

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЛИСТОВ ИЗ СПЛАВА АМг6

Л. М. ЛОБАНОВ, Н. А. ПАЩИН, О. Л. МИХОДУЙ, А. В. ЧЕРКАШИН

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Исследовано влияние параметров, определяющих различную длительность электродинамического воздействия, на снижение остаточных напряжений сварных соединений листов из алюминиевого сплава АМг6 после электродинамической обработки (ЭДО). Выявлено, что при возрастании длительности электродинамического воздействия вследствие увеличения индуктивности разрядного контура для ЭДО при постоянстве амплитудных значений импульсного электрического тока (ИЭТ) период затухания ИЭТ более продолжительный, нежели период нарастания. При этом повышается эффективность ЭДО. Установлено, что при длительности $t_{\Sigma} \geq 4,5$ ms снижение остаточных напряжений определяется как интенсивностью электродинамического влияния, так и локальной термообработкой вследствие джоулевого разогрева поверхности пластины.

Ключевые слова: *электродинамическая обработка, алюминиевый сплав, импульс электрического тока, остаточные сварочные напряжения, длительность электродинамического воздействия.*

Методы обработки металлических материалов [1] и сварных соединений [2] воздействием импульсных электромагнитных полей с начала 2000-х годов применяют для регулирования напряженного состояния элементов конструкций. К ним относится электродинамическая обработка (ЭДО), основанная на совместном воздействии на сварное соединение импульсного электрического тока и динамического давления, которое реализуется посредством контакта рабочего электрода с поверхностью металла в момент разряда емкостного накопителя энергии. В результате совместного влияния динамической нагрузки и импульсного электрического тока (ИЭТ) в обрабатываемом металле инициируются электроимпульсные процессы, связанные с электропластическим эффектом (ЭПЭ) [1], а также динамические, определяемые формированием в материале упругих волн деформаций, вследствие чего изменяется напряженное состояние сварных соединений. Изучено влияние на эффективность обработки зарядного напряжения и емкости накопителя, амплитудных значений импульсного тока и динамического давления [2]. При этом не исследовано воздействие длительности электродинамических процессов на эффективность ЭДО, хотя, согласно известным данным [3, 4], этот параметр, определяя механизм ЭДО, изменяет напряженное состояние конструкционных материалов. Поэтому цель настоящей работы – изучить влияние параметров, определяющих длительность электродинамического воздействия при ЭДО, на напряженное состояние сварных соединений из алюминиевого сплава АМг6.

Методика экспериментов. Исследовали образцы сварных стыковых соединений сплава АМг6 размерами 400×100×2 mm, выполненных автоматической сваркой TIG(Ar) при значениях напряжения дуги, сварочного тока и скорости

процесса соответственно $U = 20 \text{ V}$, $I = 170 \text{ A}$ и $V = 5,5 \text{ mm/s}$. Распределение продольной (относительно оси шва) компоненты остаточных сварочных напряжений σ_x до и после ЭДО регистрировали механическим тензомером с базой 15 mm .

ЭДО подвергали наружную поверхность и корень сварного шва образцов (рис. 1). Обрабатывали в условиях “жесткого закрепления”, для реализации которого поверхность пластины 2 предварительно фиксировали распределенной нагрузкой q на сборочной плите 3, исключая возможные угловые деформации образца. Такая схема обеспечивает максимальную эффективность электродинамического воздействия при прочих равных параметрах режима ЭДО [5]. Для реализации ЭДО на поверхность сварного шва устанавливали электродное устройство (ЭУ) 1 и обеспечивали его гарантированный электрический контакт при замыкании разрядного контура. Силовым ключом К инициировали разряд емкостного накопителя энергии С через ЭУ в обрабатываемый материал. Временные распределения импульсного тока регистрировали датчиком Холла 4, встроенным в разрядный контур. В процессе ЭДО ЭУ перемещали по обрабатываемой поверхности сварного шва с шагом $3 \dots 5 \text{ mm}$.

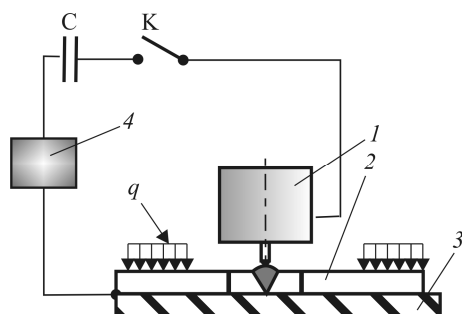


Рис. 1. ЭДО образцов сварных соединений при “жестком” закреплении: С – емкостный накопитель энергии; К – силовой ключ; q – фиксирующая нагрузка; 1 – электродное устройство; 2 – образец; 3 – сборочная плита; 4 – датчик Холла.

