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

2019, №3, Том 6 / 2019, No 3, Vol 6 <https://t-s.today/issue-3-2019.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/41SATS319.pdf>

DOI: 10.15862/41SATS319 (<http://dx.doi.org/10.15862/41SATS319>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Усольцев А.М. Исследование влияния индукционного нагрева на прочностные характеристики стали 10ХСНД // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2019 №3, <https://t-s.today/PDF/41SATS319.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/41SATS319

For citation:

Usoltsev A.M. (2019). Research of the influence of induction heating on the strength characteristics of steel 10HSND. *Russian journal of transport engineering*, [online] 3(6). Available at: <https://t-s.today/PDF/41SATS319.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/41SATS319

УДК 621.791:624.24

Усольцев Андрей Михайлович

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения», Новосибирск, Россия

Заведующий отделом СибНИИ мостов

E-mail: Mr-uam@mail.ru; Uam@stu.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=970972

Исследование влияния индукционного нагрева на прочностные характеристики стали 10ХСНД

Аннотация. При производстве сварных пролетных строений железнодорожных мостов с 70-х годов прошлого века применяются низколегированные конструкционные стали. В этих конструкциях в последние годы наблюдается интенсивный рост образования усталостных трещин. В настоящее время единственной технологией применяемой в ОАО «РЖД» для торможения усталостных трещин является высверливание отверстия в устье трещины с последующей постановкой в него высокопрочного болта и затяжкой его на нормативное усилие. В Сибирском научно-исследовательском институте мостов (СибНИИ мостов СГУПС) разработаны инновационные технологии торможения роста усталостных трещин и усиления сварных пролетных строений с применением пайки и индукционного нагрева. Технологии показали свою эффективность. При этом известно, что нагрев металла до высоких температур может существенно изменить его структуру и характеристики. В научной литературе отсутствуют данные об изменении прочностных характеристик низколегированных конструкционных сталей в результате быстрого нагрева. В лабораторном исследовании был выполнен анализ изменения прочностных характеристик низколегированной конструкционной стали при быстром индукционном нагреве. Исследования образцов из конструкционной стали показали, что быстрый кратковременный индукционный нагрев конструкционной стали до температуры пайки не ведет к существенному изменению ее прочностных характеристик, и пайка и индукционный нагрев могут применяться для усиления конструкций с усталостными трещинами.

Ключевые слова: индукционный нагрев; предел текучести; временное сопротивление разрыву; сварные пролетные строения; усталостные трещины; индукционный нагрев; индукционная пайка; лабораторные исследования

Состояние проблемы

В последние пять лет в сварных металлических пролетных строениях железнодорожных мостов фиксируется резкий рост образования усталостных трещин [1–3]. Одним из способов торможения усталостных трещин является локальный нагрев устья трещины [4–6] и создание на пути трещины локальных остаточных напряжений сжатия. Другим способом локализации развития усталостной трещины является способ создания барьера на пути трещины путем постановки конструктивных элементов методом индукционной пайки. При этом индукционный нагрев, как любая термообработка, ведет к изменению физико-механических характеристик стали [7; 8]. Учитывая то, что нагрев металла при воздействии на него токами высокой частоты (ТВЧ) происходит достаточно быстро, при этом скорость нагрева меняется в зависимости от температуры, а скачкообразное уменьшение скорости нагрева происходит после нагрева выше точки Кюри ($763\text{ }^{\circ}\text{C}$) и потери сталью ферромагнитных свойств. При этом как изменяются прочностные характеристики конструкционных сталей (10ХСНД) – предел текучести и временное сопротивление разрыву после быстрого кратковременного индукционного нагрева до различных температур с последующим охлаждением в естественных условиях остается неизвестным. Одной из основных задач исследования состояла в определении граничного значения температуры, до которого индукционный нагрев конструкционной стали, не приводит к существенным изменениям прочностных характеристик материала несущих конструкций.

Методы решения

Для решения этой задачи был выполнен лабораторный эксперимент. С целью определения механических характеристик из стали 10ХСНД были изготовлены стандартные цилиндрические «гагаринские» тип IV по ГОСТ 1497-84 образцы. Вид опытного образца приведен на рисунке 1.

Рисунок 1. Опытные образцы (размеры в мм)

В соответствии с СП 35.13330.2011¹ предел текучести проката из стали 10ХСНД должен быть не менее 390 МПа, а временное сопротивление не менее 530 МПа. Расчетное сопротивление R_y по пределу текучести для расчета мостовых конструкций принимается по – 350 МПа.

Было выполнено две серии испытаний образцов при нагреве от различных индукторов с разной площадью нагрева. Нагрев осуществляли индукционной высокочастотной нагревательной установкой ЛН-60KW². Пример нагрева образцов показан на рисунке 2.

¹ СП 35.13330.2011. Свод правил. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84.

² Руководство по эксплуатации индукционной высокочастотной нагревательной установки ЛН-60KW – WJET CO LTD (КНР) / ООО Азиатские промышленные технологии – 2014, 20 с.

