по грузоподъёмности с проверкой их прочности, выносливости и устойчивости, а для поездных нагрузок – классы K_0 по воздействию на мосты.

Для каждого элемента пролётного строения, стыков и прикреплений определяется максимальная интенсивность временной вертикальной нагрузки k , $кН/м$ пути, которая не вызывает наступления предельного состояния при нормальной эксплуатации моста. Такую нагрузку называют допустимой нагрузкой, а отношение её к эталонной нагрузке k_{et} с учётом динамического коэффициента $(1 + \mu)$ – классом элемента по грузоподъёмности K , который вычисляется по формуле

$$K = \frac{k}{k_{et}(1 + \mu)}. \quad (1)$$

В качестве эталонной нагрузки k_{et} , $кН/м$ пути, используется временная вертикальная нагрузка от условного поезда по схеме Н1 1931 года. Динамический коэффициент для эталонной нагрузки вычисляется с учётом длины λ , m , загрузки линии влияния по формуле $(1+\mu)=1+27/(30+\lambda)$.

Классификация подвижного состава по воздействию на мосты заключается в том, что его воздействие на элементы пролётного строения с учётом динамического коэффициента выражается также в единицах эталонной нагрузки Н1, а число единиц эталонной нагрузки называют классом K_0 подвижного состава по воздействию на элементы моста и определяют по формуле

$$K_0 = \frac{k_0(1 + \mu_0)}{k_{et}(1 + \mu)}, \quad (2)$$

где k_0 и $(1 + \mu_0)$ – соответственно величины интенсивности эквивалентной нагрузки, $кН/м$ пути, и динамический коэффициент для рассматриваемого подвижного состава.

Значения эквивалентных нагрузок k_0 и классов K_0 для всех типов подвижного состава, обращающегося на сети железных дорог Украины, определены и приведены в таблицах нормативного документа [3] «Укрзалізниця».

Допускаемые нагрузки и классы по грузоподъёмности элементов главных ферм до усиления определяются согласно [2] по формулам:

- при расчёте на прочность

$$k_n = \frac{1}{\varepsilon_v n_v \Omega_v} (0,1mRG_0 - \varepsilon_p p \Omega_p); \quad K_n = \frac{k_n}{k_{et}(1 + \mu)}; \quad (3)$$

- при расчёте на устойчивость сжатых элементов

$$k_y = \frac{1}{\varepsilon_v n_v \Omega_v} (0,1m\varphi_0 RG_0 \mp \varepsilon_p p \Omega_p); \quad K_y = \frac{k_y}{k_{et}(1 + \mu)}; \quad (4)$$

- при расчёте на выносливость

$$k_\sigma = \frac{1}{\varepsilon_v \theta \Omega_v} (0,1m\gamma_\sigma RG_0 - \varepsilon_p p' \Omega_p); \quad K_\sigma = \frac{k_\sigma}{k_{et}(1 + \mu)}, \quad (5)$$

где ε_v , ε_p - доля вертикальной нагрузки от подвижного состава и постоянной нагрузки, приходящаяся на одну ферму;

n_v - коэффициент надёжности к вертикальной нагрузке от подвижного состава;

Ω_v , Ω_p - площади линий влияния осевых усилий в элементах ферм, загружаемые вертикальной нагрузкой от подвижного состава и постоянной нагрузкой, m ;

$0,1$ - коэффициент размерности;

m - коэффициент условий работы (в большинстве случаев $m=1$);

R - основное расчётное сопротивление металла ферм, МПа;

G_0 - расчётная площадь сечения элементов ферм до усиления, $см^2$, принимая при расчёте на прочность и выносливость по сечению нетто, а при расчёте на устойчивость – по сечению брутто; при расчёте по прикреплению элементов учитывается приведенная рабочая площадь заклёпок или высокопрочных болтов;

$p = \sum n_{pi} p_i$ и $p' = \sum p_i$ - соответственно расчётная и нормативная

постоянная нагрузки; p_i и n_{pi} - интенсивности и коэффициенты надёжности по нагрузке для отдельных частей постоянной нагрузки (от веса металла, мостового полотна и других постоянных нагрузок);

φ_0 - коэффициент продольного изгиба для сжатых элементов;

θ - коэффициент, учитывающий понижение динамического воздействия подвижной нагрузки при расчёте на выносливость;

γ_g – коэффициент понижения основного расчетного сопротивления металла при расчёте на выносливость.

В случае недостаточной грузоподъёмности (при $K < K_0$) необходимо усиление соответствующих элементов пролётного строения, которое производится обычно путём увеличения площади сечения элементов. Усиление элементов может производиться с разгрузкой их от действия собственного веса или без разгрузки.

