

СРАВНЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ МАГНИТНОГО И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЕЙ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМГ6

Л. М. ЛОБАНОВ¹, И. П. КОНДРАТЕНКО², Н. А. ПАЩИН¹, О. Л. МИХОДУЙ¹, А. В. ЧЕРКАШИН¹

¹ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Институт электродинамики НАН Украины. 03680, г. Киев, просп. Победы, 56

Остаточные сварочные напряжения негативно влияют на предел выносливости сварного соединения, являясь при этом основной причиной хрупкого разрушения металла — коррозионного растрескивания. Поэтому разработка эффективных методов регулирования сварочных напряжений, отличающихся малыми энергетическими затратами и относительной простотой реализации, традиционно является актуальной для современного производства. В настоящее время получили распространение методы снижения сварочных напряжений, основанные на влиянии импульсов электрического тока и магнитного поля. При этом каждый из методов имеет свои достоинства и недостатки и оценка их эффективности при регулировании остаточных сварочных напряжений представляется актуальной задачей. В работе проведена сравнительная оценка эффективности регулирования остаточных напряжений сварных пластин из сплава АМГ6 при обработках импульсным электромагнитным полем (ОИЭМП) и импульсным током (ЭДО), выполненных с применением плоских индукторов. С использованием метода электронной спекл-интерферометрии установлено, что ОИЭМП и ЭДО понижают начальный уровень сварочных напряжений в зоне импульсных воздействий до 100 %. Библиогр. 16, табл. 1, рис. 4.

Ключевые слова: электродинамическая и магнитоимпульсная обработка, алюминиевый сплав, сварное соединение, электронная спекл-интерферометрия, эффективность обработки, остаточные напряжения, электропластический эффект, плотность тока, плоский индуктор

Исследования влияния остаточных сварочных напряжений на прочность сварных соединений, особенно при циклическом нагружении, традиционно представляются актуальными для инженерной практики эксплуатации металлических конструкций. Это связано с тем, что сварочные напряжения негативно влияют на предел выносливости сварного соединения, повышая скорости распространения усталостной трещины [1, 2]. При этом растягивающие сварочные напряжения при их взаимодействии с коррозионно-активной средой являются основной причиной хрупкого разрушения металла – коррозионного растрескивания [3].

Традиционные технологические операции по снижению сварочных напряжений являются достаточно трудоемкими и сводятся к термическому или механическому воздействию на металл сварного соединения. Разработка эффективных методов регулирования сварочных напряжений, отличающихся малыми энергетическими затратами и относительной простотой реализации, является актуальной для современного производства.

В научно-технических публикациях представлены результаты исследований влияния импульсов электрического тока (ИЭТ) и магнитного поля (ИЭМП) на релаксацию технологических напря-

жений [4–6], в том числе остаточных сварочных [7, 8]. Каждое из выше представленных воздействий имеет свои достоинства и недостатки и оценка эффективности регулирования остаточными сварочными напряжениями с их помощью представляется актуальной задачей.

Целью настоящей работы являлась сравнительная оценка влияния параметров обработки импульсным электромагнитным полем (ОИЭМП) и импульсным током (ЭДО) на снижение остаточных напряжений в сварных соединениях из алюминиевого сплава.

Методика проведения исследований. Для проведения исследований использовали образцы сварного соединения и основного металла из отожженного алюминиевого сплава АМГ6. Режим предварительного отжига заготовок (нагрев до 320 °С в течение 1,5 ч и остывание вместе с печью) гарантировал отсутствие в металле технологических напряжений.

