

УДК 624.82/85 (075.8)

**Г. И. Богданов, И. И. Рыбина, А. А. Антонюк****РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОЛЕТНОГО СТРОЕНИЯ РАЗВОДНОГО МОСТА РАСКРЫВАЮЩЕЙСЯ СИСТЕМЫ**

Дата поступления: 13.04.2016

Решение о публикации: 23.05.2016

**Цель:** Исследовать влияние вынужденных – ввиду пространственной несогласованности – деформаций элементов пролетного строения разводного моста раскрывающейся системы на его напряженно-деформированное состояние. **Методы:** Для расчетно-теоретического исследования выбран метод компьютерного, или численного, моделирования, так как при изучении рассматриваемой проблемы он имеет ряд преимуществ: визуализацию объекта исследования, ускорение и замедление процессов разрушения, исследование процессов и явлений в динамике и т. д. **Результаты:** Проведены расчетно-теоретические исследования напряженно-деформированного состояния радиальных ребер жесткости трубчатой втулки и элементов главных балок. Рассмотрены два состояния пролетного строения: разведенное, при котором пролетное строение опирается на ось вращения, и наведенное, при котором пролетное строение опирается на качающиеся стойки. При этом учтена пространственная несогласованность как подшипников осей вращения, так и опорных поверхностей балансиров качающихся стоек. Приведены расчетные схемы, моделирующие только интересующую область главных балок, включающую область у осей вращения. **Практическая значимость:** Расчетно-теоретические исследования вносят вклад в комплексное решение указанной задачи, так как появляется возможность правильно и обоснованно оценить влияние рассматриваемого дефекта на работу конструкции и принять оптимальные решения, связанные с дальнейшей эксплуатацией конструкции.

Напряженно-деформированное состояние, раскрывающаяся система, разводной мост, ось вращения, ребро жесткости, сварной шов, трещины, смещение.

**Gennadiy I. Bogdanov**, Cand. Eng., professor, gibgdnv@rambler.ru; **Irina I. Rybina**, Cand. Eng., assistant professor, i.i.rybina@rambler.ru; \***Anatoliy A. Antonyuk**, postgraduate student, AAA.12.03.1992@mail.ru (Petersburg State Transport University) CALCULATION AND THEORETICAL STUDY OF STRESS-STRAIN STATE OF BASCULE BRIDGE SUPERSTRUCTURE

**Objective:** To study the influence of deformations of superstructure elements of bascule bridge forced by spatial misadjustment on its stress-strain state. **Methods:** The method of computer, or numerical simulation was selected for calculation and theoretical study as it offers several advantages for the study of the problem under consideration – visualisation of study subject, acceleration and deceleration of destruction processes, dynamic study of processes and phenomena and so on. **Results:** Calculation and theoretical studies of stress-strain state of radial reinforcement ribs of tube bushing and main beam elements. Two conditions of bridge superstructure are considered, the drawn condition, wherein the superstructure is leaning on pivotal axis, and closed condition, in which superstructure leans on gantry pillars. Spatial misadjustment of both pivotal axis bearings and bearing surface of gantry pillars' balance beams is taken into account. Calculation schemes which simulate only the main beams' part that is of interest, including the area near pivotal axes. **Practical importance:** Calculation and theoretical studies contribute to complex solution of this problem as it allows for a correct and justified evaluation of the influence of defect under consideration on the structure operation and to take optimal solutions regarding the structure's further operation.

Stress-strain state, bascule system, bascule bridge, pivotal axis, reinforcement rib, welded joint, fractures, displacement.

Разрушение сварных швов связано, очевидно, с чрезмерными напряжениями в радиальных ребрах жесткости, превышающими прочностные характеристики металла в швах. Величина напряжений в радиальных ребрах жесткости приведена в результатах натурных исследований [5]. Измерение напряжений в радиальных ребрах жесткости низовой и верховой главных балок показало, что величина напряжений определяется не только углом поворота крыла, но и взаимным положением подшипников осей вращения [1, 3, 4, 15]. Разброс напряжений на кромках ребер жесткости, одинаково ориентированных, но расположенных с разных сторон (низовой и верховой) стенок главных балок, достигал 15–96 МПа. Такое неравномерное нагружение кромок радиальных ребер жесткости объясняется изгибом стенок главных балок, который возникает из-за несоосного положения осей вращения, следовательно, одновременный поворот всех главных балок невозможен без изгибов как в стенках главных балок, так и в подкрепляющих их ребрах. В соответствии с исследованиями

[5], значения изгибающих моментов для ребер достигало 338–370 КНм. С учетом всех особенностей работы ребер жесткости и опорных стоек максимальные расчетные напряжения, возникающие от действия собственного веса крыла, от влияния неравномерного опирания главных балок на качающиеся стойки и несоосного положения подшипников осей вращения, могут достигать 210 МПа (в ребрах) [5]. Не следует забывать и про остаточные напряжения в сварных швах, которые, суммируясь с максимальными расчетными напряжениями, являются причиной разрушения (образования трещин) сварных швов.

Для выполнения расчетов использован программный комплекс MIDAS Civil 2011, верифицированный РААСН [14].

На начальном этапе расчетно-теоретического исследования была создана расчетная схема всего разводного крыла. Однако она не отражала локальные особенности работы крыла, главным образом, вблизи оси вращения и области опирания главных балок на качающиеся стойки [14].