Как правило, при проведении усиления элементов пролётного строения разгрузка их от действия собственного веса не производится. В этом случае (при усилении элементов без разгрузки от действия собственного веса) постоянная нагрузка полностью передаётся на «старый» металл ферм. Добавляемый металл включается в работу только на временную нагрузку, а величина допускаемой временной нагрузки k_{yc} , кН/м пути, и классы K_{yc} усиленных элементов будут определяться по формулам:

- при расчёте на прочность

$$k_{yc.n} = \frac{1}{\varepsilon_v n_v \Omega_v} (0,1mRG_{yc} - \varepsilon_p \gamma_{yc} p \Omega_p); K_{yc.n} = \frac{k_{yc.n}}{k_{et}(1 + \mu)}; \quad (6)$$

- при расчёте на устойчивость сжатых элементов

$$k_{yc.y} = \frac{1}{\varepsilon_v n_v \Omega_v} (0,1m\varphi_{yc} RG_{yc} - \varepsilon_p \gamma_{yc} p \Omega_p); K_{yc.y} = \frac{k_{yc.y}}{k_{et}(1 + \mu)}; \quad (7)$$

- при расчёте на выносливость

$$k_{yc.s} = \frac{1}{\varepsilon_v \Omega_v} (0,1m\gamma_g RG_{yc} - \varepsilon_p \gamma_{yc} p \Omega_p); K_{yc.s} = \frac{k_{yc.s}}{k_{et}(1 + \mu)}, \quad (8)$$

где дополнительно обозначено:

$G_{yc} = G_0 + \rho_0 G_H$ – расчётная площадь сечения элементов после усиления, $см^2$;

G_0 – расчётная площадь поперечного сечения элементов, стыков или прикрепления до усиления; G_H – расчётная площадь сечения нового (добавляемая при усилении) металла;

ρ_0 – коэффициент, принимаемый равным единице при прикреплении нового металла высокопрочными болтами или сваркой, а при прикреплении заклёпками – меньшим единицы;

$\gamma_{yc} = G_{yc} / G_0$ – коэффициент, учитываемый при расчёте элементов, усиливаемых без разгрузки их от действия собственного веса.

Приведенные формулы для допускаемых нагрузок и классов усиливаемых элементов пролётных строений, имеющих недостаточную грузоподъёмность, позволяют определить необходимую величину добавляемой площади сечения элементов для увеличения класса элементов до заданного уровня.

Для случая расчёта классов элементов по прочности из формул (6) при $\gamma_{yc} = G_{yc} / G_0$ находим

$$K_{yc.n} = \frac{1}{k_{et}(1 + \mu)\varepsilon_v n_v \Omega_v} \cdot \left(0,1mRG_{yc} - \varepsilon_p \frac{G_{yc}}{G_0} p \Omega_p \right) = \frac{G_{yc}}{G_0} \cdot \frac{1}{k_{et}(1 + \mu)\varepsilon_v n_v \Omega_v} (0,1mRG_0 - \varepsilon_p p \Omega_p). \quad (9)$$

Далее с учётом зависимостей (3) получим

$$K_{yc.n} = \frac{G_{yc}}{G_0} K_n \text{ и } \frac{G_{yc}}{G_0} = \frac{K_{yc.n}}{K_n}. \quad (10)$$

Из последнего равенства при

$$G_{yc} = G_0 + \rho_0 G_H \text{ и } K_{yc.n} = K_n + \Delta K_n,$$

где $G_0 = F_{HT}$ – площадь нетто сечения элемента до усиления, $см^2$,

$G_H = \Delta F_{HT}$ – площадь нетто добавляемого сечения при усилении элемента, $см^2$ и ΔK_n – необходимое увеличение класса элемента, находим в явном виде необходимую величину новой (добавляемой) площади нетто усиливаемого элемента

$$\Delta F_{HT} = \frac{F_{HT}}{\rho_0} \cdot \frac{\Delta K_n}{K_n}. \quad (11)$$

Таким образом, для обеспечения прочности сечений элементов в случае проведения усиления без разгрузки их от действия собственного веса необходимая величина добавляемой площади сечения элемента оказывается пропорциональной существующей площади сечения и относительному увеличению класса элемента. При прикреплении нового металла высокопрочными болтами или сваркой величина коэффициента ρ_0 принимается равной единице. В случае прикреплении нового металла заклёпками коэффициент $\rho_0 < 1$, а величина его определяется в соответствии с указаниями отраслевого стандарта [2].

При недостаточной прочности прикрепления элементов необходимое увеличение приведенной расчётной площади ΔF_0^β прикрепления их определяется по формуле

$$\Delta F_0^\beta = F_0^\beta \cdot \frac{\Delta K_n}{K_n}, \quad (12)$$

где F_0^β – приведенная расчётная площадь заклёпок или высокопрочных болтов, $см^2$, которая вычисляется в зависимости от их количества по формулам:

- при прикреплении на заклёпках $F_0^\beta = n_z / \mu_0$;

- при прикреплении на высокопрочных болтах $F_0^\beta = n_b / \mu_b$; n_z и n_b – соответственно количество заклёпок или болтов в прикреплении элемента;

$1/\mu_0$ и $1/\mu_b$ – приведенные расчётные площади одной заклёпки или одного болта, $см^2$, определяемые согласно указаниям стандарта [2].

