

ПРОДЛЕНИЕ РЕСУРСА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МОСТОВ С УСТАЛОСТНЫМИ ПОВРЕЖДЕНИЯМИ*

Чл.-кор. НАН Украины **В. И. КИРЬЯН**, **В. В. КНЫШ**, канд. техн. наук, **А. З. КУЗЬМЕНКО**, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены причины раннего накопления усталостных повреждений, зарождения и развития усталостных трещин в сварных узлах металлических пролетных строений железнодорожных мостов. Установлена высокая эффективность применения высокочастотной механической проковки (ВМП) для повышения ресурса сварных соединений после накопления в них значительных повреждений, включая появление трещин глубиной до 1 мм. Для развивающихся трещин исследованы способы торможения и установлены наиболее результативные: создание на пути развития усталостных трещин остаточных напряжений сжатия локальным нагревом металла; установка в высверленное отверстие возле вершины трещины высокопрочного болта; ремонт поврежденной усталостной трещиной зоны металла путем сварки с ВМП.

Ключевые слова: металлические пролетные строения, железнодорожные мосты, усталостные трещины, сварные соединения, высокочастотная механическая проковка, продление ресурса

Нормативный срок эксплуатации металлических пролетных строений железнодорожных мостов составляет 80...100 лет. Расчет их основных (несущих) элементов на усталость осуществляется, исходя из ограниченной выносливости на базе $2 \cdot 10^6$ циклов изменения нагрузки. При этом во внимание принимается то, что одному циклу нагрузки пролетного строения отвечает проезд одного эшелона. Вместе с тем, как свидетельствует опыт эксплуатации, усталостные трещины зарождаются значительно раньше, через 1...7 лет и в тех элементах и сварных соединениях, в которых их не ожидали и не рассчитывали на усталость [1]. Наиболее часто они возникают в сварных пролетных строениях, в которых к стенкам главных балок приварены вертикальные ребра жесткости, фасонки и поперечные балки (рис. 1). Основные причины раннего накопления повреждений от усталости, возникновение и развитие усталостных трещин обусловлены конструктивными недостатками типовых пролетных строений. Среди них: выбор конструкций сварных узлов подобно клепаным без учета специфических особенностей технологии сварки, характеризующихся большей жесткостью соединений и образованием остаточных напряжений; использование верхних поясов значительной ширины (420...620 мм), через ко-

торые передается нагрузка на пролетное строение от прохождения поездов; нерациональное расположение продольных и поперечных вязей к стенкам главных балок; соединение вертикальных ребер жесткости с растянутыми поясами через сухарики. Все это привело к значительной эксцентricности передачи нагрузки от рельсов на главные балки, возникновению местных дополнительных напряжений в элементах пролетных строений и их вибрации. Частота вибраций и уровни дополнительных напряжений определяются скоростью поезда и добротностью (количественная характеристика резонансных свойств колебательной системы) узла. Высокочастотная составляющая напряжения от вибрации элементов накладывается на вторичные низкочастотные напряжения. Двухчастотная, а в общем случае по-

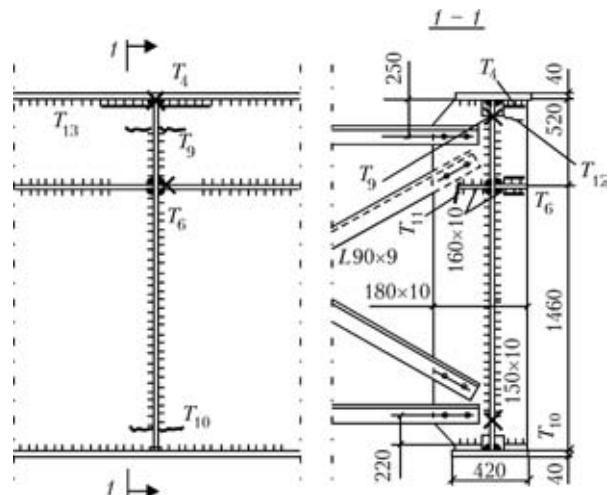


Рис. 1. Места зарождения усталостных трещин в элементах типовых пролетных строений железнодорожных мостов, спроектированных в 1960–1970-х годах (проекты № 541 и № 821). Обозначение типов трещин буквой Т с индексом внизу отвечает указаниям [2]

* Статья подготовлена по результатам выполнения целевой комплексной программы НАН Украины «Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин» (2004–2006 гг.).



