



УДК 621.791.09:785.375:539.4

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ ПРАВКА ЭЛЕМЕНТОВ ТОНКОЛИСТОВЫХ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

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

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Необходимость регулирования остаточного коробления, вызванного сваркой в тонколистовых металлических конструкциях, является одной из актуальных проблем современного сварочного производства. Перспективным подходом, отличающимся низким энергопотреблением и не требующим металлоемкого оборудования, является разработка способа снижения коробления сварных конструкций, основанного на применении электродинамической обработки сварных соединений импульсным током. Целью настоящей работы являлось исследование эффективности электродинамической правки элементов тонколистовых сварных конструкций. Исследовано влияние электродинамической обработки импульсным током на снижение остаточного деформирования элементов тонколистовых сварных пластин из алюминиевого сплава АМг6 и конструкционных сталей 30ХГСА и Ст3. Для генерирования импульсного тока при электродинамической обработке использовали емкостной накопитель энергии, а обработку осуществляли при контактном взаимодействии рабочего электрода, смонтированного в плоский индуктор, с поверхностью сварного шва. Для электродинамической обработки использовали специальное сборочное устройство, позволяющее производить обработку пластин как в свободном состоянии, так и в условиях их предварительного изгиба. Исследовали влияние последовательности выполнения токовых импульсов при электродинамической обработке и направление обработки пластин. По результатам проведенных исследований установлено, что правка сварных соединений способом электродинамической обработки позволяет существенно уменьшить значения продольных и поперечных прогибов сварных пластин из конструкционных сталей и алюминиевого сплава. Установлено, что наиболее эффективным для снижения сварочного коробления пластин является порядок выполнения электродинамической обработки в направлении «от середины к краям». Применение «обратного» изгиба пластин, инициирующего на поверхности шва напряжения на уровне предела текучести материала, в сочетании с электродинамической обработкой позволяет практически устранить остаточное коробление продольных сварных соединений из сплава АМг6 и существенно снизить его в соединениях из конструкционных сталей. Библиогр. 12, табл. 2, рис. 3.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, конструкционные стали, продольный прогиб, поперечный прогиб, электродинамическая обработка, предварительный выгиб, сварной шов, автоматическая сварка, сварка покрытым электродом

Необходимость регулирования остаточного коробления, вызванного сваркой в тонколистовых металлических конструкциях, является одной из актуальных проблем современного сварочного производства. При изготовлении новых типов конструкций используют материалы и виды сварки, для которых традиционные способы обеспечения заданной точности изготовления не всегда применимы. В то же время в условиях удорожания энергоресурсов способы правки, основанные на минимальном энергопотреблении [1], достаточно востребованы.

Перспективным подходом, отличающимся низким энергопотреблением и не требующим металлоемкого оборудования, является разработка способов правки, основанных на применении импульсных электромагнитных воздействий на сварное соединение.

Фундаментальные и прикладные исследования позволили установить явление резкого повышения пластичности и снижения сопротивления металла деформированию при воздействии электрического тока высокой плотности [2]. Явление бы-

ло названо электропластичностью [3], а практическое ее использование открыло новые возможности для технологической обработки конструктивных элементов из различных металлов и сплавов, включая тугоплавкие.

Одним из способов токового воздействия на металлы и сплавы является электродинамическая обработка (ЭДО), основанная на инициировании в материале электродинамических сил, возникающих при переходных процессах, сопровождающих прохождение в материале токового разряда [4]. При воздействии электродинамических сил на обрабатываемую конструкцию в ней могут возникать пластические деформации, понижающие уровень ее остаточного коробления. При этом воздействие токовых импульсов на сварное соединение приводит к релаксации его напряженно-деформированного состояния, определяющего параметры его остаточного деформирования [5–8].

Целью настоящей работы являлось исследование эффективности электродинамической правки элементов тонколистовых сварных конструкций.



Для обработки образцов сварных соединений импульсами тока использовали установку, основным элементом которой являлся емкостный накопитель энергии, а рабочим устройством — плоский индуктор, соединенный с диском из неферромагнитного материала и цилиндрическим электродом, сферический торец которого являлся зоной энерговыделения при контакте с обрабатываемой поверхностью сварного соединения в момент разряда. Диск предназначался для реализации динамической составляющей электродинамического воздействия на металл. Принципы работы установки [4] основаны на переходных электродинамических процессах, протекающих в металле образца при разряде накопителя.

