

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>  
Russian journal of transport engineering

2019, №2, Том 6 / 2019, No 2, Vol 6 <https://t-s.today/issue-2-2019.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/14SATS219.pdf>

DOI: 10.15862/14SATS219 (<http://dx.doi.org/10.15862/14SATS219>)

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Бокарев С.А., Усольцев А.М. Лабораторные исследования работы мостовых конструкций, усиленных индукционной пайкой // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2019 №2, <https://t-s.today/PDF/14SATS219.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/14SATS219

**For citation:**

Bokarev S.A., Usoltsev A.M. (2019). Laboratory research on functioning of bridge structures reinforced with induction brazing. *Russian journal of transport engineering*, [online] 2(6). Available at: <https://t-s.today/PDF/14SATS219.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/14SATS219

УДК 621.791:624.24

**Бокарев Сергей Александрович**

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения», Новосибирск, Россия  
Профессор кафедры «Мосты»  
Доктор технических наук, профессор  
E-mail: bokarevsa@211.ru

РИНЦ: [http://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=277386](http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=277386)

SCOPUS: <http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57197725708>

**Усольцев Андрей Михайлович**

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения», Новосибирск, Россия  
Заведующий отделом «СибНИИ мостов»  
E-mail: Uam@stu.ru

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=970972](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=970972)

## Лабораторные исследования работы мостовых конструкций, усиленных индукционной пайкой

**Аннотация.** Сварные металлические пролетные строения мостов один из самых распространённых типов пролётных строений, несколько тысяч которых эксплуатируют на автомобильных дорогах и городских мостах. Как и у многих конструкций, созданных с использованием сварки, в них появляются усталостные трещины, ремонт которых осуществляют, как правило, постановкой перекрывающих их накладок на высокопрочных болтах. В Сибирском научно-исследовательском институте мостов (СибНИИ мостов СГУПС) разработана конструкция и технология усиления сварных пролётных строений постановкой круглых накладок с использованием индукционной пайки. Для подтверждения эффективности разработанной технологии были проведены лабораторные исследования тавровых образцов, усиленных круглыми накладками с использованием индукционной пайки. Выполненные исследования показали, что мостовые конструкции с усталостными трещинами после усиления с помощью индукционной пайки имеют показатели по прочности, на 25 % превосходящие показатели не усиленных образцов без усталостных трещин.

**Ключевые слова:** сварные пролетные строения; усталостные трещины; усиление; индукционная пайка; лабораторные исследования; прочность усиленных конструкций

### Состояние проблемы

Сварные металлические пролетные строения, в том числе с ортотропной плитой проезжей части, по данным Автоматизированного банка данных по мостам (АБДМ) Росавтодора [1], один из самых распространённых видов пролётных строений, эксплуатируемых на сети автомобильных дорог России. Как все сварные конструкции они подвержены трещинообразованию [2; 3; 4]. В процессе эксплуатации в пролётных строениях образуются усталостные трещины, требующие ремонта повреждённой конструкции. Их ремонт выполняют постановкой накладок или уголков так, чтобы они перекрывали усталостную трещину. Крепление накладок осуществляют высокопрочными болтами. На рисунке 1 приведён вид на стенку балки с накладками, перекрывающими трещину. К сожалению, указанный вид ремонта ограничен по области применения, и не является универсальным. Перспективным для ремонта усталостных трещин является способ постановки круглых накладок с применением индукционной пайки. В Сибирском научно-исследовательском институте мостов (СибНИИ мостов СГУПС) получены патенты на конструкцию и технологию этого вида усиления<sup>1</sup>. Суть способа сводится к тому, что в устье трещины в стенке балки сверлят отверстие диаметром, равным двойной толщине стенки. Затем индукционной пайкой на припой прикрепляют с двух сторон круглые пластины толщиной в половину толщины стенки. Полученная конструкция должна не только восстановить усталостную долговечность элемента с трещиной, но и увеличить несущую способность конструкции.



