



## ВЛИЯНИЕ ПОВТОРНОГО НАГРУЖЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМг6 И ЕГО СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Академик НАН Украины **Л. М. ЛОБАНОВ**, **Н. А. ПАЩИН**, канд. техн. наук, **В. П. ЛОГИНОВ**, инж.,  
**О. Л. МИХОДУЙ**, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

На основе разработанной методики исследованы закономерности механизма снижения предварительных напряжений при повторном нагружении и электродинамической обработке сплава АМг6 и его сварных соединений. Установлено, что история нагружения сплава АМг6 существенно не сказывается на релаксационных характеристиках металла при повторном воздействии на него импульсами тока.

*Ключевые слова:* алюминиевый сплав, сварное соединение, остаточное напряжение, импульс электрического тока, электродинамическая обработка, эффективность обработки, относительный предел текучести, временное сопротивление

При эксплуатации сварных конструкций из алюминий-магниевого сплава, работающих в условиях воздействия импульсных электрических и магнитных полей, при определенных условиях могут возникать остаточные деформации, приводящие к разрушению отдельных элементов. При этом начало пластического течения металла наступает при значениях рабочих напряжений ниже относительного предела текучести [1–3].

С конца прошлого века ряд научных организаций в нашей стране и за рубежом ведут исследования по оптимизации структуры и свойств конструкционных материалов и сварных соединений путем их обработки импульсными электромагнитными полями. Установлено, что импульсное воздействие тока на металлы и сплавы влияет на сопротивление усталости, статическую прочность и другие механические характеристики [4]. В то же время данные работы [3] свидетельствуют о негативной роли электромагнитных воздействий на прочность металлов и сплавов.

Одним из способов воздействия электрического тока на металлы является электродинамическая обработка (ЭДО), основанная на инициировании в материале электродинамических сил, которые возникают при прохождении электрического разряда через токопроводящий материал [5]. При их суммировании с внешними нагрузками, приложенными к обрабатываемой конструкции, в зоне воздействия тока возникают локальные области пластического течения металла [6].

При исследовании влияния ЭДО на алюминиевые сплавы и низкоуглеродистые стали основное внимание уделяли изучению механизма релаксации напряженного состояния [7–9] и эволюции структуры основного металла и сварного соединения [10]. Следует отметить, что вопросы об изменении прочностных характеристик сварных соединений под воздействием энергии разрядов тока, инициируемых ЭДО, практически не изучались. В то же время в работах [3, 4] изложены различные мнения о воздействии импульсных электромагнитных полей на прочность конструкционных материалов. Кроме того, в современной литературе данные о влиянии повторного нагружения на релаксацию напряжений в металле при электромагнитных воздействиях отсутствуют.

Целью настоящей работы является исследование влияния ЭДО на механические свойства алюминиевого сплава АМг6 и его сварных соединений при одноосном растяжении, а также на релаксацию напряжений при повторном нагружении металла.

Проводили ЭДО образцов основного металла и сварных соединений отожженного алюминиевого сплава АМг6 толщиной 4 мм с размером рабочей площадки 110×30 мм, которые нагружали одноосным растяжением со скоростью 0,1 мм/с. Задавали три уровня растягивающих нагрузок: при малых упругих напряжениях 52...60 МПа; при напряжениях 116...147 МПа, близких к пределу упругости сплава АМг6 (что примерно соответствует уровню остаточных сварочных напряжений в исследуемом сплаве); при напряжениях за пределом упругости. Растяжение в упруго-пластической области доводили до 260...280 МПа, т. е. до возникновения эффекта Портевена–Ле Шателье, который проявляется в прерывистой текучести металла в области предразрушения [11].



ЭДО выполняли на лабораторной установке, описание которой приведено в работе [9]. ЭДО растянутых образцов осуществляли посредством контакта рабочего электрода с поверхностью металла по схеме, представленной в [7]. Образцы растягивали до возникновения в них напряжений заданного значения и обрабатывали сериями разрядов тока, при этом после каждого импульса контролировали падение усилия растяжения в материале. ЭДО проводили при энергии разряда тока  $E = 140, 300$  и  $800$  Дж.

