



УДК 621.791.052

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ И АРГОНОДУГОВОЙ ОБРАБОТКИ НА УСТАЛОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ КОНСТРУКЦИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Е. В. КОЛОМИЙЦЕВ, канд. техн. наук (ПАО «ММК им. Ильича», г. Мариуполь),
А. Н. СЕРЕНКО, канд. техн. наук (Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь)

Приведены результаты испытаний на усталость тавровых соединений низколегированных сталей и методы повышения долговечности и прочности сварных соединений (поверхностное деформирование с применением шарикостержневого упрочнителя и аргонодуговая обработка). Показано, что оптимальным является поверхностное упрочнение шва и околошовной зоны. Обработка этим методом подкрановых балок и балансиров колодцевых кранов Слябинг-1150 ПАО «ММК им. Ильича» повысило их циклическую долговечность в 15 раз.

Ключевые слова: сварные конструкции, подкрановые балки, сварные соединения, поверхностное упрочнение, аргонодуговая обработка, остаточные напряжения, концентрация напряжений, усталостная прочность, долговечность

Практика эксплуатации тяжелонагруженных сварных конструкций (подкрановых балок, балансиров колодцевых кранов и др.) на ПАО «ММК им. Ильича» показывает, что решающее значение для их безаварийной работы имеет не статическая, а усталостная прочность.

Повреждаемость и разрушение подкрановых балок и элементов грузоподъемных кранов зависит от многих факторов: конструктивных, технологических, эксплуатационных. Подкрановые балки претерпевают различные силовые воздействия, основными из которых являются нагрузки от катков кранов в вертикальной и горизонтальной плоскостях, передаваемые на рельс балки. В результате в сварных соединениях балок (поясные швы, швы ребер и др.) возникают переменные напряжения, распределяющиеся в расчетных сечениях крайне неравномерно. Характерные повреждения в подкрановых балках, наблюдаемые на практике, следующие:

- образование трещин по линии сплавления угловых швов, соединяющих стенку с верхним поясом (наиболее типичное и опасное повреждение). Длина трещины в момент ее устранения составляет 400...500 мм, а в некоторых случаях 2...3 м;

- нарушение сплошности и разрушение диафрагм;

- трещина в местах крепления подкрановых балок к колоннам;

- разрушение связей по подкрановым балкам.

Для выявления наиболее эффективного метода повышения усталостной прочности и долговечности сварных соединений подкрановых балок необходим недорогой и простой вариант сравнительных испытаний на усталость моделей подкрановых балок, поскольку полная имитация всех факторов, сопутствующих их повреждению, затруднительная и дорогостоящая.

Испытания на усталость провели на образцах, моделирующих соединения полки со стенкой (тавровое соединение) при знакопеременном плоском изгибе с постоянной амплитудой деформации (жесткое нагружение).

При изготовлении подкрановых балок стенки и пояса вырезаются из прокатных поясов требуемой толщины. Продольные оси поясов и стенки при раскрое совпадают с направлением проката. Последующая сварка пояса со стенкой, осуществляемая угловыми швами, также имеет направление вдоль проката, что учитывалось при разработке схемы раскроя листов на заготовки для изготовления сварных образцов.

Тавровый образец (рис. 1, а) имитирует соединение пояса со стенкой подкрановых балок склада руды и концентратов аглофабрики ПАО «ММК им. Ильича». Ширину образца (100 мм) выбрали с целью получения в нем продольных

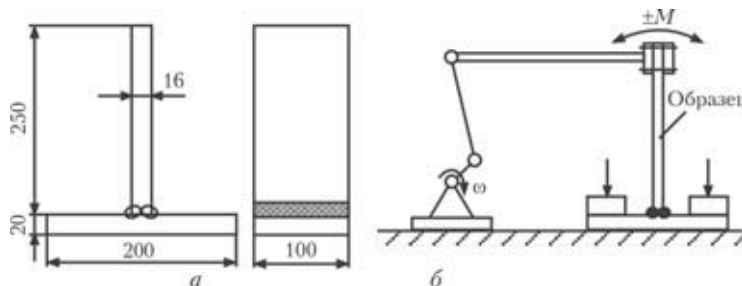


Рис. 1. Схема образца для испытаний на усталость (а) и схема испытаний (б)