Образцы сварного соединения с длиной шва 250 мм выполняли из двух листовых заготовок размерами 360x250x4 мм за один проход автоматической сваркой ТИГ (Ar) на установке АСТВ-2М. Режим сварки при напряжении дуги $U_d = 18$ В, токе $I_d = 200$ А и скорости $v_{св} = 3,1$ мм/с обеспечивал гарантированный провар по всей длине соединения. Схемы

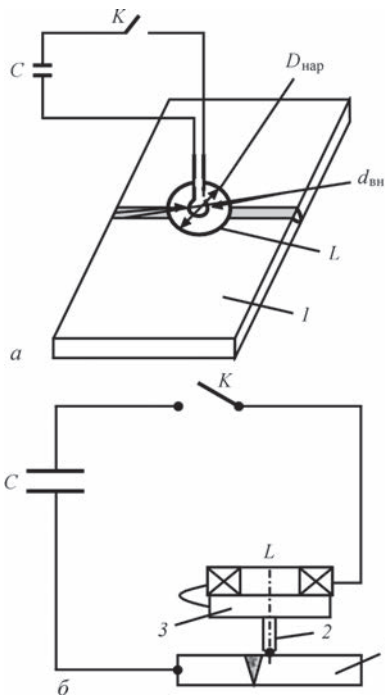


Рис. 1. Схемы разрядного контура: *a* — ОИЭМП [8]; *б* — ЭДО (описание см. в тексте)

выполнения ОИЭМП и ЭДО сварного соединения представлены на рис. 1.

ОИЭМП сварного шва выполняли по схеме, представленной на рис. 1, *a*. Индуктор L , выполненный в виде одновиткового плоского контура, перемещали вдоль продольной оси шва с шагом 15 мм после каждого разрядного цикла [8]. Наружный диаметр индуктора $D_{\text{нар}} = 45$ мм, внутренний $d_{\text{вн}} = 15$ мм. Индуктор жестко фиксировали на поверхности сварной пластины, что исключало его перемещения в течение разрядного цикла. Магнитное поле индуктора возбуждалось импульсом тока, сформированным при разряде емкостного накопителя на электрическую цепь, составленную из индуктивности контура и активного сопротивления проводников. Заряд емкостного накопителя C электрической емкостью 600 мкФ осуществлялся от источника постоянно напряжения с напряжением 3 кВ. Коммутация электрической цепи осуществлялась управляемым ключом K . При протекании электрического тока через плоский индуктор возбуждалось магнитное поле, которое, взаимодействуя с электропроводной пластиной, возбуждало вихревые токи. Взаимодействие магнитного поля и индуцированных им вихревых токов приводило к возникновению электродинамической силы, которая, будучи приложенной к поверхности, создавала так называемое магнитное давление. Максимальная амплитуда тока разряда $I_{\text{р}}^{\text{ОИЭМП}}$ и длительность его воздействия $t_{\text{р}}^{\text{ОИЭМП}}$, регистрируемые с использованием пояса Роговского [8], составляли соответственно 35 кА и 0,5 мс. Представленная выше

схема ОИЭМП обеспечивала импульсное электромагнитное давление $P^{\text{ОИЭМП}}$ на локальный участок сварного шва при одновременном протекании через эту зону электрического тока [9].

Воздействие $P^{\text{ОИЭМП}}$ инициировало в обрабатываемом металле локализованных полей деформаций растяжения, взаимодействие которых с пластическими сварочными деформациями сжатия способствовало снижению уровня остаточных напряжений. Воздействие электрического тока обеспечивало повышение пластических свойств металла и снижение его сопротивления деформированию.

ЭДО выполняли при пропускании импульсного тока через контактную площадку медного электрода 2, входящего в состав электродного устройства, с поверхностью сварного соединения 1 (рис. 1, *б*). В состав электродного устройства входили плоский многовитковый индуктор L диаметром $D_3 = 100$ мм и электрод 2, жестко связанный с диском 3 из неферромагнитного материала. Взаимодействие магнитного поля индуктора и индуцированных им вихревых токов в диске 3 приводит к возникновению электродинамической силы, которая через электрод 2 передает давление $P^{\text{ЭДО}}$ на контактную площадку одновременно с пропусканием через эту площадку импульсного тока. Коммутация электрической цепи, состоящей из емкости, индуктивности индуктора и активного сопротивления проводников осуществлялась управляемым ключом K . ЭДО проводили при значениях $U_3 = 500$ В и $C_3 = 6600$ мкФ, а $I_{\text{р}}^{\text{ЭДО}}$ и $t_{\text{р}}^{\text{ЭДО}}$ составляли соответственно 3,1 кА и 1,0 мс [10]. Воздействие ЭДО, как и в случае ОИЭМП, определяется суммированием двух воздействий, первым из которых является импульсное давление $P^{\text{ЭДО}}$, задаваемое прохождением ИЭТ через индуктор L , диск 3 и электрод 2, значение которого при $U_3 = 500$ В достигает 20 кН. Вторым является электрический ток определенной плотности, растекающийся от места контакта. Обработку сварного шва выполняли по схеме, подобной реализуемой при ОИЭМП: индуктор перемещали вдоль линии сплавления с шагом 5...7 мм после каждого ИЭТ. Механизм влияния $P^{\text{ЭДО}}$ на сварное соединение в целом подобен реализуемому при ОИЭМП.