Контроль температуры нагрева образцов осуществляли с помощью инфракрасного устройства измерения и автоматизированного контроля температуры – Laser A03³. Инфракрасные термометры Laser A03 разработаны для использования в сталелитейной промышленности. Пирометр Laser A03 позволяет осуществлять контроль температур в диапазоне от 400 °С до 1200 °С. Прибор также может осуществлять управление индукционной установкой. Температура нагрева и время выдержки задается путем установки заданных параметров на приборе Laser A03. Прибор при помощи специального кабеля соединяется с блоком преобразователя частоты, и обеспечивает автоматическое отключение энергии, при достижении заданной температуры.

а) индукционный нагрев (Серия № 1)

б) индукционный нагрев (Серия № 2)

в) рабочее место для индукционного нагрева «гагаринских» образцов

Рисунок 2. Индукционный нагрев образцов на установке LH-60 KW

Вид контрольных образцов после индукционного нагрева приведен на рисунке 3.

Испытание контрольных образцов производили на испытательной разрывной машине TIME WDW-300E, рисунок 4.

³ Инфракрасное устройство измерения температуры с системой автоматического контроля. Инструкция по эксплуатации (Laser A01-A05) / ООО Азиатские промышленные технологии – 2014, 60 с.

а) серия № 1

б) серия № 2

Рисунок 3. Контрольные образцы после индукционного нагрева

а) вид испытательной машины

б) захват с контрольным образцом

Рисунок 4. Общий вид испытательной разрывной машины TIME WDW-300E

Результаты исследования

В первой серии нагрев образцов производился плоским двухвитковым индуктором, осуществляющим нагрев образца локально в средней части (см. рисунок 2б). Испытания показали, что разрыв контрольного образца в большинстве случаев происходит не в месте нагрева, а по границе с зоной термического влияния. В связи с этим было принято решение забраковать испытания серии № 1, изготовить многовитковый индуктор для равномерного нагрева контрольного образца по всей длине (см. рисунок 2в) и повторить испытания (серия № 2). Общий вид образца серии № 2 после испытаний показан на рисунке 5. Характерные графики испытаний контрольных образцов серии № 2 при различных температурах нагрева приведены в таблице 1.

Рисунок 5. Разрыв контрольного образца серии № 2

Обсуждение результатов

Из приведенных в таблице 1 графиков и результатов видно, после нагрева образцов до 700–800 °С происходит постепенное увеличение предела текучести, до 10 % от величины, полученной без нагрева. После нагрева до 900 °С происходит снижение предела текучести (до 10 % от величины без нагрева). Нагрев же свыше 1000 °С приводит к дальнейшему уменьшению предела текучести (до 20 %, что ниже расчетного сопротивления) с постепенным уменьшением величины самой площадки текучести, что свидетельствует об уменьшении пластичности материала. Дальнейший нагрев до температуры 1100 °С и 1200 °С приводит к тому, что площадка текучести почти исчезает, а временное сопротивление разрыву увеличивается почти на 9 %.

Таблица 1

Диаграммы деформирования образцов (серия № 2)

Без нагрева	700 °С	800 °С
<p>$\sigma_T = 427,5 \text{ МПа};$ $\sigma_B = 569,4 \text{ МПа}$</p>	<p>$\sigma_T = 446 \text{ МПа};$ $\sigma_B = 548,8 \text{ МПа}$</p>	<p>$\sigma_T = 481,7 \text{ МПа};$ $\sigma_B = 562,5 \text{ МПа}$</p>
850 °С	900 °С	1000 °С
<p>$\sigma_T = 416,7 \text{ МПа};$ $\sigma_B = 571,8 \text{ МПа}$</p>	<p>$\sigma_T = 416,7 \text{ МПа};$ $\sigma_B = 571,8 \text{ МПа}$</p>	<p>$\sigma_T = 345 \text{ МПа};$ $\sigma_B = 593,5 \text{ МПа}$</p>

1100 °C	1200 °C
<p>$\sigma_T = 367,5 \text{ МПа};$ $\sigma_B = 608,1 \text{ МПа}$</p>	<p>$\sigma_T = 363 \text{ МПа};$ $\sigma_B = 622 \text{ МПа}$</p>

Заключение

В заключении можно отметить, что индукционный нагрев конструкционной стали 10ХСНД до температуры 900 °C не ведет к существенному изменению прочностных характеристик. Нагрев стали до температуры 1100 °C и более приводит к исчезновению площадки текучести, что ведет к увеличению вероятности образования усталостных трещин в процессе эксплуатации. Оптимальной температурой нагрева основного металла конструкции сварных пролетных строений при индукционной пайке является диапазон от 700 °C до 900 °C.

