

Влияние электродинамической обработки на долговечность сварных соединений алюминиевого сплава АМг6

Л. М. Лобанов^а, Н. А. Пашин^а, А. Н. Тимошенко^а, П. В. Гончаров^а, О. Л. Миходуй^а, Ю. М. Сидоренко^б

^а Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, Украина

^б Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского”, Киев, Украина

Исследовано влияние электродинамической обработки на долговечность сварных соединений алюминиевого сплава АМг6 при циклическом нагружении. Установлено, что такая обработка образцов стыковых сварных соединений данного сплава приводит к снижению уровня остаточных сварочных напряжений растяжения с изменением их знака.

Ключевые слова: электродинамическая обработка, электродное устройство, остаточные сварочные напряжения, алюминиевые сплавы, долговечность, импульс электрического тока, размах напряжений.

Введение. Использование современных транспортных сварных конструкций из сплавов на основе алюминия обуславливает необходимость разработки новых подходов к повышению их долговечности. Решение проблемы торможения развития усталостного разрушения представляется актуальным для продления ресурса как новой, так и эксплуатируемой техники [1].

Известен ряд эффективных способов повышения сопротивления усталости конструкционных материалов, основанных на наведении полей сжимающих напряжений в зоне предполагаемого разрушения, к которым можно отнести высокочастотную механическую проковку [2]. Среди способов, базирующихся на снижении концентрации напряжений, отметим обработку вершины трещины импульсными электромагнитными полями различной длительности и конфигурации [3, 4].

Одним из методов электроимпульсных воздействий на сварные соединения является электродинамическая обработка (ЭДО) [5]. В результате ЭДО снижается уровень остаточных сварочных напряжений растяжения, а в зоне обработки формируется металл с измельченной структурой. Анализ результатов [1–5] дает основание полагать, что ЭДО может быть эффективным способом повышения долговечности сварных соединений. Однако в настоящее время отсутствуют данные об оценке влияния ЭДО на долговечность таких соединений.

Цель настоящей работы заключается в исследовании влияния электродинамических воздействий на долговечность сварных соединений алюминиевого сплава АМг6 при циклическом нагружении.

Методика проведения экспериментов. Исследовали влияние ЭДО на сопротивление усталости образцов сварных соединений сплава АМг6 толщиной $\delta = 2$ мм (рис. 1), выполненных автоматической сваркой неплавящимся электродом в аргоне при напряжении дуги $U_{св} = 20$ В, сварочном токе $I_{св} = 170$ А и скорости процесса $V_{св} = 5,5$ мм/с. Методом электронной спекл-интерферометрии [6] до и после ЭДО определяли значения продольной σ_x и поперечной σ_y (относительно линии шва) компонент остаточных сварочных напряжений в центральном поперечном сечении образца вдоль линии А–А (рис. 1). Электродинамическую обработку выполняли в направлении “от центра к краям” (рис. 1) с помощью электродного устройства (ЭУ).

© Л. М. ЛОБАНОВ, Н. А. ПАШИН, А. Н. ТИМОШЕНКО, П. В. ГОНЧАРОВ, О. Л. МИХОДУЙ, Ю. М. СИДОРЕНКО, 2017

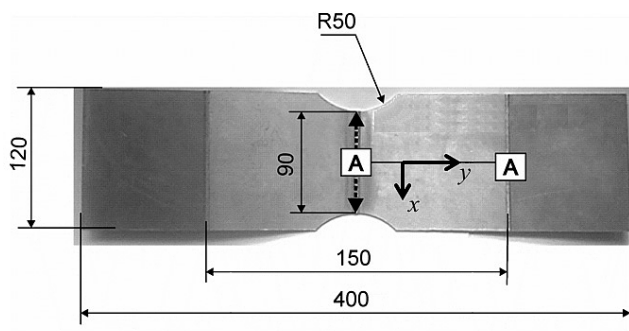


Рис. 1. Образец сварного соединения сплава АМгб для усталостных испытаний: пунктирной стрелкой обозначено направление ЭДО, сплошными стрелками – направление компонент x и y плоского напряженного состояния, $A-A$ – линия регистрации напряжений σ_x и σ_y .

