



# ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СПЛАВА АМГ6 РАЗЛИЧНОЙ ТОЛЩИНЫ

Академик НАН Украины Л. М. ЛОБАНОВ, Н. А. ПАЩИН, О. Л. МИХОДУЙ, кандидаты техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Показано влияние конструктивных особенностей крепления образцов сплава АМГ6 и его сварных соединений в захватах испытательной машины на снижение сопротивления деформированию при электродинамической обработке. Установлено, что с увеличением толщины обрабатываемого металла эффективность электродинамических воздействий снижается.

*Ключевые слова:* сварные соединения, алюминиевый сплав, электродинамическая обработка, начальные напряжения, разряд тока, зарядное напряжение, система крепления образца, эффективность обработки, снижение сопротивления деформированию

Методы обработки металлических материалов воздействием импульсных электромагнитных полей находят все более широкое применение при регулировании напряженного состояния элементов сварных конструкций [1, 2]. Одним из методов импульсного воздействия электрическим током на металлы и сплавы является электродинамическая обработка (ЭДО). Проводили исследования механизмов влияния ЭДО на напряженное состояние алюминиевых сплавов [3], конструкционных сталей [4, 5], а также сварных соединений из этих материалов. При этом результаты, представленные в работах [1, 3–5], получены с помощью разработанной экспериментальной методики, основанной на растяжении плоских образцов, их обработке разрядами тока с текущим контролем изменения усилия растяжения, которое принимали за оценочную характеристику ЭДО. Вместе с тем известно [6], что условия закрепления исследуемых образцов в захватах испытательной машины в значительно большей степени влияют на сопротивление металлических материалов деформированию при динамических нагрузках, чем при статических. Это же относится к деформационным процессам, инициируемым в металлах и сплавах прохождением разрядов электрического тока [7].

Таким образом, очевидно, что при оценке эффективности процесса ЭДО следует учитывать конструктивную схему крепления обрабатываемых образцов. Кроме того, на основании анализа фрактограмм изломов сплава АМГ6 предполагают, что эффективность электродинамического воздействия снижается с увеличением толщины

обрабатываемого металла [8]. Количественная оценка эффективности ЭДО в зависимости от толщины обрабатываемого материала позволяет выделить диапазон значений энергетических параметров электродинамического воздействия, определяющий применимость данного метода обработки в инженерной практике.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния толщины образцов сварных соединений алюминиевого сплава АМГ6, а также конструктивных особенностей их крепления в испытательной машине на эффективность электродинамических воздействий.

Для оценки влияния ЭДО на снижение уровня начальных напряжений в материале ее выполняли на предварительно растянутых плоских образцах сплава АМГ6 прямоугольного сечения с размерами рабочей части и головки соответственно 150×30 и 120×40 мм толщиной от 2,5 до 10 мм. Для генерирования импульсного тока использовали установку, описанную в работе [5], а ЭДО выполняли посредством контакта медного электрода с поверхностью металла на рабочей части образца, как показано в работе [3].

Растяжение образцов выполняли на разрывной машине 2 класса ЦДМ-10 с максимальной нагрузкой при растяжении 98000 Н, скоростью деформации 0,1 мм/с и температуре 293 К. Машина укомплектована механическим приводом растяжения, ручной системой точной регулировки нагрузки, маятниковым силоизмерителем и относится к устройствам с замкнутым силовым контуром. Выбор данного типа машины исключает возможность неконтролируемого деформирования и разрушения образца при динамическом нагружении, что в ряде случаев имеет место при использовании силовых устройств с автоматическим поддержанием скорости деформации [7].

ЭДО проводили сериями по пять-шесть импульсов при зарядном напряжении  $U = 500$  В и



емкости конденсаторной батареи  $C = 6600$  мкФ, что соответствовало энергии накопленного заряда 800 Дж. Выполняли обработку образцов основного металла и стыковых сварных соединений сплава АМг6, предварительно нагруженных до значений начальных напряжений  $\sigma_0$  от 50 до 140 МПа.

