
ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК [624.21.095:624.072.14]:625.1

С. В. КЛЮЧНИК^{1*}

^{1*}ОНИЛ искусственных сооружений, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38(050) 667 40 49, ел. почта ssser05@ukr.net, ORCID 0000-0001-7771-8377

ДЕФОРМАЦИОННО-НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ УЗЛА ЭТАЖНОГО СОПРЯЖЕНИЯ БАЛОК ПРОЕЗЖЕЙ ЧАСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО МОСТА

Цель. Этажное сопряжение балок проезжей части железнодорожных мостов наиболее простое по конструкции, но вследствие конструктивных недостатков подвержено многочисленным дефектам. Целью данной работы является исследование фактического деформационно-напряженного состояния узла сопряжения продольных балок с поперечными при их этажном расположении. Необходимо также определить возможное влияние совместной работы поясов ферм и балочной клетки мостового полотна на их деформационно-напряженное состояние. **Методика.** Для достижения поставленной цели проведены испытания существующего моста. Для измерения деформаций (напряжений) в элементах пролетного строения использовались тензорезисторы, наклеенные на поясных уголках поперечных и продольных балок и на выкружках нижних поясных уголков продольных балок в местах опирания их на поперечные балки. Для измерения прогибов ферм, продольных и поперечной балок при статических испытаниях использовались прогибомеры Аистова и Максимова, которые устанавливались по нижним поясам ферм в середине пролетного строения 0–1, а также на обеих продольных и одной поперечной балках в середине пролета. Прогибомеры крепились к пролетному строению и соединялись проволочными связями с поверхностью грунта. **Результаты.** Автором получено и проанализировано деформационно-напряженное состояние узла сопряжения продольных балок с поперечными при их этажном расположении. Анализ показывает, что помимо вертикального изгиба балок имеет место значительное влияние горизонтального изгиба поперечных балок и их кручения, возникающие вследствие совместной работы балок проезжей части с верхними поясами главных ферм, как у балки П0, так и у других балок. **Научная новизна.** В работе проведено исследование напряженно-деформационного состояния металлических балок проезжей части этажного расположения с учетом совместной работы балок с несущими фермами. **Практическая значимость.** При испытании пролетного строения поездной нагрузкой в поясах поперечных балок появляются значительные дополнительные напряжения от горизонтального изгиба поперечных балок и их кручения. Появление этих напряжений связано с включением продольных балок в совместную работу с верхними поясами ферм. Возникающие дефекты в продольных балках связаны с концентрацией местных напряжений из-за конструктивных особенностей этажной проезжей части.

Ключевые слова: продольные балки; деформация; напряжения; поперечные балки; металлические пролетные строения

Введение

Пролетные строения с ездой поверху позволяют уменьшить расход металла, его толщину, а также и высоту опор [1]. Проектным институтом Проектстальконструкция, начиная с 1944 г., были предложены новые типовые проекты

пролетных строений с ездой на уровне нижнего и верхнего поясов. Пролетные строения с ездой поверху имеют расчетные пролеты 44,0; 55,0 и 66,0 м и высоту главных ферм 8,5 м [7].

Отличительными особенностями пролетных строений ПСК с ездой поверху является уменьшение расстояния между главными фер-

ТРАНСПОРТЕ БУДІВНИЦТВО

мами до 4,0 м, использование скрещенных поперечных связей главных ферм и изменение конструкции балочной клетки проезжей части, в которой было принято этажное соединение продольных и поперечных балок проезжей части [1]. Конструкция опирания продольных балок на поперечные показана на рис. 1.

Этажное сопряжение балок проезжей части наиболее простое по конструкции, но вследствие конструктивных недостатков образуются многочисленные дефекты. В условиях этажного соединения балок проезжей части из-за наличия большого эксцентриситета между осями продольных и поперечных балок работа поперечных балок и деталей узлов опирания значительно осложняется, а в поясных уголках балок возникают местные перенапряжения и трещины. Соединительные заклепки (или болты) прикрепления продольных балок к поперечным также работают в тяжелых условиях.

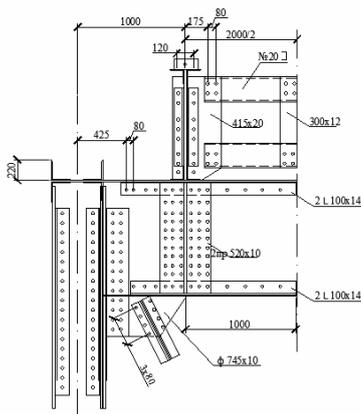


Рис. 1. Конструкция балочной клетки в пролетных строениях ПСК с ездой поверху

Неблагоприятное влияние на напряженное состояние металла в местах появления трещин имеют деформации балок, которые возникают при контакте проезжей части с верхними поясами главных ферм при загрузке всего пролетного строения подвижным составом; при этом верхние пояса ферм сокращаются, поперечные балки сгибаются в горизонтальном направлении и перекручиваются, а в месте соединения продольных и поперечных балок возникают дополнительный угол взаимного поворота и деформации конечных отрезков поясных уголков продольных балок, а также деформации

верхних поясных уголков поперечных балок в местах опирания на них продольных балок [7].

В отличие от соединения балок проезжей части на одном уровне, при этажном опирании продольных балок на поперечные балки элементы прикрепления (заклепки или болты) и полочки поясных уголков балок оказались не способными воспринимать усилия, которые возникают при линейных и угловых деформациях балок.