После завершения ЭДО 50 % исследуемых образцов доводили до разрушения, а оставшуюся часть снова подвергали растяжению и обработке на аналогичных режимах для определения влияния повторного цикла ЭДО на релаксацию напряжений.

Изменения механических свойств сплава АМгб и его сварных соединений при различных уровнях нагружения и энергии разряда тока представлены в таблице. Анализируя ее данные, можно заключить, что ЭДО с  $E = 140...300$  Дж образцов, нагруженных до 140 МПа (серии № 2, 3, 5, 6), практически не влияет на характеристики статической прочности по сравнению с исходными значениями (серия № 1). Это же относится

**Механические свойства сплава АМгб и его сварных соединений после ЭДО**

№ серии образца	Энергия разряда тока $E$ , Дж	Начальные растягивающие напряжения $\sigma_n$ , МПа	Относительный предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	Временное сопротивление $\sigma_b$ , МПа
1	—	—	$\frac{140}{130}$	$\frac{305}{246}$
2	140	60	$\frac{140}{130}$	$\frac{305}{245}$
3	140	140	$\frac{145}{131}$	$\frac{304}{248}$
4	140	260	$\frac{253}{232}$	$\frac{330}{303}$
5	300	55	$\frac{145}{130}$	$\frac{305}{246}$
6	300	135	$\frac{144}{132}$	$\frac{310}{245}$
7	300	265	$\frac{258}{237}$	$\frac{330}{303}$
8	800	60	$\frac{145}{133}$	$\frac{305}{245}$
9	800	146	$\frac{170}{152}$	$\frac{310}{285}$
10	800	260	$\frac{261}{256}$	$\frac{332}{305}$

Примечания. 1. В числителе приведены данные об основном металле, в знаменателе — о сварном соединении. 2. Серии образцов № 7, 9, 10 получили приращения значений  $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_b$  под воздействием ЭДО.

к варианту обработки при  $E = 800$  Дж и  $\sigma_n = 60$  МПа (серия № 8). ЭДО с  $E = 800$  Дж при увеличении  $\sigma_n$  до значений, близких к пределу упругости сплава АМгб, повышает  $\sigma_{0,2}$  основного металла и сварного соединения на 15...20 % (серия № 9). При этом значения  $\sigma_b$  сварного соединения увеличиваются приблизительно на 15 %. Совместное воздействие импульсов электрического тока и упругопластического нагружения стимулирует в исследуемых образцах процессы текучести, которые определяются по повышению значений  $\sigma_{0,2}$  на 45...50 % (серии № 4, 7, 10). При этом временное сопротивление основного металла возрастает приблизительно на 8, а сварного соединения — на 20 %.

На рис. 1 показана зависимость уровня начальных растягивающих напряжений образцов сварных соединений от количества разрядов при первом и повторном растяжениях. Из рис. 1, а видно, что при  $E = 140$  Дж в упругой области нагружения имеет место незначительное уменьшение значений  $\sigma_n$  после первой (кривые 1 и 3) и повторной ЭДО (кривые 2 и 4). При  $\sigma_n < 60$  МПа относительное снижение значений напряжений при первой и повторной ЭДО составило соответственно 16 и 21 %. Для образцов при растягивающих напряжениях до 120 МПа аналогичные показатели после двух серий ЭДО не превысили 20 %. В упругопластической области при  $\sigma_n = 260$  МПа после первой (рис. 1, кривая 5) и повторной (рис. 1, кривая 6) ЭДО снижение напряжений составило соответственно 11 и 14 %, т. е. ниже, чем при малых нагрузках (рис. 1, кривые 1, 2).

Более эффективной является ЭДО сварных соединений с  $E = 800$  Дж. После первой и повторной серии ЭДО растянутых образцов при растягивающих напряжениях до 60 МПа (рис. 1, б, кривые 1, 2) относительное падение приложенной нагрузки в обоих случаях составило 55 %. Повышение усилия растяжения до значений, близких к пределу упругости 140 МПа (рис. 1, кривые 3, 4), практически не влияет на эффективность воздействия током. Так, после двух серий ЭДО относительное снижение нагрузки составило соответственно 60 и 65 %. В упругопластической области уровень растягивающих напряжений достигает 280 МПа, как и при ЭДО с  $E = 140$  Дж (рис. 1, а), эффективность обработки несколько уменьшается. При этом имеет место разница в показаниях сбросов нагрузки после первой и второй (рис. 1, а, кривая 5, б) ЭДО, относительная эффективность этих процессов составляет соответственно 40 и 50 %.