Рис. 2. Оборудование мощностью 0,3 кВт для высокочастотной механической проковки сварных соединений металлоконструкций: 1 — ручной инструмент с пьезокерамическим излучателем; 2 — ультразвуковой генератор; 3 — компьютер

личастотная, нагрузка существенно снижает циклическую долговечность. Поэтому для обеспечения расчетного срока эксплуатации пролетных строений железнодорожных мостов необходимо усовершенствование их конструкции, т. е. исключение появления недопустимых дополнительных местных напряжений и вибраций.

Настоящая работа посвящена рассмотрению способов продления ресурса эксплуатируемых пролетных строений железнодорожных мостов усталостными повреждениями разного уровня и усталостными трещинами, которые развиваются.

В последние годы большое внимание уделяется высокочастотной механической проковке (ВМП) сварных соединений как одному из наиболее перспективных способов повышения их сопротивлению усталости. Этот метод достаточно исследован, установлены основные закономерности повышения циклической долговечности и границы выносливости сварных соединений упрочнением ВМП сразу после изготовления, показано

его преимущества по сравнению с другими известными способами пластического деформирования поверхности металла [3]. Наиболее существенными преимуществами технологии ВМП, что делает возможным ее широкое применение для продления ресурса эксплуатируемых металлоконструкций, являются высокая производительность и экономичность, компактность и мобильность оборудования, обработка в произвольном пространственном положении (рис. 2). Важно, что для повышения сопротивления усталости сварных соединений достаточно обработать узкую зону перехода от металла шва к основному материалу шириной 4...7 мм. Главные факторы повышения циклической долговечности и границы выносливости сварных соединений при ВМП такие: создание в зоне перехода остаточных напряжений сжатия; уменьшение коэффициента концентрации рабочих напряжений α_σ ; деформационное упрочнение поверхностного слоя металла.

Ниже приведены результаты исследований эффективности применения ВМП для повышения циклической долговечности сварных соединений металлоконструкций, которые эксплуатируются и уже имеют значительный уровень накопленных усталостных повреждений в зонах концентраторов напряжений, а в отдельных случаях усталостные трещины глубиной до 1 мм [4]. Испытание на усталость проводили при отнулевом цикле сменной нагрузки ($R_\sigma = 0$) на образцах из стали СтЗсп с поперечными ребрами жесткости, приваренными с полным проваром ручной электродуговой сваркой. Первая серия образцов была в исходном состоянии после сварки, вторая — обработана ВМП сразу после сварки, третья — обработана ВМП после циклической нагрузки и накопления в сварных соединениях усталостных повреждений на уровне приблизительно 50 % тех, которые отвечают зарождению трещины. Полученные кривые усталости (рис. 3) демонстрируют повышение долговечности образцов третьей серии (залитые кружки), испытанных в диапазоне напряжений $\sigma_{max} = 175...225$ МПа при сравнении с образцами первой (залитые треугольники) и второй (светлые кружки) серий соответственно на порядок и больше чем в 2 раза. При этом границы выносливости на базе $2 \cdot 10^6$ циклов также увеличились по сравнению с исходным состоянием на 66 и 50 %. Повышение уровня напряжений $\sigma_{max} = 175...225$ МПа при наработке 50 % долговечности и испытании образцов третьей серии связаны с тем, что даже после накопления около 95 % усталостных повреждений и ВМП, долговечность оказалась больше нормативной — $2 \cdot 10^6$ циклов (залитые квадраты на рис. 3). Такой высокий (приближенный к границе текучести) уровень напряжений способствовал существенному пластическому деформированию метал-