Fig. 1. Electrodynamic treatment (EDT) of specimens of welded joints at “rigid” fixture: С – energy storage capacitor; К – power switch; q – fixing load; 1 – electrode device; 2 – specimen; 3 – assembly plate; 4 – Hall (effect) transducer.

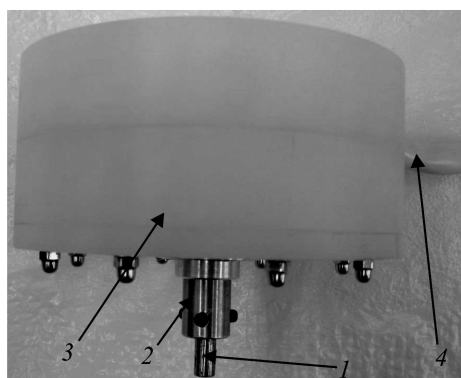


Рис. 2. Внешний вид ЭУ для ЭДО: 1 – электрод; 2 – цанга; 3 – корпус; 4 – силовой кабель.

Fig. 2. Appearance of electrode device (ED) for electrodynamic treatment (EDT): 1 – electrode; 2 – collet; 3 – framework; 4 – power cable.

Для генерирования электродинамических воздействий использовали источник импульсного электрического тока (ИИЭТ) с регулируемой индуктивностью L [6]. Ступенчатым регулированием величины L изменяли длительность ИЭТ (t), а следовательно, интенсивность электродинамических воздействий.

Чтобы реализовать электродинамическое влияние, использовали ЭУ (рис. 2). Его рабочим органом является электрод 1, торец которого в процессе ЭДО сопрягается с обрабатываемой поверхностью сварного соединения. Электрод закреплен в цанге 2, установленной в защитном корпусе 3, содержащем устройство, которое обеспечивает воздействие электроимпульсной и динамической составляющих ЭДО на сварное соединение. Силовым кабелем 4 подключали ЭУ к ИИЭТ.

Исследовали характер изменения продольной по отношению к шву компоненты σ_x напряженного состояния соединений при равных амплитудных значениях импульсного тока I и вариациях t . Равенство значений I при различной длительности воздействия t , задаваемой изменением L , обеспечивали нарастанием напряжений заряда U_{ch} . В качестве базового амплитудного значения импульсного тока выбирали $I = 1,0$ кА. Вследствие возрастания U_{ch} увеличилась запасенная энергия заряда E_{ch} .

Результаты и их обсуждение. Режимы ЭДО пластин при нарастании значений L и U_{ch} , обеспечивающих $I = 1,0$ кА при сопутствующем увеличении длительности воздействия t и запасенной энергии E_{ch} , приведены в табл. 1.

Временные распределения импульсного тока I равных амплитуд, соответствующих различной длительности воздействия t , иллюстрирует рис. 3. Установили (табл. 1 и рис. 4), что с увеличением параметра L длительность воздействия нарастает, при этом он больше влияет на период фронта затухания и

Таблица 1. Параметры ИЭТ

№ п/п	L , μН	U_{ch} , В	I , кА	t , ms			E_{ch} , J
				t_i	t_{Σ}	t_{Σ}/t_i	
1	5,3	185	1,0	0,25	0,7	2,8	94
2	20	388	1,0	0,5	1,75	3,5	413
3	71,5	726	1,0	1,0	4,5	4,5	1449

общую продолжительность t_{Σ} ИЭТ, нежели на период фронта нарастания t_i . При увеличении значений L и E_{ch} соответственно в 13 и 4 раза периоды t_i и t_{Σ} возрастает соответственно в четыре и семь раз. Это определяет большую долю энергии E_{ch} , приходящуюся на фазу затухания ИЭТ, от которой зависит площадь под убывающей ветвью кривой $I = f(t)$ (рис. 4). Увеличение значений t_{Σ}/t_i (табл. 1) в большей степени определяет фаза затухания кривых, нежели фронт их нарастания (кривые 2 и 3). В то же время, согласно [4], доминирующий вклад динамического воздействия в регулирование напряженно-деформированного состояния металлических материалов приходится на фазу его нарастания.