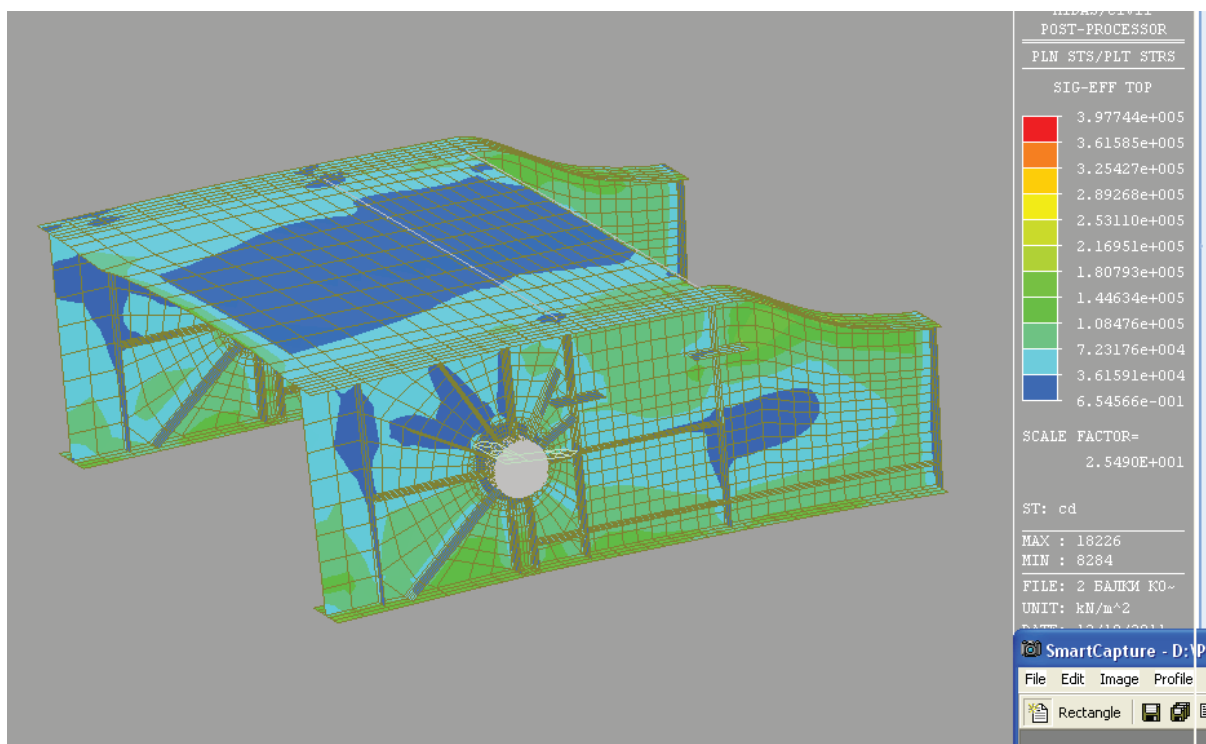


Рис. 1. Упрощенная расчетная модель

После предварительных оценочных расчетов и экспертной оценки специалистов по работе разводного крыла с учетом дефектов в сварных швах была составлена более упрощенная схема, включающая в себя две главные балки в области оси вращения (рис. 1).

Дальнейший анализ результатов позволил считать, что основной причиной возникновения отмечаемых дефектов сварных швов являются напряжения, возникающие из-за перемещений, вызываемых выявленной несоосностью осей вращения и нарушением проектного положения качающихся стоек [5, 7, 9, 11], поэтому расчет на заданные смещения оси и на единичные смещения качающейся стойки сделали только для части упрощенной расчетной схемы (рис. 2), куда вошли часть крайней балки (балка Б1) длиной 8,1 м, примыкающая к ней ортотропная плита шириной 3,9 м, ось вращения, связи и приводные балки.

Вдоль зоны контакта с остальным пролетным строением блок считается заземленным.

Балку с ребрами и ортотропную плиту моделируют плоскими элементами, ось – объемными элементами, связи и приводные балки – стержнями.

Количество элементов расчетной модели: 12 725 узлов; 67 стержневых конечных элементов; 5607 двумерных конечных элементов; 5344 объемных конечных элемента.

### **Посадка крыла на качающиеся стойки – наведенное положение**

При опирании крыла на качающиеся стойки возможны следующие вынужденные деформации [7, 9, 10]:

- разновысотное положение крайних точек опирания нижнего пояса балки из-за того, что опорная поверхность балансира качающейся стойки не горизонтальна (эквивалентно повороту нижнего пояса при опирании на качающуюся стойку);
- линейные смещения узла опирания главной балки в вертикальном направлении из-за разновысотного положения опорных поверхностей балансиров качающихся стоек разных главных балок;
- линейные смещения узла опирания поперек и вдоль плоскости стенки главной балки вследствие деформаций качающихся стоек из-за их внецентренного сжатия.

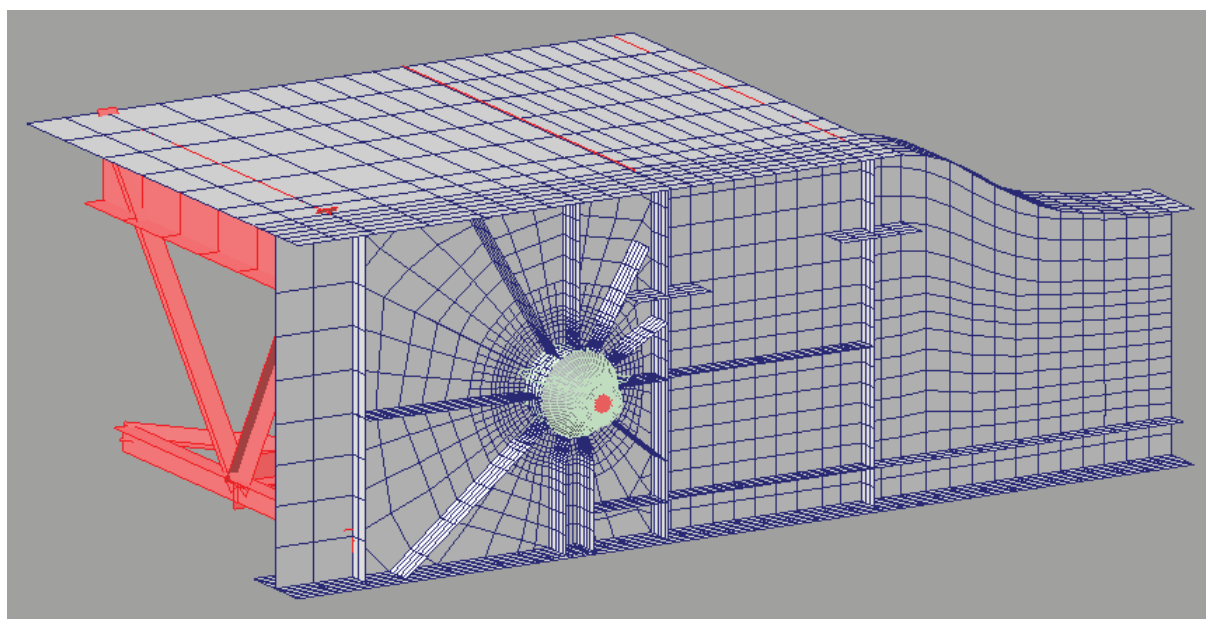


Рис. 2. Рабочая расчетная модель

При данном расчете опирание балок моделировали в виде двух узлов, присоединенных к нижнему поясу балки с помощью абсолютно жестких тел (рис. 3).

