

Гейзен Р.Е.,  
Тимофеев М.Р.

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ОПОРНЫХ ЧАСТЯХ МАЯТНИКОВОГО ТИПА ПОДВЕСНЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ МОСТОВ

**1. Введение.** В 60-70-е годы прошлого века было построено немало железобетонных мостов рамно-подвесной системы, многие из которых в настоящее время нуждаются в ремонте. Один из них - коммунальный мост через р.Каму в г.Перми постройки 1967г. Мост выполнен по схеме  $4 \times 43,25 + 85,12 + 3 \times 127 + 85,12 + 6 \times 43,25$  (м) (проект Гипрокоммундортранса, г.Москва). Проектный габарит моста -  $G-14 + 2 \times 2,0$  (м); нормативные нагрузки - Н30, НК-80 и трамвайная нагрузка. В 1995-1997гг. по проекту института «Гипромострестроение» (г.Саратов) Мостоотрядом №123 мост был реконструирован под габарит  $G-15,5 + T1,0,75 + T2,2,0$  (м) с удалением трамвайных путей. В настоящее время «НИИ ТРАНСМОСТ» проектирует ремонт моста с увеличением габарита до  $G-16 + 2 \times 2,0$  (м) под нагрузки А11 и НК-80. При резко возросшей интенсивности движения автотранспорта и наличии множества накопившихся дефектов возникают непростые вопросы оценки грузоподъемности и временного ресурса конструкций.

В настоящей работе изложены результаты анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) одних из наиболее ответственных узлов судоходной части моста - опорных частей подвесных пролетных строений. Полученные результаты представляют интерес для других мостов с аналогично устроенными опорными частями.

**2. Постановка задачи.** Т-образные рамы моста в виде стоек с ригелями длиной  $L=83,36$ м состоят из трех секций коробчатого сечения, объединенных посредством монолитных концевых диафрагм и продольных стыков верхних плит коробов. Ригель имеет переменную высоту от 2,1 до 7,0м у опор. К диафрагмам ригелей подвешены балочные ребристые пролетные строения длиной  $L=43,2$ м, состоящие из девяти балок, объединенных по плите проезжей части монолитными стыками.

Опорные части представляют собой тяги-подвески, шарнирно соединенные с кронштейнами: верхними, заанкеренными в диафрагме ригеля, и нижними, - в поясе балки. Неподвижная опорная часть (НОЧ) отличается от подвижной (ПОЧ) маятникового типа наличием горизонтальной связи-накладки, шарнирно соединенной с подвеской и анкером в балке. Накладки в соответствии с проектом были устроены на двух подвесках из девяти.

НДС НОЧ определяется тремя концентраторами напряжений в виде отверстий в подвеске под два шарнира и болт- шарнир крепления связи. При обследовании подвесок были обнаружены вырезы серповидной формы, устроенные в местах расположения связей. Потребность в них возникла в связи с заменой изначально принятых гантелеобразных подвесок полосовыми с постоянной шириной, не увязанной с расположением анкеров для крепления накладок. Вследствие этого при монтаже были устроены серповидные вырезы. Их длина 170-230мм, стрела 35-45мм. Вырезы имеют неровные зазубренные края, что создает дополнительную концентрацию напряжений.

Обнаружены также разрушения всех связей: в одних случаях разорваны накладки, в других - срезаны болты их прикрепления. В результате подвесные пролетные строения оказались фактически подвешенными на ПОЧ с двух сторон. При движении автотранспорта они качаются на «маятниках»- подвесках с небольшими амплитудами колебаний, что сопровождается поскрипыванием в шарнирах. Расчеты показали, что разрывы связей являются закономерными и объясняются их недостаточным количеством: расчетное усилие, приходящееся на одну связь, втрое превосходит ее несущую способность. Наличие этого дефекта затрудняет проектирование ремонта деформационных швов, поскольку не определен установочный зазор. Вызывает затруднение и устранение дефекта: при наличии только двух анкеров чрезмерное усиление накладок может повлечь разрушение анкеров и привести к резкому увеличению изгибающего момента в подвеске, на который она не рассчитывалась. Затруднено и увеличение количества связей затруднено в связи с отсутствием анкеров в балках. Кроме того, крайне сложно добиться относительной равномерности усилий в связях: при их числе большем двух, схема закрепления становится статически

