

УДК 624.014.078.45

К. О. Жунев

## Параметры проведения лабораторных исследований для построения кривых усталости сварных соединений

Поступила 18.05.2020

Рецензирование 03.06.2020

Принята к печати 07.07.2020

Основным повреждением железнодорожных металлических пролетных строений, изготовленных с применением сварки, являются усталостные трещины. Как правило, усталостные трещины образуются у обрывов сварных швов вертикальных ребер жесткости главных балок или продольных балок проезжей части. Такие трещины при развитии в стенке балки оказывают негативное влияние как на прочность, так и на долговечность конструкции. Для прогнозирования времени эксплуатации таких соединений до образования трещин в 90-х гг. прошлого века были разработаны Методические указания. Для оценки остаточного усталостного ресурса металлических конструкций использовали кривые усталости, полученные в результате лабораторных испытаний типовых сварных соединений. Анализ исходных предпосылок, заложенных в основу расчетов по существующим указаниям, позволил выявить ряд недостатков. Основным недостатком, который приводит к большим погрешностям при оценке долговечности, является несоответствие между фактическим напряженным состоянием некоторых элементов пролетных строений и напряженным состоянием лабораторных образцов при испытаниях.

Для уточнения режима эксплуатации сварных соединений пролетных строений были проведены исследования их фактической напряженности под обращающейся нагрузкой. Результаты исследований показали, что наиболее распространенные усталостные трещины типа Т-9 и Т-10 образуются по причине изгибных деформаций стенки балки. Поскольку в существующих методических указаниях отсутствуют кривые усталости, полученные в результате испытания сварных соединений на изгиб, было решено провести лабораторные испытания на усталость сварных соединений, моделирующих работу элементов с трещинами Т-9, Т-10. Конструкция и материалы лабораторных образцов были назначены аналогичными конструкции и материалу главных балок или продольных балок проезжей части пролетных строений. Анализ фактической напряженности под обращающейся нагрузкой позволил выявить необходимые режимы нагружения лабораторных образцов. Расчет конечно-элементной модели образца позволил подобрать параметры внешних нагрузок и составить программу лабораторных испытаний.

**Ключевые слова:** *сварное пролетное строение, остаточный усталостный ресурс, лабораторные испытания, многоцикловая усталость, метод конечных элементов.*

На железных дорогах России около 20 % пролетных строений, выполненных с применением сварки, имеют усталостные трещины, которые являются одним из наиболее распространенных повреждений для металлических и сталежелезобетонных пролетных строений [1]. Как правило, усталостные трещины образуются в сварных швах уже через 15–20 лет интенсивной эксплуатации пролетных строений [2]. Для изучения усталостной долговечности таких конструкций еще в 80-х гг. прошлого века были проведены масштабные обследования сварных пролетных строений железнодорожных мостов, подробно описаны все случаи образования трещин, проведена типизация трещин и даны рекомендации по содержанию и усилению пролетных строений с трещинами [3]. В 90-е гг. были выпущены Методические указания [4] по расчету усталостной долговечности сварных конструкций, изготовленных из низкоуглеродистых, низколегированных и высокопрочных

сталей. Указания, действующие и в настоящее время, основаны на расчетах усталостной долговечности с использованием линейного суммирования повреждений и кривых усталости типовых сварных соединений. Применение кривых усталости позволяет определить предельное количество циклов до разрушения при заданных максимальных напряжениях и коэффициенте асимметрии цикла.

Анализ исходных предпосылок, заложенных в основу расчетов по существующим указаниям, показал, что они имеют следующие недостатки: был недостаточно проработан механизм расчета напряженного состояния в местах образования трещин; не были выполнены в полном объеме натурные исследования напряженного состояния в местах трещинообразования [5]; существовало несоответствие между фактическим напряженным состоянием некоторых элементов пролетных строений и напряженным состоянием лабораторных образцов при испытаниях.

Кривые усталости, применяемые в Методических указаниях, были получены в результате испытаний серий восьми типовых соединений, изготовленных из сталей трех классов прочности. Испытания типовых элементов в основном проводили при одноосном растяжении-сжатии в широком диапазоне асимметрии цикла напряжений [4].