Смещения опорных узлов, для которых выполнен расчет, приведены в табл. 1. Значения рассматриваемых смещений получены в ре-

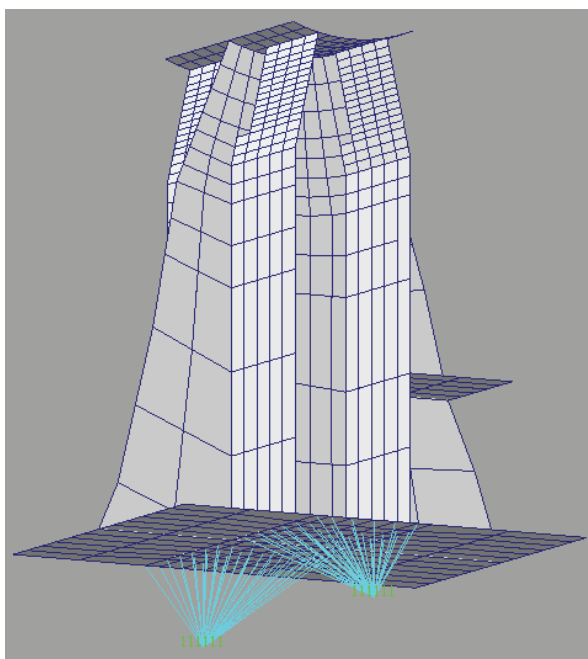


Рис. 3. Фрагмент расчетной модели в месте опирания на качающуюся стойку

зультате натурального исследования главных балок Володарского разводного моста в г. Санкт-Петербурге.

Вынужденные смещения с учетом данных табл. 1 показаны на рис. 4–6 [5, 12]. Значения напряжений, приводящих к образованию трещин в ребрах, полученные в результате расчета, приведены в табл. 2.

Графические напряжения показаны в полях эффективных напряжений (интенсивность напряжений по критерию пластичности Мизеса) (рис. 7–9).

### Посадка крыла на оси вращения – положение при разводке крыла

Согласно данным, приведенным в [5, с. 140, рис. 9, 10], построена схема деформаций, вызванных поворотом оси вращения балки в плоскости сечения (рис. 10).

На рис. 11 представлены результаты расчета напряжений в зоне вокруг отверстия и в ребрах для приведенной на рис. 10 схемы деформаций, вызванных поворотом оси вращения балки.

Характерные значения напряжений приведены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 1. Расчетные смещения опорных узлов нижнего пояса главной балки, мм

Направление смещений	Величина смещений	
	По вертикали	$Z_1 = +1,0$
Перпендикулярно оси балки	$Y_1 = Y_2 = +1,0$	
Вдоль оси балки	$X_1 = X_2 = +1,0$	

ТАБЛИЦА 2. Характерные значения напряжений, МПа

Смещения качающейся стойки	Наибольшие эффективные напряжения в зоне образования трещин	Главные напряжения
По вертикали	~ 250	-230...+240
Поперек оси балки	~ 30	-20...+30
Вдоль оси балки	~ 60	-60...+30

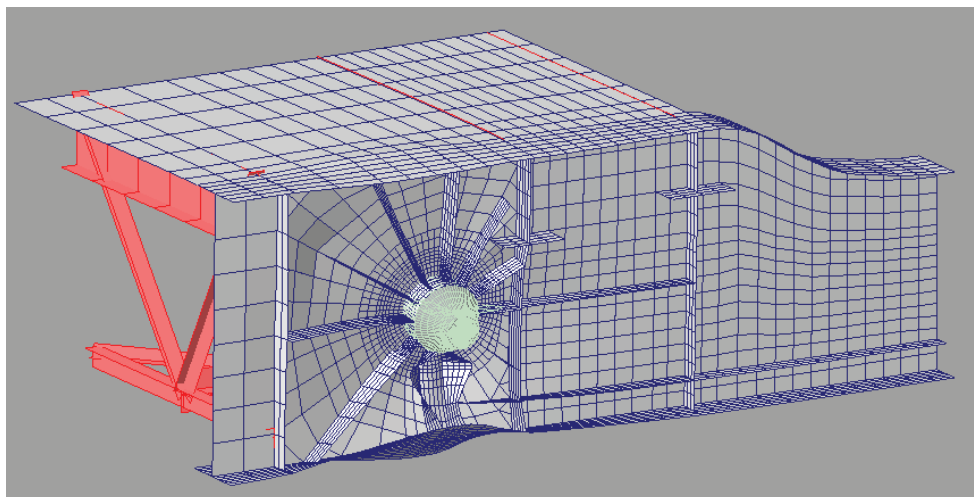


Рис. 4. Деформации, вызванные разнонаправленным смещением по вертикали (кручение нижнего пояса)