Исследования влияния конструктивных особенностей крепления образцов в захватах машины на снижение значений  $\sigma_0$  при ЭДО проводили на основе сравнения двух вариантов конструкции узла крепления головок образцов (рис. 1). В первом варианте крепление осуществляли клиновыми захватами, губки которых сопрягались с площадью контактной поверхности головок образца (рис. 1, а). Во втором образцы крепили цилиндрическими штифтами, соединенными П-образными скобами траверса машины (рис. 1, б). Поперечные сечения рабочей площадки и головок исследуемых образцов соответствовали требованиям ГОСТ 1497–84.

Сравнительную оценку проводили при ЭДО образцов толщиной 5 мм, растянутых до значения  $\sigma_0 = 50$  МПа. Обработку образцов выполняли серией из пяти импульсов тока. Изменения значений напряжений при ЭДО для двух вариантов крепления образцов представлены на рис. 2, из которого видно, что фиксация образца через штифт (кривая 2) характеризуется более интенсивным снижением значений напряжений по сравнению с креплением клиновыми захватами (кривая 1). При этом разность значений напряжений на кривых 1 и 2 после пяти импульсов тока составила 40...50 %, что связано с различием конструктивных особенностей крепления образцов. При креплении образца через штифт в момент электродинамического воздействия имеют место условия взаимодействия, определяемые как контакт пары штифт–отверстие [9] по поверхности их сопряжения. Площадь контакта соответствовала отпечатку штифта на сопрягаемой с ним поверхности отверстия головки образца после одиночного электродинамического воздействия и была равна 5 мм<sup>2</sup>. При креплении клиновыми захватами взаимодействие головки образца с двумя губками захвата траверсы проходит по линиям сопряжения общей длиной 80 мм (ширина головки образца 40 мм), что определяет площадь контактного взаимодействия 200 мм<sup>2</sup>.

Для оценки динамической нагрузки, воздействующей на образец в зоне крепления, исследовали распределение продольных волн напряжений, инициируемых электродинамическим воздействием, вызванным ЭДО. При этом использовали плоский образец прямоугольного сечения

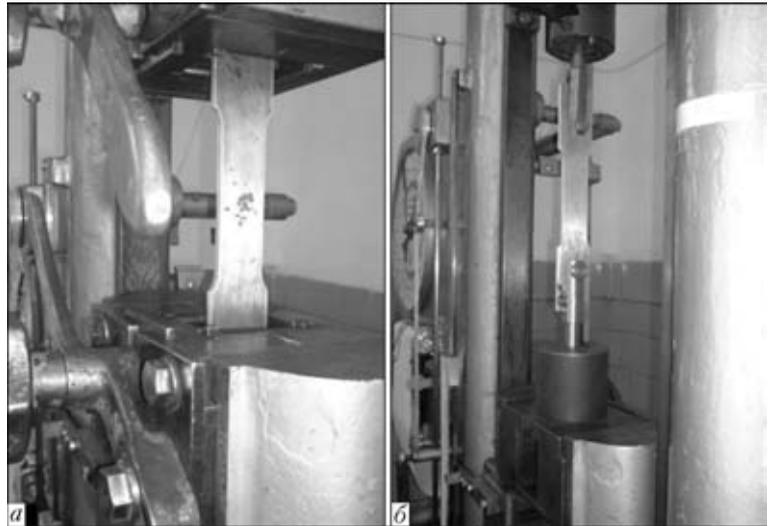


Рис. 1. Внешний вид узлов крепления образцов в машине ЦДМ-10 клиновыми захватами (а) и штифтом через П-образные скобы (б)

из сплава АМг6, растянутый до значений начальных напряжений, соответствующих 50 МПа. На лицевой и обратной поверхностях рабочей части образца вдоль центральной продольной оси располагали два тензорезистора ( $r = 200$  Ом) с базой 10 мм. Датчики располагали на расстоянии 70 мм от центра образца, поверхность которого обрабатывали одиночным разрядом тока на режиме, соответствующем зарядному напряжению 500 В. Запись показаний датчиков проводили двухканальным цифровым осциллографом PCS Welleman при развертке 0,5 мс.