Учитывая данные [4], где показано, что эффективность электродинамического воздействия прямо зависит от накопленной энергии токового разряда E , для оценки влияния ЭДО на остаточные деформации сварных пластин использовали режим обработки, соответствующий $E = 800$ Дж.

Исследования влияния ЭДО на остаточное деформирование элементов сварных конструкций проводили на плоских сварных образцах из сталей 30ХГСА, Ст3 размерами $400 \times 300 \times 3$ мм, а также из алюминиевого сплава АМг6 ($400 \times 400 \times 4$ мм). Стыковые сварные соединения сталей выполняли сваркой покрытыми электродами, а сплава АМг6 — автоматической сваркой в среде аргона.

При обработке сварных соединений использовали специальное сборочное приспособление (рис. 1), предназначенное для позиционирования индуктора относительно обрабатываемого сечения образца, а также фиксированного контакта торца электрода с поверхностью металла. Приспособление позволяет производить обработку

сварных соединений как в свободном состоянии, так и в состоянии предварительного изгиба.

Приспособление (рис. 1, а) состоит из опорной 2 и прижимной 4 балок, предназначенных для крепления образца сварного соединения 7 и плоского индуктора 5, а также для их коммутации в разрядную цепь емкостного накопителя энергии с использованием силового кабеля 8. Позиционирование прижимной балки 4 относительно образца 7 осуществляли направляющими шпильками 6, а вертикальное усилие прижатия создавали нагружающими гайками 3. Тензометрический шлейф 9 использовали для контроля напряжений при предварительном изгибе, для реализации которого по углам пластин устанавливали подпятники 1. Взаимное расположение индуктора 5 с диском из неферромагнитного материала 10 и электрода 11 показано на рис. 1, б.

Целью первого этапа работы было исследование оптимальной последовательности выполнения электродинамических воздействий. Для этого проводили оценку влияния расположения зоны обработки на сварном шве, а также последовательности выполнения разрядов на остаточное коробление пластин. При этом в пластинах сохраняли начальные несовершенства формы, вызванные сваркой, а условия их сборки в оснастке обеспечивали гарантированный электрический контакт электрода с поверхностью обрабатываемого металла.

Сборку образцов осуществляли при гарантированном контакте торца электрода с поверхностью сварного шва, как показано на рис. 1, б. Выбор шва в качестве зоны обработки обоснован данными [9, 10], которые показывают, что максимальная эффективность электродинамического воздействия имеет место при ЭДО металла, имеющего уровень упругих напряжений близкий к $\sigma_{0.2}$. Это характерно для центральной части шва и, следовательно, для правки сварных пластин способом ЭДО следует проводить обработку поверхности сварного шва.

После сборки пластин в приспособлении производили разряд накопителя с последующей оценкой изменения геометрических характеристик пластин в результате обработки. В качестве характеристик деформации пластин регистрировали начальные (после сварки) значения их продольных прогибов вдоль свободных кромок f_1 и f_3 , вдоль шва — f_2 , а также значения поперечных прогибов в начале Δ_n и конце Δ_k сварного шва, как показано на рис. 2, а.

После проведения ЭДО также регистрировали значения параметров деформации f_{13} – f_{33} , $\Delta_{н3}$ и $\Delta_{к3}$, которые,