На сегодняшний день известно более 20 типов усталостных трещин, встречающихся в пролетных строениях, выполненных с применением сварки. Для современных болто-сварных пролетных строений (типовые проекты инв. № 541, 563, 690, 739, 821, 1062), являющихся наиболее распространенными на сети железных дорог, характерными являются около 16 типов усталостных трещин. Наиболее распространенными из них являются трещины, начинающиеся у верхнего и нижнего концов шва прикрепления вертикальных ребер жесткости к стенкам, а затем развивающиеся на металле стенки (тип Т-9, Т-10) [6]. Прогнозирование долговечности таких соединений в настоящий момент имеет большую погрешность, поскольку стенка балки в этих местах испытывает поперечный изгиб [7] и ее напряженно-деформированное состояние не соответствует в полной мере схеме нагружения ни одного типового соединения с известными характеристиками сопротивления усталости.

С целью получения дополнительных кривых усталости сварных соединений, типичных для пролетных строений и находящихся в характерном для них напряженно-деформированном состоянии, необходимо провести лабораторные испытания на усталость образцов, моделирующих работу элементов с трещинами Т-9, Т-10. Для уточнения режима нагружения образцов (максимальных напряжений и коэффициентов асимметрии) были проведены исследования фактической напряженности сварных соединений под обращающейся нагрузкой [6, 8]. Тензометрические датчики устанавливали перпендикулярно наиболее вероятному направлению развития трещин, возникающих в результате изгибных деформаций стенки балки у выреза ребра жесткости, на расстоянии 20 мм от ребра жесткости. Расположение тензометрических датчиков по высоте стенки балки при обследовании показано на рис. 1.



Рис. 1. Расположение тензометрических датчиков на стенке продольной балки проезжей части

Измерения деформаций в стенках балок были выполнены у более чем 170 ребер жесткости в 13 пролетных строениях, эксплуатируемых на различных участках Транссибирской магистрали с различными видами мостового полотна (плиты безбалластного мостового полотна, деревянный мостовой брус), под обращающимися поездами с разной величиной осевых нагрузок. Результаты измерений показали, что диапазон максимальных напряжений цикла в стенке балки на расстоянии 2 см от ребра жесткости изменяется от 200 до 600 кгс/см<sup>2</sup>. При этом наибольшие значения напряжений были зафиксированы у верхних концов ребер жесткости, имеющих неплотное примыкание к поясам балок с зазором более 1 мм. Пример записанных графиков изменения напряжений (тензограмм), возникающих в стенке балки у вертикального ребра жесткости от прохода грузового поезда, показан на рис. 2, 3.

Для определения коэффициентов асимметрии циклов нагружений была выполнена схематизация циклов напряжений из записанных тензограмм по методу «падающего дождя» [9]. Для анализа коэффициентов асимметрии циклов напряжений, действующих у ребер жесткости при проходе грузовых поездов, была подготовлена матрица циклов, представленная на рис. 4 в виде трехмерной поверхности распределения количества циклов при различных коэффициентах асимметрии и соответствующих им максимальных напряжениях.