ЛИТЕРАТУРА

1. Майстренко И.Ю., Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Кокодеев А.В. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 1 // Транспортные сооружения. 2017. Т. 4. № 4. С. 11.
2. Влияние тяжеловесного движения на искусственные сооружения / Бокарев С.А., Мурованный Ю.Н., Усольцев А.М. // Железнодорожный транспорт. 2016. № 4. С. 25–28.
3. Обеспечение пропуска тяжеловесных поездов по металлическим мостам / Бокарев С.А., Усольцев А.М., Жунев К.О. // Путь и путевое хозяйство. 2019. №4. С. 26–28.
4. Продление ресурса металлических пролетных строений железнодорожных мостов с усталостными трещинами / В.И. Кирьян, В.В. Кныш, А.З. Кузьменко // Автомат. сварка. – 2007. – №7. – С. 29–32.
5. Кадиев Р.И. Краевые задачи механики торможения трещин локальными тепловыми полями: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.02.04 Махачкала, 2005 331 с. РГБ ОД, 71:05-1/334.
6. Чабаненко А.А. Локальное упрочнение тонкостенных конструкций способом местного нагрева // дис. канд. техн. наук. – Львов 1985 г.
7. Изменение структуры и ударной вязкости металла шва сварных соединений низколегированных сталей типа 09Г2С, 15ХСНД, 09Г2ФБЮ после термической обработки при 610–650 °C / М.В. Карасев, В.Г. Гребенчук, В.С. Скутин, Р. Розерт // Сварка и диагностика. – 2013. – № 2. – С. 20–27.
8. Пумпянский Д.А., Пышминцев И.Ю., Фарбер В.М. Методы упрочнения трубных сталей / Сталь – № 7, 2005. – с. 74.

Usoltsev Andrei Mikhaylovich

Siberian transport university, Novosibirsk, Russia
E-mail: Mr-uam@mail.ru; Uam@stu.ru

Research of the influence of induction heating on the strength characteristics of steel 10HSND

Abstract. In the production of welded spans of railway bridges since the 70s of the last century, low-alloy structural steels are used. In these constructions in recent years there has been an intensive growth in the formation of fatigue cracks. Currently, the only technology used by Russian Railways for braking fatigue cracks is to drill a hole in the mouth of a crack, followed by setting a high-strength bolt into it and tightening it to a standard force. At the Siberian Research Institute of Bridges (Siberian Research Institute of Bridges SGUPS), innovative technologies have been developed to inhibit the growth of fatigue cracks and strengthen welded spans using soldering and induction heating. Technology has proven effective. It is known that heating a metal to high temperatures can significantly change its structure and characteristics. In the scientific literature there are no data on changes in the strength characteristics of low alloy structural steels as a result of rapid heating. In a laboratory study, an analysis was made of the change in the strength characteristics of low alloy structural steel with rapid induction heating. Studies of structural steel samples showed that quick short-term induction heating of structural steel to the temperature of brazing does not lead to a significant change in its strength characteristics, and brazing and induction heating can be used to strengthen structures with fatigue cracks.

Keywords: induction heating; yield strength; tensile strength; welded spans; fatigue cracks; induction heating; induction brazing; laboratory tests

REFERENCES

1. Maystrenko I.Y., Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Kokodeev A.V. (2017). Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 1. *Russian journal of transport engineering*, [online] 4(4). Available at: <https://t-s.today/PDF/13TS417.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/13TS417.
2. Bokarev S.A., Murovanny Yu.N., Usol'tsev A.M. (2016). The influence of heavy traffic on artificial structures. *Railway Transport*, 4, pp. 25–28 (in Russian).
3. Bokarev S.A., Usol'tsev A.M., Zhunev K.O. (2019). Passage of heavy trains on metal bridges. *Way and track facilities*, 4, pp. 26–28 (in Russian).
4. Kir'yan V.I., Knysh V.V., Kuz'menko A.Z. (2007). Extension of the resource of metal spans of railway bridges with fatigue cracks. *Automatic welding*, 7, pp. 29–32 (in Russian).
5. Kadiev R.I. (2005). Kraevye zadachi mekhaniki tormozheniya treshchin lokal'nyimi teplovymi pol'yami. [*Boundary-value problems of crack braking mechanics by local thermal fields*.] Makhachkala, p. 331, ПГБ ОД, 71:05-1/334.
6. Chabanenko A.A. (1985). Lokal'noe uprochnenie tonkostennykh konstruktsiy sposobom mestnogo nagreva. [*Local hardening of thin-walled structures by local heating*.] Lviv.
7. Karasev M.V., Grebenchuk V.G., Skutin V.S., Rozert R. (2013). Change in the structure and toughness of the weld metal of welded joints of low-alloy steels of the type 09Г2С, 15ХСНД, 09Г2ФБЮ after heat treatment at 610–650 °C. *Welding and diagnostics*, 2, pp. 20–27 (in Russian).
8. Pumpyanskiy D.A., Pyshmintsev I.Yu., Farber V.M. (2005). Methods of hardening pipe steels. *Steel*, 7, pp. 74.