При расчете динамических напряжений динамический модуль упругости  $E_d$  для сплавов алюминия принимали равным статическому  $E = 70000$  МПа [10]. Усредненные по толщине металла амплитудные значения волны напряжений представлены на рис. 3. Из рисунка видно, что размах амплитуды составляет 178 МПа, из которых на растягивающие напряжения приходится 108 МПа. При этом остаточной пластической де-

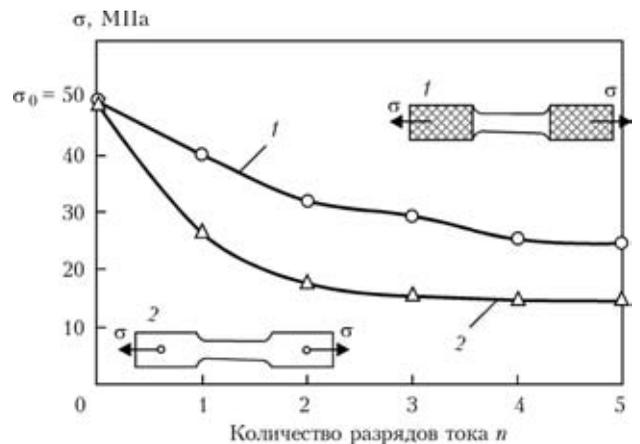


Рис. 2. Влияние конструктивных особенностей крепления образцов сплава АМг6 на снижение напряжений  $\sigma$  при ЭДО: 1 — крепление клиновыми захватами; 2 — то же, но П-образными скобами

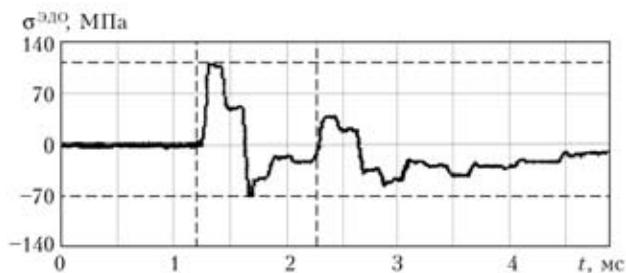


Рис. 3. Волна динамических напряжений  $\sigma^{ЭДО}$  в образце сплава АМгб при одиночном электродинамическом воздействии с энергией заряда 800 Дж

формации в зоне измерения тензодатчиков зарегистрировано не было. Данный факт подтверждают работы [3, 11], где указывается на то, что область пластического деформирования при ЭДО локализована в зоне энерговыделения электродинамического воздействия.

Исходя из экспериментально полученных максимальных значений напряжения волны нагрузки, представленных на рис. 3, проведена приближенная оценка напряженного состояния металла образцов в местах их крепления на траверсах испытательной машины. В соответствии с работой [6] следует учитывать корреляцию условного предела текучести при динамических нагрузках  $\sigma_{0,2}^д$ , значение которого определяется соотношением [10]

$$\sigma_{0,2}^д = \chi \sigma_{0,2}^с,$$

где  $\sigma_{0,2}^с$  — условный предел текучести при статическом растяжении, МПа;  $\chi$  — коэффициент динамичности.

Согласно работе [10] для сплавов алюминия значение  $\chi$  принимали равным 2, а значение  $\sigma_{0,2}^с$  сплава АМгб, полученное по результатам испытаний металла в исходном состоянии, составляло 140 МПа. С учетом  $\chi$  значение динамического предела текучести  $\sigma_{0,2}^д$  составляло 280 МПа.

При креплении клиновыми захватами значения динамических напряжений растяжения составляют 81 МПа. При сложении динамических напряжений с начальными напряжениями образца

**Режимы автоматической сварки пластин из сплава АМгб различной толщины, используемых для ЭДО ( $U_d = 18$  В)**

№ пластины	$\delta$ , мм	$I$ , А	$v_{св}$ , мм/с
1	2,5	170	5,55
2	4,0	200	3,33
3	5,0	250	3,33
4	10,0	480	2,50

$\sigma_0 = 50$  МПа их суммарное значение не превышает 131 МПа, что значительно ниже  $\sigma_{0,2}^д$ .

При штифтовом креплении значения динамических напряжений составляют 324 МПа, что при сложении с начальными напряжениями дает 374 МПа, что превышает  $\sigma_{0,2}^д$ . Согласно проведенной оценке при использовании штифтовой системы крепления в зоне отверстия развивается местная текучесть, приводящая к его деформированию. Это накладывает определенные ограничения на применимость штифтовых креплений при разработке экспериментальных методик исследования влияния динамических и импульсных нагрузок на напряженное состояние конструкционных материалов.