*Рисунок 1. Ремонт стенки с усталостной трещиной  
(взято из реестра усталостных трещин ОАО «РЖД»)*

### Методы решения

Для проверки этого тезиса был запланирован лабораторный эксперимент. Работы по индукционной пайке вели в СибНИИ мостов СГУПС на высокочастотной установке индукционного нагрева ЛН-60 КВ мощностью 60 КВт. Высокочастотная установка индукционного нагрева ЛН-60КВ (60 КВт) [5] состоит из преобразователя частоты,

---

<sup>1</sup> Патент РФ № 2562622 Российская Федерация, МПК E01D 22/00 (2006.01). Способ усиления, имеющего трещину металлического элемента пролетных строений мостов / Бокарев С.А., Усольцев А.М., Мурованный Ю.Н., ФГБОУ ВПО СГУПС – Оpubл. 13.08.2015.

Патент № 2642758 Российская Федерация, МПК E01D 22/00 (2006.01). Способ усиления имеющего трещину металлического тонкостенного элемента пролетных строений мостов / Бокарев С.А., Усольцев А.М., Служаев А.И., Патентообладатели: ОАО «РЖД», ЦУИС – Оpubл. 25.01.2018.

трансформаторного блока, индукционной катушки, устанавливаемой на выходные клеммы трансформаторного блока и установки водоохлаждения. В основу установки LH-60KW составляет высокочастотный транзисторный преобразователь частоты, который выполнен по схеме регулируемого выпрямителя с последующим инвертированием. Система защиты преобразователя предохраняет силовую электронику от перенапряжения, срыва инвертирования, фазовой ошибки, нарушения подачи охлаждающей воды, а также развития иных аварийных ситуаций. Конденсаторная батарея установки имеет малые габариты, за счет применения современных водоохлаждаемых конденсаторных блоков. Количество конденсаторов, соответствует проектной мощности установки и обеспечивает необходимую емкостную компенсацию реактивной мощности резонансного контура установки.

Для проведения испытаний была *изготовлена серия из 5 образцов* двутавровых балок из стали СтЗсп с пределом текучести 295 МПа. В двутавровых балках в середине сечения вырезана нижняя полка, и сделан искусственный концентратор напряжений в виде надпила шириной и глубиной 1 мм. Конструкция образца приведена на рисунке 2.

«Выращивание» усталостной трещины в образцах выполняли циклическим нагружением на универсальной испытательной машине ГРМ-2А, приведенной на рисунке 3. Максимальная нагрузка 3,8 т, коэффициент асимметрии цикла 0,8.

Контроль образования и роста усталостной трещины осуществляли тремя способами: визуально при помощи лупы с 4-х кратным увеличением; инструментально при помощи тепловизора Fluke Ti400 и с помощью капиллярного метода контроля комплектом фирмы SHERWIN.

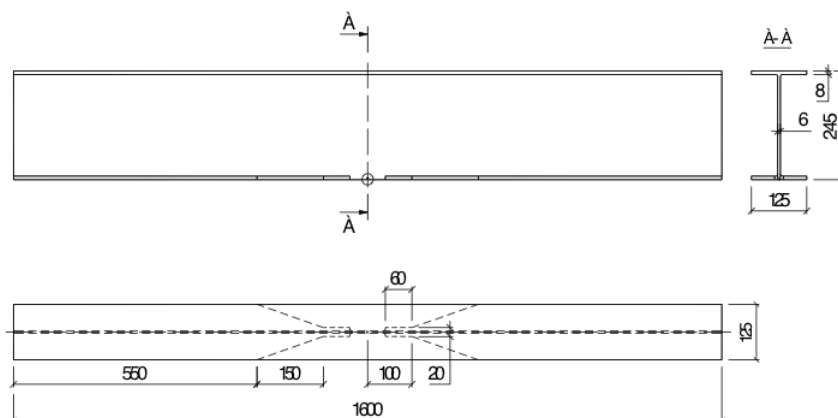


Рисунок 2. Конструкция образцов (разработано авторами)