После ЭДО у образцов основного металла (сплав АМгб) значения  $\sigma_n$  практически не отличались от представленных на рис. 1, что свидетельствует о подобии релаксационных механизмов в сварных соединениях.

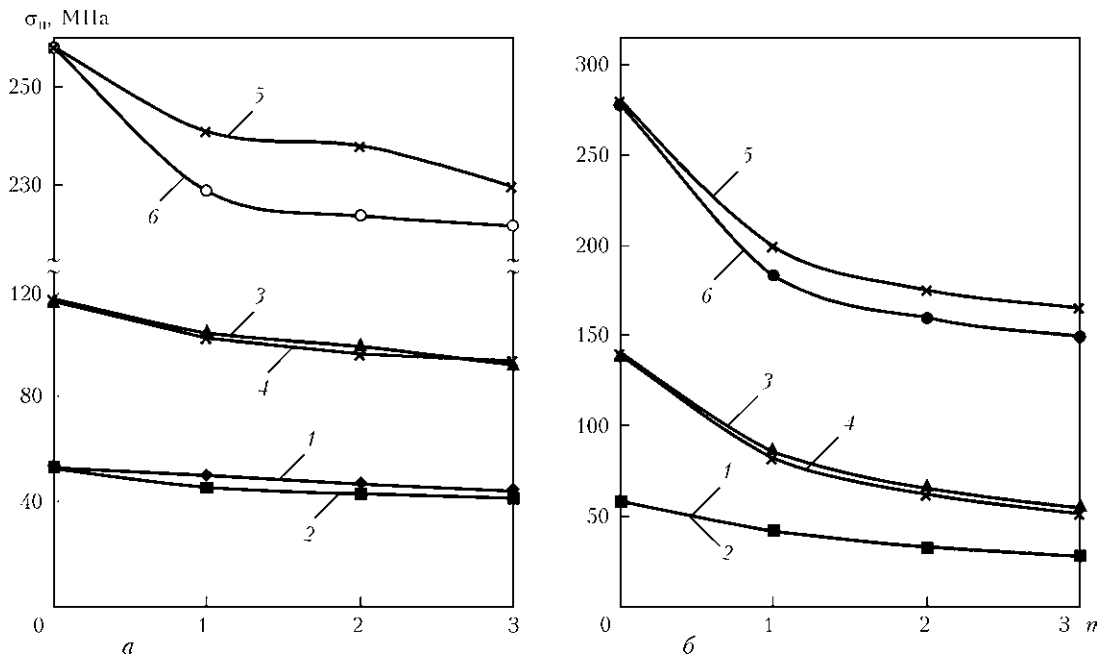


Рис. 1. Зависимость уровня растягивающих напряжений  $\sigma_n$  от количества разрядов  $n$  в образцах сварных соединений сплава АМг6 при  $E = 140$  (а) и  $800$  (б) Дж после первой (1, 3, 5) и повторной (2, 4, 6) ЭДО

Из рис. 2 видно, что результативность процесса обработки прямо пропорциональна энергии разряда тока в исследуемом диапазоне. ЭДО с  $E = 800$  Дж обеспечивает максимальное снижение приложенных растягивающих напряжений во всем исследуемом диапазоне нагрузок. При этом наибольший эффект при всех значениях энергии разряда тока, используемых в настоящей работе, достигается при уровне начальных растягивающих напряжений, близком к пределу упругости для сплава АМг6 (150 МПа), что примерно соответствует пикам растягивающих напряжений для сплава АМг6. Сопоставление эффективности воздействия током на образцы основного металла и сварного соединения (рис. 2) показало, что литая структура сварного шва более подвержена воздействию ЭДО с  $E = 800$  Дж при  $\sigma_n = 130...150$  МПа. Это выражается в большем уровне эффективности снижения напряжений после ЭДО в образцах сварных соединений по сравнению с основным металлом (соответственно 65 и 55 %), что создает предпосылки для разработки технологии ЭДО с целью регулирования напряженного состояния сварных конструкций из алюминиево-магниевого сплава. В то же время снижение значений относительной эффективности ЭДО при  $\sigma_n = 260...280$  МПа (рис. 2) может быть связано с деформационным упрочнением, инициируемым разрядами тока в сплаве АМг6 [10].