© Е. В. Коломийцев, А. Н. Серенко, 2011

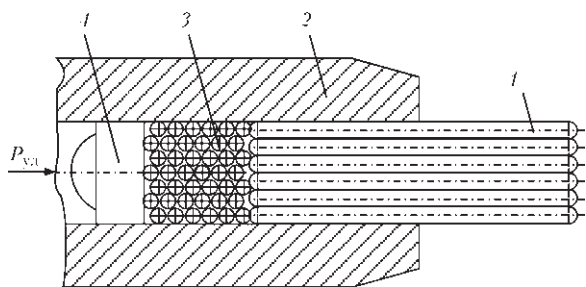


Рис. 2. Схема шарикостержневого ударника (обозначения см. в тексте)

остаточных напряжений, примерно равных остаточным напряжениям, образующимся в зонах сварных швов балок. Поверхность поясов и стенок балок и соответственно образцов не подвергали послепрокатной обработке. Образцы изготавливали из горячекатаной стали 09Г2С ($\sigma_T = 350$ МПа, $\sigma_B = 500$ МПа).

Сборку и сварку образцов осуществляли в кондукторе, позволяющем уменьшить угловые деформации поясов посредством их крепления винтовыми прижимами.

Автоматическую сварку поясных швов заготовок (по пять образцов в заготовке) длиной 500 мм проводили в лодочку трактором АДФ-1001 сварочной проволокой Св-08А диаметром 4 мм под флюсом АН-348А на режиме: $I_{св} = 700...750$ А; $U_d = 36...37$ В; $v_{св} = 21$ м/ч; вылет электрода $h = 40$ мм, ток постоянный обратной полярности. В качестве источника питания использовали тиристорный выпрямитель ВДУ-1201.

Начало и конец поясных швов выводили на дополнительные планки. Второй шов выполняли после остывания заготовки, нагретой в процессе выполнения первого шва.

Полученные заготовки разделили на три серии: исходное состояние после сварки; оплавление переходной зоны от шва к основному металлу в среде аргона; поверхностное пластическое деформирование зоны перехода шва к основному металлу.

После сварки или соответствующей обработки околошовной зоны заготовку разрезали механическим способом на образцы. Разрезку проводили без охлаждения водой на мягком режиме, что не вызывало нагрева образцов выше 50 °С и, следовательно, не приводило к релаксации остаточных напряжений. Затем образцы передавали на механическую обработку кромок.

Известно, что долговечность сварных соединений при переменных нагрузках можно повысить разными методами [1–6]:

— до сварки путем подбора рациональных сварочных материалов, режимов сварки и др.;

— при сварке путем регулирования термомодеформационного цикла сварки и условий кристаллизации;

— после сварки путем улучшения поверхностных свойств металла и наведения сжимающих напряжений в нем механической, термической, ультразвуковой и другими видами обработок.

Так как методы, предшествующие и сопутствующие сварке, являются более отработанными, в настоящей работе была предпринята попытка оценить возможности технологических методов обработки сварных соединений с учетом полученных ранее результатов [3–6].

Одним из наиболее распространенных методов повышения циклической прочности сварных конструкций является поверхностная пластическая обработка [2–6]. Использован шарикостержневой упрочнитель, имеющий ряд преимуществ по сравнению с другими типами [7]. Инструмент состоит из двух основных узлов – пневмомолотка КМП-24 и шарикостержневого ударника (рис. 2). Пневмомолоток является источником ударных импульсов, а конструкция ударника позволяет осуществлять передачу импульсов через систему тел свободно плавающим стержням 1 и удерживать их в рабочем и нерабочем состоянии в корпусе ударника 2. Для равномерной передачи ударной энергии на все стержни используется промежуточный слой шариков 3 диаметром 2,0...2,5 мм. Соотношение диаметров шариков к диаметру стержней выбрали в диапазоне 0,6...0,8. Ударный импульс передается на шарики через боек 4. Слой шариков выполняет функцию квазижидкости и позволяет пластически обрабатывать поверхность сварных швов и зоны перехода без пропусков. Скорость обработки с применением шарикостержневого упрочнителя составила 6...8 м/ч. Сила прижатия рабочего инструмента к упрочняемой поверхности колеблется в пределах 80...120 Н.