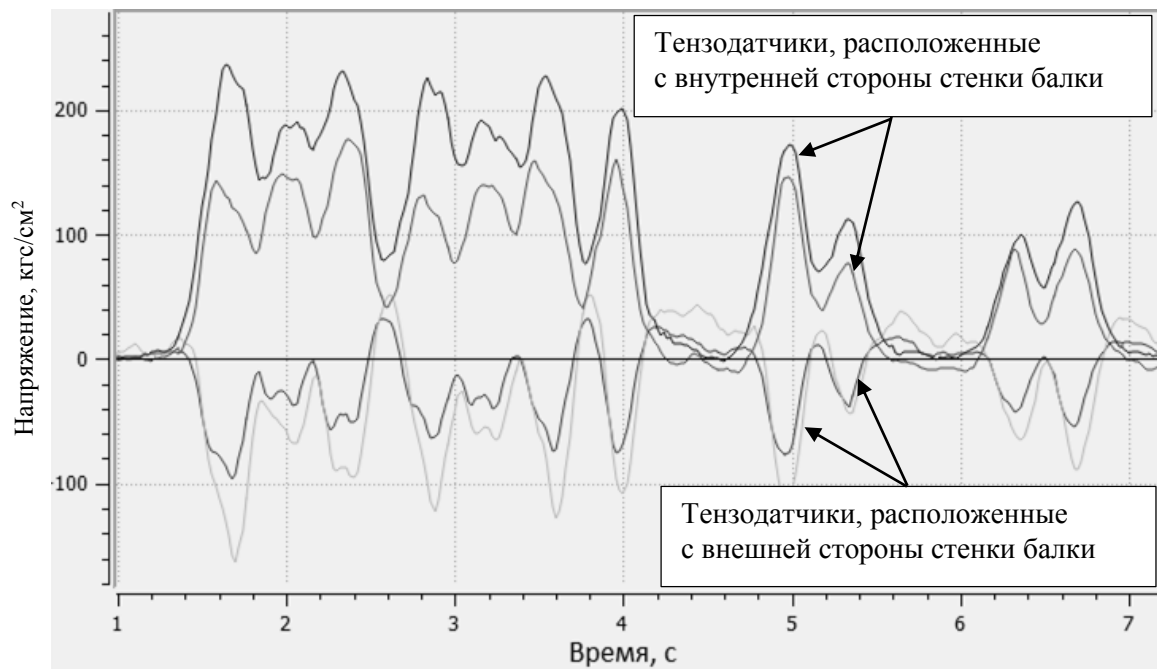


Рис. 2. Тензограмма напряжений в стенке главной балки у верхнего конца сварного шва вертикального ребра жесткости сплошностенчатого пролетного строения при проходе двух локомотивов ВЛ85 и трех вагонов

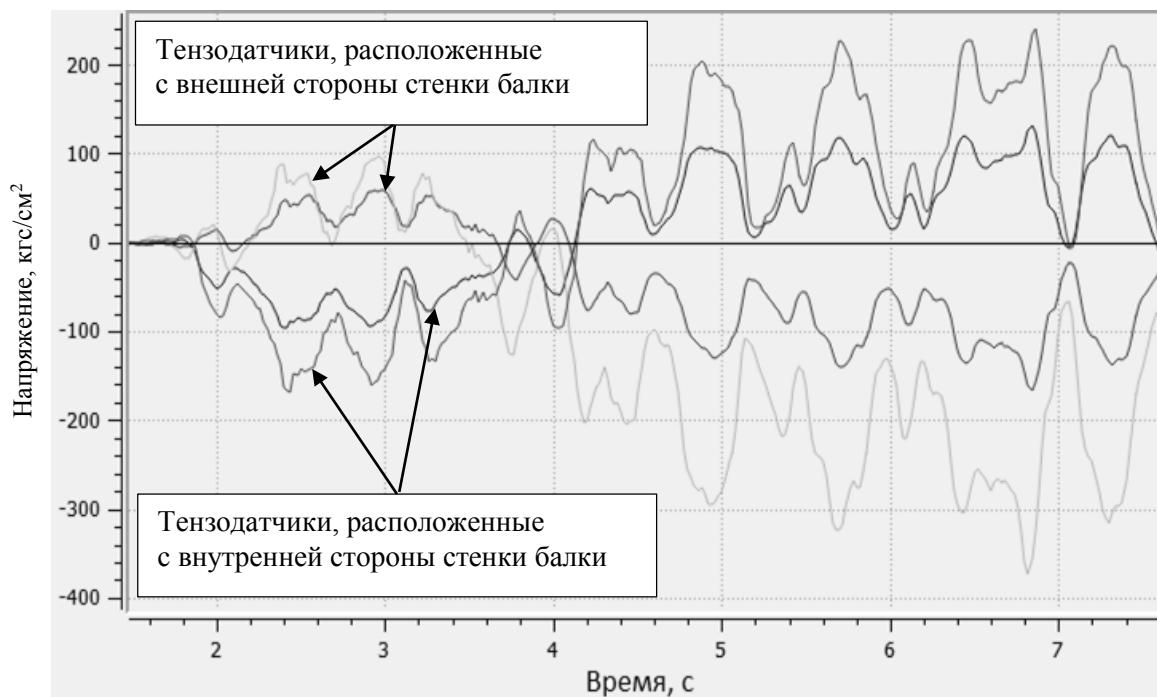


Рис. 3. Тензограмма напряжений в стенке продольной балки проезжей части у нижнего конца сварного шва вертикального ребра жесткости решетчатого пролетного строения при проходе двух локомотивов ВЛ85 и пяти вагонов

На рис. 4 видно, что наиболее часто в стенке балки действуют циклы напряжений с асимметрией от  $-0,4$  до  $+0,4$ . При этом максимальные напряжения циклов находятся в диапазоне  $200\text{--}600$  кгс/см<sup>2</sup>. Таким образом, основываясь на фактической нагруженности сварных балок пролетных строений, можно рекомендовать проведение испытаний в диапазоне коэффициентов асимметрии циклов от  $-0,4$  до  $+0,4$ .