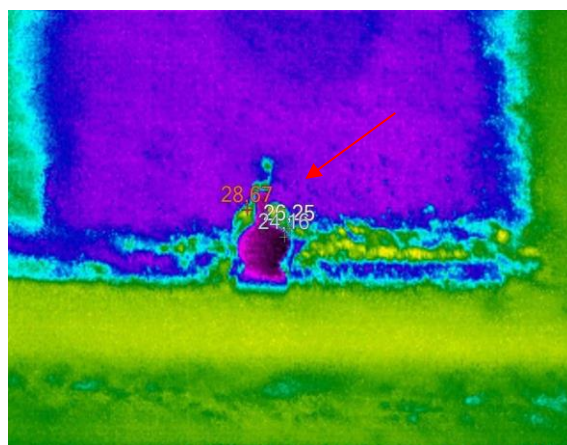
Рисунок 3. «Выращивания» усталостной трещины (разработано авторами)

Самую точную и полную информацию получали с тепловизора, который позволял фиксировать процесс зарождения, образования и развития усталостной трещины. На рисунке 4 приведена термограмма, наглядно демонстрирующая процесс образования трещины.

Процесс циклического нагружения прерывали после достижения трещиной длины 20 мм.

**Усиление образцов методом индукционной пайки.** Устье усталостной трещины в стенке балочного образца засверливали сверлом с диаметром 20 мм, затем поверхность стенки балки в месте пайки зачищали, шлифовальным кругом и обезжировали, в полученное отверстие методом индукционной пайки впаивали круглые накладки. Пайку выполняли, контролируя температуру основного металла и припоя. Для контроля было использовано инфракрасное устройство измерения и автоматизированного контроля температуры – Laser A03.

Качество паяного шва во многом зависит от прочности связи припоя с металлом основы [6]. В настоящее время разработано большое количество стандартных припоев, обладающих высокими прочностными характеристиками [7; 8]. В эксперименте индукционную пайку осуществляли высокопрочным твердым припоем ПСР-45 и флюсом ПВ-209. Температура пайки 800–850 °С.



**Рисунок 4.** Процесс образования трещины, зафиксированный тепловизором (разработано авторами)

После усиления осуществляли контроль качества пайки. Для этого места пайки очищали от остатков флюса и выполняли визуальный контроль соединения с помощью лупы по ГОСТ 25706-83 с 4-х кратным увеличением на наличие дефектов пайки [9]. Затем для соединений, прошедших визуальный контроль, выполняли ультразвуковой контроль по ГОСТ 261684 с помощью ультразвукового дефектоскопа «PELENG» («Пеленг») УДЗ-103.

Общий вид образца, усиленного методом индукционной пайки, показан на рисунке 5.