Отличием ЭДО от ОИЭМП является то, что в первом случае к обрабатываемому металлу прикладывается нагрузка, сосредоточенная в зоне токоведущего торца электрода 2 (рис. 1, *б*), а во втором — распределенная по поверхности индуктора L , контактирующей с обрабатываемым металлом (рис. 1, *a*).

Для оценки влияния ОИЭМП и ЭДО на напряженное состояние сплава АМг6 без учета сварочных напряжений выполняли обработку пластин основного металла с размерами 360×500×4 мм. ОИЭМП

и ЭДО проводили в центре пластин единичными ИЭТ на режимах, используемых для обработки сварных соединений. В процессе обработки образцов выполняли оценку джоулевого разогрева [9], инициируемого прохождением ИЭТ и ИЭМП через обрабатываемый материал. В случае ОИЭМП для оценки изменения температуры, временного распределения плотности тока и напряженного состояния пластины без шва использовали численное моделирование методом конечных элементов.

При ЭДО изменение температуры джоулевого разогрева в зоне электродинамических воздействий регистрировали с использованием термопар [11].

Для ОИЭМП и ЭДО сварных пластин использовали специализированные сборочные приспособления, обеспечивающие позиционирование индуктора и гарантированный контакт электрода с обрабатываемой поверхностью. Напряженное состояние сварных пластин определяли с использованием метода электронной спекл-интерферометрии, основанном на измерении перемещений, возникающих при упругой разгрузке объема металла в исследуемых точках на поверхности образцов, вызванной сверлением несквозных отверстий [12].

Результаты экспериментов и их обсуждение.

Анализ результатов оценки изменения значений температуры поверхности пластин $T_{пов}$ под индукторами L (рис. 1, а) при ОИЭМП, а также в зоне контактного взаимодействия электрода 2 (рис. 1, б) в зоне ЭДО, показал практическое отсутствие влияния джоулевого разогрева на напряженное состояние образцов при описанных выше методах обработки. Так, пиковые значения $T_{пов}$ при ОИЭМП не превышали 25 °С [8], а при ЭДО — 30 °С [11], что не оказывает заметного влияния на напряженное состояние сплава АМгб [10].

Проводили оценку изменения во времени плотности ИЭТ — j в сварной пластине за период его действия t при ОИЭМП и ЭДО (рис. 2). Зависимость $j = f(t)$ при ОИЭМП определяли численным методом, реализуемым в конечно-элементной постановке. Распределение $j = f(t)$ при ОИЭМП, представленное на кривой 1 [8], имеет вид затухающей синусоиды, что характерно для разрядного контура с активным сопротивлением (роль которого выполняет сварной образец), в состав которого входят емкость C и индуктивность L . Значения j в течение всего периода разряда емкостного накопителя находятся в диапазоне 1...4 кА/мм². Это свидетельствует о том, что при ОИЭМП имеет место снижение сопротивления материала деформированию в результате электропластического эффекта (ЭПЭ) [9]. ЭПЭ определяется как специфическое действие ИЭТ при $j \geq 1$ кА/мм², инициирую-

щее изменения пластических свойств материала вследствие взаимодействия электронов проводимости с дефектами кристаллической решетки — дислокациями, что увеличивает их подвижность [13]. Это создает условия для развития неупругих деформаций (микродвигов) в области дефектов кристаллической структуры, приводящих на макроуровне к релаксации остаточных напряжений первого рода.