Практика проведения исследований усталости металла показала, что для построения кривой усталости, соответствующей одному коэффициенту асимметрии цикла, необходимо использовать не менее четырех значений максимальных напряжений, а на каждом уровне максимальных напряжений цикла следует испытывать не менее трех лабораторных образцов [10, 11]. На основании результатов исследования фактической напряженности сварных соединений под обращающейся нагрузкой в рамках лабораторного исследования целесообразно проводить испытания образцов в диапазоне максимальных напряжений цикла от  $500$  до  $1\ 100$  кгс/см<sup>2</sup>. Контроль напряжений, так же как и в натурных исследованиях, следует проводить при помощи тензометрических датчиков, расположенных на стенке лабораторного образца у выреза ребра жесткости, на расстоянии  $20$  мм от него с внутренней и наружной стороны стенки, пер-

пендикулярно вероятному направлению развития усталостных трещин. В качестве тензометрической системы можно рекомендовать применение разработанного сотрудниками НИИ «Мосты» СГУПС тензометрического комплекса «Тензор-МС» [12]. Испытания следует проводить до развития усталостной трещины в основном металле длиной  $5$  мм. Фиксацию образования усталостной трещины можно производить по показаниям тензометрических датчиков, используя методы капиллярной дефектоскопии или пассивной термографии [13].

Для построения кривых усталости соединений, подверженных образованию трещин Т-9, Т-10, предпочтительно использовать конструкцию и материалы лабораторного образца, аналогичные конструкции и материалам главных балок или продольных балок проезжей части. В качестве материала лабораторных образцов следует применять стали 15ХСНД или 10ХСНД обычного или северного исполнения. Поскольку долговечность сварных соединений во многом зависит от геометрических характеристик и механических свойств сварного шва, то сварные соединения лабораторных образцов должны быть подобны соединениям в реальных конструкциях. Катет шва для прикрепления ребер жесткости к стенке следует назначать в диапа-

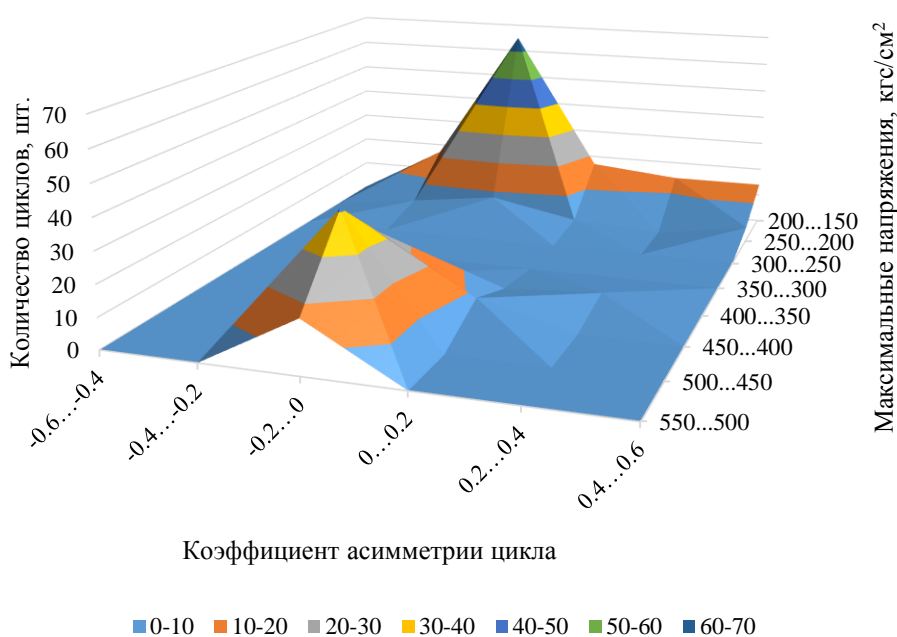


Рис. 4. Трехмерная диаграмма распределения коэффициента асимметрии циклов в зависимости от максимальных напряжений цикла