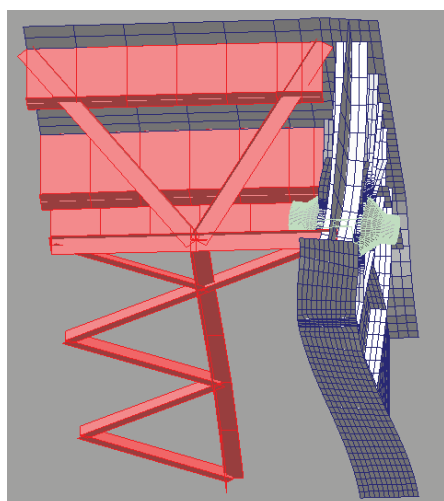


Рис. 5. Деформации, вызванные смещением поперек оси балки

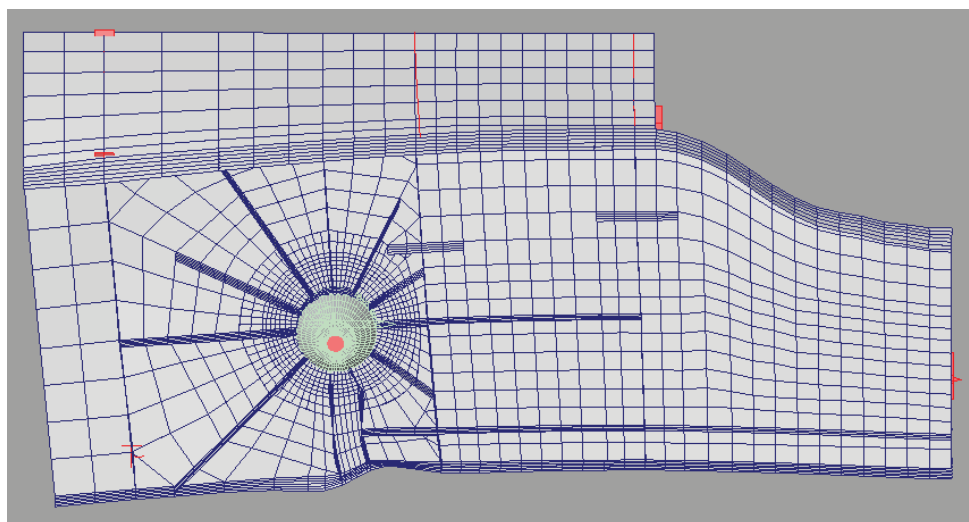


Рис. 6. Деформации, вызванные смещением опорных узлов вдоль оси моста

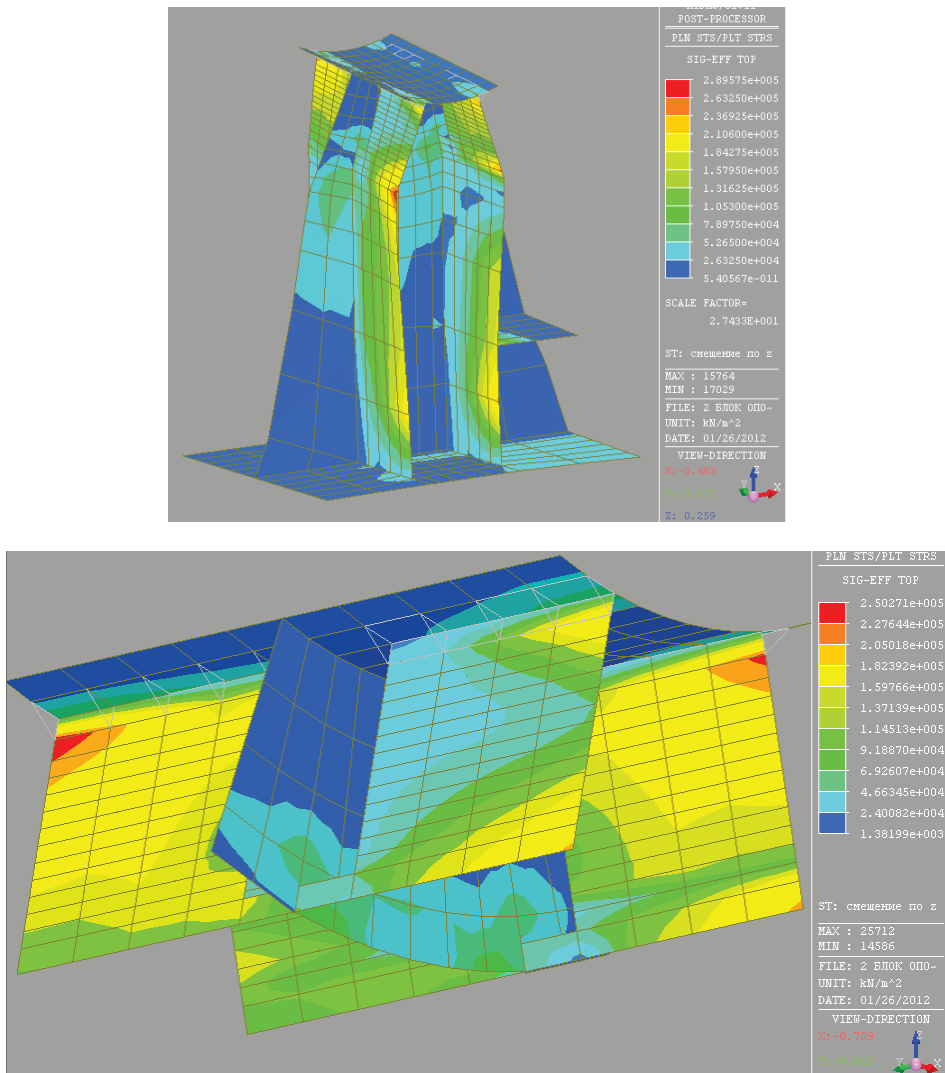


Рис. 7. Эффективные напряжения в опорных ребрах при смещении по вертикали

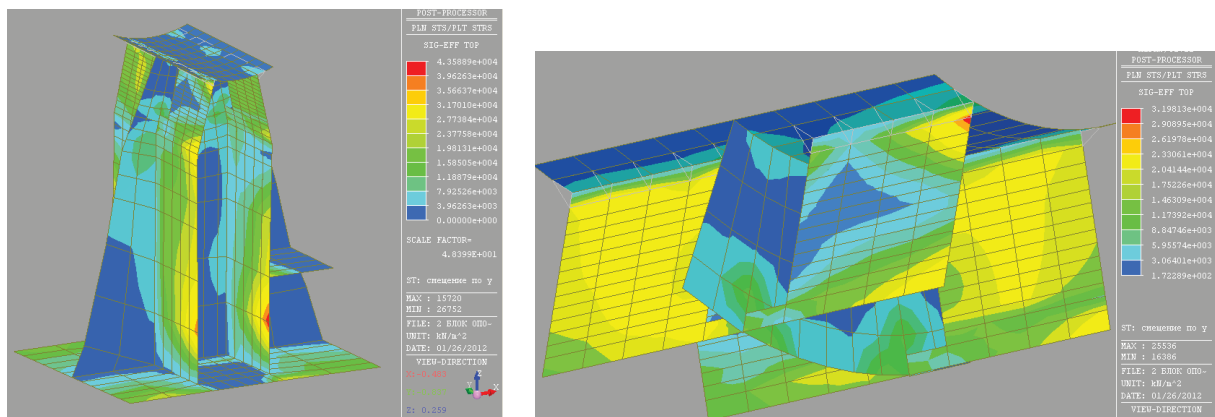


Рис. 8. Эффективные напряжения в опорных ребрах при смещении в поперечном направлении по горизонтали:

