



## СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ И РЕСУРСА СВАРНЫХ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В. С. КОВАЛЬЧУК, В. В. КНЫШ, В. Д. ПОЗНЯКОВ, С. Б. КАСАТКИН, кандидаты техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Предложен способ повышения сопротивления усталости сварных соединений толстолистовой стали в исходном состоянии и после ремонтной сварки удаленных усталостных трещин по общепринятой технологии рекомендованными материалами с последующей облицовкой швов аустенитно-мартенситной проволокой X10Ni10, создающей благоприятные остаточные сжимающие напряжения. Определено, что циклическая долговечность сварных соединений стали 09Г2С, изготовленных, а также отремонтированных по предлагаемой технологии, повышается в 5...7 раз по сравнению с таковой при стандартной технологии.

*Ключевые слова:* циклическая долговечность, сварные соединения, облицовочные швы, остаточные сжимающие напряжения

В элементах железнодорожных и автодорожных мостов, подкрановых балок, судов, буровых платформ и других промышленных сооружений, а также в деталях машин транспортного и энергетического машиностроения после определенного периода эксплуатации в условиях сложного циклического нагружения возникают усталостные трещины. Можно полагать, что главными причинами их преждевременного зарождения и ускоренного развития в металлоконструкциях являются дополнительные местные вибрации отдельных элементов, которые накладываются на основные переменные нагрузки, а также неучтенные при конструировании сварочные остаточные напряжения. Подтверждением этому могут служить пролетные строения железнодорожных мостов [1], изготовленные в 1950–1980-х годах. В мостах, построенных в более ранний период, усталостными трещинами поражены в основном прикрепления продольных и поперечных связей вследствие их колебаний при проходе подвижного состава. В мостах, построенных во второй половине указанного периода по типовым проектам, в которых предусмотрено освобождение поясов главных балок от приварки к ним центрирующих листов, ребер жесткости и связей в стенках балок, имели место значительные дополнительные напряжения изгиба, возникшие от бокового смещения и вибраций. В результате очагами зарождения усталостных трещин стали окончания швов у вырезов вертикальных ребер жесткости, где сварочные растягивающие остаточные напряжения достигают значений предела текучести основного металла. Такие трещины обычно распространяются вдоль стенок главных балок, но при их повороте поперек балок они представляют еще большую

опасность, особенно зимой, когда в условиях пониженных температур даже относительно небольшие усталостные трещины в пролетных строениях могут инициировать хрупкие разрушения при низких номинальных напряжениях. В настоящее время во многих странах, в том числе и в Украине, эксплуатируется большое количество мостов с усталостными трещинами. В таком же состоянии находится подвижной состав, который также в значительной степени исчерпал свой расчетный ресурс.

В этой связи актуальной проблемой является повышение сопротивления усталости сварных конструкций на стадиях проектирования, изготовления, а также после ремонта, в ходе которого с целью продления ресурса изделий удаляют металл вокруг усталостной трещины и выполняют заварку повреждений.

Существуют различные способы повышения циклической долговечности сварных соединений. Как правило, они основаны на снятии растягивающих остаточных напряжений или искусственном наведении благоприятных сжимающих напряжений после завершения сварочных работ, что ухудшает технологичность и увеличивает продолжительность и стоимость изготовления и ремонта металлоконструкций. Указанные недостатки устраняет способ повышения сопротивления усталости путем наведения сжимающих напряжений в процессе сварки, предложенный японскими исследователями [2]. Ими высказано предположение о том, что использование сварочной проволоки с низкой температурой межфазного перехода (рекристаллизации) может способствовать эффективному снижению остаточных напряжений растяжения. Известно [3], что в тройной системе Fe–Ni–Cr температура фазовых превращений в твердом состоянии, связанных с переходом одного класса твердых растворов в другой, зависит от массовой доли этих металлов (рис. 1). Если твердый раствор состоит

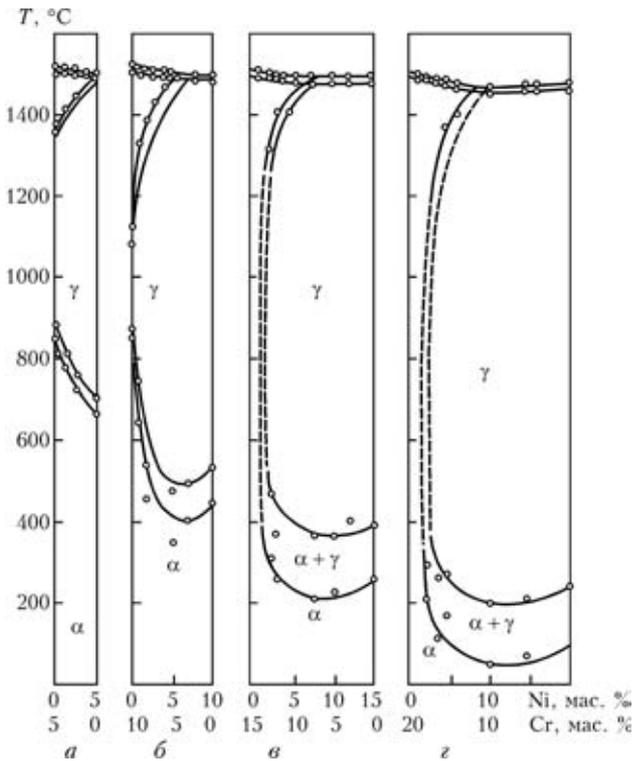


Рис. 1. Политермические разрезы сплавов тройной системы Fe-Ni-Cr: а — 95; б — 90; в — 85; г — 80 мас. % Fe