зоне от 6 до 8 мм. Ребра жесткости должны быть расположены с обеих сторон стенки. Сварные швы следует выполнять полуавтоматической или автоматической сваркой. Анализ конструкций типовых пролетных строений показал, что толщина ребра жесткости, как правило, составляет 10 мм, а толщина стенки – 12 мм. Свободную длину стенки, как и вырез ребра жесткости в типовых пролетных строениях, следует назначать не более 160 мм. Поскольку исследования сварочных напряжений [14, 15] показывают, что остаточные напряжения зависят от ширины свариваемых элементов, то ширину ребер жесткости, как и в реальных конструкциях, следует назначать не менее 120 мм. Таким образом, в качестве лабораторного образца целесообразно использование консольно-закрепленного металлического листа, к которому с двух сторон приварены ребра жесткости. Эскиз образца приведен на рис. 5.

Для моделирования изгибных деформаций стенки приложении внешней нагрузки следует осуществлять перпендикулярно плоскости листа на расстоянии от торцов ребер жесткости,

не превышающем 160 мм. В качестве источника внешней переменной нагрузки целесообразно использовать вибродвигатель с дебалансами для создания изменяющихся по гармоническому закону изгибных деформаций стенки образца. Величина вынуждающей силы вибродвигателя,  $H$ , зависит от частоты вращения и статического момента дебалансов [16] и определяется по формуле

$$P_B = M_{ст}\omega^2,$$

где  $M_{ст}$  – статический момент дебалансов вибродвигателя, кг/м;  $\omega$  – циклическая частота вращения дебалансов вибродвигателя, рад/с.

Для получения требуемых максимальных напряжений в лабораторном образце у торца ребра жесткости при помощи численного моделирования был осуществлен подбор частоты колебаний и величины внешней нагрузки. Численное моделирование производили в программе Ansys Workbench 16.2 [17]. Модель лабораторного образца была аппроксимирована объемными тетраэдрическими элементами SOLID 185. Сгущение сетки осуществляли около сварных швов ребер жесткости для