Проведены исследования влияния толщины металла на эффективность ЭДО при обработке образцов сплава АМгб и его сварных соединений с шириной рабочей части 30 мм. При этом толщину образцов основного металла задавали 2,5 и 10 мм, а сварных соединений — 2,5; 4,0; 5,0 и 10,0 мм. Последние получали с помощью вырезки из пластин размерами 400×400 мм, сваренных сваркой ТИГ с присадкой на установке АСТВ-2М. Режимы сварки образцов сплава АМгб приведены в таблице.

Следует отметить, что площадь сечения на участке усиления шва при увеличении толщины свариваемого металла может меняться, что связано с технологией сварки. Это может негативно влиять на достоверность результатов при сопоставлении значений эффективности ЭДО образцов различной толщины, обработанных при равных энергетических параметрах электродинамического воздействия. Для повышения точности результатов измерений усиление на образцах было удалено с помощью механической обработки до толщины основного металла.

Перед обработкой образцы подвергали статическому растяжению до значения начального напряжения  $\sigma_0 = 140$  МПа, что соответствует максимальному значению продольной составляющей остаточных сварочных напряжений в сплаве АМгб.

Обработку поверхности центральной части образцов выполняли серией из шести импульсов ( $n = 6$ ) при параметрах электродинамического воздействия, соответствующих энергии накопленного заряда 800 Дж. После каждого импульса регистрировали снижение уровня начальных напряжений  $\Delta\sigma$ . Оценочной характеристикой влияния толщины обрабатываемого металла на эффективность ЭДО являлась относительная эффективность  $\frac{\Delta\sigma}{\sigma_0} \cdot 100$  %.

Зависимость влияния толщины обрабатываемого металла на эффективность ЭДО представ-



лена на рис. 4, а, из которого видно, что максимальные значения  $\frac{\Delta\sigma}{\sigma_0} \cdot 100\%$  достигаются

после первого импульса тока во всем диапазоне исследуемых толщин ( $n = 1$ ). При сравнении показателей эффективности ЭДО основного металла и сварных соединений для минимальных толщин 2,5 мм (рис. 4, а, кривые 1' и 1) и максимальных 10 мм (рис. 4, а, кривые 4' и 4) можно видеть, что значения  $\frac{\Delta\sigma}{\sigma_0} \cdot 100\%$  для основного металла на

10...12 % ниже, чем для сварных соединений. Это связано с наличием остаточных напряжений в образцах сварных соединений. В ряде работ, например [3, 7], показано, что наблюдается прямая зависимость эффективности электродинамических воздействий от значения упругих растягивающих напряжений, приложенных к образцу в процессе ЭДО.

При сравнении параметров эффективности электродинамического воздействия при ЭДО сварных соединений толщиной 2,5 и 4 мм (рис. 4, а, кривые 1, 2) значения  $\frac{\Delta\sigma}{\sigma_0} \cdot 100\%$  различаются

на 2...5 % в течение всего цикла обработки. Максимальные показатели эффективности ЭДО при увеличении толщины образцов от 4 до 10 мм (кривые 2-4) соответственно понижаются с 25 до 15 %, т. е. в целом значения  $\frac{\Delta\sigma}{\sigma_0} \cdot 100\%$  снижаются

при увеличении толщины металла. Как видно из рис. 4, а, значения эффективности ЭДО с энергией заряда 800 Дж близки к максимальным в диапазоне толщин 2,5...4 мм.

Проведена оценка снижения сопротивления металла деформированию при ЭДО образцов сварных соединений сплава АМгб толщиной от 2,5 до 10 мм после первого ( $n = 1$ ) и завершающего ( $n = 6$ ) импульсов тока (рис. 4, б, кривые 5, 6). Если принять максимальное значение  $\frac{\Delta\sigma}{\sigma_0} \cdot 100\%$  при  $n = 6$  для каждого из исследуемых сечений за 100 %, то при сравнении кривых 5 и 6 на участках, соответствующих толщинам 2,5 и 4 мм, видно, что влияние первого импульса тока (кривая 5) на эффективность ЭДО составляет 60 %.