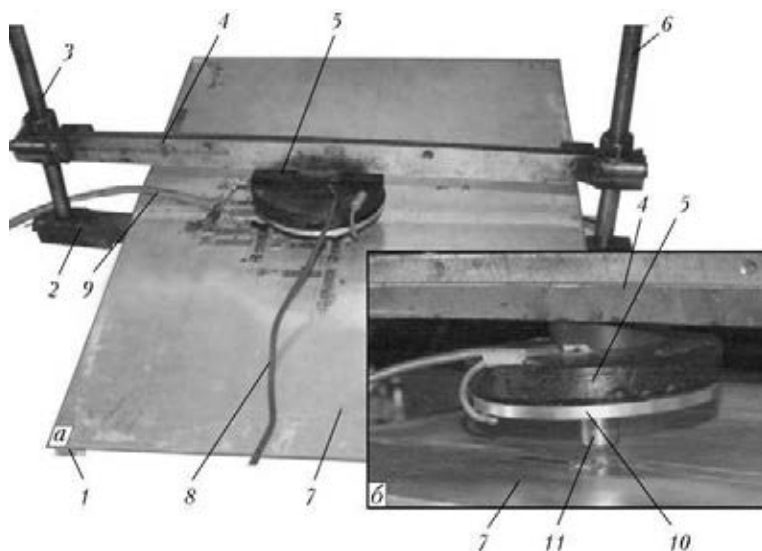


Рис. 1. Внешний вид сборочного приспособления для ЭДО сварного соединения сплава АМг6 (а) и позиционирование индуктора на сварном шве (б) (1–11 — см. в тексте)



совместно с начальными значениями представлены в табл. 1.

Изучали три варианта обработки, определяющие последовательность выполнения токовых разрядов и их местоположение. В первом варианте цикл ЭДО, состоящий из пяти-шести последовательных электродинамических воздействий, производили в локализованной зоне сварного шва (схема ЛОК) (рис. 2, б; табл. 1, № 1, 4, 7), во втором — цикл ЭДО осуществляли на лицевой поверхности сварного шва в направлении «на проход» (схема НПР) (рис. 2, в; табл. 1, № 2, 5, 8). Третий вариант реализовывали посредством приложения четырех циклов ЭДО вдоль линии шва в направлении «от середины к краям» (схема ОСК) (рис. 2, г; табл. 1, № 3, 6, 9).

При реализации схемы ЛОК проводили обработку центральной части сварного шва (рис. 2, б), что позволяло концентрировать электродинамическое воздействие на ограниченном участке шва, прикладывая его в зоне, соответствующей максимальной величине продольного прогиба — f_2 (рис. 2, а). Данная схема характеризуется минимальной трудоемкостью из-за отсутствия необходимости перемещения электрода, но эффективность ЭДО снижается с каждым последующим токовым воздействием, прикладываемым к фиксированному участку поверхности шва. Это, согласно данным [4], связано с тем, что эффективность электродинамических воздействий прямо зависит от уровня начальных напряжений σ_0 в обрабатываемом металле. Таким образом, каждый последующий токовый разряд в цикле ЭДО воздействует на металл, значение σ_0 в котором уменьшилось в результате предыдущего разряда и, следовательно, влияние электродинамического воздействия на напряженно-деформированное состояние пластины снижается.

Анализ остаточных формоизменений сварных пластин из сплава АМгб, обработанных по схеме ЛОК, показал, что до обработки образцы имели характерную параболическую форму продольных

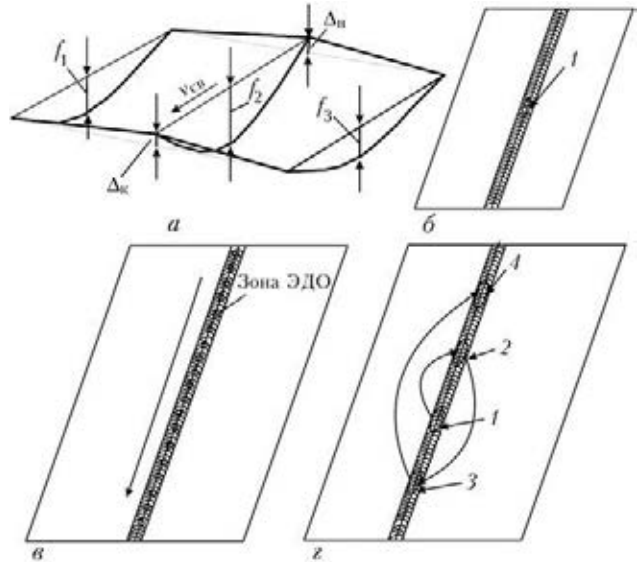


Рис. 2. Геометрические характеристики формоизменения (а) и схемы обработки сварных пластин: ЛОК (б); НПР (в); ОСК (г) (1...4 — последовательность выполнения циклов ЭДО)

прогибов до 2,5 мм, а поперечных — от 2,5 до 3,5 мм. После обработки остаточные значения продольных и поперечных прогибов снизились в среднем на 60 % (табл. 1, № 1).