Цель

Проблема, которая существует сегодня в конструктивном решении этажного соединения балок проезжей части, заключается в необходимости повышения надежности конструкции узла прикрепления продольных балок к поперечным. Для этого необходимо исследовать фактическое деформационно-напряженное состояние узла сопряжения продольных балок с поперечными. В данной работе с целью определения особенности работы балочной клетки этажного сопряжения выполнен анализ результатов испытания реального сооружения. Целью статических испытаний было измерение напряжений в продольных и поперечных балках проезжей части и других элементах пролетного строения при различных установках испытательной нагрузки. Особое внимание при исследованиях напряжений было обращено на определение напряжений в нижних поясных уголках продольных балок возле их прикрепления к поперечным балкам, поскольку именно в этих зонах сосредоточены основные разуплотнения.

Методика

Работы выполнены ОНИЛ искусственных сооружений Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна на железнодорожном мосту через реку Мокрая Московка на 186 км линии Кривой Рог–Волноваха.

Нумерация опор принята по ходу километров в направлении от Кривого Рога до Волновахи, начиная с № 0. Пролетные строения моста нумерованы двойными арабскими цифрами в соответствии с номерами опор, на которые они опираются. Поперечные балки – по ходу километров, в соответствии с названием узла ферм (П0–П8), а продольные балки пролетных строе-

ТРАНСПОРТЕ БУДІВНИЦТВО

ний – слева направо, начиная с единицы (Б1 и Б2).

Для измерения деформаций (напряжений) в элементах пролетного строения использовались тензорезисторы, наклеенные на поясных уголках поперечных и продольных балок и на выкружках нижних поясных уголков продольных балок в местах опирания их на поперечные балки.

Для измерения прогибов ферм, продольных и поперечной балок при статических испытаниях использовались прогибомеры Аистова и Максимова, которые устанавливались по нижним поясам ферм в середине пролетного строения 0 – 1, а также на обеих продольных и одной поперечной балках в середине пролета. Прогибомеры крепились к пролетному строению и соединялись проволочными связями с поверхностью грунта.

Статические испытания проводились в «окна» продолжительностью по 2 часа. В качестве испытательной нагрузки применено два маневровых тепловоза ЧМЭ-3. Схемы расстановки тензорезисторов при статических испытаниях пролетного строения показаны на рис. 2–4.

реку Мокрая Московка на 186 км линии Кривой Рог-Волноваха расположен на прямой в плане и площадке. Отверстие моста перекрыто двумя металлическими пролетными строениями, с ездой поверху расчетным пролетом 44,0 м.

Железнодорожный мост через реку Мокрая Московка был построен в 1903 г. по однопролетной схеме 1×88 м, затем подвергался разрушениям в 1920 и 1943 гг. В 1948 г. мост восстановлен по схеме 2×44,0 м.

Полная длина моста 107,96 м. По конструкции пролетные строения одинаковы. Пролетные строения состоят из двух сквозных клепаных ферм с ездой поверху, с треугольной решеткой, а также дополнительными стойками и подвесками. Расстояние между фермами 4,0 м, высота ферм 8,5 м. Фермы изготовлены по проекту Проектстальконструкции под нагрузку Н7. Пояса ферм Н-образного сечения. Продольные горизонтальные связи между фермами расположены в уровне верхних и нижних поясов, а поперечные связи – в четных узлах ферм в виде пересекающихся диагоналей.

Проезжая часть состоит из клепаных продольных и поперечных балок двутаврового сечения, расположенных этажно.

Результаты

Однопутный железнодорожный мост через

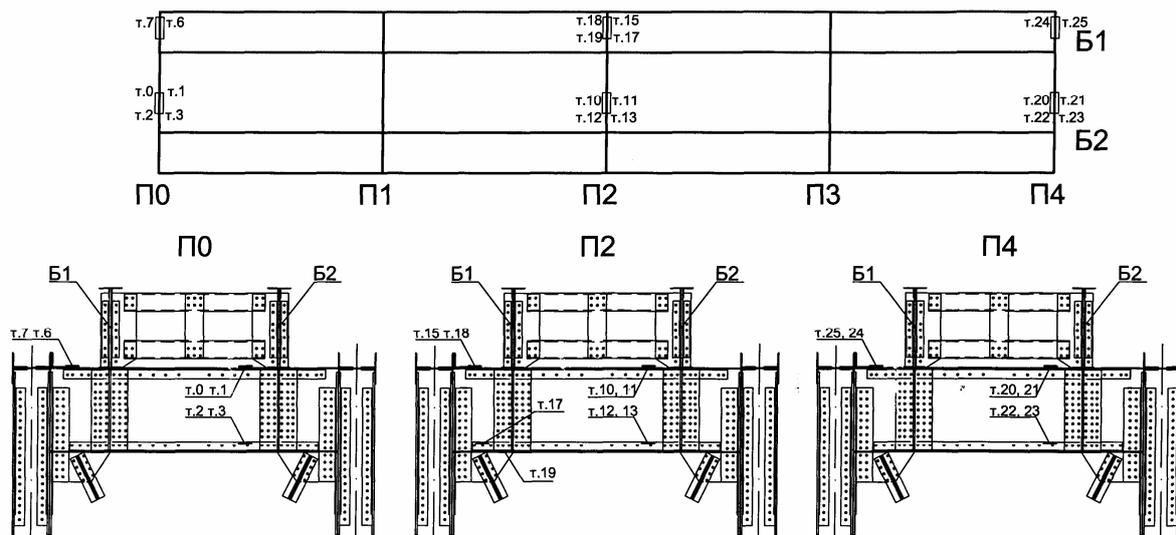
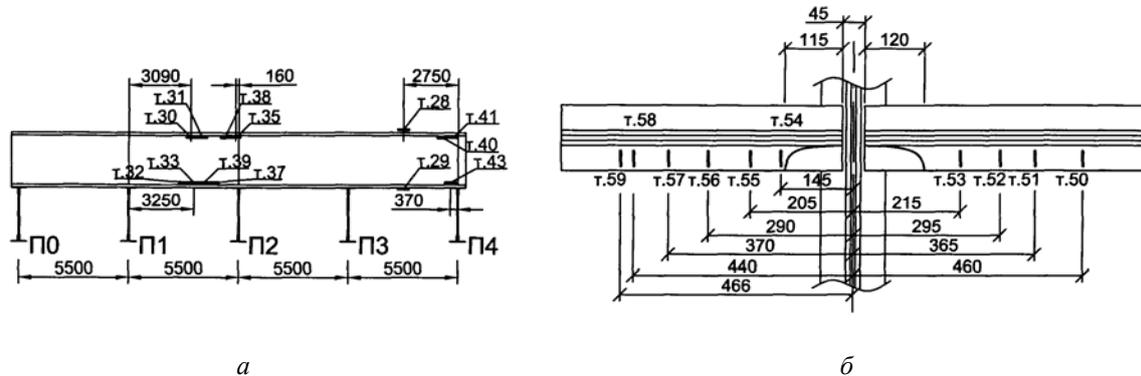