Режим ЭДО обеспечивал запасенную энергию импульса электрического тока (ИЭТ) до 600 Дж при однократном электродинамическом воздействии.

Конструктивная схема и внешний вид ЭУ представлены на рис. 2. Электродное устройство обеспечивает электрический контакт между разрядным контуром и обрабатываемым металлом по одному каналу, через который в последний вводится ИЭТ. Направление протекания ИЭТ по цепям ЭУ от источника импульсного электрического тока (ИИЭТ) к обрабатываемому металлу показано на рис. 2,а. Рабочим органом ЭУ является электрод 1 (рис. 2,а), закрепленный в корпусе 2. Рабочая поверхность электрода контактирует с обрабатываемым металлом. Корпус, жестко связанный с диском 3, совместно с электродом входит в состав ударного механизма, который может двигаться в вертикальном направлении. Диск 3 сопряжен с катушкой индуктивности 4. Сверху клеммы подключения закрыты крышкой 5, предназначенной также для позиционирования ЭУ в процессе обработки. Для подключения ЭУ к ИИЭТ сверху на корпусе расположены клеммы 6 и 7. Сдвоенная клемма 7 обеспечивает прохождение ИЭТ от ИИЭТ на катушку индуктивности и, как следствие, ударное нагружение обрабатываемого металла, а также электрический контакт с клеммой 6. Последняя обеспечивает прохождение ИЭТ от катушки индуктивности к электроду, т.е. проникновение тока в обрабатываемый металл. Внешний вид одноканального ЭУ представлен на рис. 2,б. Перед применением ЭУ, упираясь в металл торцем электрода, выставляется перпендикулярно к обрабатываемой поверхности. Прохождение ИЭТ через катушку индуктивности возбуждает в диске магнитное поле, инициирующее в нем вихревые токи. Взаимодействие наведенных токов с возбужденным их магнитным полем приводит к возникновению электродинамической силы P .

Осциллограммы силы P и импульсного тока I , проходящего через пластину из алюминиевого сплава АМгб толщиной $\delta = 4,0$ мм при напряжении заряда $U_3 = 500$ В, емкости $C = 6600$ мкФ и индуктивности $L = 5,3$ мкГн, представлены на рис. 3. Воздействие ИЭТ на зону обработки при одноканальной схеме по длительности превышает период действия силы P , что задается параметрами разрядного контура.

Для обеспечения режима работы ЭУ, исключаяющего искрообразование и оплавление в месте контакта электрод–образец, определяли величину статической нагрузки, обеспечивающей надежный токовый контакт электрода с обрабатываемой поверхностью в период действия электродинамической силы $P = 20,4$ кН [7]. С этой целью создавали гарантированное статическое прижатие электрода ЭУ (рис. 2,а) к наружной поверхности образца (рис. 1). От силы прижатия F_y существенно зависит величина электрического сопротивления контакта электрод–образец R_k . Для оценки влияния силы F_y прижатия на изменение значений сопротивления контакта R_k измеряли

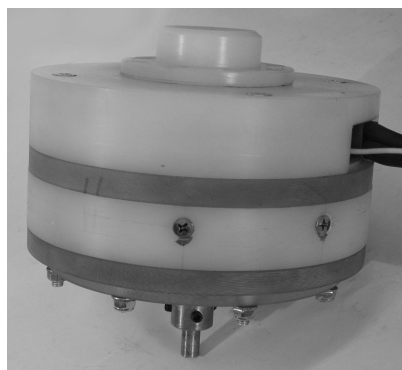
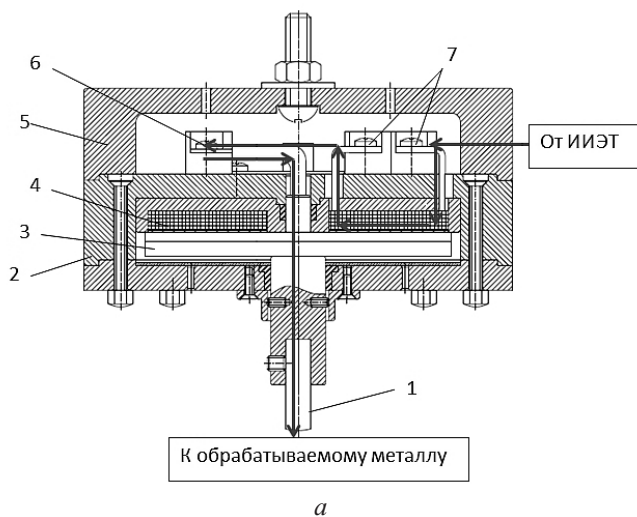