До обработки по схеме ЛОК образцы из стали 30ХГСА имели значения продольных прогибов 4,3...6,5 мм на кромках и 6,7 мм на шве. После ЭДО остаточные значения прогибов по продольным кромкам и шву снизились соответственно на 40 и 60 %, а поперечных — на 50 % (табл. 1, № 4).

Значения остаточных продольных прогибов сварных пластин из стали Ст3 достигали 6,9...9,4 мм, а поперечных 12...16 мм. После обработки по схеме ЛОК остаточные значения продольных и поперечных прогибов снизились соответственно на 45 и 50 % (табл. 1, № 7).

При сравнении значений f_2 и $f_{2э}$ можно видеть, что максимальный эффект обработки, определяющий остаточные прогибы пластины после ЭДО,

Таблица 1. Продольные f и поперечные Δ прогибы сварных пластин до и после ЭДО

Номер пластины	Материал сварных пластин	f , мм			Δ , мм		Схема ЭДО	$f_э$, мм			$\Delta_э$, мм	
		f_1	f_2	f_3	Δ_n	Δ_k		$f_{1э}$	$f_{2э}$	$f_{3э}$	$\Delta_{нэ}$	$\Delta_{кэ}$
1	АМгб	2,5	2,5	2,5	2,5	3,5	ЛОК	1,1	1,0	1,2	1,1	1,2
2	АМгб	2,5	2,6	2,4	2,4	3,2	НПР	2,2	2,0	2,2	2,2	3,9
3	АМгб	2,4	2,6	2,6	2,6	3,4	ОСК	-0,5	0	-1,1	-2,3	-0,6
4	30ХГСА	4,3	6,7	6,5	9,3	12,6	ЛОК	3,3	2,8	3,2	4,1	6,4
5	30ХГСА	4,4	6,9	6,6	9,8	12,1	НПР	2,4	3,9	3,2	7,5	12,4
6	30ХГСА	6,3	6,8	4,9	9,4	12,9	ОСК	1,5	1,3	1,9	1,9	2,8
7	Ст3	7,3	9,4	6,9	16,0	12,1	ЛОК	4,6	4,0	4,2	8,1	6,0
8	Ст3	7,2	9,2	5,7	16,7	11,7	НПР	4,5	5,2	3,6	10,2	14,8
9	Ст3	7,0	9,1	6,8	15	11,3	ОСК	1,6	1,5	1,7	1,5	0,9



достигается в зоне сварного соединения — в области, где величины прогибов, как и уровень остаточных сварочных напряжений, максимальны, что подтверждают данные, приведенные в [9].

При ЭДО по схеме ННР (рис. 2, в) изучали изменения значений прогибов пластин при поступательном движении электрода в направлении «на проход» от начала в конец соединения (показано стрелкой). Продольное перемещение торца электрода осуществляли по линии шва с шагом 15 мм таким образом, что на каждый участок обрабатываемой поверхности приходилось одно электродинамическое воздействие. Данная схема ЭДО является наиболее трудоемкой из перечисленных, так как требует многократного позиционирования электрода вдоль линии шва.

Анализ значений остаточных перемещений сварных пластин из сплава АМгб при ЭДО по схеме ННР показал, что после обработки образцы имели незначительное снижение продольных прогибов до 2,0 мм при нарастании поперечных до 3,9 мм (табл. 1, № 2).

Следует отметить, что при снижении продольных прогибов при обработке по схеме ННР пластин из сталей марок 30ХГСА и Ст3 нарастают поперечные прогибы до 12,4...14,8 мм (табл. 1, № 5, 8). Подобный эффект наблюдали и на пластинах из сплава АМгб (табл. 1, № 2). Сравнение начальных значений деформации Δ_n и Δ_k с аналогичными параметрами $\Delta_{н0}$ и $\Delta_{к0}$ после ЭДО показало, что в процессе обработки при движении электрода вдоль стыка в направлении «на проход» имеет место некоторое увеличение поперечных прогибов.

Использование схемы ОСК (рис. 2, з) объединяет преимущества ранее описанных схем ЛОК и ННР. Так, преимуществом схемы ЛОК является малая трудоемкость (отсутствие необходимости перемещения электрода вдоль стыка), а схемы ННР — возможность обработки поверхности шва по длине.