Распределение j при ЭДО регистрировали в фазе нарастания воздействия электрода на обрабатываемую поверхность пластины. Однополярный характер зависимости $j = f(t)$ при ЭДО (кривая 2), рассчитанный по методике, показанной в [11], задается конфигурацией разрядного контура и определяется совместным воздействием динамической нагрузки при индентировании электрода в обрабатываемый материал, а также прямым прохождением через него ИЭТ в период разрядного цикла. При этом, если при бесконтактной ОИЭМП, где давление $P_{ОИЭМП}$ осуществляется только электродинамическими силами и ИЭТ проходит через постоянное сечение пластины, при ЭДО имеет место текущее изменение площади контактного взаимодействия электрода с обрабатываемой поверхностью, прямо зависящее от изменения во времени $P^{ЭДО}$. Изменение площади электрического контакта электрода с пластиной определяется закономерностями упругопластического контактного взаимодействия системы «сфера-плоскость» при нулевом начальном зазоре [14]. Временные соотношения значений импульсного тока и площади контакта электрода, определяющие изменение j при ЭДО, представлены в работе [11]. На начальном этапе нарастания импульсного тока, соответствующем периоду времени $t = 0...0,1$ мс (кривая 2), площадь электрического контакта пары «электрод-металл» минимальна, что вызывает прирост значений j до 9,0 кА/мм². При увеличении площади контакта до максимального значения за время $t = 0,1...0,6$ мс, величина j монотонно понижается до 0,15 кА/мм².

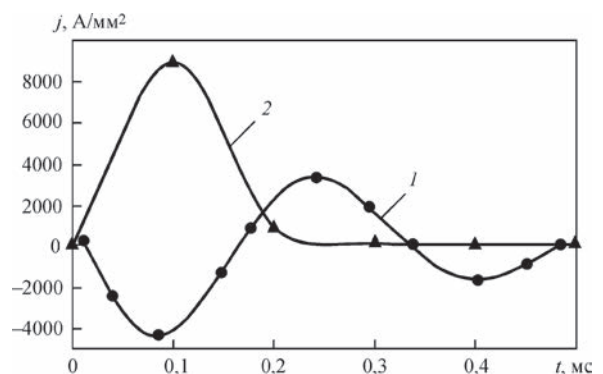


Рис. 2. Распределение плотности тока j в отожженной пластине сплава АМгб $\delta = 4$ мм после ОИЭМП [8] (кривая 1) и ЭДО (2)

Анализируя распределение $j = f(t)$ при ЭДО на кривой 2, можно заключить, что в начальной фазе индентирования электрода при $t = 0 \dots 0,2$ мс также имеет место ЭПЭ, влияние которого минимально в период $t = 0,2 \dots 0,5$ мс. Эффективность ЭДО, как сказано выше, определяется совместным воздействием токовой и динамической составляющих процесса. Так, динамическая нагрузка создает условия для прорыва барьеров дислокационными группировками, а прямое прохождение ИЭТ высокой плотности обеспечивает продвижение дислокаций направленным потоком электронов проводимости, что соответствует концепции электронно-дислокационного взаимодействия [9]. Подробно механизм воздействия на проводящие материалы при ЭДО изложен в работе [15].

При сопоставлении кривых 1 и 2 на рис. 2 можно видеть, что с учетом того факта, что влияние ЭПЭ на структуру и пластичность материала прямо зависит от величины j [9], вклад ЭПЭ в релаксацию напряжений при ЭДО более выражен, чем при ОИЭМП. Это связано с особенностями прохождения ИЭТ по разрядным контурам, используемым при двух видах обработки. Так, абсолютное значение плотности тока при ОИЭМП не превышает 4 кА/мм^2 , а при ЭДО достигает 9 кА/мм^2 . При этом для ОИЭМП характерны биполярные ИЭТ, а для ЭДО — однополярные, что влияет на эффективность электроимпульсных воздействий. Так, в работе [16] показано, что при одинаковом количестве электричества и амплитуде ИЭТ, пропускаемых через нагруженный образец, биполярные импульсы вызывают меньшую релаксацию (скачок) напряжений, чем однополярные. Это, по мнению авторов, вызвано тем, что последовательные ИЭТ различной полярности, инициируя движение дислокаций в противоположных направлениях, противодействуют друг другу, вследствие чего результирующая вектора Бюргера меньше, чем при однополярных ИЭТ.