В результате поверхностной пластической обработки шарикостержневым ударником происходят следующие процессы: упрочнение (наклеп) поверхностных слоев металла шва и околошовной зоны; наведение в них благоприятных сжимающих остаточных напряжений; уменьшение концентрации напряжений в зоне перехода шва к основному металлу вследствие увеличения радиуса перехода от шва к основному металлу. Специфический микрорельеф наклепанной поверхности образуется путем многократного наложения и пересечения единичных следов (лунок) от закругленных концов стержней.

Глубину наклепанного слоя, интенсивность и характер распределения остаточных напряжений по толщине слоя a определяли по методике из работ [6, 8]. Исследования проводили на плоских образцах размером $16 \times 20 \times 300$ мм из стали 09Г2С на режиме, приведенном выше. Из рис. 3 видно, что глубина наклепанного слоя и глубина распространения сжимающих напряжений достигают

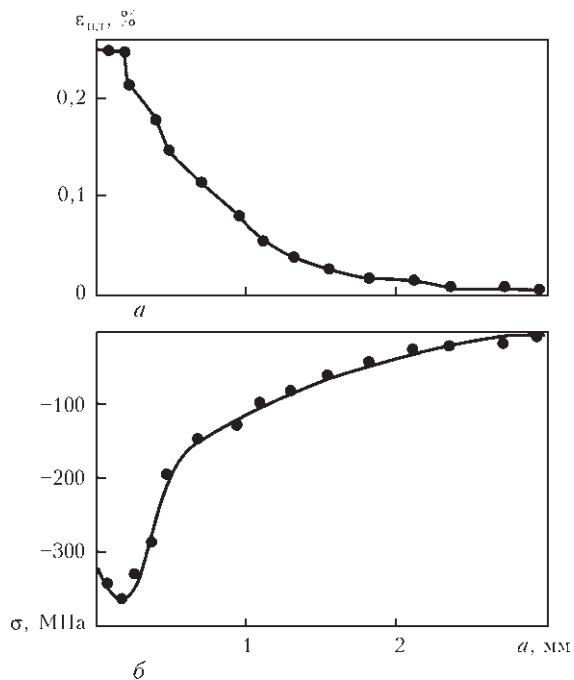


Рис. 3. Распределение пластических деформаций (а) и остаточных напряжений (б) по сечению образца, упрочненного пневмомолотком с шарикостержневым ударником

3 мм, а максимальные напряжения сжатия близки к пределу текучести для стали 09Г2С.

Другим методом, предложенным для опробования на элементах, имитирующих работу верхнего пояса подкрановых балок, было оплавление дугой в аргоне места перехода шва к основному металлу [2, 3], который находит применение в машино- и судостроении.

Испытания на усталость проводили на установке с кривошипно-шатунным механизмом при симметричном цикле нагружения. Изгиб при постоянной деформации проводили в плоскости, перпендикулярной вертикальной стенке образца (см. рис. 1, б). Испытания проводили на базе $3 \cdot 10^6$ циклов при частоте нагружения 13 Гц. Результаты испытаний представлены на рис. 4.

Усталостная прочность таврового соединения в исходном состоянии после сварки изменялась от 200 МПа при $50 \cdot 10^3$ циклов до 70 МПа при $3 \cdot 10^6$ циклов (рис. 4, кривая 1).

Аргонодуговая обработка места перехода шва к основному металлу (рис. 4, кривая 2) повысила предел выносливости с 70 до 100 МПа (в 1,4 раза), долговечность при этом выросла в 2,5...3,0 раза (при одинаковых уровнях напряжений — 140 и 200 МПа). Увеличение предела усталости и долговечности главным образом достигается путем увеличения радиуса перехода от шва к основному металлу, что приводит к снижению концентрации напряжений.

Поверхностное пластическое деформирование с применением шарикостержневого упрочнителя повысило предел выносливости до 140 МПа, т. е.