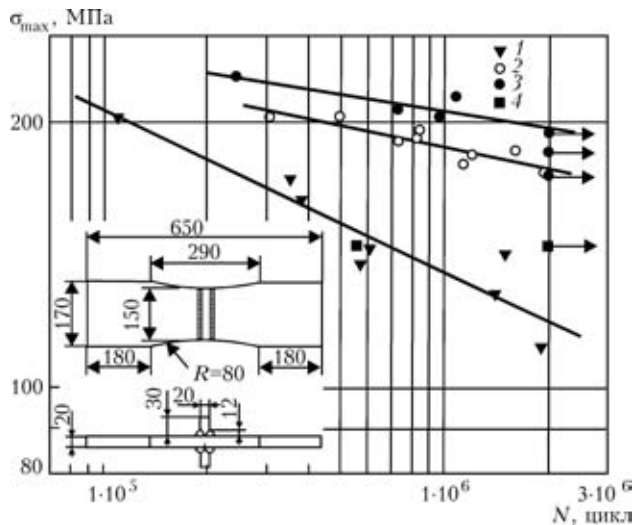


Рис. 3. Кривые усталости тавровых сварных соединений (СтЗсп): 1 — исходное состояние после сварки; 2 — ВМП сразу после сварки; 3 — ВМП после наработки до 50 % долговечности; 4 — то же самое до 95 %

ла около концентраторов и образованию остаточных напряжений сжатия (как при перегрузке). В результате этого дополнительного эффекта повысилась сопротивляемость усталости сварных соединений после наработки и ВМП (залитые кружки на рис. 3) относительно обработанных ВМП сразу после сварки (светлые кружки на рис. 3).

Существенное повышение долговечности после ВМП наблюдается и у сварных соединений металлоконструкций, которые имеют усталостные трещины глубиной до 1 мм. Так, долговечность таврового соединения из стали 10ХСНД в исходном после сварки состоянии достигла приблизительно 300000 циклов изменений напряжений ($\sigma_{max} = 220$ МПа, $R_{\sigma} = 0$). В результате ВМП зоны перехода от металла углового шва к основному материалу, в котором возникла усталостная трещина (глубина до 1 мм), долговечность образца превысила $2 \cdot 10^6$ циклов.

Несущие элементы пролетных строений железнодорожных мостов с усталостными трещинами, которые развиваются и имеют значительные размеры, исследовали при разных способах их торможения. С целью сопоставления одновременно с новыми рассматривались известные способы, которые сегодня используют на практике, в частности высверливание в зоне вершины усталостной трещины отверстия без или с установлением в него высокопрочного болта для создания сжимаемых напряжений.

Крупномасштабные плоские образцы для исследований из сталей 10ХСНД и ВстЗсп толщиной соответственно 12 и 14 мм имели центральную начальную сквозную усталостную трещину длиной $2a_0$. После применения указанных в таблице способов торможения трещин циклическую нагрузку образцов осуществляли в мягком режиме (поддержка постоянным усилием) при отнулевой асимметрии цикла ($R_{\sigma} = 0$) и максимальном напряжении $\sigma_{max} = 150$ МПа. По построенным зависимостям роста трещины от количества циклов сменной нагрузки до полного разрушения образцов определяли коэффициент увеличения долговечности K_d (рис. 4, таблица).