Рис. 2. Расстановка тензорезисторов при статических испытаниях пролетного строения

ТРАНСПОРТЕ БУДІВНИЦТВО

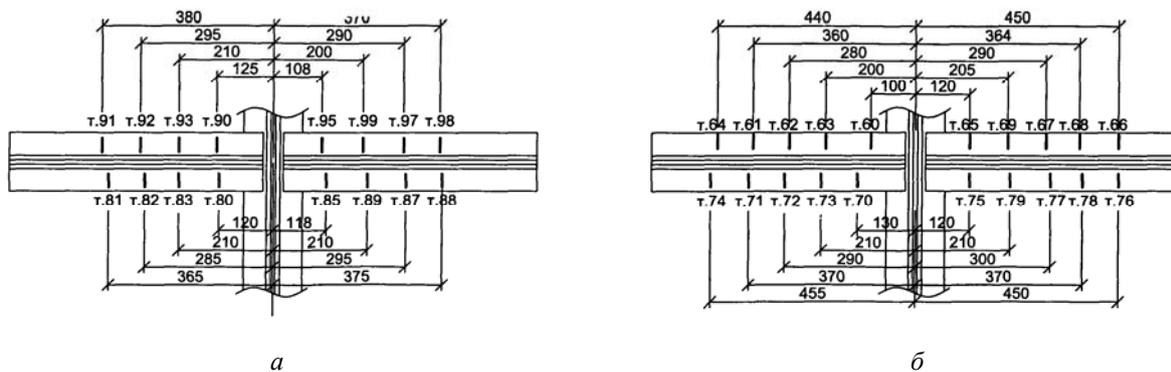


а

б

Рис. 3. Расстановка тензорезисторов на продольной балке Б1:

а – на продольной левой балке Б1; б – на продольной левой балке Б1 в сопряжении с П2



а

б

Рис. 4. Расстановка тензорезисторов на левой Б1 и правой Б2 продольных балках в месте опирания на поперечную балку П4:

а – продольная правая балка Б2 в сопряжении с П4; б – продольная левая балка Б1 в сопряжении с П4

Продольная балка крепится к поперечной четырьмя болтами. Расстояние между продольными балками – 2,0 м.

Опоры моста двухпутные, массивные. Устои обсыпного типа сооружены на естественном основании. Слой подстилающий опоры – гранит, промежуточная опора бетонная, массивная, сооружена в 1948 г., основание опоры на опускном колодце.

Перед испытаниями было проведено обследование мостового перехода, которое включало натурный осмотр пролетных строений, опорных частей и опор моста, обследование русла реки и подходов к мосту, освидетельствования состояния мостового полотна и пути на мосту и подходах [5, 8, 13].

Общим дефектом обоих пролетных строе-

ний является коррозия горизонтальных листов верхних и нижних поясов главных ферм до 1 мм, шелушение краски на элементах главных ферм, загрязнение горизонтальных поверхностей фасонок, поясов сыпучими грузами, неудовлетворительный отвод влаги с поясов ферм.

Одними из наиболее существенных обнаруженных дефектов является расстройство в узлах сопряжения балок проезжей части.

Разрывы заклепок, ослабление болтов, развитие трещин вдоль обушков поясных уголков продольных балок в узлах, их сопряжения с поперечными, отмечались при обследованиях еще с 1958 г. Некоторые трещины в процессе эксплуатации моста были засверлены, а позднее произведены вырезы в нижних поясных

ТРАНСПОРТЕ БУДІВНИЦТВО

уголках продольных балок. Однако развитие трещин продолжается: по левым продольным балкам у поперечной балки ПЗ на пролетном строении 0–1 и у поперечных балок П1, ПЗ, П7 на пролетном строении 1–2, а также по правой продольной балке у поперечной балки П5 на пролетном строении 0–1. Длина некоторых трещин после вырезания полки поясного уголка достигает 128 мм. В нижних поясных уголках в местах опирания продольных балок на поперечные балки П0 и ПЗ продолжается развитие трещин, и длина трещин доходит до 90 мм.

Слабые болты обнаружены: по левым продольным балкам у поперечных балок П1 – 4 шт., ПЗ – 8 шт., П6 – 6 шт., П7 – 12 шт. на пролетном строении 0–1 и у поперечных балок ПЗ – 8 шт., П7 – 6 шт. на пролетном строении 1–2; а также по правым продольным балкам у поперечных балок П5 – 4 шт., П7 – 5 шт. на пролетном строении 0–1.

Обнаружены зазоры в опирании поперечных балок на продольные: по левым продольным балкам у поперечных балок ПЗ – 1,0 мм, П7 – 1,5 мм на пролетном строении 0–1 и у поперечных балок ПЗ – 2,0 мм, П7 – 1 мм на пролетном строении 1–2; а также, по правым продольным балкам у поперечных балок П5 – 1,0 мм, П7 – 1,0 мм на пролетном строении 0–1 и у поперечной балки П6 – 1,0 мм на пролетном строении 1–2.