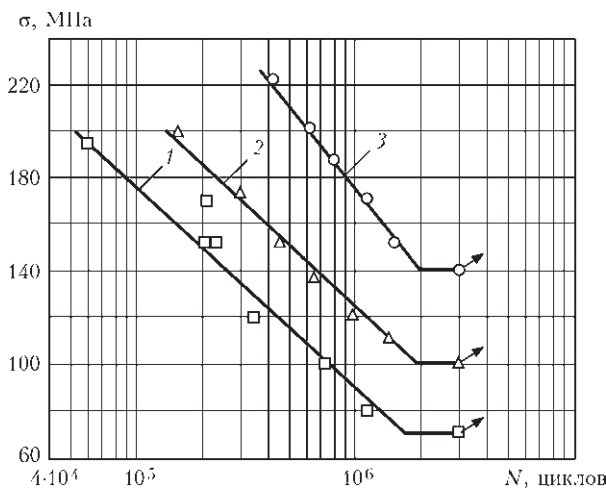


Рис. 4. Результаты испытаний сварных образцов на усталость: 1 — исходное состояние (после сварки); 2 — аргонодуговая обработка зоны перехода шва к основному металлу; 3 — упрочнение пневмомолотком с шарикостержневым ударником той же зоны

в 2 раза (рис. 4, кривая 3). Долговечность таврового соединения после наведения сжимающих напряжений возросла в 8...10 раз.

Образцы в исходном состоянии после сварки разрушались в месте перехода от шва к основному металлу (стенке) (рис. 5, а), что совпадает с данными работ [1, 2 и др.]. После аргонодуговой обработки трещина образовывалась в месте перехода оплавленного металла шва к стенке (рис. 5, б). Усталостная прочность и долговечность в основном возросли за счет увеличения радиуса перехода от шва к основному металлу, хотя наблюдалось некоторое увеличение микротвердости в металле ЗТВ (с $HV 188...195$ до $HV 210...214$).

После обработки с применением шарикостержневого упрочнителя образцы разрушались, как

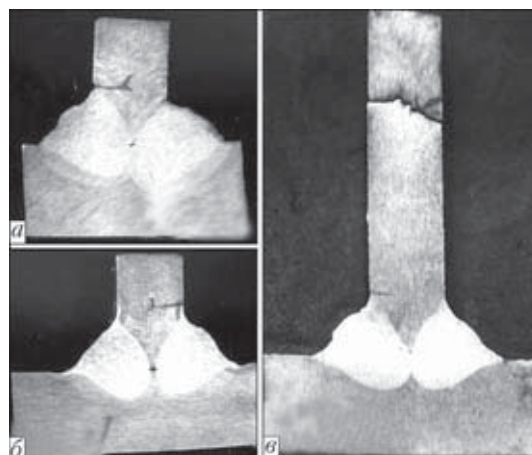


Рис. 5. Макрошлифы поперечных сечений образцов, подверженных усталостному нагружению: а, б — зарождение усталостных трещин соответственно в исходных образцах (необработанных) и обработанных переплавкой переходной зоны дугой в аргоне; в — разрушение образца по основному металлу после упрочнения переходной зоны пневмомолотком с шарикостержневым ударником

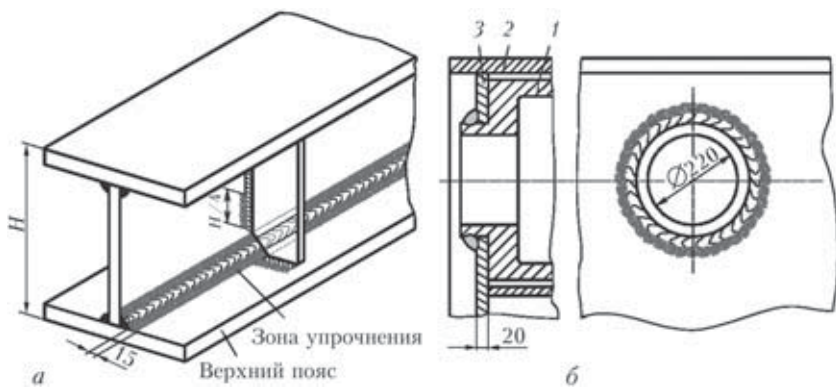


Рис. 6. Зоны упрочнения сварных соединений (затемнены) подкрановых балок (а) и балансира колодцевых кранов (б): 1 — втулка; 2 — верхний пояс; 3 — стенка

правило, за пределами обработанной зоны (рис. 5, в), т. е. по основному металлу.