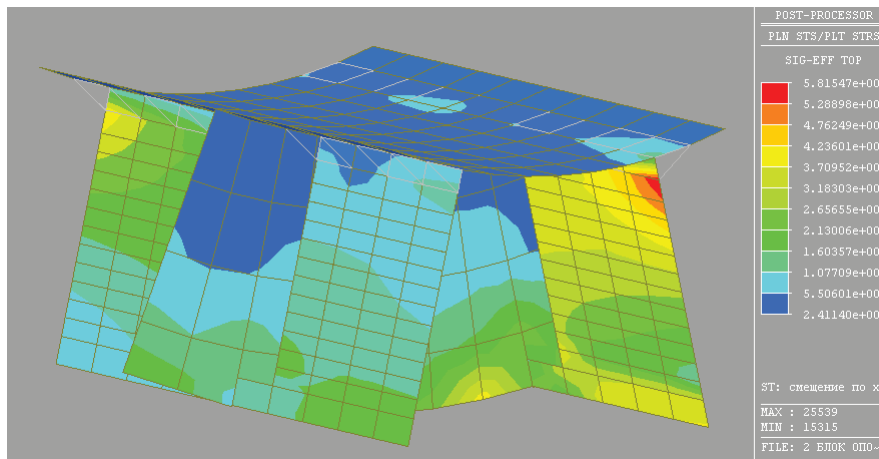
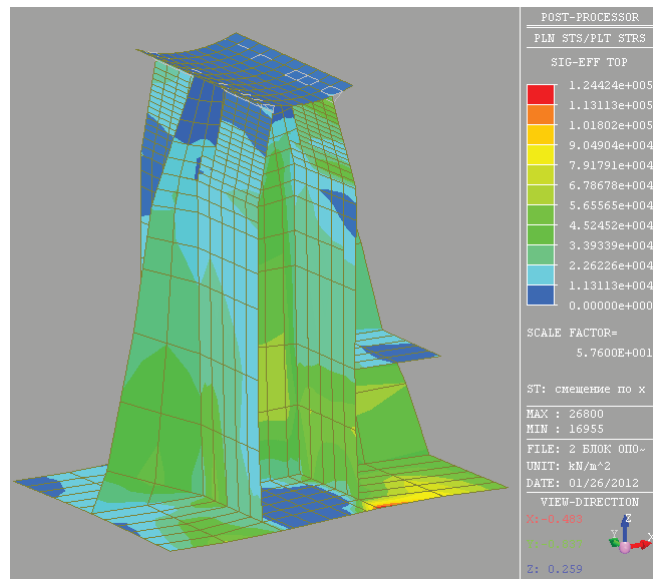