Одновременное наличие слабых болтов, трещин и неплотностей в опирании балок обнаружено: по левым продольным балкам у поперечных балок ПЗ, П7 на пролетном строении 0–1 и у поперечной балки ПЗ на пролетном строении 1–2; а также по правой продольной балке у поперечной балки П5 на пролетном строении 0–1.

Кроме этого на пролетном строении 0–1 в балочной клетке были обнаружены следующие дефекты:

1) выработка прокладок под «рыбками» по левым продольным балкам у поперечных балок П1 – 1 мм, ПЗ – 2 мм, П6 – 2 мм, П8 – 1 мм;

2) в верхнем поясном уголке поперечной балки П2 у места сопряжения с левой продольной балкой имеется трещина длиной 85 мм;

3) на правой продольной балке в месте примыкания поперечной балки П7 вместо 8 срезаемых заклепок установлены высокопрочные

болты;

4) искривление верхних поясных уголков на левой продольной балке в панелях 6–7 и 7–8 до 20 мм;

5) в прикреплении верхних «рыбок» левых продольных балок в панели 6–7 и 7–8 отсутствует по одной заклепке, правых продольных балок в панели 6–7 отсутствует 2 заклепки, в панели 7–8 одна заклепка.

На пролетном строении 1–2 выработка прокладок под «рыбками» по левым продольным балкам у поперечных балок достигает: у П2 – 1 мм, ПЗ – 1,5 мм, П5 – 2 мм, П7 и П8 – 1 мм.

В ряде мест на пролетном строении 0–1 на незаменённых верхних распорках поперечных связей между продольными балками имеются местные прогибы горизонтальных полок, появившиеся в результате схода подвижного состава с рельсов в 1985 г.

На пролетном строении 0–1 в первых трех панелях продольные связи между главными фермами имеют провисание до 30 мм и местные прогибы, полученные, видимо, при сбрасывании обломков мостового полотна вниз при проведении восстановительных работ после схода подвижного состава в 1985 году.

В связи с наличием трещин в балочной клетке на мосту установлено ограничение скорости до 50 км/ч.

Статические прогибы замерялись по нижним поясам в узлах Н4 обеих ферм. Наибольшая величина прогиба под локомотивом составляла 12 мм по обеим фермам. При пересчете на нагрузку Н7 относительный прогиб составляет $1/3000 I_p$, что ниже предельной величины, установленной нормами.

При испытании балок проезжей части определялось их напряженное состояние с учетом совместной работы с главными фермами и особенностей работы нижних поясных уголков продольных балок в местах их опирания на поперечные балки. Схемы загрузки при испытаниях показаны на рис. 5.

Для конечной поперечной балки П0, наиболее интенсивно включающейся в совместную работу с поясами ферм, не выгодной установкой испытательной нагрузки оказалось загрузку по схеме 6.

Наибольшие напряжения при этом в поясных уголках достигали +49,5 (т. 2) МПа и –63,7 МПа (т. 1). Напряженное состояние попе-

ТРАНСПОРТЕ БУДІВНИЦТВО

речной балки П0 при различных схемах загрузки приведено в табл. 1.

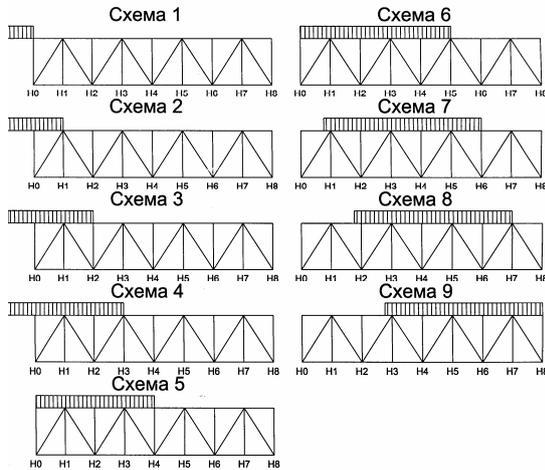


Рис. 5. Схемы загрузки пролётного строения 0–1 испытательной нагрузкой

Таблица 1

**Напряжения от статической нагрузки
в поперечной балке П0, МПа**

№ схе- мы	Точка измерения			
	0 (в)	1 (в)	2 (н)	3 (н)
1	-20,2	-27,4	30,6	6,7
2	1,9	-21,2	23,1	-4,2
3	3,4	-47,1	42,0	-5,7
4	3,9	-41,5	36,8	-8,9
5	19,3	-40,1	31,6	-16,0
6	13,0	-63,7	49,5	-3,8
7	37,6	-32,5	17,4	-22,6
8	31,3	-22,6	12,5	-18,1
9	29,4	-18,9	10,7	-14,3

Анализ показывает, что помимо вертикального изгиба балки имеет место значительное влияние горизонтального изгиба и кручения поперечных балок, возникающих вследствие совместной работы балок проезжей части с верхними поясами главных ферм, как у балки П0, так и у других балок.

Руководство по определению грузоподъёмности [3] не дает возможности определить усилия в конструктивных элементах сопряжения балок проезжей части, т.к. использует расчетные схемы, в которых продольные балки бе-

дутся разрезными, а поперечные – работающими только на изгиб в вертикальной плоскости [6]. На самом деле продольные балки являются неразрезными, а при воздействии временной нагрузки стремятся повернуться вокруг центра тяжести. Повороту опорных сечений продольных балок соответствуют продольные перемещения их нижних граней и такие же по величине горизонтальные перемещения прикрепленных верхних граней поперечных балок. Вследствие этого поперечные балки работают на горизонтальный изгиб с кручением и одновременно препятствуют поворотам опорных сечений продольных балок. Причиной этого является включение продольных балок в совместную работу с поясами ферм [1].