**а)** общий вид образца усиленного пайкой



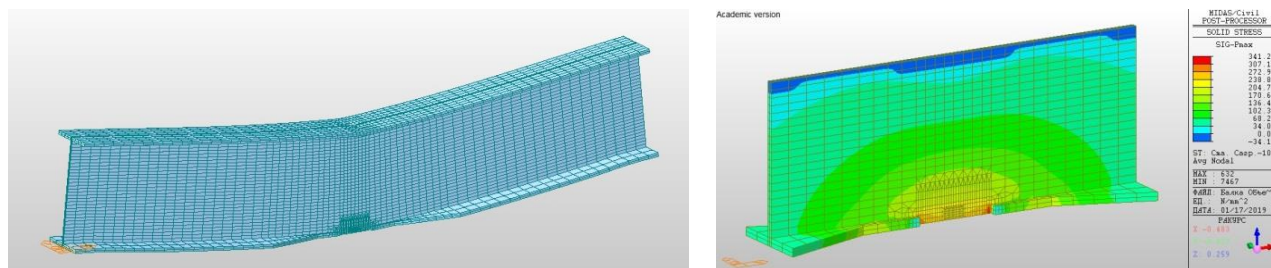
**б)** фрагмент усиления пайкой

**Рисунок 5.** Образец усиленный индукционной пайкой (разработано авторами)



Перед проведением испытания было выполнено численное моделирование работы экспериментальных балок. Для определения расчетных напряжений в стенке балки, а также прогибов, в программном комплексе Midas Civil была составлена конечно-элементная модель исследуемой балки, полностью повторяющая испытываемый образец. В качестве опорных частей были установлены жесткие шарнирно-подвижная и шарнирно неподвижная опорные части, закрепленные в узлах по всей ширине нижнего пояса, образуя расчетный пролет 1440 мм, идентичный расстоянию между осями опорных частей в испытательном стенде.

Общий вид модели приведен на рисунке 6.



а) Деформированный вид образца

б) Поля напряжений  
в исследуемой зоне от нагрузки

**Рисунок 6.** Общий вид модели (разработано авторами)

**Испытание усиленных балочных образцов на прочность** осуществляли нагружением на прессе ДРБМ-300. Нагрузку фиксировали с помощью специального датчика усилия ДОГ-3 (месдозы) и по шкале пресса ДРБМ-300.

Для определения прогибов балки и деформаций металла использовали 8 цифровых индикаторов часового типа ИЧЦ-10 (ИЧ). Для сбора данных с цифровых индикаторов часового типа ИЧЦ-10 применяли комплексы автоматизированного сбора информации «DISYS», приведённые на рисунке 7.



а) пресс ДРБМ-300 и измерительные системы:  
«Тензор-МС», TDS-150, «DISYS» (слева на право)

б) датчик усилия (месдоза)

**Рисунок 7.** Общий вид пресса ДРБМ-300  
с измерительными системами (разработано авторами)

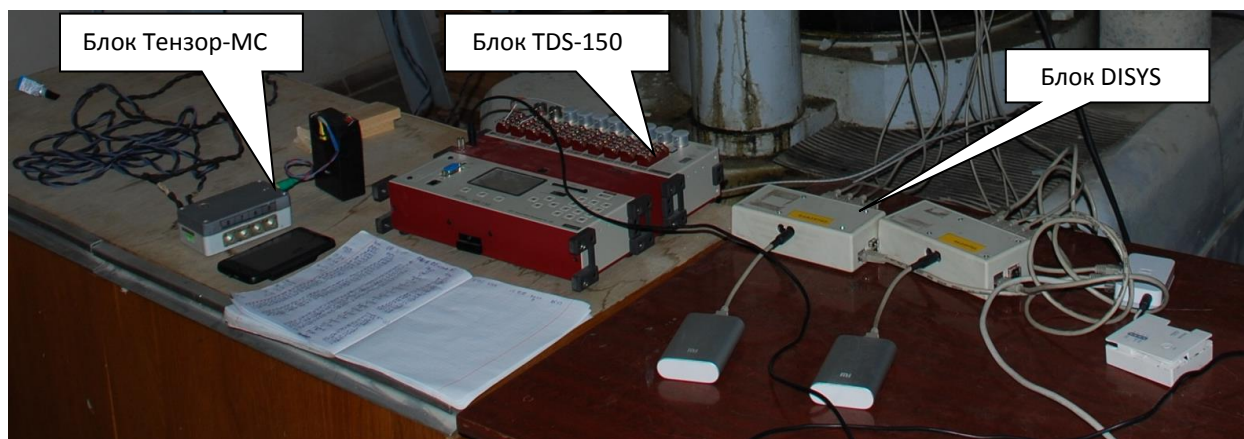
Для контроля деформаций в верхнем поясе балки дополнительно к ИЧЦ-10 использовали 2 тензодатчика ТДМ<sup>2</sup> электронного измерительного комплекса «Тензор МС»<sup>3</sup>.