Рис. 2. Схема (а) и внешний вид (б) электродного устройства для ЭДО.

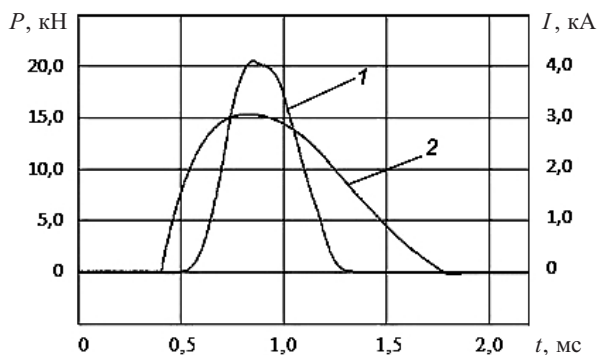


Рис. 3. Осциллограммы динамического давления P (1) и импульсного тока I (2), проходящего через обрабатываемый металл при напряжении заряда $U_3 = 500$ В, емкости $C = 6600$ мкФ и индуктивности $L = 5,3$ мкГн.

последние, варьируя F_y в диапазоне 2...150 Н. С этой целью на наружной поверхности крышки ЭУ (рис. 2,а) закрепляли грузы, имеющие различную массу, а изменение значений R_k регистрировали на участке разрядного контура между электродом и образцом с использованием измерительного моста (RLC-метр) марки BR2876-5.

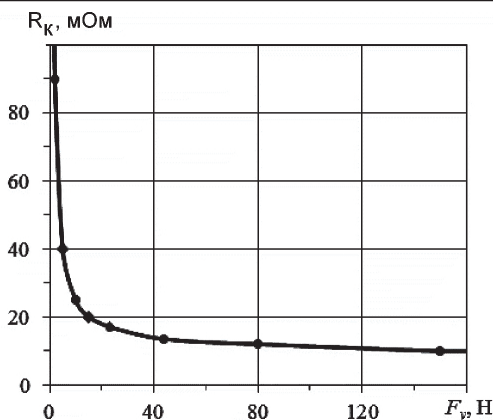


Рис. 4. Зависимость сопротивления контакта R_k от силы F_y статического прижатия электрода к образцу.

Зависимость сопротивления контакта R_k от силы F_y статического прижатия электрода к образцу представлена на рис. 4. Видно, что с увеличением F_y в интервале 2...40 Н сопротивление контакта R_k интенсивно снижается с 90 до 13 мОм. При дальнейшем увеличении F_y до 150 Н значения R_k линейно уменьшаются до 10 мОм. Анализ приведенных на рис. 4 данных показывает, что увеличение F_y больше 40 Н незначительно влияет на изменение сопротивления в зоне контактного взаимодействия. Это позволяет для дальнейших экспериментов выбрать значения F_y в диапазоне 50...80 Н.

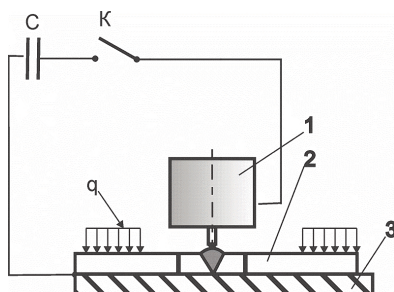


Рис. 5. Электродинамическая обработка образцов сварных соединений сплава АМгб при “жестком” закреплении: 1 – ЭУ; 2 – образец; 3 – сборочная плита (С – емкостной накопитель энергии; К – силовой ключ; q – фиксирующая нагрузка).