Рис. 9. Эффективные напряжения в опорных ребрах при смещении вдоль оси моста

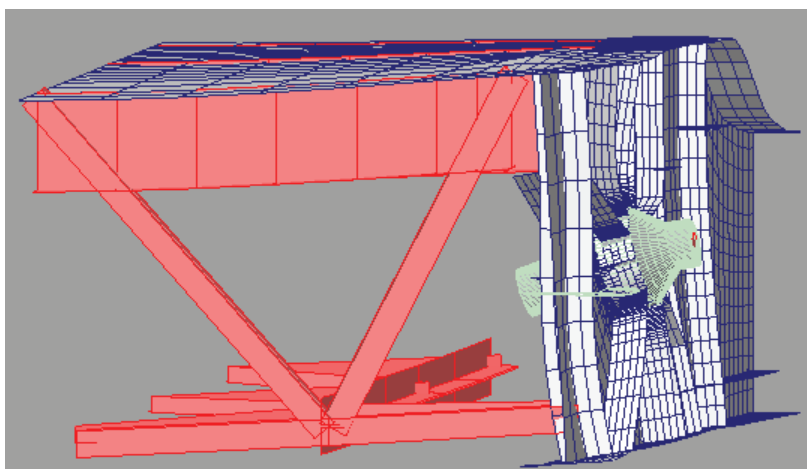


Рис. 10. Схема деформаций, вызванных поворотом оси вращения балки

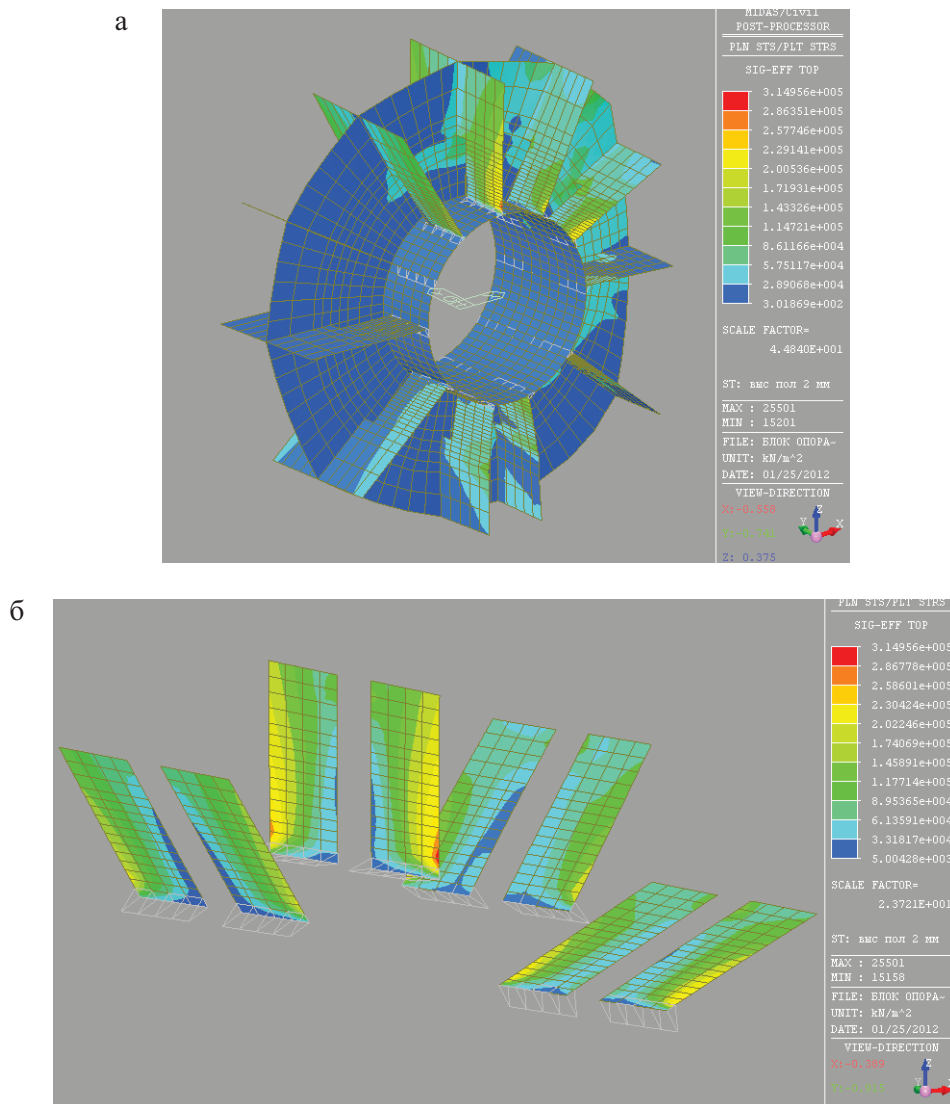


Рис. 11. Эффективные напряжения в зоне при повороте оси:  
а) вокруг отверстия; б) в ребрах (фрагмент)

ТАБЛИЦА 3. Характерные значения напряжений, МПа

Вариант расчета	Наибольшие эффективные напряжения в зоне образования трещин	Главные напряжения
Поворот оси в плоскости сечения балки	~ 310	-260...+240
Смещение оси	~ 80	-80...+40

### Оценка сварочных напряжений

На напряженное состояние ребер жесткости влияют остаточные сварочные напря-

жения, возникающие в первую очередь в тех областях, где разрушаются сварные швы, поэтому мы попытались оценить воздействие сварочных напряжений [2, 6, 8, 13].



Воздействие сварки на напряженное состояние ребер моделировали как изменение температуры объемных элементов в месте соединения ребра и цилиндрической втулки на 500 °С. Высота сечения призматических элементов, имитирующих сварной шов, была принята равной 15 мм.

Расчетная схема, принятая при оценке сварочных напряжений, приведена на рис. 12. В расчете рассматривали наложение сварного шва одного из нижних и одного из верхних ребер.

Напряженное состояние верхнего и нижнего сварного шва ребра показаны на рис. 13.

Максимальные значения напряжений в ребрах приведены в табл. 4.

Как видно, сварочные напряжения могут достигать значительной величины и действуют только в области сварного шва.

Естественно, принятые расчетная схема и расчетная температура достаточно условны. Однако приведенная оценка позволяет считать, что сварочные напряжения могут достигать больших величин именно в области сварных швов и серьезно влиять на напряженное состояние ребер в тех зонах, где отмечаются исследуемые дефекты.

### Заключение

Расчетно-теоретические исследования напряженно-деформированного состояния пролетного строения разводного моста раскрывающейся системы подтвердили, что образование трещин связано с возникновением чрезмерных напряжений в сварных швах прикрепления ра-

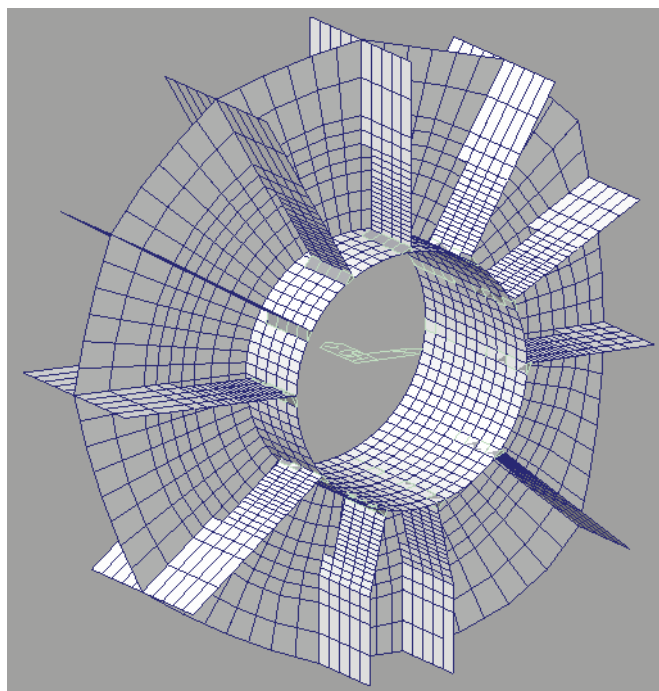


Рис. 12. Конечные элементы, моделирующие сварной шов в месте соединения ребер и втулки

ТАБЛИЦА 4. Максимальные значения напряжения в ребрах, МПа

Ребро	Наибольшие эффективные напряжения в зоне образования трещин	Главные напряжения
Верхнее, толщиной 20 мм	~ 520	-1230...+650
Нижнее, толщиной 32 мм	~ 390	-800...+390