<sup>2</sup> Свидетельство Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии RU.C.28.007.A № 31740/1 // Измерители деформаций ТДМ.

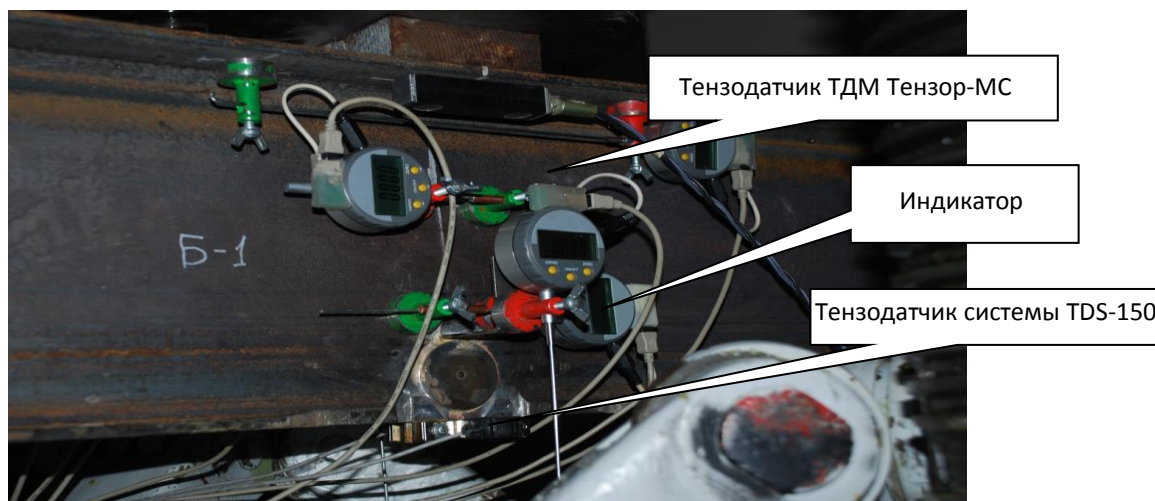
<sup>3</sup> Свидетельство Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии RU.C.34.007.A № 32603/1 // Комплексы измерительные многофункциональные Тензор МС.

Контроль деформаций в нижнем поясе осуществляли 2-мя датчиками перемещений HI-2-50 многоканального измерительного комплекса TDS-150 (Tokyo Sokki Kenkyujo Co, Ltd, Япония). Общие виды измерительных блоков и приборов показаны на рисунках 7, 8 и 9.

Нагрузка на балку передали через месдозу (датчик усилия). Опирали балку происходило на цилиндрические металлические опоры испытательной машины. Нагрузку прикладывали с шагом  $\Delta P = 500$  кг.



**Рисунок 8.** Измерительные блоки комплексов: «Тензор-МС», TDS-150, «DISYS» (слева на право) (разработано авторами)



**Рисунок 9.** Размещение измерительных приборов (разработано авторами)

### Результаты исследования

Разрушение **усиленных образцов** происходило в результате резкого нарастания деформаций после того, как разрушалось сцепление круглой накладки усиления с металлом стенки балки при нагрузке 12,5 тс. Разрушение **не усиленных образцов без трещины** происходило в результате роста прогиба образца при нагрузке 8,5 тс. Напряжения по нижней грани образца в месте выреза полки в этот момент были близки к временному сопротивлению стали (425 МПа), а относительные деформации доходили до 500 е.о.д. Разрушение **образцов с трещиной** было скоротечным и происходило по сечению с тещиной при нагрузке около 6,5 тс.

Усреднённые величины прогиба усиленных балок, балок без трещины и балок с трещиной при нагружении образцов приведены на рисунке 10, а изменение относительных

деформаций по нижней грани в месте выреза на рисунке 11. Кроме того, на графиках показаны расчётные значения прогибов и относительных деформаций, полученные по МКЭ для балок, без “выращенных” трещин и усиления. За предельное состояние для них принято достижение на нижней грани полки напряжений, соответствующих пределу текучести – 259 МПа.