Аналогичные показатели влияния первого импульса тока для толщин 5 и 10 мм были соответственно 0,5 и 0,35. Проанализировав данные рис. 4, можно заключить, что в диапазоне толщин 2,5...4 мм имеет место повышение значений эффективности ЭДО при сравнении с образцами толщиной 5...10 мм. При этом показатели эффективности для толщин 2,5 и 4 мм достаточно близ-

ки. Это свидетельствует о том, что процессы деформирования металла в результате электродинамического воздействия для толщин 2,5...4 мм и 5...10 мм отличаются. Можно предположить, что линейный характер снижения значений  $\frac{\Delta\sigma}{\sigma_0} \cdot 100\%$  с увеличением толщины от 5 до 10 мм

связан с упругопластическим деформированием металла при обработке. При этом с увеличением толщины образцов доля пластической составляющей деформации понижается при сопутствующем возрастании упругой. Деформирование образцов толщиной 2,5...4 мм происходит в условиях, когда металл практически исчерпал упругие свойства и близок к пластическому течению, что подтверждается пологими участками кривых 5 и 6.

Для подтверждения отмеченного выше предположения о различии процессов деформирования сварных соединений сплава АМгб в диапазонах толщин 2,5...4 и 5...10 мм выполнена приближенная оценка удельной динамической нагрузки, соответствующей запасенной энергии заряда 800 Дж. По результатам испытаний на продольное растяжение установлено, что значение статического предела текучести  $\sigma_{0,2}^c$  для сварных соединений сплава АМгб толщиной 2,5...10 мм в исходном состоянии составляет 130 МПа. С уче-

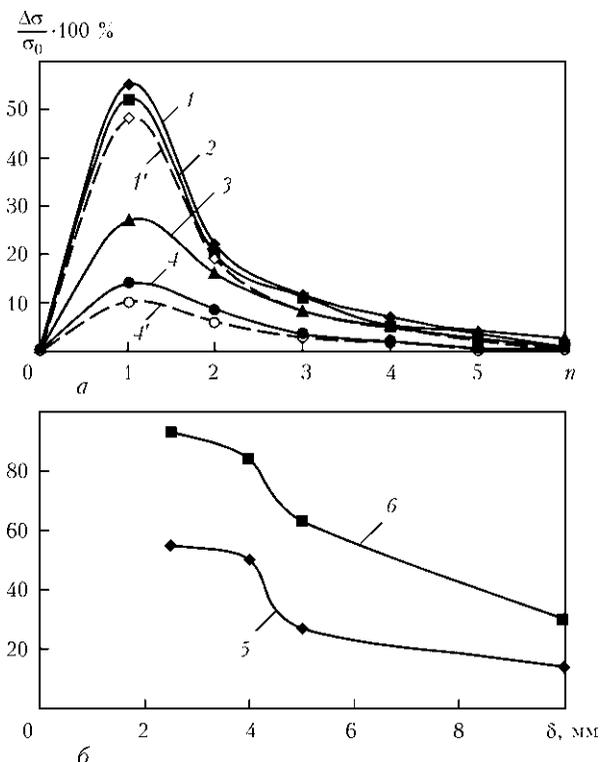


Рис. 4. Зависимость эффективности ЭДО от количества разрядов тока  $n$  образцов основного металла (ОМ) и сварных соединений (СС) сплава АМгб (а) и от толщины образцов (б): 1, 1' —  $\delta = 2,5$  мм для ОМ и СС; 2 — 4 мм для СС и ОМ; 3 — 5 мм для СС; 4, 4' — 10 мм для СС и ОМ; 5 —  $n = 1$ ; 6 — 6