Из рассмотренных способов заслуживает внимания создание на пути развития усталостной трещины остаточных напряжений сжатия с помощью кратковременного локального нагрева металла до температуры около 350 °С на небольшом расстоянии от вершины трещины ($K_d = 19$). Для конкретных случаев технологические параметры нагрева определяют путем решения термоупругой задачи при условии создания на пути развития усталостной

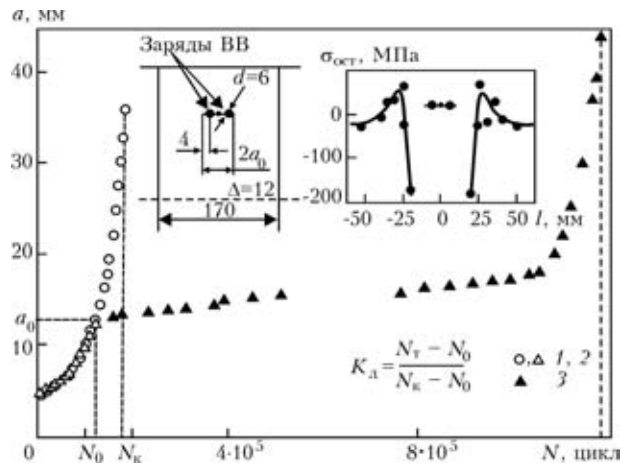


Рис. 4. Зависимость полудлины усталостной трещины ($a = a_0 + \Delta a$) от количества циклов сменной нагрузки в образце из стали 10ХСНД при торможении усталостной трещины созданием на пути ее развития остаточных напряжений сжатия с помощью локальной обработки взрывом (a_0 — полудлина трещины к началу торможения, N_0 — число циклов до начала торможения трещины, N_k — число циклов до разрушения образца в исходном состоянии, N_t — число циклов до разрушения образца в условиях торможения трещины): 1, 2 — исходное состояние; 3 — применение локальной обработки взрывом

трещины максимальных напряжений сжатия. Достаточно эффективным ($K_d \approx 21$) является установление в отверстие возле вершины усталостной трещины высокопрочного болта с натяжением 20 тс. При $K_d > 41$ возможен ремонт трещины с помощью сварки, а долговечность ремонтных швов после ВМП превышает нормативную $2 \cdot 10^6$ циклов.

Полученные результаты экспериментальных исследований позволяют рекомендовать разработанную в Институте электросварки им. Е. О. Патона технологию ВМП для широкого использования в целях продления ресурса сварных металлоконструкций, срок эксплуатации которых дос-

Результаты экспериментальных исследований эффективности способов торможения усталостных трещин в плоских образцах из стали ВстЗсп ($2a_0 = 76$ мм; $R_{\sigma} = 0$, $\sigma_{max} = 150$ МПа)

Номер образца	Способ торможения трещины	Долговечность N, цикл	Коэффициент увеличения долговечности K_d
1	Исходное состояние	35000	
2	Высверливание отверстия $\varnothing 23$ мм около вершины трещины	52200	1,45
2'	То же с последующей наклепкой поверхности отверстий ВМП	84500	2,41
3	Установка в отверстие высокопрочного болта $\varnothing 22$ мм с натяжением 20 тс	730550	20,87
4	Локальная обработка взрывом	277700	7,93
5	Локальный нагрев	668300	19,09
6	Ремонт трещин сваркой	1450000	41,43
6'	То же и ВМП	$> 2 \cdot 10^6$	



тиг нормативного (возникли усталостные трещины до 1 мм) или приближается к нему. Восстановленная долговечность после ВМП в зависимости от уровня действующих сменных напряжений при эксплуатации может возрасти до нормативной — $2 \cdot 10^6$ циклов.

Наиболее эффективными способами торможения усталостных трещин, которые распространяются, являются создание на пути их развития остаточных напряжений сжатия с помощью локального нагрева металла, высверливание отверстий возле вершины трещины и установление высокопрочных болтов с натяжением 20 тс и ремонт трещины сваркой и ВМП зоны перехода от металла шва к основному материалу.

На базе проведенных исследований для «Укрзалізниці» составлено «Рекомендації по підси-

ленню, ремонту та збільшенню ресурсу суцільно-стінчатих зварних прогонових будов».