неопределимой с непредсказуемым распределением усилий. В итоге сохраняется вероятность повторного последовательного разрушения связей. В связи с этим исследовалась задача о НДС опорных частей.

**3. Расчетная схема.** Методом конечных элементов (КЭ) рассчитывались: подвеска подвижной опорной части; подвеска неподвижной опорной части без выреза; две подвески с вырезами (170x32мм и 230x45мм); кронштейн, заанкеренный в диафрагме короба ригеля Т-образной рамы. Расчет выполнялся на расчетные и нормативные нагрузки: постоянные от веса блока и элементов проезжей части подвесного пролетного строения, временную вертикальную нагрузку А11, а элементы НОЧ - также на горизонтальную силу, приложенную в уровне отверстия для прикрепления накладок к подвеске.

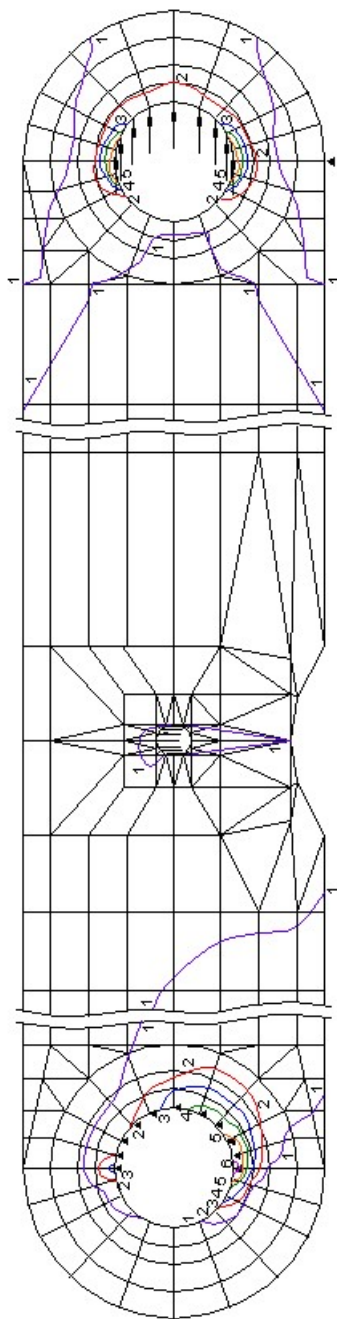
Подвески и кронштейны опорной части рассчитывались на основе плоских КЭ схем в виде пластин оболочечного типа. Виды КЭ (использовался пакет прикладных программ «ИСПА»): четырехугольник без промежуточных узлов и треугольник без промежуточных узлов. В результате расчета выдаются в узловых точках: перемещения, углы поворотов и тензор осредненных напряжений в глобальной системе координат (сверху и снизу относительно узловой точки в местной системе координат), главные напряжения (также сверху и снизу) и эквивалентные напряжения, определяемые по формуле:

$$\sigma_{\text{эКВ}} = (\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2 + \tau_{xy}^2)^{1/2}$$

Жесткостные характеристики КЭ: модуль упругости  $E = 2,06 \times 10^5$  МПа, коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ . Толщины КЭ подвесок - 80мм, КЭ кронштейна - 40мм.