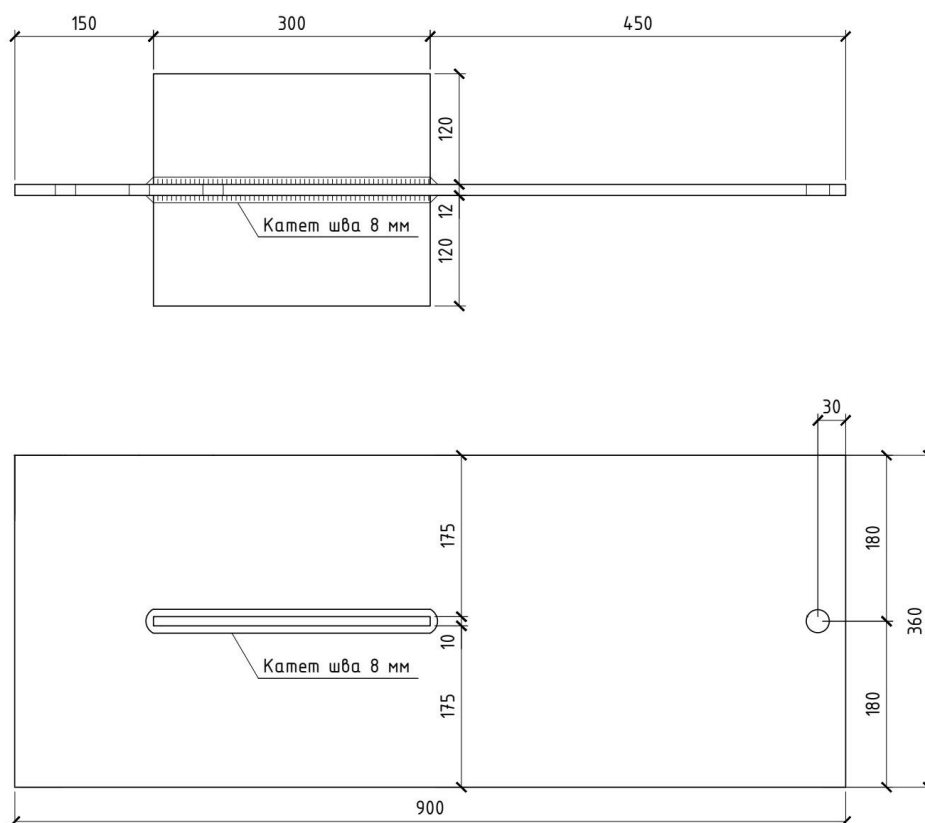


Рис. 5. Эскиз лабораторного образца

плавного изменения возникающих напряжений. В качестве материала модели была задана сталь со следующими механическими характеристиками: модуль упругости  $2 \cdot 10^5$  МПа; коэффициент Пуассона 0,3; предел текучести 250 МПа. Краевые условия были заданы в виде жесткого защемления листа с одной стороны. Внешние нагрузки прикладывали на верхнюю поверхность листа в виде распределенного давления, изменяющегося во времени по гармоническому закону и расположенного от торца ребра жесткости на расстоянии 150 мм, и двух сосредоточенных масс, моделирующих вес вибродвигателя и вес груза, необходимого для изменения средних напряжений цикла. В качестве варьируемых параметров были приняты: частота возмущающей силы и

масса груза. В качестве контролируемых параметров от действия внешней нагрузки были приняты относительные деформации узлов модели, расположение которых соответствует расположению тензометрических датчиков на реальных образцах. Конечно-элементная модель лабораторного образца приведена на рис. 6.

Результаты подбора параметров для проведения лабораторного эксперимента по получению кривых усталости сварных соединений, подверженных образованию трещин Т-9, Т-10 от действия изгибных деформаций, приведены в таблице. На рис. 7 показаны нормальные к плоскости листа напряжения в МПа от совместного действия вынуждающей силы, равной 0,3 кН, приложенной на расстоянии

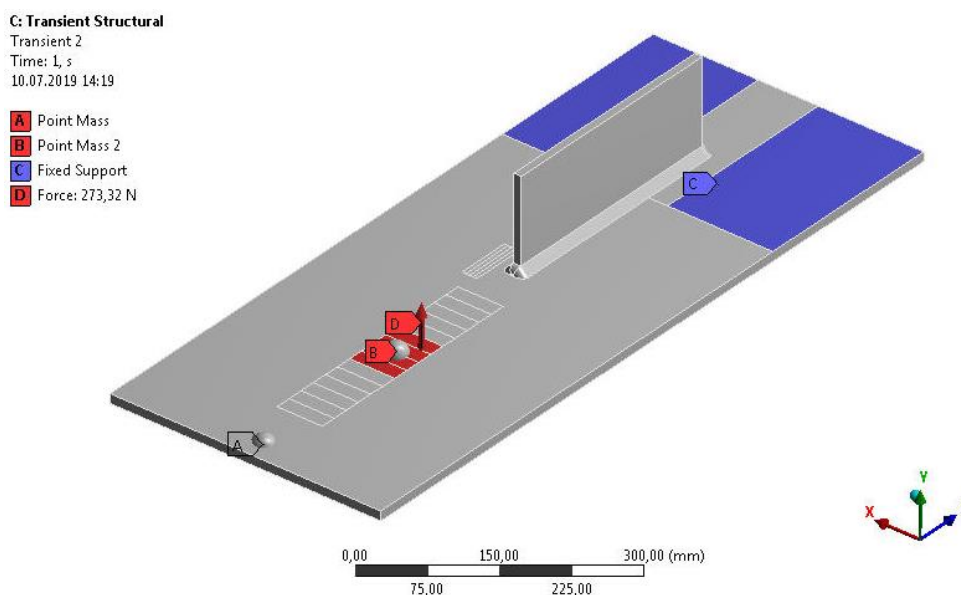


Рис. 6. Конечно-элементная модель лабораторного образца

#### Результаты подбора параметров внешних нагрузок

№ п/п	Коэффициент асимметрии цикла	Растягивающие напряжения, кгс/см <sup>2</sup>		Частота приложения вынуждающей силы, Гц	Вынуждающая сила, Н	Масса груза, кг
		min	max			
1	-0,3	-150	500	8,6	201	35
2	0,0	0	500	9,5	246	50
3	0,3	150	500	10,3	289	65
4	-0,3	-210	700	7,2	141	49
5	0,0	0	700	8,5	197	70
6	0,3	210	700	9,8	265	91
7	-0,3	-270	900	6,2	105	63
8	0,0	0	900	7,5	153	90
9	0,3	270	900	8,8	211	117
10	-0,3	-330	1 100	5,9	95	77
11	0,0	0	1 100	6,5	115	110
12	0,3	330	1 100	7,0	133	143