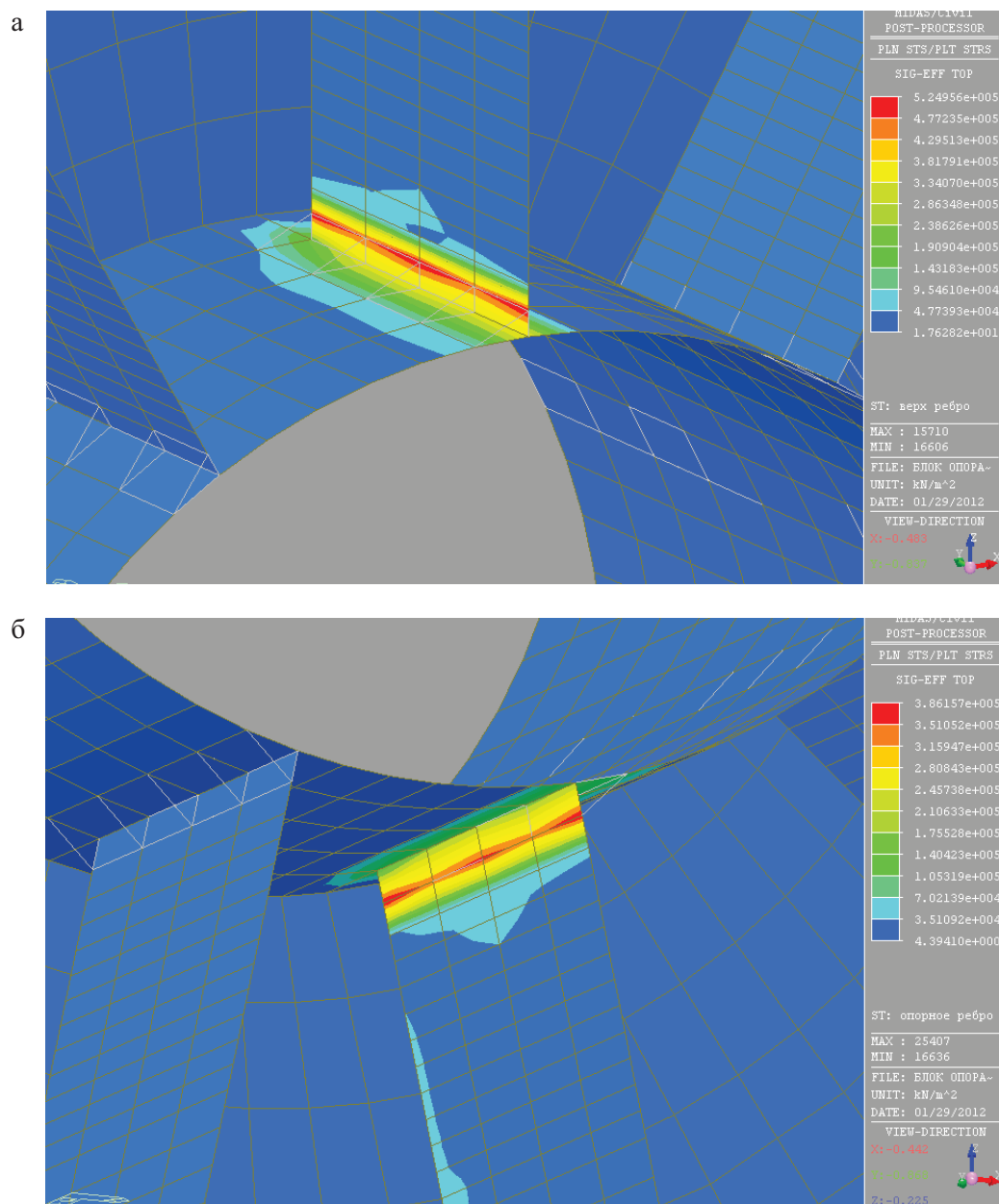


Рис. 13. Напряженное состояние сварного шва:  
а) верхнего ребра; б) нижнего ребра

диальных ребер жесткости к трубчатой втулке из-за вынужденных деформаций конструкции вследствие пространственной несогласованности опорных узлов и элементов оси вращения. При появлении трещин чрезмерные напряжения в швах устраняются, но при этом изменяется напряженно-деформированное состояние главных балок в областях, примыкающих к опорным узлам – к качающимся стойкам и осям вращения.

Также следует отметить, что полученные результаты следует применять только для приближенной оценки изменения напряженно-деформируемого состояния конструкции. Однако практическая значимость рассматриваемой задачи чрезвычайно велика, так как ее решение поможет правильно оценивать влияние рассматриваемого дефекта на работу конструкции и принимать оптимальные решения, связанные с ее дальнейшей эксплуатацией.

**Библиографический список**

1. Богданов Г. И. Натурные исследования работы элементов главных балок пролетных строений разводных мостов раскрывающейся системы у осей вращения / Г. И. Богданов // Изв. ПГУПС. – 2014. – Вып. 3 (40). – С. 135–143.

2. Богданов Г. И. Проектирование мостов и труб. Разводные мосты : учеб. пособие / Г. И. Богданов. – М. : УМЦ по образованию на ж.-д. транспорте, 2013. – 248 с.

3. Богданов Г. И. Способы разгрузки осей вращения раскрывающихся мостов и стабильность их пространственного положения / Г. И. Богданов // Украинский межотраслевой науч.-практич. семинар «Сучасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення», 30 червня – 1 липня 1998 р., Київ : сб. докл. – Киев, 1998. – С. 13–16.

4. Богданов Г. И. Техническая диагностика раскрывающихся мостов / Г. И. Богданов // Украинский межотраслевой науч.-практич. семинар «Сучасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення», 30 червня – 1 липня 1998 р, Київ: сб. докл. – Киев, 1998. – С. 23–27.

5. Богданов Г. И. Учет деформаций при оценке напряженно-деформированного состояния конструкций раскрывающихся мостов / Г. И. Богданов // Изв. ПГУПС. – 2011. – Вып. 4 (29). – С. 29–36.

6. Гатовский К. М. Теория сварочных деформаций и напряжений / К. М. Гатовский, В. А. Кархин. – Л. : ЛКИ, 1980. – 331 с.