Используя формулы (4), (7) и (5), (8), были получены также формулы для вычисления необходимой площади сечений после усиления и площади нового (добавляемого) металла для других случаев:

- необходимая площадь брутто после усиления $F_{ус.у}$, $см^2$, при недостаточной грузоподъёмности элементов ферм по устойчивости и величина необходимой добавляемой площади брутто $\Delta F_{бр}$, $см^2$,

$$F_{ус.у} = F_{бр} \cdot \frac{K_{ус.у}}{K_y} \cdot \frac{\varphi_0 - \varepsilon_p p \Omega_p / 0,1mRF_{бр}}{\varphi_{ус} - \varepsilon_p p \Omega_p / 0,1mRF_{бр}}; \quad (13)$$

$$\Delta F_{бр} = (F_{ус.у} - F_{бр}) / \rho_0, \quad (14)$$

где $F_{бр}$ – площадь брутто сечения до усиления, $см^2$;

- необходимая площадь нетто после усиления $F_{ус.в}$, $см^2$, при недостаточной грузоподъёмности элементов ферм по выносливости и величина необходимой добавляемой площади нетто $\Delta F_{нт}$, $см^2$,

$$F_{ус.в} = F_{нт} \cdot \frac{K_{ус.в}}{K_v} \cdot \frac{\gamma_v - \varepsilon_p p' \Omega_p / 0,1mRF_{нт}}{\gamma_{ус.в} - \varepsilon_p p' \Omega_p / 0,1mRF_{нт}}; \quad (15)$$

$$\Delta F_{нт} = (F_{ус.в} - F_{нт}) / \rho_0, \quad (16)$$

где $F_{нт}$ – площадь нетто сечения до усиления, $см^2$.

Значения коэффициентов продольного изгиба φ_0 и $\varphi_{ус}$, а также коэффициентов γ_v и $\gamma_{ус.в}$ уменьшения расчётного сопротивления металла при расчёте на выносливость определяется согласно указаниям стандарта [2].

Расчётами на прочность и выносливость находится необходимая площадь сечения нетто добавляемого при усилении металла, а площадь сечения брутто и подбор листов или металла фасонных профилей подбирается затем с учётом ослаблений их отверстиями для высокопрочных болтов.

В случае проведения усиления с *разгрузкой* элементов от действия собственного веса новый металл включается (после выполнения усиления) в работу на действие постоянной и временной нагрузок, а величина коэффициента $\gamma_{ус}$ в формулах (6), (7) и (8) для усиленных элементов принимается равной единице.

В этом случае для площади сечения добавляемого при усилении металла получены следующие формулы:

- по результатам расчёта элементов на прочность

$$\Delta F_{нт} = (F_{ус.нт} - F_{нт}) = F_{нт} \cdot \frac{\Delta K}{K} \left(1 - \frac{\varepsilon_p p \Omega_p}{0,1mRF_{нт}}\right); \quad (17)$$

- по результатам расчёта сжатых элементов на устойчивость

$$\Delta F_{бр} = (F_{ус.бр} \frac{\varphi_{ус}}{\varphi_0} - F_{бр}) = F_{бр} \cdot \frac{\Delta K}{K} \left(1 - \frac{\varepsilon_p p \Omega_p}{0,1mR\varphi_0 F_{бр}}\right); \quad (18)$$

- по результатам расчёта элементов на выносливость

$$\Delta F_{нт} = (F_{ус.нт} \frac{\gamma_{ус.в}}{\gamma_v} - F_{нт}) = F_{нт} \cdot \frac{\Delta K}{K} \left(1 - \frac{\varepsilon_p p' \Omega_p}{0,1mR\gamma_v F_{нт}}\right); \quad (19)$$

где обозначено $F_{нт}$, $F_{бр}$, $F_{ус.нт}$, $F_{ус.бр}$ – соответственно площади нетто и брутто сечения элементов до усиления и после усиления, $см^2$;

$\Delta F_{нт}$ и $\Delta F_{бр}$ – необходимые площади сечения нетто и брутто добавляемого металла по результатам соответствующих расчётов, $см^2$;

φ_0 и $\varphi_{ус}$, γ_v и $\gamma_{ус.в}$ – коэффициенты продольного изгиба и уменьшения расчётного сопротивления при расчёте на выносливость для элементов до усиления и после усиления;

K – классы элементов до усиления, определяемые по формулам (1) и (3)-(5);

ΔK – необходимое увеличение классов элементов главных ферм, имеющих недостаточную грузоподъёмность для обеспечения пропуска по мосту современных нагрузок, а остальные обозначения и размерности величин указаны ранее.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Правила технічної експлуатації залізниць України. Затверджені наказом Укрзалізниці від 20.12.2006 р. № 411, із змінами.
2. ГСТУ 32.6.03.111-2002 Правила визначення вантажопідйомності металевих прогонових будов залізничних мостів. Затверджено наказом Міністерства транспорту України від 5.12.2001 р. № 850.
3. Інструкція з визначення умов пропуску рухомого складу по металевих та залізобетонних залізничних мостах (ЦП-0093. Київ-2002).