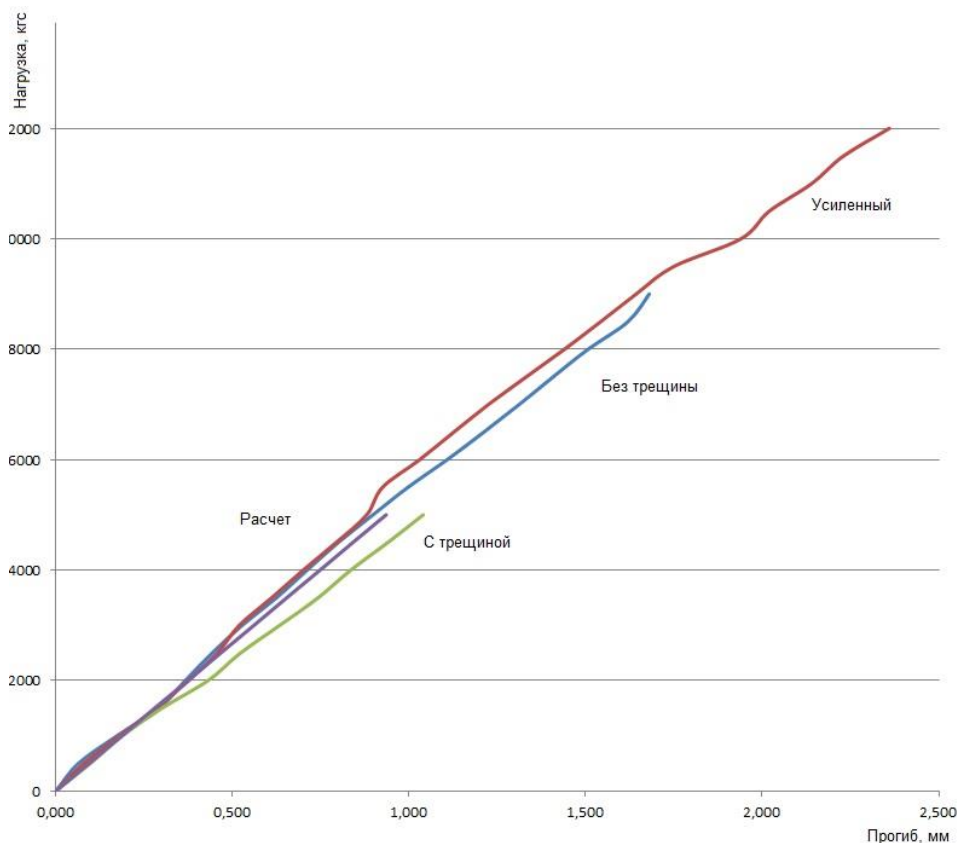


Рисунок 10. Зависимость прогибов от нагрузки (разработано авторами)