Проводили сравнительную оценку распределений тангенциальных напряжений σ_θ после ОИЭМП и ЭДО на поверхности отожженных пластин из сплава АМг6 (рис. 3). Схема приложения воздействий ОИЭМП и ЭДО к пластине, а также расположение на образце сечения, в котором определяли σ_θ , представлена на рис. 3, а. Эпюра σ_θ после ОИЭМП [8] (рис. 3, б, кривая 1) имеет вид синусоиды с двумя зонами растяжения, уравновешенными зоной сжатия, расположенной между ними. Первая зона растяжения с максимальным значением $\sigma_\theta = 7 \text{ МПа}$ располагалась на участке $l = 0 \dots 8 \text{ мм}$ сечения пластины, расположенном под центром внутреннего отверстия индуктора. Вторая зона растягивающих напряжений с максимальным значением $\sigma_\theta = 18 \text{ МПа}$, располагалась на участке пластины $l = 24 \dots 45 \text{ мм}$

от центра индуктора. Зона сжимающих напряжений с максимальным значением $\sigma_\theta = -35 \text{ МПа}$, располагалась на участке $l = 8 \dots 24 \text{ мм}$ от центра отверстия. Максимальные воздействия приходились на участок сечения поверхности пластины, расположенный под образующей внутренней цилиндрической поверхности индуктора L диаметром $d_{\text{вн}}$. Анализируя распределение σ_θ на кривой 1, можно заключить, что ОИЭМП (при заданных параметрах процесса) стимулирует сжимающие напряжения, достигающие не более $0,25 \dots 0,3\sigma_{0,2}$ в сплаве АМг6.

Распределение напряжений после ЭДО [11] (рис. 3, б, кривая 2), характеризуется областью сжатия с максимальным значением до $\sigma_\theta = -160 \text{ МПа}$, локализованной в зоне контактного взаимодействия электрода 2 (рис. 1, б) с обрабатываемой поверхностью. Зона сжатия уравновешивается монотонно убывающим полем растягивающих напряжений с пиковым значением $\sigma_\theta = 60 \text{ МПа}$, расположенном на удалении от продольной оси электрода на 15 мм . Анализируя распределение σ_θ , показанное на кривой 2, можно заключить, что ЭДО стимулирует в сплаве АМг6 сжимающие напряжения, близкие к величине $\sigma_{0,2}$ для сплава АМг6. Распределение продольной (относительно оси шва) компоненты σ_x остаточных сварочных напряжений в центральном поперечном сечении пластин до, а также после ОИЭМП и ЭДО, представлено на рис. 4. Из рисунка видно, что до обработки максимальные значения σ_x близки к условному пределу текучести $\sigma_{0,2}$ сплава АМг6. Сопоставляя внешний вид эпюр σ_x до (кривая 1) [7, 8], а также после ОИЭМП (кривая 2) [8], и ЭДО (кривая 3) [7], можно видеть, что импульсные воздействия влияют на распределение напряжений в обрабатываемом сечении.