Повышение усталостной прочности сварных элементов происходит в результате наведения сжимающих напряжений в поверхностных слоях, в которых зерна дробятся и изменяется их ориентация, причем твердость зерен практически не изменяется. Увеличение предела выносливости в 2 раза, а усталостной долговечности в 8...10 раз и возможность проведения данного вида обработки в любом пространственном положении в производственных условиях позволяют рекомендовать его для обработки ответственных сварных конструкций металлургических предприятий.

Промышленное применение технологии шарикостержневого упрочнителя опробовали на опытной партии из шести подкрановых балок (рис. 6, а) склада руды и концентратов аглофабрики ПАО «ММК им. Ильича». Образование усталостных трещин в сварных соединениях балок сопряжено с риском перехода их в хрупкое разрушение, поэтому эксплуатация таких конструкций требует постоянного надзора и соответственно финансовых затрат. Опытная партия упрочненных балок эксплуатируется без появления усталостных трещин уже более десяти лет.

Другой ответственной сварной конструкцией, подверженной циклическому нагружению и появлению усталостных повреждений, является балансир колодцевого крана Слябинг-1150. Службой главного механика совместно с авторами установлено, что в результате воздействия переменных нагрузок срок службы балансира составлял не более трех месяцев до возникновения трещины по сварному шву или металлу ЗТВ на расстоянии

5...10 мм от линии сплавления в зоне приварки втулки к корпусу балансира (рис. 6, б).

В начале 2007 г., основываясь на результатах, представленных в данной статье, с применением шарикостержневого упрочнителя были обработаны два балансира колодцевых кранов. Один из них был установлен на кран № 3, другой — на кран № 7. Долговечность балансиров после такой упрочняющей обработки к настоящему времени достигла 15-кратного увеличения. Эксплуатация балансиров продолжается, что подтверждает высокую технико-экономическую эффективность упрочняющей обработки шарикостержневым упрочнителем.

1. Труфяков В. И. Усталость сварных соединений. — Киев: Наук. думка, 1973. — 216 с.
2. Михеев П. П. Способы повышения сопротивления усталости сварных соединений стальных конструкций. — Киев: Знання, 1981. — 28 с.
3. Аснис А. Е., Иващенко Г. А. Повышение прочности сварных конструкций. — Киев: Наук. думка, 1985. — 256 с.
4. Олейник Н. В., Кычин В. П., Луговский А. Л. Поверхностное динамическое упрочнение деталей машин. — Киев: Техніка, 1984. — 152 с.
5. Коломийцев Е. В., Серенко А. Н. Влияние ультразвуковой ударной и лазерной обработки на сопротивление усталости стыковых сварных соединений в воздушной и коррозионной средах // Автомат. сварка. — 1990. — № 11. — С. 13–15.
6. Кравцов Т. Г., Севрюков В. В. Ультразвуковая обработка судовых деталей и сварных конструкций. — Николаев: УГМТУ, 2001. — 126 с.
7. Пат. 30992 на корисну модель Україна. Пристрій для деформаційного зміцнення сварних з'єднань / Є. В. Коломийцев, О. М. Серенко, П. М. Кирильченко. — Опубл. 25.03.2008, Бюл. № 6.
8. Махненко В. И., Кравцов Т. Г. Толщина пластически деформированного слоя при ультразвуковой ударной обработке наплавленных изделий // Автомат. сварка. — 1986. — № 8. — С. 14–19.

Results of fatigue tests of the T-joints on low-alloy steels are given, and methods for extending life and increasing strength of the welded joints (surface deformation by using a ball-rod strengthening device and argon-arc treatment) are described. It is shown that the optimal method is surface strengthening of the weld and near-weld zone. Treatment of crane beams and rocker bars of well cranes «Slabbing-1150» at the Ilyich Iron & Steel Works of Mariupol by this method provided a 15 times increase in their cyclic fatigue life.

Поступила в редакцию 20.12.2010