При загрузке пролётного строения вертикальной нагрузкой сжатые верхние пояса ферм укорачиваются в каждой панели на величину δ . Наличие продольных балок, длина которых под нагрузкой остается практически неизменной, препятствует свободным перемещениям поперечных балок, прикрепленных к верхним поясам главных ферм. Разность перемещений $\Delta\delta$ верхних поясов ферм и продольных балок проезжей части вызывает изгиб поперечных балок в горизонтальной плоскости.

Наибольшие изгибающие моменты в горизонтальной плоскости возникают в крайних поперечных балках [1]. В продольных балках появляются дополнительные сжимающие усилия, а в верхних поясах главных ферм сжимающие усилия снижаются. Изгиб продольных балок вызывает кручение поперечных балок, а также повороты узлов прикрепления и деформации изгиба поясов главных ферм в их плоскости. Изгибу соответствуют перерезывающие силы, которые раскладываются на продольные усилия, ведущие к перемещениям узлов ферм.

При исследованиях напряжений особое внимание было направлено на определение напряжений в нижних поясных уголках продольных балок возле их прикрепления к поперечным балкам, поскольку именно в этих зонах сосредоточены основные расстройств (трещины, неплотности в опирании и прикреплении балок). С этой целью по нижним поясным уголкам на выкружках продольных балках Б1 и Б2 в местах их примыкания к поперечной балке П4 были наклеены тензорезисторы с малой базой.

ТРАНСПОРТЕ БУДІВНИЦТВО

Загружение пролетного строения проводилось по схемам 1–7 (рис. 5) с установкой первой оси тепловоза через 5,5 м.

Напряженное состояние элементов балок проезжей части этажного прикрепления определяется действующими в этой зоне поперечной силой и изгибающим моментом. Момент возникает из-за фактической неразрезности продольных балок, а также особенностей работы узла опирания продольных балок на поперечные (наличие зазоров в опирании, выработок в «рыбках», неплотности приторцовки ребер жесткости и т.д.). Максимальные напряжения в сопряжении продольных балок с поперечной балкой при нагружении пролетного строения по схеме 9 достигают –136,4 МПа в т. 60. Для всех схем нагружения наибольшие экспериментальные значения местных напряжений в сопряжении продольных балок Б1, Б2 с поперечной балкой П4 приведены в табл. 2.

По длине уголков напряжения изменяются неравномерно. Наибольшие напряжения возникают, как правило, у концов уголков. В отдельных случаях максимальные и местные напряжения в уголках оказались на расстоянии до 80–100 мм от торцов уголков. В большинстве случаев изменение напряжений в уголках по их длине характеризуется изменением знака напряжений.

Помимо измерений деформаций (напряжений) в конечной поперечной балке П0 при ис-

пытаниях проводилось определение напряжений в левой продольной балке Б1 в панели 1–2 и в поперечных балках П2 и П4.

Из результатов измерений следует, что в продольной балке помимо напряжений от вертикального изгибающего момента возникают напряжения от действия других факторов (горизонтального изгиба, осевых сил и кручения поперечной балки).

Для различных схем нагружения наибольшие величины напряжений в сопряжениях продольных балок Б1 и Б2 с поперечной балкой П4 и в продольной балке Б1 (панель 1–2) приведены в табл. 2. Наибольшие величины напряжений в поперечных балках П0, П2 и П4, полученные при испытаниях, приведены в табл. 3.

Осевые сжимающие напряжения в продольных балках возникают из-за участия их в совместной работе с верхними поясами главных ферм. При этом происходит изгиб в горизонтальном направлении поперечных балок. Наиболее существенно это проявляется для поперечной балки П2 в месте примыкания ее к ферме Ф1, а в середине пролета этой балки влияние горизонтального изгиба выражено меньше (см. табл. 3).

Максимальные из всех нагружений напряжения зарегистрированы в поперечной балке П2 в месте примыкания ее к ферме Ф1 и составили: –131,5 МПа в точке 15 (схема 9) и +105,3 МПа в точке 17 (см. схем. 9).

Таблица 2

Наибольшие величины напряжений в сопряжениях продольных балок Б1 и Б2 с поперечной балкой П4 и продольной балки Б1 (панель 1-2), МПа

Схема нагружения	Б1 наружное		Б1 внутри		Б2 наружное		Б2 внутри		Б1 (панель 1-2)	
	σ_{\max}	σ_{\min}	σ_{\max}	σ_{\min}	σ_{\max}	σ_{\min}	σ_{\max}	σ_{\min}	верх	низ
1	–34,2	–2,5	–4,1	0	–5,3	0	9,2	2,9	–2,5	–8,9
2	40,0	2,5	–2,2	0	–4,3	–0,4	10,6	4,8	–16,8	10,4
3	38,4	0	4,1	0,4	–2,1	0	12,1	2,4	–29,1	4,9
4	–101,0	–0,8	–15,3	–0,4	–7,8	0	14,9	3,3	–23,7	12,8
5	–126,9	–19,2	–40,2	–0,4	–12,8	–1,4	17,3	1,4	–14,8	–4,4
6	–132,0	–18,3	–30,7	–5,4	–14,8	–2,5	–19,3	–0,9	–35,5	5,9
7	–133,0	–16,7	–31,2	–4,5	–13,1	–2,1	–19,8	–2,9	–28,1	19,7
8	–116,0	–19,5	–33,7	–7,6	–13,6	–0,5	26,5	7,4	–14,1	–8,6
9	–136,4	–6,1	–34,9	–5,2	14,4	0	27,8	5,9	–11,5	–11,8