Установили (кривая 0 на рис. 4), что начальные растягивающие остаточные сварочные напряжения $\sigma_x(0)$ по оси шва до ЭДО достигли 95 МПа, что связано с малой шириной и соответственно низкой жесткостью используемых пластин. После ЭДО по режиму, соответствующему минимальной индуктивности (режим 1; табл. 1), они снижаются до 20 МПа ($\Delta\sigma = 75$ МПа), достигая максимума 45 МПа на расстоянии 10 мм от оси шва (кривая 1). При увеличении L (режим 2) они снижаются до нулевых значений ($\Delta\sigma = 95$ МПа), при этом максимум 40 МПа находится на расстоянии 7 мм от оси шва. При дальнейшем увеличении L (режим 3) напряжения переходят в область сжатия: $\sigma_x(0) = -15$ МПа ($\Delta\sigma = 110$ МПа), а максимум $\sigma_x = 45$ МПа находится уже на расстоянии 15 мм от оси шва. При этом заметно снижается максимум сжимающих напряжений по сравнению с исходным состоянием и ЭДО по режимам 1 и 2. Таким образом, с увеличением значений L и t эффективность ЭДО усиливается, что проявляется в возрастании $\Delta\sigma$.

Следует отметить, что рост $\Delta\sigma$ обеспечивается немонотонным нарастанием энергии E_{ch} , необходимой для достижения $I = 1$ кА при наибольших значениях L и t . Кроме того, при ЭДО, соответствующей максимальному значению t_{Σ} (режим 3 в табл. 1), зафиксировали локальное плавление металла в зоне контактного взаимодействия электрода с обрабатываемой поверхностью пластины, вызванное джоулевым разогревом [1]. Таким образом, при ЭДО длительностью $t_{\Sigma} \geq 4,5$ ms снижение остаточных сварочных напряжений определяется не только интенсивностью электродинамического воздействия, но и локальной термообработкой вследствие джоулевого разогрева поверхности пластины.

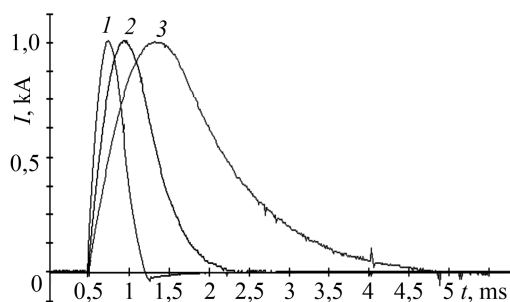


Рис. 3. Fig. 3.

Рис. 3. Временные зависимости импульсного тока I равной амплитуды (номер кривых соответствует номеру строк в табл. 1).

Fig. 3. Time dependences of pulse current I of equal amplitude (number of curves correspond to number of rows of Table 1).

Рис. 4. Распределение остаточных напряжений σ_x в сварных соединениях до (кривая 0) и после (кривые 1–3) ЭДО шва по режимам, приведенным в табл. 1.

Fig. 4. Distribution of residual stresses σ_x in welded joints before (curve 0) and after (curves 1–3) EDT of a weld using conditions of Table 1.

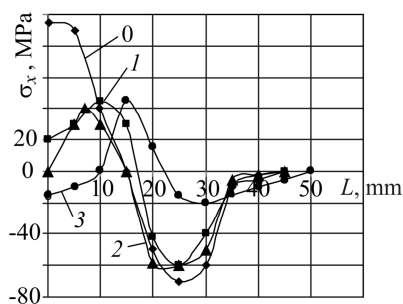


Рис. 4. Fig. 4.

Таблица 2. Эффективность ЭДО в зависимости от ее параметров

№ п/п	L/t_{Σ} , $\mu\text{H/ms}$	V_i , kA/ms	$\sigma_x(0)$, MPa	$\Delta\sigma$, MPa	$E_{ch}/\Delta\sigma$, J/MPa
1	5,3 / 2,8	4,0	95	75	1,4
2	20 / 3,5	2,0	95	95	4,4
3	71,5 / 4,5	1,0	95	110	13,2

Выявили (табл. 2), что с увеличением отношения L/t_{Σ} значение $\Delta\sigma$ возрастает с 75 до 110 МПа. В то же время удельная энергия $E_{ch}/\Delta\sigma$, затрачиваемая на снижение напряжений на 1 МПа, свидетельствует о большей энергоэффективности ЭДО при минимальной длительности t в исследуемом диапазоне. Сравнение значений $E_{ch}/\Delta\sigma$ при различных значениях общей длительности воздействия t_{Σ} и скорости его нарастания V_i указывает на то, что для снижения напряжений $\sigma_x(0)$ на 1 МПа при $L = 5,3 \mu\text{H}$ ($V_i = 4,0 \text{ kA/ms}$) требуется 1,4 J, а при более длительном ИЭТ, соответствующем $L = 71,5 \mu\text{H}$ ($V_i = 1,0 \text{ kA/ms}$), удельная энергия возрастает на порядок. Следовательно, фаза нарастания ИЭТ имеет определяющее влияние на энергоэффективность ЭДО, что соответствует данным работы [4].