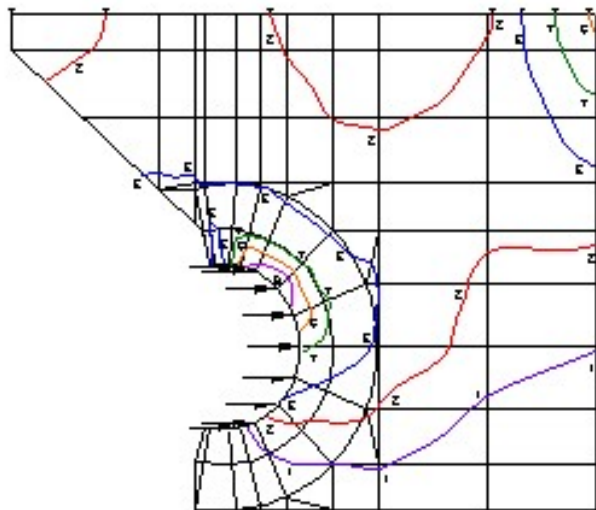
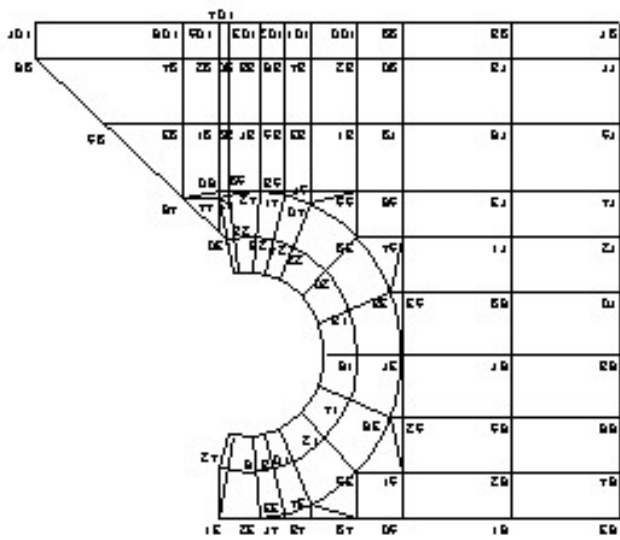
**4. Результаты расчета НДС подвесок.** Наиболее напряженными зонами подвесок являются: для ПОЧ - зоны шарниров, для НОЧ - зоны шарниров и отверстия для прикрепления накладок (здесь же находятся вырезы).

В качестве примера на рис.1 приведены изолинии эквивалентных напряжений в (НОЧ) с вырезом 170x35мм при наиболее невыгодном сочетании расчетных постоянных и временных нагрузок. Для этой подвески характерна наибольшая концентрация напряжений.



Напряжения (тс/м<sup>2</sup>): min -  $3.5712 \cdot 10^2$ ; **1** -  $7.5618 \cdot 10^3$ , **2** -  $1.4947 \cdot 10^4$ , **3** -  $2.2241 \cdot 10^4$ ,  
**4** -  $2.9536 \cdot 10^4$ , **5** -  $3.6831 \cdot 10^4$ , **6** -  $4.4125 \cdot 10^4$ , max -  $5.1420 \cdot 10^4$

*Рисунок 1 - Изолинии эквивалентных напряжений в подвеске неподвижной опорной части с вырезом ( $a = 170$ ,  $f = 35$ мм) при действии расчетных нагрузок*



Напряжения (тс/м<sup>2</sup>): min -  $2.859 \cdot 10^2$ ; **1** -  $5.5763 \cdot 10^3$ ; **2** -  $1.0867 \cdot 10^4$ ; **3** -  $.6157 \cdot 10^4$ ; **4** -  $2.1447 \cdot 10^4$ ,  
**5** -  $2.6737 \cdot 10^4$ , **6** -  $3.2028 \cdot 10^4$ ; max -  $3.7318 \cdot 10^4$

Рисунок 2 - Номера узлов КЭ схемы кронштейна и изолинии эквивалентных напряжений

При обработке распечаток и графиков из рассмотрения исключались точки по контурам окружностей, поскольку моделирование распределенной по неизвестному закону контактной нагрузки группой сосредоточенных сил и замена шарнира группой шарнирно-неподвижных опор связаны с большими погрешностями (в данном случае необходима постановка или использование известных решений контактной задачи о взаимодействии шарниров и узлов подвески).