Схему ОСК реализовывали путем обработки четырех участков поверхности шва на сварных пластинах в последовательности «от середины к краям». На каждом из участков был выполнен цикл ЭДО (пять токовых разрядов).

Анализ значений остаточных деформаций сварных пластин из сплава АМгб при ЭДО по схеме ОСК показал, что после обработки образцы имели снижение продольных прогибов в шве до нулевых значений, а поперечных — до достижения деформации противоположного знака (табл. 1, № 3).

Значения остаточных продольных прогибов по шву сварных пластин из сталей 30ХГСА и Ст3 после ЭДО по схеме ОСК снижались соответственно на 80 и 85 %, а поперечных — на 80 и 90 % (табл. 1, № 6, 9).

На основании проведенных экспериментов можно сделать вывод, что выбранные схемы ЭДО, такие как воздействие серией токовых импульсов на зону «в центре шва» (схема ЛОК) и ЭДО «на проход» (схема ННР), не обеспечивают полного устранения остаточного коробления сварных пластин из сталей марок Ст3 и 30ХГСА. Использование схемы ОСК при ЭДО на сплаве АМгб обеспечивает незначительную обратную кривизну исследуемых пластин при сопутствующих остаточных прогибах поперечных кромок.

Анализируя данные табл. 1, можно видеть, что наиболее эффективной схемой электродинамической правки является последовательность ОСК.

Проведенные ранее исследования [11] показали, что предварительное нагружение околошовной зоны свариваемых листов упругим изгибом, который создается силами, прикладываемыми перпендикулярно плоскости листов, позволяет регулировать остаточные деформации тонколистовых конструкций из сплава АМгб.

На основании [11] можно заключить, что предварительный изгиб сварных пластин перед выполнением ЭДО позволит повысить возможности обработки с целью снижения коробления тонколистовых конструкций. Это связано с тем, что при реализации обратного изгиба к сварной конструкции прикладывается внешняя нагрузка, стимулирующая трансформацию упругой составляющей деформации сварной пластины в пластическую при реализации электродинамических воздействий. При этом силовой контур задает параметры изгиба закрепленной пластины с заданной точностью.

Для оценки влияния параметров напряженного состояния металла при предварительном изгибе на эффективность правки способом ЭДО проводили вначале обработку растянутых плоских образцов из алюминиевого сплава АМгб и стали Ст3 с рабочим сечением 30×4 мм. Растяжение образцов выполняли на испытательной машине ЦДМ-10 при «жестком» режиме нагрузки и скорости деформирования 0,1 мм/с до заданных значений σ_0 . Температура испытаний составляла 293 К. Проводили оценку влияния электродинамического воздействия на эффективность обработки, определяемой отношением значений сопротивления материала деформированию $\Delta\sigma$ к начальному напряжению σ_0 . Определяли $\Delta\sigma$ как разность значения σ_0 и текущего значения напряжения, регистрируемого после электродинамического воздействия. Значения σ_0 задавали в упругом и упругопластическом диапазонах нагрузки, что позволило определить параметры напряженного состояния, соответствующие оптимальной величине выгиба.

Проводили сравнительную оценку влияния электродинамического воздействия при различ-



ных уровнях σ_0 на относительную эффективность ЭДО $(\Delta\sigma/\sigma_0) \cdot 100\%$ для сплава АМгб и стали Ст3, которая определялась после одиночного разряда тока. Значения энергии ЭДО задавали в диапазоне 130...800 Дж, а величину σ_0 для сплава АМгб — от 55 до 294 МПа, для стали Ст3 — от 180 до 310 МПа. Выбор значений $\sigma_0 > 1,5\sigma_{0,2}$ для образцов из сплава АМгб продиктован необходимостью оценки влияния деформационного упрочнения материала на эффективность ЭДО в упругопластическом диапазоне нагрузки. Проведение аналогичных исследований на образцах из стали Ст3 затруднено из-за невозможности обеспечения стабильных показателей σ_0 после превышения значений начальной нагрузки выше $1,3\sigma_{0,2}$ вследствие местной текучести металла.