Наибольшие величины напряжений в поперечных балках проезжей части, МПа

Схема загрузки	Поперечные балки					
	П0		П2		П4	
	верх	низ	верх	низ	верх	низ
1	-27,4	(-6,1) 30,6	-8,5	10,8	-48,9	-4,9
2	-21,2	-4,2	-27,8	24,9	-42,0	-16
3	-47,1	-5,7	-54,2	47,6	-3,6	-17,5
4	-41,5	-8,9	-67,4	34,9	-9,8	-16,3
5	-40,1	-16,0	-78,7	33,9	-57,1	-2,5
6	-63,7	-3,8	-77,8	27,8	-38,8	-22,8
7	37,6	17,4	-71,7	23,6	35,1	2,0
8	31,3	12,5	-62,5	17,4	-32,7	3,1
9	29,4	10,7	-38,9	0,8	-66,0	-36,5

В продольной балке Б1 максимальные напряжения зарегистрированы в середине панели 1–2 и составили –35,5 МПа в точке 30 (схема 6) и +19,7 МПа в точке 33 (схема 7) (см. рис. 3 и рис. 5)

Научная новизна и практическая значимость

Вертикальные прогибы главных ферм при загрузке пролетного строения подвижной нагрузкой (две секции ТЭЗ + 4-осные груженные полувагоны) достигали величины 12,4 мм, 1/3500 *l_p*. При загрузке пролетного строения поездной нагрузкой в поясах поперечных балок появляются значительные дополнительные напряжения от горизонтального изгиба поперечных балок и их кручения. Появление этих напряжений связано с включением продольных балок в совместную работу с верхними поясами ферм.

Выводы

Анализ экспериментальных данных, полученных при испытаниях балок проезжей части, позволяет сделать следующие выводы.

Напряженное состояние поперечных балок П0, П2, П4 определяется в основном вертикальным изгибом. Напряжения от горизонтального изгиба и кручения появляются от совме-

стной работы балок проезжей части с поясами главных ферм.

Наиболее значительные напряжения получены от горизонтального изгиба в поперечной балке П2 в месте прикрепления её к ферме Ф1. Величины наибольших напряжений здесь получены в уголке верхнего пояса П2 в точке 15 при загрузке пролетного строения по схеме 9. В большей степени влияние горизонтального изгиба поперечных балок сказывается на величинах напряжений в горизонтальных полках уголков верхнего пояса, которыми поперечные балки крепятся к горизонтальным фасонкам верхних продольных связей между главными фермами. Здесь сказывается то обстоятельство, что на пролетных строениях, установленных на данном мосту, расстояние от оси продольной балки до прикрепления её к ферме весьма мало.

Высоким уровнем напряжений в верхних поясах поперечных балок и объясняется появление трещины в горизонтальной полке верхнего поясного уголка на участке между продольной балкой и фермой [9, 11, 15].

Напряженное состояние в середине панели 1-2 продольной балки Б1, где при испытаниях производились измерения, отличается относительно невысоким уровнем напряжений. Здесь величины напряжений оказались не более 30-40 МПа.

В тех местах, где трещины уже появились, провести измерения напряжений не было воз-

ТРАНСПОРТЕ БУДІВНИЦТВО

можности. Измерения были проведены главным образом в местах опирания продольных балок на поперечную балку П4, где трещин в нижних поясных уголках продольных балок при осмотре не зафиксировано. В этих местах проведено детальное изучение напряженного состояния. Тензорезисторы были наклеены в 32 точках на выкружках у концов нижних поясных уголков с двух сторон на каждой из продольных балок с шагом 80-100 мм.

Напряжения в уголках оказались весьма высокими (до 136,4 МПа). При этом надо отметить, что соединение продольных балок с поперечной балкой – П4, очевидно, не является наиболее напряженным узлом, поскольку в

этом месте вместо нижних «рыбок» продольных балок поставлены развитые горизонтальные фасонки прикрепления тормозных связей. Это тем более существенно в связи с тем, что в расчете при проектировании пролетных строений напряжения в этих местах не проверялись. В других сопряжениях, где уже появились трещины в уголках, напряжения, по-видимому, были ещё выше.