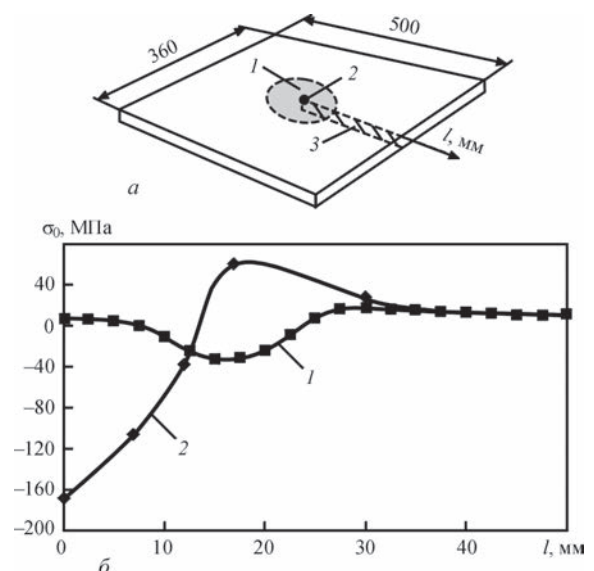


Рис. 3. Тангенциальные напряжения σ_θ в отожженной пластине сплава АМг6 $\delta = 4 \text{ мм}$ после ОИЭМП [8] и ЭДО [11]: а — исследуемая пластина (l — зона воздействия ОИЭМП; 2 — ЭДО; 3 — сечение, в котором определяли σ_θ); б — распределение σ_θ после ОИЭМП (кривая 1), после ЭДО (2)

Анализируя распределение σ_x , представленное на кривой 2, можно видеть, что область эффективного воздействия при ОИЭМП сопоставима с внутренним диаметром плоского индуктора, величина которого составляет 15 мм. Расположение индуктора задавали таким образом, чтобы наибольшая плотность силовых линий ИЭМП приходилась на металл шва, что определило максимальную эффективность обработки данного участка. Так, значение σ_x в зоне шва снизилось до 50 МПа, что составляет 35 % значений напряжений до ОИЭМП. При удалении от центра шва на 5 мм значения σ_x составляют 65 % начальных, а при удалении на 15 мм ОИЭМП практически не влияет на распределение σ_x . Из сопоставления кривых 1 и 2 на рис. 4 следует, что эффективность ОИЭМП на сварное соединение монотонно снижается к краям внутреннего диаметра индуктора. При этом, если принять площадь эпюры растяжения $S_{\sigma+}$ на кривой 1 (рис. 4) за 100 %, то в результате ОИЭМП (кривая 2) значение $S_{\sigma+}$ понижается на 23 %.

Анализируя распределение σ_x после ЭДО (кривая 3) видно, что влияние последней на снижение напряжений более выражено по сравнению с воздействием ОИЭМП. Эффективность воздействия при ЭДО определяется, очевидно, сосредоточенным характером ввода энергии в обрабатываемый металл (в отличие от распределенного воздействия при ОИЭМП) и соотношением величины $P^{\text{ЭДО}}$ и амплитуды импульсного тока. Так, после ЭДО имеет место снижение растягивающих σ_x в зоне воздействия (стрелка на рис. 4) со 120 до 5 МПа. Характер распределения σ_x после ЭДО связан с тем фактом, что в разрядном цикле электродинамическое воздействие инициирует в околошовной зоне волну деформации растяжения [15], взаимодействие которой с остаточными напряжениями шва вызывает локализованную пластическую деформацию, которая определяет характер распределения σ_x после обработки пластины. ЭДО стыкового сварного соединения сплава АМгб вызывает понижение значений остаточных сварочных напряжений в зоне обработки до близких к нулю. При этом значение $S_{\sigma+}$ в результате ЭДО (кривая 3) понижается на 76 %.

Проводили сравнительную оценку энергетических затрат, необходимых для снижения напряжений в результате однократного импульсного воздействия, реализуемого при двух описанных видах обработки. В качестве оценочной характеристики использовали

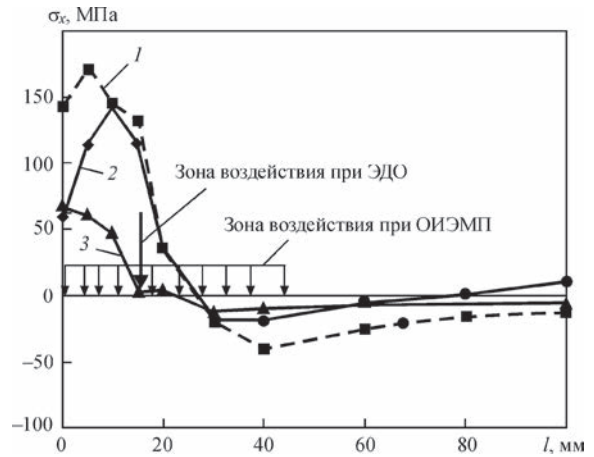


Рис. 4. Распределение остаточных сварочных напряжений σ_x в пластине сплава АМгб $\delta = 4$ мм без обработки (кривая 1), после ОИЭМП [8] (2) и ЭДО (3)