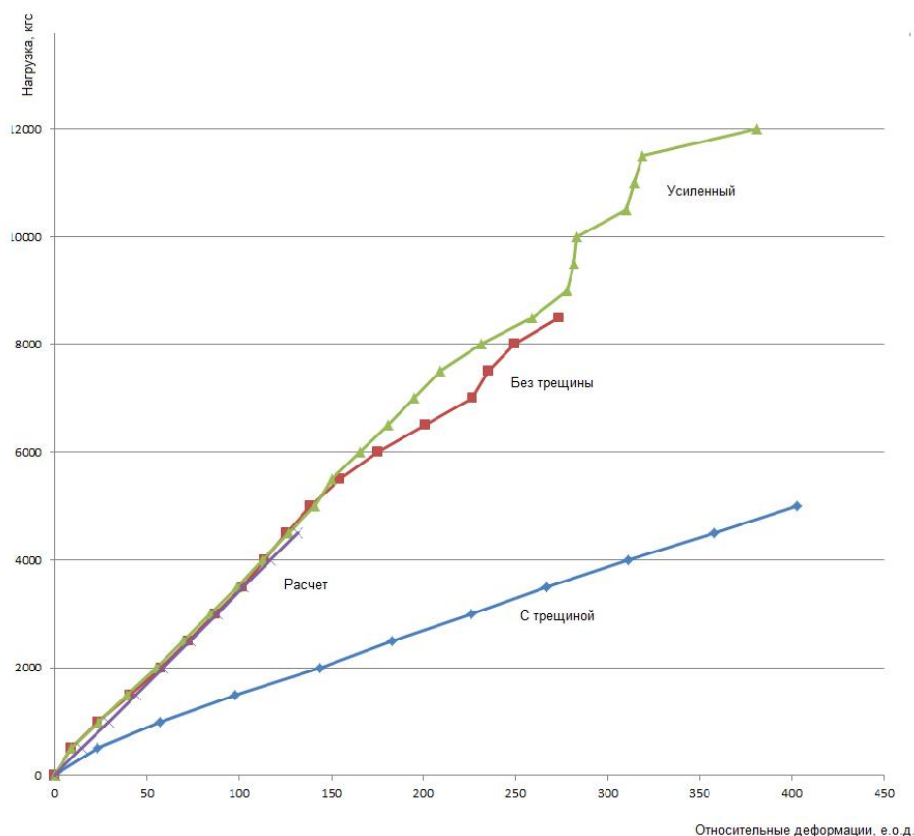
### Обсуждение результатов

Из полученных по результатам исследований данных можно сделать следующие выводы:

- разрушение усиленных образцов не носит резкого лавинообразного характера, а является результатом достаточно плавного разрушения припоя под накладками по мере нарастания нагрузки;
- в области упругих деформаций до 200 е.о.д. конструкция с усилением и проектная (без усиления и без трещины) работают устойчиво, при больших значениях относительных деформаций наблюдалась нестабильность работы конструкции, что выразилось в скачкообразных отклонениях прогиба и относительных деформаций от плавного характера их изменения;
- усталостные трещины снижают не только долговечность, но и несущую способность конструкции в сравнении с проектными образцами – образцами без трещин;
- усиленные индукционной пайкой конструкции обладают существенно большей несущей способностью по сравнению с проектной конструкцией (образцы без

“выращенных” трещин) и имеют ещё большее превышение по сравнению с не усиленными образцами с трещинами;

- результаты численного моделирования МКЭ хорошо отражают работу конструкции.



**Рисунок 11.** Зависимость относительных деформаций от нагрузки (разработано авторами)

### Заключение

В заключении можно отметить, что проведённые лабораторные исследования, подтвердили эффективность применения способа усиления конструкций с усталостными трещинами круглыми накладками, установленными индукционной пайкой. Можно рекомендовать использовать в опытном порядке предложенный способ усиления на натурной конструкции.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Нигаматова О.И., Овчинников И.Г. Системы управления состоянием мостовых сооружений. Интернет-журнал Науковедение. ISSN 2223-5167. Том 7, 3 (2015). <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol7-3>.
2. Len Reid, Arresting Cracks in Steel Bridges // Western Bridge Preservation Partnership – San Diego CA – May 12, 2013.
3. Repairing and Preserving Bridge and Steel Structure Using an Innovative Crack Arrest Repair System // Le Len Reid, VP Technology. 11th International Fatigue Congress, Melbourne, Australia, March 2–7 2014.
4. Муравьева Л.В., Овчинников И.Г. Анализ усталостной прочности морского трубопровода из высокопрочной стали // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 9. С. 1260–1268. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.10.1260-1268.
5. Руководство по эксплуатации индукционной высокочастотной нагревательной установки LH-60KW-WJET CO LTD (КНР) / ООО Азиатские промышленные технологии – 2014, 20 с.
6. Кузнецов О.А., Погалов А.И. Прочность паяных соединений. М.: Машиностроение, 1987.
7. Руководство по пайке (подготовлено комитетом по пайке Американского общества сварщиков) – перевод А.Т. Лысенко, М: Оборонгиз – 1960 – 193 с.
8. Пайка серебряными припоями в пламени газовой горелки, И. Родин, М: Оборонгиз – 1954 г.
9. Дефекты металла: Учебное пособие по дисциплине Материаловедение и ТКМ» для механических специальностей вузов / В.П. Расщупкин, М.С. Корытов. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2006. – 37 с.