том принятого на основании работы [10] значения коэффициента динамичности  $\chi = 2$  значение динамического предела текучести  $\sigma_{0,2}^d$  составило 260 МПа. В работе [12] проведена экспериментальная оценка динамической нагрузки, соответствующей накопленной энергии заряда 800 Дж, значение которой составило 20461 Н, а период нарастания до максимального значения — 0,0013 с. Значение динамических напряжений  $\sigma_{\text{ЭДО}}$  при толщине образцов 2,5 мм равно 273 МПа, что превышает  $\sigma_{0,2}^d$ . При толщине 4 мм имеет место соотношение  $\sigma_{\text{ЭДО}} = 0,75\sigma_{0,2}^d$ , что свидетельствует о близости максимальных значений динамических напряжений к динамическому пределу текучести. Полученные соотношения  $\sigma_{\text{ЭДО}}$  и  $\sigma_{0,2}^d$  определяют пологий характер кривых 5 и 6 на рис. 4, б в диапазоне толщин 2,5...4 мм. При обработке образцов толщиной 5 и 10 мм электродинамическое воздействие находится в области упругих динамических нагрузок, что соответствует монотонному участку кривых 5 и 6 на рис. 4, б, а эффективность ЭДО определяется областью пластического деформирования в зоне энергосвободного выделения импульса тока [3, 11].

### Выводы

1. Установлено, что при штифтовом креплении головок образцов из сплава АМг6 в испытательной машине зарегистрированы пониженные на 50 % значения напряжений растяжения при электродинамических воздействиях по сравнению с креплением клиновыми захватами.

2. Показано, что значения эффективности ЭДО сварных соединений сплава АМг6 понижаются с увеличением толщины обрабатываемого металла.

1. *Исследование влияния импульсной обработки на повышение ресурса металлических конструкций* / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. П. Логинов и др. // Автомат. сварка. — 2005. — № 11. — С. 28–32.
2. *Перераспределение остаточных сварочных напряжений в результате обработки импульсным электромагнитным полем* / Г. В. Степанов, А. И. Бабуцкий, И. А. Мамеев и др. // Пробл. прочности. — 2011. — № 3. — С. 123–131.
3. *Лобанов Л. М., Пашин Н. А., Логинов В. П.* Влияние электродинамической обработки на напряженное состояние сварных соединений алюминиевого сплава АМг6 // Автомат. сварка. — 2007. — № 6. — С. 11–13.
4. *Влияние электродинамической обработки на напряженное состояние сварных соединений стали Ст3* / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. П. Логинов и др. // Там же. — 2007. — № 7. — С. 10–12.
5. *Влияние электродинамической обработки на напряженно-деформированное состояние теплоустойчивых сталей* / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. П. Логинов, В. М. Скульский // Там же. — 2006. — № 5. — С. 28–32.
6. *Белл Дж. Ф.* Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. — Ч. 2. Конечные деформации. — М.: Наука, 1984. — 432 с.
7. *Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Воробьев Е. В.* Прочность материалов при криогенных температурах с учетом воздействия электромагнитных полей. — Киев: Ин-т пробл. прочности им. Г. С. Писаренко НАНУ, 2008. — 504 с.
8. *Лобанов Л. М., Пашин Н. А., Логинов В. П.* Особенности структурообразования алюминиевых сплавов АМг5, АМг6 под воздействием импульсов электрического тока // Вісн. Укр. матеріалозн. тов-ва. — 2010. — № 3. — С. 33–42.
9. *Гудченко В. М., Лютцау В. Г.* Структурные изменения поверхностных слоев стали ШХ-15 в условиях пульсирующего контактного нагружения // Высокоскоростная деформация. — М.: Наука, 1971. — С. 92–95.
10. *Ионов В. Н., Огибалов П. М.* Напряжения в телах при импульсивном нагружении. — М.: Высш. шк., 1975. — 463 с.
11. *Особенности формирования пластических деформаций при электродинамической обработке сварных соединений стали Ст3* / Л. М. Лобанов, В. И. Махненко, Н. А. Пашин и др. // Автомат. сварка. — 2007. — № 10. — С. 10–15.
12. *Эффективность электродинамической обработки алюминиевого сплава АМг6 и его сварных соединений* / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, А. В. Черкашин и др. // Там же. — 2012. — № 1. — С. 3–7.

Influence of design features of fastening the samples of АМg6 alloy and its welded joints in the grips of testing machine on lowering the deformation resistance at electrodynamic treatment is shown. It is established that the effectiveness of electrodynamic impact decreases with increase of treated metal thickness.

Поступила в редакцию 03.01.2012