Проверки по прочности выполнялись в соответствии с п.4.31\* СНиП 2.05.03-84\* для внецентренно растянутых элементов:

$$\sigma_{\text{экр}} = (\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2)^{1/2} \leq \gamma' R_y m; \tau_{xy} \leq R_s m, \quad (1)$$

где  $\gamma'$  - коэффициент равный 1,1 при  $\sigma_y \neq 0$ ;  $m = 1,0$  - коэффициент условий работы по табл. 60\* СНиП;  $R_y = 2900 \text{ кгс/см}^2$  - расчетное сопротивление по пределу текучести;  $R_s$  - расчетное сопротивление сдвигу, равное  $R_s = 0,58R_{yn}/\gamma_m$  ( $R_{yn} = 3400 \text{ кгс/см}^2$  - нормативное сопротивление по пределу текучести,  $\gamma_m = 1,165$  - коэффициент надежности по материалу). Следовательно, должны выполняться условия:  $\sigma_{\text{экр}} \leq 3190 \text{ кгс/см}^2$ ,  $\tau_{xy} \leq 1692,7 \text{ кгс/см}^2$ . Расчеты показали, что указанные условия прочности выполняются.

Для последующих расчетов по выносливости рассматривалась задача о НДС этой же подвески при действии только вертикальной нормативной нагрузки. Опуская распечатки напряжений, приведем величины эффективных коэффициентов концентрации напряжений  $\beta$ : в зоне отверстия для прикрепления накладок связей  $\beta=1,76$ ; в зоне выреза  $\beta=1,69$ .

Для расчета подвески на выносливость была принята выборка напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  и  $\sigma_{\text{экр}}$  в узлах КЭ от полной нормативной нагрузки при направлении горизонтальной силы, вызывающей положительные нормальные напряжения со стороны выреза.

По п.4.57\* СНиП наибольшее нормальное растягивающее напряжение  $\sigma_{\text{max, ef}}$  должно удовлетворять условию:

$$\sigma_{\text{max, ef}} \leq \gamma_w R_y m;$$

где  $m = 1$  - коэффициент условий работы по табл. 60\* СНиП,

$$\gamma_w = 1/\zeta \nu [(\alpha\beta + \delta) - (\alpha\beta - \delta)\rho] \leq 1. \quad (2)$$

Здесь  $\zeta = 0,7$  - коэффициент;  $\nu = 1$  при  $\lambda \geq 22m$ ;  $\alpha$  и  $\delta$  - коэффициенты, учитывающие марку стали и нестационарность режима нагруженности (при марке стали 15ХСНД  $\alpha=0,72$ ;  $\delta=0,24$ );  $\beta$  - эффективный коэффициент концентрации напряжений;  $\rho$  - коэффициент асимметрии цикла,

$$\rho = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}.$$

Для сечения с наибольшим эквивалентным напряжением, проходящего вертикально через точку излома профиля около приопорного участка, имеем напряжения (кгс/см<sup>2</sup>):  $\sigma_{\max, ef} = 1337,2$ ;  $\beta = 1,5$ ;  $\rho = 0,53$ ;  $\gamma_w = 1$ ;  $R_{ym} = 2900$ . Условия СнИП выполняются.

Эффективный коэффициент концентрации напряжений, определенный для прямых жестких проушин с болтом, поставленным с зазором,  $\beta = 3,8$ . Ему отвечает коэффициент  $\gamma_w = 0,46$  и  $\gamma_w R_{ym} = 1334$  кгс/см<sup>2</sup>, т.е. по условию выносливости перенапряжение составляет 0,2%. Следовательно, зоны проушин являются местами наиболее вероятного появления усталостных трещин, что должно быть принято во внимание при содержании моста.