удельную запасенную энергию E_3 емкостного накопителя, затрачиваемую на снижение уровня напряженного состояния $\Delta\sigma$ на один МПа — $E_3/\Delta\sigma$. Значения $\Delta\sigma$ для ОИЭМП и ЭДО задавали, исходя из максимальной разности значений σ_x , зарегистрированных до обработки σ_0 и после $\sigma_{об}$ в зоне импульсного воздействия (рис. 4):

$$\Delta\sigma = \sigma_0 - \sigma_{об}, \text{ МПа.} \quad (1)$$

Расчет значений E_3 выполняли, используя выражение для запасенной энергии конденсатора [4]. Значения электрических и механических параметров для описываемых воздействий, используемых для оценки $E_3/\Delta\sigma$, представлены в таблице.

Анализируя данные таблицы, можно видеть, что значение запасенной энергии ЭДО, затрачиваемой на снижение остаточных сварочных напряжений в сплаве АМгб на один МПа, в четыре раза меньше аналогичного показателя при ОИЭМП. Это является существенным фактором при выборе вида обработки протяженных сварных соединений, где количество воздействий может исчисляться сотнями и тысячами.

Необходимо указать на технологические особенности применения ОИЭМП, что видно при сравнении значений U_3 для двух видов обработки. Это связано, прежде всего, с использованием высокого напряжения (свыше 1000 В) при ОИЭМП для электропитания индукторов, что приводит к возрастанию стоимости электротехнического оборудования, возможным нежелательным электрофизическим явлениям (пробой электрической изоляции, искровые процессы и пр.). При использовании ОИЭМП полагается, что индуктор явля-

Значения электрических и механических параметров ОИЭМП и ЭДО

Вид обработки	Емкость заряда C_3 , мкФ	Напряжение заряда U_3 , В	Ток разряда I_p , кА	Энергия заряда E_3 , Дж	Напряжение до обработки σ_0 , МПа	Напряжение после обработки $\sigma_{об}$, МПа	Снижение напряжения $\Delta\sigma$, МПа	Удельная энергия обработки $E_3/\Delta\sigma$, Дж/МПа
ОИЭМП	600	3000	35,0	2700	148	52	96	28,1
ЭДО	6600	500	3,0	825	130	5	125	6,6

ется расходным элементом комплекса оборудования. Учитывая в целом позитивные результаты по перераспределению сварочных напряжений после ОИЭМП, представленные на рис. 4, представляется целесообразным проведение исследований по оптимизации конструкции индуктора и режимов обработки, направленных на интенсификацию воздействия ОИЭМП на сварные соединения конструкционных материалов.

К недостаткам ЭДО следует отнести высокую степень локализации импульсного токового воздействия, что требует большего количества перестановок электрода вдоль линии шва по сравнению с ОИЭМП. Дальнейшие исследования по повышению эффективности ЭДО должны быть направлены как на расширение зоны влияния воздействия токового разряда, так и разработку технологических мероприятий по повышению вклада ЭПЭ в импульсное воздействие, направленное на регулирование напряженного состояния сварных соединений. При этом для двух видов обработки представляется актуальным повышение их энергетических характеристик, направленное на трансформацию растягивающих напряжений в сжимающие.

На основании проделанной работы можно заключить, что оба рассмотренных метода характеризуются значительным потенциалом для регулирования остаточного напряженно-деформированного состояния сварных соединений, что предполагает проведение дальнейших исследований по их совершенствованию.

Выводы

1. Проведена сравнительная оценка эффективности регулирования остаточных напряжений сварных пластин из сплава АМг6 при обработках импульсным электромагнитным полем (ОИЭМП) и импульсным током (ЭДО), выполненных с применением плоских индукторов.

2. Установлено, что ОИЭМП и ЭДО позволяют снижать начальный уровень сварочных напряжений в зоне импульсных воздействий соответственно на 65 и 100 %.

3. Установлено, что значение запасенной энергии ЭДО, затрачиваемой на снижение остаточных сварочных напряжений в сплаве АМг6 на один МПа, в четыре раза меньше аналогичного показателя при ОИЭМП.