**Bokarev Sergey Aleksandrovich**  
Siberian transport university, Novosibirsk, Russia  
E-mail: bokarevsa@211.ru

**Usoltsev Andrei Mikhaylovich**  
Siberian transport university, Novosibirsk, Russia  
E-mail: Uam@stu.ru

## Laboratory research on functioning of bridge structures reinforced with induction brazing

**Abstract.** Welded metal bridge spans are one of the most wide-spread types of bridge spans, several thousand of them being in operation along motorways and in city areas in Russia. Similar to other welded structures they are prone to fatigue cracking which is usually repaired using metal plates fixed with high-strength bolts. The Siberian Research Institution of Bridges located in Siberian Transport University has developed the structure and technology of welded bridge span reinforcement using round metal plates fixed by induction brazing. To prove the efficiency of the technology a laboratory research and testing of girders reinforced with round metal plates fixed by induction brazing has been conducted. The research shows that after the induction brazing enforcement the bridge structures that have fatigue cracks obtain strength parameters 25 per cent higher compared to those of completely new unreinforced samples without fatigue cracks. The article is part of the dissertation research Usoltseva A.M.

**Keywords:** welded bridge span; fatigue cracks; reinforcement; induction brazing; laboratory research; strength of reinforced structures Siberian transport university

### REFERENCES

1. Nigamatova O.I., Ovchinnikov I.G. (2015). Systems of state management bridges. *Naukovedenie*, [online] 3(7). Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/09TVN315.pdf> (in Russian) ISSN 2223-5167.
2. Len Reid (2013). *Arresting Cracks in Steel Bridges*. San Diego CA: Western Bridge Preservation Partnership.
3. Le Len Reid (2014). *Repairing and Preserving Bridge and Steel Structure Using an Innovative Crack Arrest Repair System*. Australia, Melbourne: 11th International Fatigue Congress.
4. Murav'eva L.V., Ovchinnikov I.G. (2018). Analysis of the fatigue strength of the offshore high-strength steel pipeline. *Herald of the Moscow State University of Civil Engineering*, 9(13), pp. 1260–1268 DOI: 10.22227/1997-0935.2018.10.1260-1268.
5. (2014). Rukovodstvo po ehkspluatatsii induktsionnoy vysokochastotnoy nagrevatel'noy ustanovki LH-60KW-WJET CO LTD (KNR). [*Instruction manual for the induction high-frequency heating unit LH-60KW-WJET CO LTD (PRC).*] Asian Industrial Technologies Ltd., p. 20.
6. Kuznetsov O.A., Pogalov A.I. (1987). Prochnost' payanykh soedineniy. [*Solder joint strength.*] Moscow: Mechanical Engineering.
7. Kuznetsov O.A., Pogalov A.I. (1960). *Rukovodstvo po payke (podgotovleno komitetom po payke Amerikanskogo obshchestva svarshchikov)*. [Russ. ed.: *Soldering Guide* (prepared by the American Society of Welders Soldering Committee). Authorized transl. by A.T. Lysenko. Moscow: Oborongiz, p. 193].
8. Rodin I. (1954). Payka serebryanymi pripoyami v plameni gazovoy gorelki. [*Silver brazing in a gas burner flame.*] Moscow: Oborongiz.
9. Rasshchupkin V.P., Korytov M.S. (2006). Defekty metalla. [*Metal defects.*] Omsk: Publishing House of the Siberian State Automobile and Highway University, p. 37.