Другие выполненные проверки по выносливости показали положительные результаты.

**5. Результаты расчета кронштейна по прочности и выносливости.** Пример изолиний эквивалентных напряжений от полной расчетной нагрузки на кронштейн приведен на рис.2. Обработка выборки напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  и  $\sigma_{эkv}$  в узлах КЭ от полной расчетной нагрузки показала, что условия прочности выполняются.

По п.4.57\* СнИП абсолютные наибольшие нормальное растягивающее  $\sigma_{\max, ef}$  и касательное  $\tau_{\max, ef}$  напряжения должны удовлетворять условиям:

$$\sigma_{\max, ef} \leq \gamma_w R_{ym}; \tau_{\max, ef} \leq 0,75 \gamma_w R_{ym}.$$

Были получены следующие значения максимальных напряжений:

- в вертикальном сечении, проходящем через точку излома профиля около шарнира:  $\sigma_{\max, ef} = 912$  кгс/см<sup>2</sup>;  $\rho = 0,53$ ;  $\gamma_w = 1$ ;  $R_{ym} = 2700$  кгс/см<sup>2</sup>;

- то же, около приопорного участка:  $\sigma_{\max, ef} = 2151 \text{ кгс/ см}^2$ ;  
 $\rho = 0,53$ ;  $\gamma_w = 1$ ;  $R_{ym} = 2700 \text{ кгс/ см}^2$ ;

- в горизонтальном сечении, проходящем через центр шарнира:  
 $\tau_{\max, ef} = 770,4 \text{ кгс/ см}^2$ ;  $\rho = 0,53$ ;  $\gamma_w = 1$ ;  $0,75R_{ym} = 2025 \text{ кгс/ см}^2$ .

Условия СНИП выполняются.

## Выводы

На основе анализа НДС элементов опорных частей подвесных пролетных строений можно сделать следующие выводы:

1. НДС подвесок и кронштейнов характеризуется высоким уровнем нормальных, касательных и эквивалентных (приведенных) напряжений, достигающих в зонах концентрации  $2500 \text{ кгс/ см}^2$ .

2. Значения эффективных коэффициентов концентрации напряжений для расчета на выносливость сечений подвески, проходящих через отверстие для прикрепления накладок и вырез, получены равными: 1,76-для зоны отверстия; 1,69 - для выреза. Коэффициент концентрации напряжений в подвеске у отверстия под шарнир - 3,8.

3. Все условия прочности и выносливости по СНИП 2.05.03-84\* в сечении на уровне горизонтальной связи с двумя концентраторами напряжений (отверстием под болт для крепления накладок и вырезом) выполняются. Из условий прочности и выносливости не выполняется условие выносливости для сечения в зоне проушины, где отмечено незначительное перенапряжение 0,2%.

4. Проектное решение по устройству всего двух НОЧ на девять балок неподвижного торца пролетного строения привело к тому, что расчетное горизонтальное усилие на одну связь втрое превысило ее несущую способность и произошло их разрушение.

5. Изгибные напряжения в подвеске, вызываемые горизонтальной силой, численно равной несущей способности накладки связи по растяжению, реализованной при ее разрушении, составляют около  $1100 \text{ кгс/ см}^2$ .

6. Наиболее опасными по условиям работы на выносливость являются участки подвески в зоне проушины, что должно учитываться при содержании моста.



Приведенный анализ не исчерпывает задачу исследования НДС опорных частей. Здесь опущены результаты анализа контактных напряжений в упругой стадии и с учетом пластических деформаций. Отметим лишь, что расчетный анализ работы ПОЧ и НОЧ был дополнен ультразвуковым контролем сплошности их элементов в зонах наивысшей концентрации напряжений, который показал положительные результаты.