Следует отметить, что, так как значения $\sigma_{0,2}$ для стали и алюминиевого сплава существенно отличаются, то построение зависимости $(\Delta\sigma/\sigma_0) \cdot 100\% = f(\sigma_0)$ затруднит сравнение характеристик эффективности ЭДО от уровня начальных напряжений для исследуемых материалов в задаваемом диапазоне энергий заряда. Для более корректного сопоставления полученных значений использовали относительную нагрузку $\sigma_0/\sigma_{0,2}$, показывающую отношение начального напряжения к пределу текучести стали Ст3 и сплава АМгб.

Зависимости $\Delta\sigma/\sigma_0$ от $\sigma_0/\sigma_{0,2}$ при различных значениях запасенной энергии заряда для сплава АМгб и стали Ст3 приведены на рис. 3. Из рисунка видно, что максимальная эффективность ЭДО отвечает уровню начальных напряжений, которые близки к $\sigma_{0,2}$ для сплава АМгб (кривые 3, 5). В этом случае снижение показателей $\Delta\sigma/\sigma_0$ при нарастании $\sigma_0/\sigma_{0,2}$ можно объяснить влиянием деформационного упрочнения, что ранее было отмечено в [4]. Для стали Ст3 при нарастании E монотонно увеличивалась эффективность с увеличением нагрузки (кривые 1, 4), что, вероятно, связано с высокой пластичностью. Следует отметить, что при $E = 130$ Дж эффективность ЭДО стали Ст3 близка к нулю.

Анализируя данные (рис. 3) можно сделать вывод, что для пластин из сплава АМгб параметры изгиба должны соответствовать значениям σ_0 в упругой области нагружения, близким к $\sigma_{0,2}$. Учитывая монотонный характер нарастания зависимости $\Delta\sigma/\sigma_0 = f(\sigma_0/\sigma_{0,2})$ для стали Ст3 (рис. 3, кривые 1, 4), целесообразно исследовать параметры предварительного прогиба пластин, соответствующие как упругому, так и упругопластическому диапазонам σ_0 .

Учитывая данные (рис. 3 и [11]), изучали эффективность правки способом ЭДО сварных пластин, предварительно задавая значения продольного прогиба $f_{пр}^*$ в направлении, обратном прогибу от сварки. Предварительный изгиб пластин выполняли в центре сварного соединения, используя

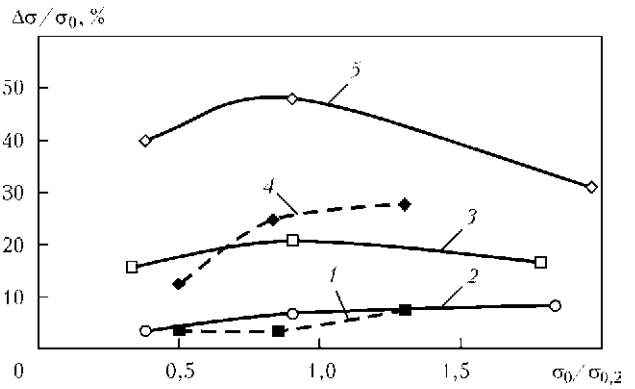


Рис. 3. Влияние величины относительной нагрузки $\sigma_0/\sigma_{0,2}$ для образцов из стали Ст3 (1, 4) и сплава АМгб (2, 3, 5) на эффективность ЭДО при различной запасенной энергии заряда: 1 — $E = 300$ Дж; 2 — 130; 3 — 300; 4 — 800; 5 — 800

сборочное приспособление (см. рис. 1, а), а значение прогиба задавали, регулируя высоту опор, установленных по краям пластин. При этом $f_{пр}^*$ определяли как стрелу прогиба пластин после приложенной вертикальной нагрузки.

Изгиб осуществляли посредством прижатия торца электрода к поверхности пластины в центральной части соединения. После достижения заданных значений $f_{пр}^*$ контролировали продольную составляющую напряжений сжатия σ_{xx} вдоль линии сплавления, возникающих на поверхности пластины в результате изгиба. При этом значение $\sigma_{xx} = 0$ соответствовало прогибу f_2 пластины от сварки в зоне шва. Следует отметить, что оценку влияния начальной нагрузки на эффективность ЭДО выполняли, задавая значения σ_0 для плоских образцов в области растяжения (рис. 3), а на поверхности пластин после изгиба имели место сжимающие σ_{xx} . На основании данных [12] можно сделать вывод, что зависимости $\Delta\sigma/\sigma_0 = f(\sigma_0/\sigma_{0,2})$, полученные при растяжении алюминиевого сплава и малоуглеродистой стали, являются справедливыми и в области сжимающих нагрузок, но с противоположным знаком.