Все это свидетельствует о том, что конструкция сопряжения балок проезжей части с этажным расположением продольных и поперечных балок, примененная на мосту, является неудачной и требует повышения надежности конструкций прикрепления.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бычковский, Н. Н. Металлические мосты / Н. Н. Бычковский, А. Ф. Данковцев ; Саратов. гос. техн. ун-т. – Саратов, 2005. – Ч. 1. – 364 с.
2. Гибаленко, А. Н. Оценка живучести металлоконструкций при моделировании факторов эксплуатации / А. Н. Гибаленко, Т. С. Трофимчук // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 2 (62). – С. 119–128.
3. ГСТУ 32.6.03.111-2002. Експлуатація залізничних мостів. Правила визначення вантажопідйомності металевих прогонових будов залізничних мостів. – Чинний від 2001–12–05. – Київ : М-во трансп. України, 2003. – 382 с.
4. ДБН В.1.2-15:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження і впливи. – Чинний від 2009–11–11. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. – 83 с.
5. ДБН В.2.3-6:2009. Мости та труби. Обстеження і випробування. – Чинний від 2009–11–11. – Київ : М-во регіон. розвитку та буд-ва України, 2009. – 43 с.
6. ДБН В.2.3-14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування. – Чинний від 2007–02–01. – Київ : М-во буд-ва, архітектури та житл.-комун. госп-ва, 2006. – 359 с.
7. Ефимов, П. П. Проектирование мостов / П. П. Ефимов. – Омск : Дантэя, 2006. – 111 с.
8. Інструкція з визначення умов пропуску рухомого складу по металевих та залізобетонних залізничних мостах / Гол. упр. колійн. госп-ва Укрзалізниці. – Київ : М-во трансп. України, 2002. – 301 с.
9. Ключник, С. В. Опыт эксплуатации этажной проезжей части / С. В. Ключник, В. В. Марочка // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта : тез. докл. 72 Междунар. науч.-практ. конф. / Днепропетр. нац. ун-т ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна. – Днепропетровск, 2012. – С. 158.
10. Ключник, С. В. Обзор вариантов подсиления та ремонту балок проїзної частини поверхового типу / С. В. Ключник, В. В. Марочка // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2014. – Вип. 5. – С. 35–40.
11. Пат. 109806 Україна, МПК Е 01 D 1/00, Е 01 D 19/00, Е 01 D 101/30. Узел спираяння поздовжньої балки на поперечну / Марочка Віталій Владиславович, Ключник Сергій Владиславович ; заявник та патентовласник Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – № u 2016 01940 ; заявл. 29.02.2016 ; опубл. 12.09.2016, Бюл. № 17.
12. Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин [Електронний ресурс] : зб. наук. ст. / Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України. – Київ, 2015. – 816 с. – Режим доступу: <http://patonpublishinghouse.com/rus/compilations/resurs2015>. – Назва з екрана. – Перевірено : 29.05.2017.
13. Шульман, З. А. Испытания и мониторинг инженерных сооружений / З. А. Шульман, И. З. Шульман. – Днепропетровск, ЛИРА, 2013. – 536 с.
14. Gibalenko, A. N. Design requirements to structural steel durability based on level of industrial facility corrosion hazard / A. N. Gibalenko, V. Korolov, J. Filatov // Aktualnie problemy konstrukcji metalowych : Abstr. II Polish-Ukrainian International Conference APMK (27.11– 28.11.2014) / University of Technology. – Gdansk, 2014. – P. 98–102.

ТРАНСПОРТЕ БУДІВНИЦТВО

15. Ovchinnikov, P. Sing of finite element modeling for determination of buckling possibility in lengthwise stiffeners of orthotropic plate for bridge spans under operational load / P. Ovchinnikov, S. Klyuchnik // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2012. – Вип. 5. – С. 130–135.
16. Rust, I. Sicherheit technischer Anlagen – Eine sozial wissenschaftliche Analyse des Umgangs mit Risiken in Ingenieurpraxis und Ingenieurwissenschaft / Ina Rust ; Kassel university. – Kassel, 2004. – 394 p.
17. Weltshev, M. Comparison of the operating life of tank containers, tank vehicles and rail tank cars for the carriage of dangerous goods in practice, analysis of causes of damage / M. Weltshev, S. Schwarzer, F. Otremba // Chemical Engineering Transactions. – 2013. – Vol. 31. – P. 559–564. doi: 10.3303/CET1331094.

С. В. КЛЮЧНИК¹

¹ ГНДЛ штучних споруд, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38(050) 667 40 49, ел. пошта ssser05@ukr.net, ORCID 0000-0001-7771-8377

ДЕФОРМАЦІЙНО-НАПРУЖЕНИЙ СТАН ВУЗЛА ПОВЕРХОВОГО СПОЛУЧЕННЯ БАЛОК ПРОЇЗНОЇ ЧАСТИНИ ЗАЛІЗНИЧНОГО МОСТА

Мета. Поверхове сполучення балок проїзної частини залізничних мостів найбільш просте по конструкції, але внаслідок конструктивних недоліків утворюються численні дефекти. Метою даної роботи є дослідження фактичного деформаційно-напруженого стану вузла сполучення поздовжніх балок із поперечними при їх поверховому розташуванні. Необхідно також визначити можливий вплив спільної роботи поясів ферм та балочної клітки мостового полотна на їх деформаційно-напружений стан. **Методика.** Для досягнення поставленої мети проведено випробування існуючого моста. Для вимірювання деформацій (напружень) в елементах прогонової будови використовувалися тензорезистори, наклеєні на поясних кутиках поперечних і поздовжніх балок та на викружках нижніх поясних кутиків поздовжніх балок у місцях опирання їх на поперечні балки. Для вимірювання прогинів ферм, поздовжніх та поперечної балок при статичних випробуваннях використовувалися прогиноміри Аїстова і Максимова, які встановлювалися по нижніх поясах ферм у середині прогону 0–1, а також на обох поздовжніх та однією поперечною балках із середини прольоту. Прогиноміри кріпилися до прогінної будови та з'єднувалися дротяними зв'язками з поверхнею ґрунту. **Результати.** Автором отримано і проаналізовано деформаційно-напружений стан вузла сполучення поздовжніх балок із поперечними при їх поверховому розташуванні. Аналіз показує, що крім вертикального вигину балок має місце значний вплив горизонтального вигину поперечних балок та їх крутіння, що виникають внаслідок спільної роботи балок проїзної частини з верхніми поясами головних ферм, як у балки П0, так і в інших балок. **Наукова новизна.** У роботі проведено дослідження напружено-деформованого стану металевих балок проїзної частини поверхового розташування з урахуванням спільної роботи балок із несучими фермами. **Практична значимість.** При випробуванні прогонової будови поїзним навантаженням у поясах поперечних балок з'являються значні додаткові напруги від горизонтального вигину поперечних балок та їх крутіння. Поява цих напружень пов'язана з включенням поздовжніх балок у спільну роботу з верхніми поясами ферм. Виникаючі дефекти в поздовжніх балках пов'язані з концентрацією місцевих напружень через конструктивні особливості поверхової проїзної частини.