7. Евграфов Г. К. Разводные мосты / Г. К. Евграфов. – М. : Трансжелдориздат, 1950. – 404 с.

8. Игнатъев А. Г. Определение остаточных напряжений при сварке труб из стали 45 / А. Г. Игнатъев, Г. П. Пызин // Вопросы сварочного производства : сб. науч. тр. – Челябинск : ЧГТУ, 1994. – С. 31–35.

9. Колесников Я. А. Численное моделирование сварного соединения из стали 15×5 м и оценка его напряженно-деформированного состояния / Я. А. Колесников, М. З. Ямилев, М. Р. Фазылов // Строительство уникальных зданий и сооружений : сб. науч. тр. – Уфа, 2008. – С. 135–151.

10. Кондратов В. В. Особенности динамической работы пролетных строений разводных мостов раскрывающейся системы / В. В. Кондратов, Г. И. Богданов // Изв. ПГУПС. – 2013. – Вып. 1 (34). – С. 100–108.

11. Кондратов В. В. Оценка долговечности разводных мостов раскрывающейся системы при отсутствии подклинки противовеса / В. В. Кондратов, Г. И. Богданов // Изв. ПГУПС. – 2013. – Вып. 1 (34). – С. 96–99.

12. Крыжановский В. И. Разводные мосты / В. И. Крыжановский. – М. : Транспорт, 1967. – 257 с.

13. Сальманов И. Д. Остаточные напряжения и деформации при сварке / И. Д. Сальманов, М. Ю. Барановский, В. А. Тарасов // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – № 12 (27). – С. 64–75.

14. Koglin T. L. Movable bridge engineering. – New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003.

15. MIDAS IT Россия и СНГ. – URL: <http://midasit.ru/products/products.asp?strCate=midasCivil> (дата обращения 12.03.2016).

**References**

1. Bogdanov G. I. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2014, Is. 3 (40), pp. 135-143.

2. Bogdanov G. I. *Proyektirovaniye mostov i trub. Razvodnyye mosty: uchebnoye posobiye* [Designing Bridges and Pipes. Bascule Bridges: Course Guide]. Moscow, UMTs po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte, 2013. 248 p.

3. Bogdanov G. I. *Sposoby razgruzki osey vrashcheniya raskryvayushchikhsya mostov i stabilnost ikh prostranstvennogo polozheniya* [Methods for Unloading Rotation Axis of Bascule Bridges and Stability of Their Spatial Location]. *Ukrainskiy mezhotraslevoy nauchno-prakticheskiy seminar “Suchasni problemy proektuvannya, budivnytstva ta ekspuatatsii sporud na shlyakhakh spoluchennya”* (Coll. Papers of Ukrainian Inter-Industry Sci. and Practical Seminar “Modern Problems of Designing, Building and Operating Structures on Communication Tracks). Jun. 30 – Jul. 1, 1998, Kyiv. Kyiv, 1998. Pp. 13-16.

4. Bogdanov G. I. *Tekhnicheskaya diagnostika raskryvayushchikhsya mostov* [Technical Diagnos-

tics of Bascule Bridges]. *Ukrainskiy mezhotraslevoy nauchno-prakticheskiy seminar "Suchasni problemy proektuvannya, budivnytstva ta ekspuatatsii sporud na shlyakhakh spoluchennya"* (Coll. Papers of Ukrainian Inter-Industry Sci. and Practical Seminar "Modern Problems of Designing, Building and Operating Structures on Communication Tracks). Jun. 30 – Jul. 1, 1998, Kyiv. Kyiv, 1998. Pp. 23-27.

5. Bogdanov G.I. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2011, Is. 4 (29), pp. 29-36.

6. Gatovskiy K. M. & Karkhin V.A. *Teoriya svarochnykh deformatsiy i napryazheniy* [Theory of Welding Deformations and Strains]. Leningrad, LKI, 1980. 331 p.

7. Yevgrafov G. K. *Razvodnyye mosty* [Draw Bridges]. Moscow, Transzheldorizdat, 1950. 404 p.

8. Ignatyev A. G. & Pyzin G. P. *Opredeleniye ostatochnykh napryazheniy pri svarke trub iz stali 45* [Estimation of Residual Strain in Welding Pipes Made from 45 Steel]. *Voprosy svarochnogo proizvodstva: sbornik nauchnykh trudov (Welding Industry Issue: Coll. Sci. Papers)*. Chelyabinsk, ChGTU, 1994. Pp. 31-35.

9. Kolesnikov Ya. A., Yamilev M. Z. & Fazylov M. R. *Chislennoye modelirovaniye svarnogo*

*soyedineniya iz stali 15x5 m i otsenka yego napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya* [Numerical Simulation of Welded Connection from 15 by 5 m Steel and Evaluation of Its Stress-Strain State]. *Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy: sbornik nauchnykh trudov (Construction of Unique Buildings and Structures: Coll. Sci. Papers)*. Ufa, 2008. Pp. 135-151.

10. Kondratov V. V. & Bogdanov G. I. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2013, Is. 1 (34), pp. 100-108.

11. Kondratov V. V. & Bogdanov G. I. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2013, Is. 1 (34), pp. 96-99.

12. Kryzhanovskiy V. I. *Razvodnyye mosty* [Draw Bridges]. Moscow, Transport, 1967. 257 p.

13. Salmanov I. D., Baranovskiy M. Yu. & Tarasov V. A. *Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy – Construction of Unique Buildings and Structures*, 2014, no. 12 (27), pp. 64-75.

14. Koglin T. L. *Movable bridge engineering*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003.

15. MIDAS IT Russia and CIS, available at: <http://midasit.ru/products/products.asp?strCate=midasCivil>.

БОГДАНОВ Геннадий Иванович – канд. техн. наук, профессор, [gibgdnv@rambler.ru](mailto:gibgdnv@rambler.ru); РЫБИНА Ирина Игоревна – канд. техн. наук, доцент, [i.i.rybina@rambler.ru](mailto:i.i.rybina@rambler.ru); \*АНТОНЮК Анатолий Анатольевич – аспирант, [AAA.12.03.1992@mail.ru](mailto:AAA.12.03.1992@mail.ru) (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).