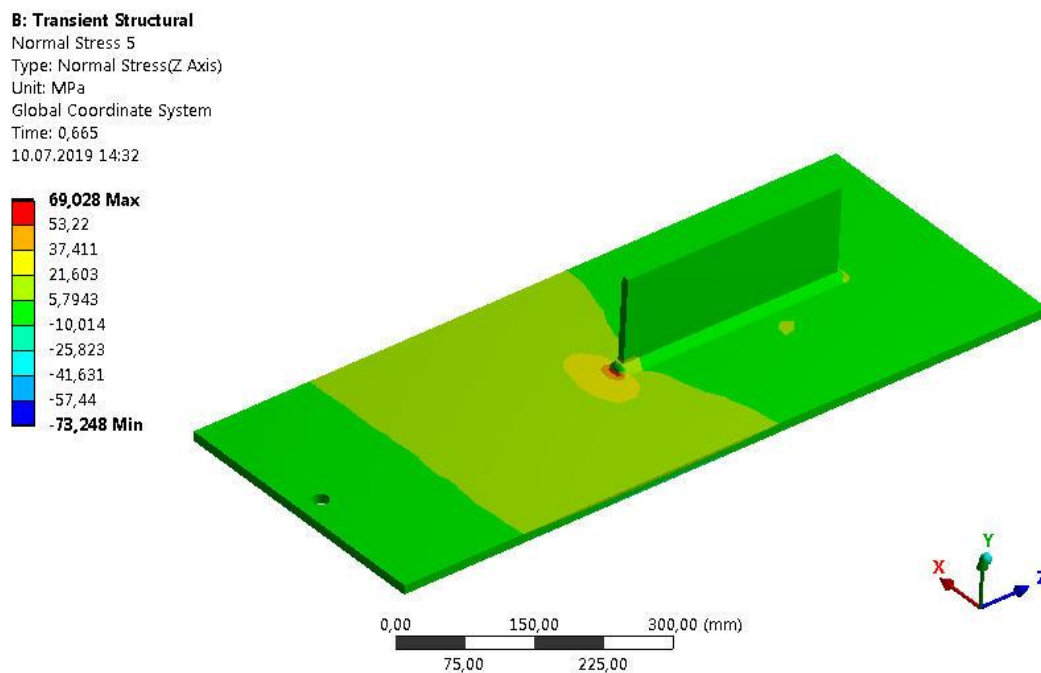


Рис. 7. Поля нормальных к плоскости листа напряжений, МПа, от совместного действия вынуждающей силы, равной 0,3 кН, и груза массой 30 кг

150 мм от торца ребра жесткости, и груза массой 30 кг.

На рис. 7 видно, что концентрация напряжений в результате изгиба листа наблюдается в месте обрыва сварного шва ребра жесткости. От совместного действия внешних нагрузок величина нормальных напряжений в месте обрыва сварного шва достигает 69 МПа. Таким образом, резкое изменение геометрии листа

увеличивает действующие в нем напряжения, которые способствуют развитию усталостных трещин. Проведение лабораторных испытаний долговечности образцов при изгибных деформациях позволит определить параметры кривых усталости для соединений, подверженных образованию трещин типа Т-9, Т-10, при характерном для них напряженно-деформированном состоянии.