Ключові слова: поздовжні балки; деформація; напруження; поперечні балки; металеві прогонові будови

S. V. KLUCHNIK^{1*}

^{1*} Industrial Research Laboratory of Artificial Structures, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 667 40 49, e-mail ssser05@ukr.net, ORCID 0000-0001-7771-8377

STRESS-STRAIN STATE OF BEAM STAGED CONNECTION POINT OF THE RAILWAY BRIDGE TRACK-WAY

ТРАНСПОРТЕ БУДІВНИЦТВО

Purpose. The staged connections of the beams of railway bridge track-way have the simplest design, but some design flaws result in numerous defects. The purpose of the given work is to research the actual stress-strain state of the point of connection of the stringers with the floor beams on condition of their staged interposition. To determine possible effect of coupled work of deck beam grid and booms on their stress-strain state. **Methodology.** To reach the purpose of the study the testing of the existing bridge was conducted. To measure strains (stresses) in the span elements we used the strain gages glued to flange angles of stringers and floor beams and to fillets of lower flange angles of stringers in the points of their support on floor beams. To measure deflections of the truss, stringers and floor beams from static loads we used Aistov's and Maksimov's deflectometers, that were installed on lower boom in the middle of span 0-1, as well as on both stringers and floor beams in the middle of the span. Deflectometers were fastened to the span and, by wire communication, to the ground surface. **Findings.** Stress-strain state of the point of connection of the stringers with the floor beams on condition of their staged interposition was obtained and analyzed. Analysis indicates that, apart from vertical bending of the stringers and beams, there is a significant effect of horizontal bending of floor beams and their torsion, that occur due to the coupled work of track-way beams and top booms, both for P0 beam and for other beams. **Originality.** Research of stress-strain state of metal track-way staged beams while considering their coupled work with bearing trusses. **Practical value.** While testing the span under the train load, there are significant additional stresses from horizontal bending of floor beams and their torsion in the floor beam flanges. The appearance of these stresses is caused by inclusion of stringers into coupled work with top booms. Appearing flaws in stringers are caused by local stress concentration due to design features of staged track way.

Keywords: stringers; strain; stress; floor beams; metal spans

REFERENCES

1. Bychkovskiy, N. N., & Dankovtsev, A. F. (2005). *Metallicheskiye mosty*. Saratov: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.
2. Gibalenko, O. M., & Trofymchuk, T. S. (2016). Metal structures survivability assessment when simulating service conditions. *Science and Transport Progress*, 2(62), 119-128. doi: 10.15802/stp2016/67327
3. Ekspluatatsiia zaliznychnykh mostiv. Pravyla vyznachennia vantazhopidionnosti metalevykh prohonovykh sporud zaliznychnykh mostiv, GSTU 32.6.03.111-2002 (2003).
4. Sporudy transportu. Mosty ta truby. Navantazhennia i vplyvy, DBN V.1.2-15:2009 (2009).
5. Sporudy transportu. Mosty ta truby. Obstezhennia ta vyprobuvannia, DBN V.2.3-6:2009 (2009).
6. Sporudy transportu. Mosty ta truby. Pravyla proektuvannia, DBN V.2.3-14:2006 (2006).
7. Yefimov, P. P. (2006). *Proektirovaniye mostov*. Omsk: Danteya.
8. Ukrzaliznytsia. (2002). Instruktsiia z vyznachennia umov propusku rukhomoho skladu po metalevykh ta zalizobetonnykh zaliznychnykh mostakh. Kyiv: Ministry of Infrastructure of Ukraine.
9. Kliuchnyk, S. V., & Marochka, V. V. (2012). Opyt ekspluatatsii etazhnoy proezzhey chasti. Proceedings of the 72 International Scientific & Practical Conference «Problems and Prospects of Railway Transport Development», April 19-20, 2012, Dnipropetrovsk. 158.
10. Kliuchnyk, S. V., & Marochka, V. V. (2014). Review of enhancement and repair options for roadway beams of two-level type. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 5, 35-40.
11. Marochka, V. V., & Kliuchnyk, S. V. (2016). *UA Patent No.109806*. Ukrainian Intellectual Property Institute (UKRPATENT).
12. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine. (2015). *Service life and safety of structures, buildings and machinery*. Kyiv: Paton Publishing House. Retrieved from <http://patonpublishinghouse.com/rus/compilations/resurs2015>
13. Shulman, Z. A., & Shulman, I. Z. (2013). *Ispytaniya i monitoring inzhenernykh sooruzheniy*. Dnipropetrovsk: LIRA.
14. Gibalenko, A. N., Korolov, V., & Filatov, J. (2014). Design requirements to structural steel durability based on level of industrial facility corrosion hazard. *Proceedings of the II Polish-Ukrainian International Conference Aktualnie problemy konstrukcji metalowych (APMK), November, 27-28, 2014, Gdansk*. Gdansk: University of Technology.
15. Ovchinnikov, P., & Kliuchnyk S. (2014). Using of finite element modeling for determination of buckling possibility in lengthwise stiffeners of orthotropic plate for bridge spans under operational load. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 5, 130-135.

ТРАНСПОРТЕ БУДІВНИЦТВО

16. Rust, I. (2004). *Sicherheit technischer Anlagen – Eine sozial wissenschaftliche Analyse des Umgangs mit Risiken in Ingenieurpraxis und Ingenieur wissenschaft.* (Doctoral dissertation). Kassel University, Germany.
17. Weltshev, M., Schwarzer, S., & Otremba, F. (2013). Comparison of the operating life of tank containers, tank vehicles and rail tank cars for the carriage of dangerous goods in practice, analysis of causes of damage. *Chemical Engineering Transactions*, 31, 559-564. doi: 10.3303/CET1331094

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. В. Д. Петренко (Украина); д.т.н., проф. В. Е. Волковой (Украина)

Поступила в редколлегию: 10.02.2017

Принята к печати: 17.05.2017