из 10 мас. % Cr, 10 мас. % Ni и 80 мас. % Fe, то рекристаллизация такого металла происходит в диапазоне низких (200...50 °C) температур. При сварке проволокой отмеченного состава процесс межфазного перехода аустенита в мартенсит ( $\gamma \rightarrow \alpha$ ) приводит к расширению металла шва на конечной стадии охлаждения и, как следствие, к возникновению благоприятных остаточных напряжений сжатия в зоне сварного соединения. По данным работы [4], выполнение сварки с применением проволоки указанного состава позволяет повысить сопротивление усталости соединений стали почти в 2 раза. Однако широкое использование этой проволоки для сварки сталей разных классов прочности имеет и определенные недостатки. Механические характеристики металла шва в значительной мере определяются присадочным материалом и могут существенно отличаться от таковых основного металла, что нередко приводит к появлению холодных трещин в соединениях, особенно при сварке корня шва [5], и снижению сопротивления хрупкому разрушению. Следует также отметить, что высокая стоимость сварочной проволоки снижает экономичность изготовления и ремонта толстолистовых конструкций. В свете изложенного представляется, что для повышения сопротивления усталости сварных соединений не следует выполнять все слои многослойного шва соединений хромоникелевыми материалами. Предлагается сварку многослойных швов и заварку участка с удаленными усталостными тре-

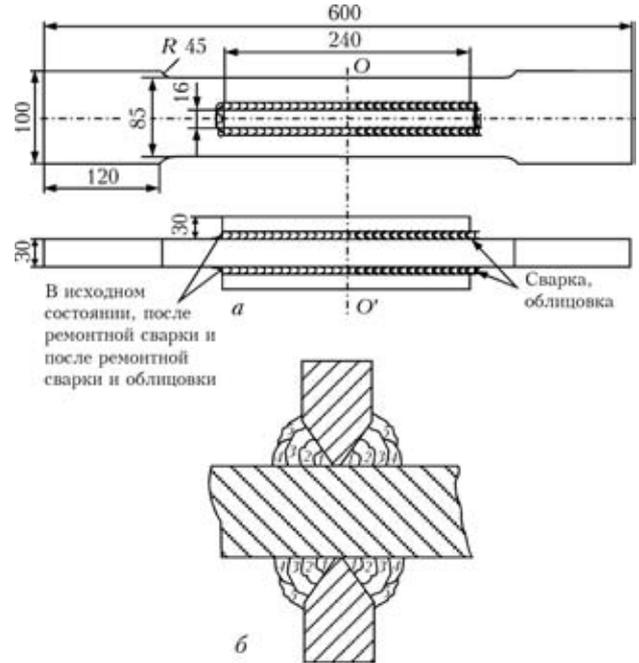


Рис. 2. Схема образца для оценки эффективности облицовки швов проволокой X10Ni10 на сопротивление усталости новых и отремонтированных сварных соединений при одночастотном нагружении (а) и схема сварки (б): 1 — первый проход (корень шва); 2 — сердцевина; 3 — заварка разделки кромок с использованием электродов УОНИ-13/55; 4, 5 — облицовочные швы, выполненные проволокой X10Ni10 в углекислом газе

щинами выполнять по обычной технологии рекомендованными материалами, а последние (облицовочные) швы — аустенитно-мартенситной проволокой.

Для оценки сопротивления усталости сварных соединений, выполненных по предлагаемой в данной работе технологии, изготовлены образцы крестообразной формы из толстолистовой стали 09Г2С (рис. 2), имеющие высокую концентрацию напряжений и растягивающие остаточные напряжения в исходном состоянии при общепринятой технологии изготовления. Все сварные швы продольных ребер образцов с левой стороны оси  $OO'$  и внутренние швы с правой ее стороны (рис. 2, а) выполнены ручной сваркой штучными электродами УОНИ-13/55 с полным проваром, а облицовочные швы ребер с правой стороны от оси  $OO'$  — аустенитно-мартенситной проволокой марки X10Ni10 диаметром 1,6 мм в углекислом газе с применением полуавтомата. Такая конструкция образца и технология изготовления позволили определить сопротивление усталости сварных соединений в исходном состоянии, после облицовки, а также ремонта сваркой и ремонта сваркой и облицовкой на одних и тех же образцах и при тех же режимах нагружения. Испытания на усталость образцов выполняли при мягком режиме от нулевого одночастотного осевого растяжения на сервогидравлической машине УРС 200/20. За критерий завершения испытаний принимали развивающуюся усталостную трещину длиной 20 мм. В процессе