Проведена оценка остаточного относительного удлинения  $\delta$  основного металла и сварных соединений, инициируемых разрядами тока в образцах при ЭДО. Согласно данным работ [4, 6], прохождение импульса тока через нагруженный материал вызывает появление в нем остаточной

пластической деформации, которая может влиять на характеристики статической прочности. Из рис. 3 видно, что при  $E = 140$  Дж остаточное удлинение образцов стимулируется процессом ЭДО при растягивающих напряжениях более 120 МПа, а при  $\sigma_n = 150$  МПа  $\delta = 1,5$  % и может достигать 7,5 % в упругопластической области нагружения при  $\sigma_n = 275$  МПа. При  $\sigma_n = 60$  МПа использование всего диапазона энергий разряда тока не привело к увеличению относительного удлинения, что свидетельствует о малой эффективности процесса ЭДО сплава АМг6 с низким уровнем начальных напряжений. В то же время при  $\sigma_n > 125$  МПа разряды тока с энергией в 300 и 800 Дж приводят к повышению относительного удлинения до 1,5 %, а при увеличении растягивающих напряжений до 150 МПа остаточ-

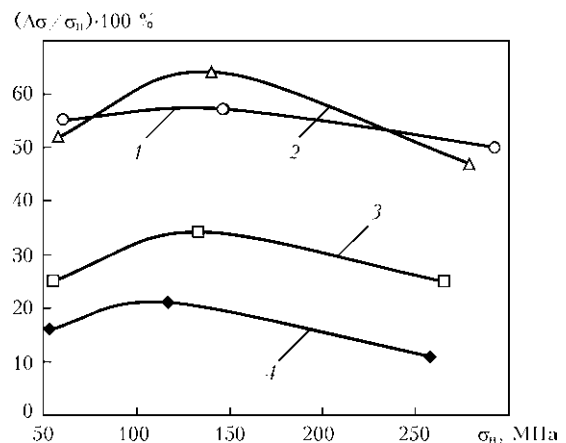


Рис. 2. Зависимость относительной эффективности  $\Delta\sigma/\sigma_n$  ЭДО в образцах сплава АМг6 (1, 3) и его сварных соединений (2, 4) от уровня растягивающих напряжений  $\sigma_n$  при  $E = 800$  (1, 2), 300 (3) и 140 (4) Дж