4. Показано, что применение ОИЭМП, в отличие от ЭДО, связано с использованием высокого напряжения (свыше 1000 В) для электропитания индукторов, что приводит к возрастанию стоимости электротехнического оборудования, возможным нежелательным электрофизическим явлениям (пробой электрической изоляции, искровые процессы и пр.).

5. Показано, что ОИЭМП и ЭДО характеризуются значительным потенциалом для регулирования остаточного напряженно-деформированного состояния сварных соединений, что предполагает проведение дальнейших исследований по их совершенствованию.

1. Труфяков В. И. Усталость сварных соединений / В. И. Труфяков. – К.: Наукова думка, 1973. – 216 с.
2. Труфяков В. И. Влияние масштабного фактора и остаточных сварочных напряжений на скорость распространения усталостных трещин / В. И. Труфяков, П. П. Михеев, А. З. Кузменко // Проблемы прочности. – 1980. – № 6. – С. 20–22, 30.
3. Петушков В. Г. Обработка взрывом сварных соединений металлоконструкций / В. Г. Петушков, В. М. Кудинов, Ю. И. Фадеев. – М.: Металлургия, 1993. – 160 с.
4. Антонов Ю. А. Импульсный метод снятия остаточных напряжений / Ю. А. Антонов, Ю. И. Рагозин // Физика и химия обработки материалов. – 2001. – № 3. – С. 91–95.
5. Research on residual stress reduction by a low frequency alternating magnetic field / F. Tang, A. L. Lu, J. F. Mei [et al.]. // Journal of Materials Processing Technology. – 1998. – 74. – P. 255–258.
6. Степанов Г. В. Моделирование релаксации напряжений при действии импульсного электрического тока высокой плотности / Г. В. Степанов, А. И. Бабуцкий // Проблемы прочности. – 2007. – № 2. – С. 113–120.
7. Application of Local Current Pulses for Determination and Control of Residual Stresses / L. Lobanov, N. Paschin, V. Pivtorak [et al.]. // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 996. – P. 386–391.
8. Перераспределение остаточных сварочных напряжений в результате обработки импульсным электромагнитным полем / Г. В. Степанов, А. И. Бабуцкий, И. А. Мамеев [и др.] // Проблемы прочности. – 2011. – № 3. – С. 121–131.
9. Баранов Ю. В. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы / Ю. В. Баранов, О. А. Троицкий, Ю. С. Аврамов. – М.: МГИУ, 2001. – 844 с.
10. Эффективность электродинамической обработки алюминевого сплава АМг6 и его сварных соединений / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, А. В. Черкашин [и др.] // Автоматическая сварка. – 2012. – № 1. – С. 3–7.
11. Звіт про науково-дослідну роботу (Заклучний) по проекту Р 7.3.1 «Розробити технологію та обладнання для оперативного неруйнівного визначення залишкових напружень в зварних конструкціях на основі застосування локального імпульсу струму і електронної спекл-інтерферометрії». – УДК 658.562. – № держ. реєстрації 0113U003481. – К.: ІЕЗ ім. Є. О. Патона, грудень 2015 р.
12. Методика определения остаточных напряжений в сварных соединениях и элементах конструкций с использованием электронной спекл-интерферометрии / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, В. В. Савицкий [и др.] // Автоматическая сварка. – 2006. – № 1. – С. 10–13.
13. Кравченко В. Я. Воздействие направленного потока электронов на движущиеся дислокации // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1966. – Т. 51, Вып. 6(12). – С. 1677–1688.
14. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – М.: Мир, 1989. – 510 с.
15. Эффективность различных схем электродинамической обработки сплава АМг6 и его сварных соединений / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, О. Л. Миходуй [и др.] // Автоматическая сварка. – 2012. – № 12. – С. 29–35.
16. Троицкий О. А. Зависимость электропластического эффекта в цинке от длительности отдельных импульсов / О. А. Троицкий, П. У. Калымбетов // Физика металлов и металловедение. – 1981. – Т. 51, Вып. 5. – С. 1056–1059.

Поступила в редакцию 30.06.2016