Образцы обрабатывали в условиях “жесткого” закрепления. Для реализации последнего перед ЭДО обе головки образца “жестко” фиксировали распределенной нагрузкой q на сборочной плите, исключая возможные его угловые деформации (рис. 5). Данная схема фиксации обрабатываемого металла, согласно [8], обеспечивает максимальную эффективность электродинамического воздействия. Для реализации электродинамического воздействия на рабочую часть образца в зоне ЭДО устанавливали ЭУ с гарантированным электрическим контактом с обрабатываемой поверхностью при замыкании разрядного контура. Посредством включения силового ключа K инициировали разряд емкостного накопителя энергии C через ЭУ в обрабатываемый материал (рис. 5). В процессе ЭДО серий ИЭТ электродное устройство перемещали по поверхности обрабатываемого участка образцов в направлении от центра к краям с шагом 3–5 мм (рис. 1). В каждом цикле ЭДО выполняли до 35 электродинамических воздействий, что обеспечивало равномерное деформирование обрабатываемого участка шва длиной 90 мм. Реализовывали схему обработки образцов

со стороны наружной поверхности шва и со стороны корня. Обработку проводили в режиме при амплитудных значениях плотности тока $j = 7,7 \text{ кА/мм}^2$ и электродинамической силы $P = 17,5 \text{ кН}$.

Усталостные испытания осуществляли на машине марки УПМ-02, реализующей схему симметричного изгиба образцов с частотой 14 Гц, в течение инкубационного периода [9] до регистрации числа циклов N , соответствующего началу разрушения образцов [8]. Размах напряжений цикла $2\sigma_a$ задавали в диапазоне 80...160 МПа.

Результаты экспериментов. Распределение σ_x до и после двухсторонней ЭДО центра шва представлено на рис. 6. Видно, что до ЭДО в центре шва пиковые значения растягивающих напряжений близки к пределу текучести $\sigma_{0,2}$ сплава АМгб (130 МПа). После обработки напряжения трансформируются в сжимающие и составляют -15 МПа .

Значения растягивающих напряжений σ_y в центре шва и на линии сплавления до ЭДО достигают соответственно 12 и 17 МПа. После ЭДО они также трансформируются в сжимающие и их значения в центре шва и на линии сплавления равны соответственно -68 и -56 МПа .

Циклическая долговечность N образцов сварных соединений в исследуемом диапазоне $2\sigma_a$ повышается в три раза по сравнению с исходной (рис. 7). При этом разрушение как исходных образцов, так и обработанных происходит по линии сплавления.

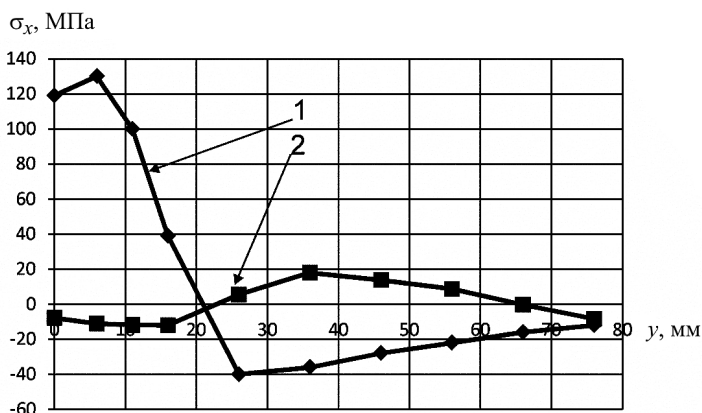


Рис. 6. Распределение σ_x до (1) и после (2) ЭДО.