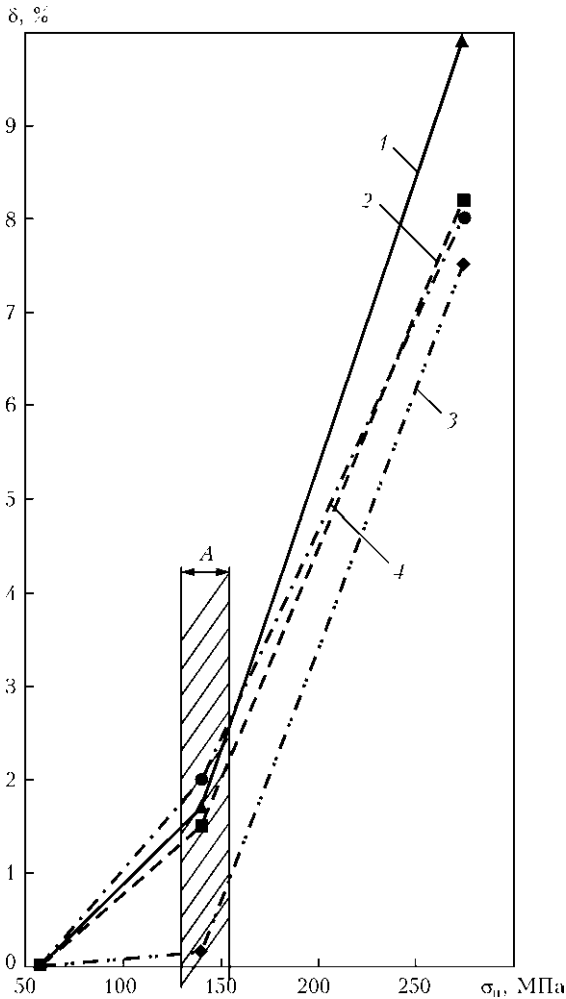


Рис. 3. Зависимость остаточного относительного удлинения  $\delta$  от уровня растягивающих напряжений  $\sigma_n$  в образцах основного металла сплава АМг6 (1, 2) и его сварных соединений (3, 4) при  $E = 800$  (1, 4), 300 (2) и 140 Дж (3) (А — область максимальных значений  $\Delta\sigma/\sigma_n$ )

ная пластическая деформация возрастает до 2,0. Дальнейшее увеличение  $\sigma_n \geq 290$  МПа приводит относительному удлинению образцов до 8...10 %, при этом сложно разделить вклад ЭДО и пластического течения материала под нагрузкой. Согласно рис. 2 максимальная эффективность ЭДО во всем диапазоне значений энергии разряда тока имела место при растягивающих напряжениях до 150 МПа, чему соответствует относительное удлинение образца из сплава АМг6 до 2 %. Дальнейшее его удлинение приводит к ухудшению эффективности обработки, что, как уже описано выше, связано с развитием процессов деформационного упрочнения, инициируемых разрядами тока [9], которые негативно влияют на эффективность процесса ЭДО.

The mechanisms of reduction of preliminary stresses in repeated loading and electrodynamic treatment of alloy AMg6 and its welded joints were investigated on the basis of the developed procedure. It was established that the history of loading of alloy AMg6 has no substantial effect on relaxation characteristics of metal subjected to repeated impact by current pulses.

### Выводы

1. ЭДО не влияет на снижение значений относительного предела текучести  $\sigma_{0,2}$  и временного сопротивления  $\sigma_B$  сплава АМг6 и его сварных соединений. При ЭДО образцов, растянутых до предела упругости, параметры  $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_B$  повышаются на 15...20 %, а упругопластическое состояние — соответственно на 50 и 20 %.

2. Повторное нагружение образцов из сплава АМг6 существенного влияния на эффективность воздействия током не оказывает. При ЭДО с  $E = 140$  Дж относительное снижение уровня приложенных напряжений в сплаве АМг6 составляет 20 %, а при  $E = 800$  Дж — до 65 %.

3. Максимальная эффективность ЭДО образцов из сплава АМг6 и его сварных соединений имеет место при  $\sigma_n = 150$  МПа.

1. Писаренко Г. С. О механической прочности материалов элементов конструкций // Пробл. прочности. — 1984. — № 1. — С. 3–5.
2. Сопротивление материалов / Г. С. Писаренко, В. А. Агарев, А. Л. Квитка и др. / Под ред. Г. С. Писаренко НАН Украины. — Киев: Вища шк., 1986. — 775 с.
3. Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Воробьев Е. В. Прочность материалов при криогенных температурах с учетом воздействия электромагнитных полей. — Киев: Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2008. — 504 с.
4. 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.
5. Теория электрических аппаратов / Г. Н. Александров, В. В. Борисов, В. Л. Иванов и др. — М.: Высш. шк., 1985. — 312 с.
6. Батаронов И. Л. Механизмы электропластичности // Соросов. образоват. журн. — 1999. — № 10. — С. 93–99.
7. 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.
8. Особенности формирования пластических деформаций при электродинамической обработке сварных соединений стали Ст3 / Л. М. Лобанов, В. И. Махненко, Н. А. Пашин и др. // Там же. — 2007. — № 10. — С. 10–15.
9. 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.
10. Влияние электродинамической обработки на особенности микромеханизма разрушения сварных соединений алюминиевого сплава АМг6 / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. П. Логинов, А. В. Чайка // Там же. — 2007. — № 2. — С. 10–17.
11. Белл Дж. Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. Ч. 2: Конечные деформации. — М.: Наука, 1984. — 432 с.

Поступила в редакцию 04.10.2010