1. Усталостные трещины в сплошностенчатых пролетных строениях / Ю. П. Миролубов, Э. М. Панин, В. В. Фролов и др. // Вопр. проектирования и эксплуатации искусственных сооружений. — Л.: Ин-т инж. ж.-д. транспорта им. В. Н. Образцова, 1983. — С. 62–69.
2. Указания по осмотру и усилению эксплуатируемых сварных пролетных строений. — М.: МПС, ГУП НИИЖТА, 1990. — 28 с.
3. Повышение сопротивления усталости сварных соединений металлоконструкций высокочастотной механической проковкой (Обзор) / Л. М. Лобанов, В. И. Кирьян, В. В. Кныш, Г. И. Прокопенко // Автомат. сварка. — 2006. — № 9. — С. 3–11.
4. Лобанов Л. М., Кир'ян В. И., Кныш В. В. Підвищення ресурсу зварних металлоконструкцій високочастотною механічною проковкою // Фізико-хімічна механіка матеріалів. — 2006. — № 1. — С. 56–61.

Considered are the features of early accumulation of fatigue damage, initiation and development of fatigue cracks in welded components of metal span structures of railway bridges. A high effectiveness of application of HF mechanical peening (HFMP) for extension of residual life of welded joints after accumulation of considerable damage in them, including development of cracks up to 1 mm deep. Methods of retardation have been studied for propagating cracks, and the most efficient of them have been determined, namely inducing compressive residual stresses in the fatigue crack propagation path by applying local heating of the metal; placing a high-strength bolt in the drilled-out hole near the crack tip; repair of the metal zone damaged by the fatigue crack using welding with HFMP.

Поступила в редакцию 20.03.2006

ДОКУМЕНТАЦИЯ ПО СВАРКЕ, ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ И КОНТРОЛЮ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС, ТЭЦ, ТЦ, ОТОПИТЕЛЬНЫХ КОТЕЛЕН, ТЕПЛОВЫХ И РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Предприятия тепловой энергетики относятся к разряду объектов повышенной опасности. Практически все теплотехническое оборудование ТЭС, ТЭЦ, ТЦ, других теплоагрегатов, отопительных котелен, тепловых и распределительных сетей, значительная часть вспомогательного оборудования должны отвечать требованиям государственных нормативных актов, обеспечивающим безопасные условия эксплуатации энергоблоков. К ним относятся нормативные документы ДНАОП 0.00-1.11-08, ДНАОП 0.00-1.08-94, ДНАОП 0.00-1.07-94, ДНАОП 0.00-1.20-98, ГД 34.03.101-96, РД 34.15.027-89, ряд СНиПов, ГОСТов, ОСТов, ДСТУ и др. Объемы и сложность сварочных работ при изготовлении, монтаже и ремонте технологического оборудования тепло- и энергоблоков весьма велики. Это обусловлено большой номенклатурой применяемых сталей, заготовок, деталей, блоков, сложностью выполняемых работ (пространственное положение свариваемых стыков), необходимостью соблюдения высокого качества сварки и достоверности контроля качества сварных соединений, применением нескольких видов сварки, подогрева и термообработки сварных соединений.

ИЭС им. Е. О. Патона в содружестве с ОАО «Энергомонтажпроект» и АК «Киевэнерго» разработал блок технологических инструкций с техкартами (29 наименований) и операционных карт (3 наименования) по подготовке к сварке, сборке, термической обработке и контролю качества сварных соединений конкретных узлов энергоблоков, работающих при температуре до 450 и 575 °С: паропроводов, трубопроводов, труб поверхностей нагрева, коллекторов, экономайзеров, барабанов, котлов и др. Ряд инструкций относятся к ремонту конкретных узлов энергоблоков.

Контакты: Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11, отд. № 19
Тел./факс: (38044) 289 90 87, 287 10 88