### Библиографический список

1. Жунев К. О. Статистический анализ факторов трещинообразования в сварных пролетных строениях // Сборник материалов VIII Междунар. науч.-техн. конф. «Транспортная инфраструктура Сибирского региона». Иркутск, 2017. Т. 1. С. 455–460.
2. Осипов В. О. Долговечность металлических пролетных строений железнодорожных мостов. М. : Транспорт, 1982. 287 с.
3. Указания по осмотру и усилению эксплуатируемых сварных пролетных строений. М. : МПС, 1990. 28 с.
4. РД 50-694-90. Методические указания. Надежность в технике. Вероятностный метод расчета на усталость сварных конструкций. М. : Изд-во стандартов, 1991. 84 с.
5. Условия обеспечения движения тяжеловесных поездов по искусственным сооружениям / С. А. Бокарев, Ю. Н. Мурованный, С. С. Прибытков, А. М. Усольцев // Железнодорожный транспорт. 2017. № 7. С. 15–20.
6. Жунев К. О. Обследование трещинопасных узлов в болто-сварных пролетных строениях // Сборник материалов IX Науч.-практ. конф. «Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения». СПб., 2018. С. 62–70.
7. Кирьян В. И., Дворецкий В. И., Мальгин М. Г. Расчет локальных напряжений в зонах сварных соединений крупногабаритных пространственных конструкций // Автоматическая сварка. 2012. № 4. С. 3–7.
8. Жунев К. О. Динамическое воздействие подвижной нагрузки на сварные пролетные строения // Сб. науч. ст. по итогам науч.-практ. конф. «Наука и практика в решении стратегических и тактических задач устойчивого развития России». СПб., 2019. С. 9–12.

9. Федорченко Д. Г., Новиков Д. К. Методы схематизации эксплуатационного цикла изменения напряжений системой элементарных циклов // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. № 6. С. 267–271.
10. Тихомиров В. М. Расчетно-экспериментальный анализ развития усталостной трещины в монолитной панели с ребрами // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2007. № 17. С. 195–203.
11. Хлыбов А. А., Углов А. Л. Исследование накопления усталостных повреждений в образцах из стали 08Х18Н10Т при малоцикловой усталости // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2016. № 3. С. 185–190.
12. Снежков И. И., Кузьменков П. Ю. Пример применения измерительного комплекса «Тензор МС» в мостостроении // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте : материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Омск, 2013. С. 101–105.
13. Глушков С. П., Соловьев Л. Ю., Соловьев А. Л. Экспериментальная оценка долговечности сварных металлических пролетных строений мостов методом инфракрасной термографии // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2018. № 2. С. 63–71.
14. Окерблом Н. О. Сварочные напряжения в металлоконструкциях. Л. : Машгиз, 1950. 144 с.
15. Винокуров В. А. Сварочные деформации и напряжения. М. : Машиностроение, 1968. 236 с.
16. Методика балансировки дебалансов вибратора на вибропрессовом оборудовании / А.-М. С. Джашеев, А. М. Кидакоев, Ф. А. Акбаева, К. А.-М. Джашеев // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 3. С. 41–46.
17. ANSYS guide. ANSYS release 16.2. Canonsburg, 2017. 1286 p.

К. О. Zhunev

#### **Laboratory Testing Parameters for Fatigue Curves Plotting of Welded Joints**

**Abstract.** The main damage of railway welded girders is the fatigue cracks. As a rule, fatigue cracks are located near the welded stiffeners ends of the main beams or the floor beams. Developing, such cracks reduce the structure strength and its service life too. In the 1990s the guidelines that are intended for predicting the crack initiation life of welded joints were developed. Fatigue curves resulting from laboratory testing of typical welded joints were used to assess the residual life of metal structures. The analysis of the guideline calculation method has revealed some disadvantages. The main disadvantage that leads to large errors in the service life assessment is the mismatch between the actual stress–strain behavior near the welded ends of stiffeners and the stress–strain behavior of laboratory specimens.

To improve the stress–strain behavior near the welded ends of stiffeners the strains in the beam web were measured under the moving load. The research results showed that the most common fatigue cracks (T-9 and T-10) are formed due to bending deformations of the beam web. Unfortunately, guidelines do not contain fatigue curves obtained by bending test of welded joints. It was decided to conduct laboratory fatigue tests of welded specimens simulating joints with T-9, T-10 cracks. The design and materials of laboratory specimens were assigned similarly to the design and materials of the main beams or the floor beams. Analysis of the actual stresses under the moving load revealed the necessary loading conditions for laboratory specimens. Calculation of the specimen finite element model let to select the parameters of external loads and to draw up a laboratory test program.

**Key words:** *welded girder; residual fatigue life; laboratory test; high-cycle fatigue; finite element method.*

**Жунев Кирилл Олегович** – аспирант кафедры «Мосты» СГУПС. E-mail: [junev.kirill@yandex.ru](mailto:junev.kirill@yandex.ru)