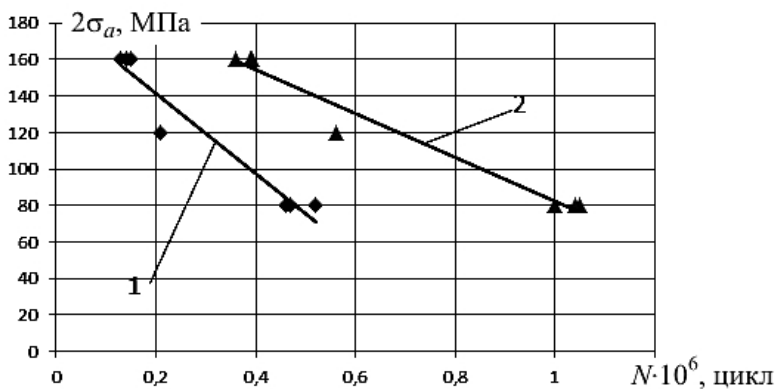


Рис. 7. Кривые усталости образцов сварных соединений сплава АМгб в исходном состоянии (1) и после ЭДО (2) при $\sigma_a = 80, 120$ и 160 МПа .

Выводы

1. Для удовлетворительного токового контакта электрода с обрабатываемой поверхностью при ЭДО сварных соединений сплава АМг6 величина статической нагрузки на электродное устройство должна составлять не менее 50 Н.

2. Показано, что ЭДО образцов стыковых сварных соединений сплава АМг6 приводит к снижению уровня остаточных сварочных напряжений растяжения с изменением их знака.

3. Установлено, что в результате двухсторонней одноканальной ЭДО поверхности сварных соединений сплава АМг6 циклическая долговечность при симметричном изгибе повышается примерно в три раза по сравнению с исходной.

Резюме

Досліджено вплив електродинамічної обробки на довговічність зварних з'єднань алюмінієвого сплаву АМг6 за циклічного навантаження. Установлено, що така обробка зразків стикових зварних з'єднань даного сплаву призводить до зменшення рівня залишкових зварних напружень розтягу зі зміною їх знака.

1. *Кныш В. В.* Определение циклической долговечности элементов конструкций при торможении усталостных трещин // Автомат. сварка. – 2003. – № 9-10. – С. 73–75.
2. *Кныш В. В., Клочков И. Н., Пацуля М. П., Мотрунич С. И.* Повышение сопротивления усталости тонколистовых сварных соединений алюминиевых сплавов высокочастотной проковкой // Там же. – 2014. – № 5. – С. 22–29.
3. *Финкель В. М., Иванов В. М., Головин Ю. И.* Залечивание трещин в металлах скрещенным электрическим и магнитным полями // Пробл. прочности. – 1983. – № 4. – С. 54–58.
4. *Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Копанев А. А.* Влияние электрического тока на процесс деформирования в зоне концентратора напряжений // Изв. вузов. Сер. Черная металлургия. – 1993. – № 8. – С. 44–46.
5. *Лобанов Л. М., Пащин Н. А., Соломийчук Т. Г. и др.* Изменения структуры алюминиевого сплава АМг6 при электродинамических воздействиях // Вісн. укр. матеріалознавчого тов-ства. – 2012. – № 5. – С. 30–42.
6. *Лобанов Л. М., Пивторак В. А., Савицкий В. В., Ткачук Г. И.* Методика определения остаточных напряжений в сварных соединениях и элементах конструкций с использованием электронной спекл-интерферометрии // Автомат. сварка. – 2006. – № 1. – С. 10–13.
7. *Лобанов Л. М., Пащин Н. А., Черкашин А. В. и др.* Эффективность электродинамической обработки алюминиевого сплава АМг6 и его сварных соединений // Там же. – 2012. – № 1. – С. 3–7.
8. *Lobanov L. M., Pashchin N. A., Yashchuk V. A., and Mikhodui O. L.* Effect of electrodynamic treatment on the fracture resistance of the АМg6 aluminum alloy under cyclic loading // Strength Mater. – 2015. – 47, No. 3. – P. 447–453.
9. *Яковлева Т. Ю.* Локальная пластическая деформация и усталость металлов. – Киев: Наук. думка, 2003. – 236 с.

Поступила 12. 07. 2016