Рассматривая полученные результаты с позиций теории электрон-дислокационного взаимодействия [1, 3], можно сделать вывод, что период нарастания t_i ИЭТ, определяющий величину V_i и связанный с ней срыв дислокационных группировок со стопоров, является доминантным в реализации ЭПЭ по сравнению с общей длительностью t_{Σ} ИЭТ, обеспечивающей дрейф дислокаций при их взаимодействии с электронами проводимости. Это представляется достаточно логичным, так как более слабое синхронизирующее воздействие, задаваемое параметром V_i , способно обеспечить срыв меньшего количества дислокаций, вступающих во взаимодействие с электронами проводимости, что понижает возможности реализации ЭПЭ и, как следствие, уменьшает величину $\Delta\sigma$.

ВЫВОДЫ

Установлено, что в результате увеличения длительности электродинамического воздействия, достигаемого повышением индуктивности разрядного контура

для электродинамической обработки (ЭДО) при постоянстве амплитудных значений импульсного электрического тока (ИЭТ), период затухания ИЭТ по сравнению с периодом его нарастания становится более длительным. Рост его длительности, сопровождаемый уменьшением скорости нарастания электродинамического воздействия, обуславливает повышение эффективности ЭДО для уменьшения и перераспределения остаточных напряжений в сварных соединениях листов из сплава АМгб. Отмечено, что при ЭДО продолжительностью $t_{\Sigma} \geq 4,5$ ms снижение напряжений определяется не только интенсивностью электродинамического воздействия, но и локальной термообработкой вследствие джоулевого разогрева поверхности пластины. Установлено, что при увеличении длительности воздействия в 1,5 раза удельная запасенная энергия заряда, затрачиваемая на снижение остаточных напряжений на 1 МПа, возрастает на порядок.

РЕЗЮМЕ. Досліджено вплив параметрів, що визначають різну тривалість електродинамічної дії, на зниження залишкових напружень зварних з'єднань листів з алюмінієвого сплаву Амгб після електродинамічної обробки (ЕДО). Виявлено, що за зростання тривалості електродинамічної дії через збільшення індуктивності розрядного контуру для ЕДО за сталих амплітудних значень імпульсного електричного струму (ІЕС) період загасання ІЕС триваліший проти періоду наростання. При цьому підвищується ефективність ЕДО. Встановлено, що за тривалості $t_{\Sigma} \geq 4,5$ ms зниження залишкових напружень залежить від інтенсивності електродинамічної дії і локальної термообробки внаслідок джоулевого розігріву поверхні пластины.

SUMMARY. The effect of parameters determining different duration of an electrodynamic effect on reduction of the level of residual stresses of welded joints of aluminium alloy AMg5 after electrodynamic treatment (EDT) is investigated. The results of investigations showed that an increased duration of the electrodynamic effect, due to increase in inductance of the discharge contour for EDT at constant amplitude values of pulsed electric current (PEC) is characterized by a longer period of PEC damping as compared with the period of its increment. In this case the increase in duration of the electrodynamic effect leads to the increase of the EDT efficiency because of the reduction of the residual stresses level of AMg6 alloy welded joints. It was noted that at EDT of duration $t_{\Sigma} \geq 4.5$ ms the decrease in residual stresses is determined not only by the intensity of electrodynamic effect but also by local heat treatment due to Joule heating of the surface plate.

1. *Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы* / Ю. В. Баранов, О. А. Троицкий, Ю. С. Аврамов, А. Д. Шляпин. – М.: Моск. гос. индустр. ун-т, 2001. – 844 с.
2. *Эффективность электродинамической обработки алюминиевого сплава АМгб и его сварных соединений* / Л. М. Лобанов, И. П. Кондратенко, Н. А. Пашин, А. В. Черкашин, О. Л. Миходуй // Автомат. сварка. – 2012. – № 1. – С. 3–7.
3. *Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Воробьев Е. В.* Прочность материалов при криогенных температурах с учетом воздействия электромагнитных полей. – К.: Ин-т проблем прочности, 2008. – 504 с.
4. *Белова М. М., Проценко С. С., Иванов А. В.* Динамика деформирования упругопластического слоя при импульсном энерговыделении // Проблемы прочности. – 1987. – № 12. – С. 87–91.
5. *Влияние электродинамической обработки на сопротивление разрушению алюминиевого сплава АМгб при циклическом нагружении* / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. А. Ящук, О. Л. Миходуй // Проблемы прочности. – 2015. – № 3. – С. 91–98.
6. *Звіт про науково-дослідну роботу “Розробка електродної системи і джерела живлення для неруйнівного визначення залишкових напружень методом електронної спеклі-інтерферометрії” за договором № Р 7.7.2-2010, ІЕЗ НАН України, № держреєстрації 0110U003669.*

Получено 29.06.2016