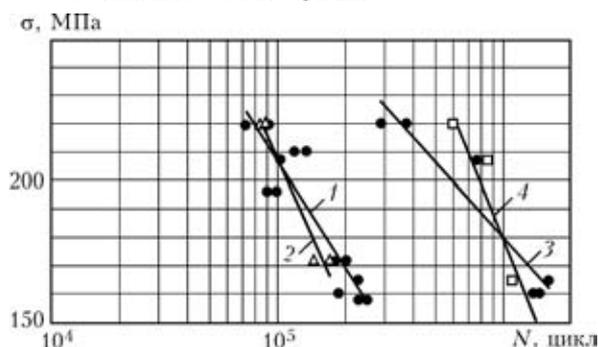


Рис. 3. Сопротивление усталости сварных соединений стали 09Г2С с продольными ребрами жесткости (рис. 2): 1 — исходная технология сварки; 2 — после первого ремонта сваркой по исходной технологии; 3 — сварка с облицовочными швами; 4 — после первого ремонта сваркой с облицовкой проволокой Х10Н10;  $N$  — количество циклов нагружения;  $\sigma$  — максимальные напряжения

испытаний усталостные трещины зарождались по линии сплавления шва с основным металлом в соединениях, полученных с использованием электродов УОНИ-13/55. После достижения трещиной критической длины испытания прерывали, металл с усталостной трещиной удаляли пальцевой фрезой, а образовавшееся углубление заваривали электродами УОНИ-13/55. В образцах, предназначенных для получения данных о сопротивлении усталости соединений после ремонта сваркой по обычной технологии, полную заварку разделанных трещин выполняли электродами УОНИ-13/55. Во всех остальных образцах заварку электродами осуществляли заподлицо с плоскостью образца, а последний (облицовочный) шов выполняли аустенитно-мартенситной проволокой. При этом облицовочные швы начинались и заканчивались на продольной части ребер. Последующие испытания после ремонта продолжали на первоначально заданных режимах нагружения до образования усталостных трещин заданных критических размеров в отремонтированных и исходно упрочненных облицовкой соединениях. Полученные результаты испытаний образцов на усталость, представленные на рис. 3, показали, что ремонт сваркой по общепринятой технологии позволяет практически восстановить исходную циклическую долговечность сварных соединений с высоким уровнем растягивающих остаточных свароч-

ных напряжений и присущей данному типу соединения концентрации напряжений. При выполнении сварки с облицовкой аустенитно-мартенситной проволокой соединений при их изготовлении или после ремонта циклическую долговечность металлоконструкций с такими соединениями можно повысить в 5...7 раз.

## Выводы

1. Применение аустенитно-мартенситной проволоки с низкой температурой межфазного перехода  $\gamma \rightarrow \alpha$  при сварке низколегированных сталей позволяет существенно повысить сопротивление усталости соединений.

2. Предлагаемая технология сварки соединений из толстолистовой стали обычными сварочными материалами и облицовкой швов аустенитно-мартенситной проволокой в отличие от сварки только аустенитно-мартенситной проволокой исключает появление внутренних трещин и соответственно повышает циклическую долговечность соединений, а также снижает затраты на изготовление и ремонт сварных металлоконструкций.

3. Циклическая долговечность сварных соединений стали 09Г2С с высоким уровнем остаточных сварочных напряжений, выполненных и отремонтированных по предлагаемой технологии, повышается в 5...7 раз по сравнению с таковой при стандартной технологии сварки.

1. Усталостные трещины в сварных сплошностенчатых пролетных строениях / Ю. П. Миролубов, Е. И. Панин, В. В. Фролов и др. // Вопросы проектирования и эксплуатации искусственных сооружений. — Л.: ЛИИЖТ, 1983. — С. 62–68.
2. Ohta A., Suzuki N., Maeda Y. Effective means for improving the fatigue strength of welded structures // *Welding World*. — 1996. — № 37. — P. 84–89.
3. Корнилов И. И. Железные сплавы. — Т. 3: Сплавы системы железо–хром–никель. — М.: Изд-во АН СССР, 1956. — 432 с.
4. Ohta A., Maeda Y., Suzuki N. Fatigue life extension by repairing fatigue cracks initiated around box welds with low transformation temperature welding wire. — S.I., [2000]. — 13 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1835–2000).
5. Mazel Yu. A. 10 % Gr–10 % Ni martensitic welding wires with a low temperature of the  $\gamma \rightarrow \alpha$  transformation // *Svarochnoe Proizvodstvo*. — 2002. — 49, № 12. — S. 10–13.

The method is suggested for increasing fatigue resistance of welded joints on thick steel plates in the as-welded condition and after repair welding of fatigue cracks by the standard technology using the recommended consumables, followed by facing the welds with austenite-martensite wire Kh10N10 that induces favourable residual compressive stresses. Cyclic fatigue life of welded joints in steel 09G2S, made and repaired by the suggested technology, was found to increase 5-7 times, compared with that by using the standard technology.

Поступила в редакцию 10.07.2006,  
в окончательном варианте 22.03.2006