Регистрацию значений σ_{xx} проводили с использованием проволочного тензорезистора, наклеиваемого на поверхности пластин в зоне ЭДО, и шлейфа тензостанции ИДЦ-10. Значения $f_{пр}^*$ и σ_{xx} представлены в табл. 2. Цикл ЭДО, как и в предыдущих экспериментах, состоял из пяти токовых разрядов, прикладываемых к пластине по схеме ЛОК, с последующей регистрацией их формоизменения в результате обработки. Значения начальных продольных прогибов пластин $f_1 - f_3$, после обработки $f_{13} - f_{33}$ (f_2, f_{23} — прогибы в зоне шва) представлены в табл. 2. Начальные значения поперечных прогибов пластин в зоне начала и конца шва Δ_n и Δ_k , после ЭДО — Δ_{n3} и Δ_{k3} , также представлены в табл. 2.

Следует отметить, что задаваемые значения $f_{пр}^*$ при $\sigma_{xx} = -0,3\sigma_{0,2}$ для всех исследуемых ма-



Таблица 2. Влияние предварительного продольного изгиба $f_{пр}^*$ на остаточные формоизменения сварных пластин при ЭДО

Номер пластины	Материал сварных пластин	f , мм			Δ , мм		$f_{пр}^*$, мм	σ_{xx} , МПа	$f_{э}$, мм			$\Delta_{э}$, мм	
		f_1	f_2	f_3	Δ_H	Δ_K			$f_{1э}$	$f_{2э}$	$f_{3э}$	$\Delta_{Hэ}$	$\Delta_{Kэ}$
1	АМгб	2,5	2,6	2,5	2,4	3,8	-2,5	-90	0,7	0,8	0,7	1,0	1,4
2	АМгб	2,4	2,7	2,6	2,6	3,4	-5,5	-145	0,1	0	0,2	0,2	0,2
3	30ХГСА	4,4	7,2	5,9	9,0	11,8	-1,0	-430	2,2	2,2	2,4	3,5	4,2
4	30ХГСА	4,8	7,1	6,6	9,2	12,0	-2,0	-475	1,4	1,3	1,6	1,5	1,6
5	Ст3	7,4	9,8	6,1	15,9	12,1	5	-250	2,1	3,8	1,5	3,1	3,6
6	Ст3	7,3	9,4	6,9	16,3	12,1	3	-330	1,0	2,5	0,9	1,7	1,3

териалов не приводят к заметному снижению параметров остаточного коробления пластин.

На основании данных (табл. 2, № 1) можно видеть, что при достижении значения $\sigma_{xx} = -0,6\sigma_{0,2}$ на образце из сплава АМгб и соответствующего прогиба $f_{пр} = -2,5$ мм продольная и поперечная составляющие формоизменения понижаются соответственно на 70 и 60 %. Максимальные значения составляющих остаточного прогиба получены после ЭДО при $\sigma_{xx} = -\sigma_{0,2}$ (табл. 2, № 2), что соответствует $f_{пр}^* = -5,5$ мм, где снижение формоизменения обеспечивало практическое выравнивание пластины. Это подтверждает данные (см. рис. 3), где показано, что максимальная эффективность электродинамического воздействия для сплава АМгб достигается при начальных значениях напряжений близких к $-\sigma_{0,2}$.

После достижения $\sigma_{xx} = -0,45\sigma_{0,2}$ изгибом пластины из стали 30ХГСА значения $f_{пр}^* = -1,0$ мм (табл. 2, № 3) и последующей ЭДО, значения продольной и поперечной составляющих прогиба снижались соответственно на 70 и 65 %. Максимальное влияние ЭДО имело место при $\sigma_{xx} = -0,5\sigma_{0,2}$ и $f_{пр}^* = -2,0$ мм (табл. 2, № 4), где снижение продольной и поперечной компонент формоизменения пластины достигало 80 %. Дальнейшее увеличение значений σ_{xx} и $f_{пр}^*$ не приводило к существенному изменению характеристик прогиба пластины.

Для стали Ст3 при достижении $f_{пр}^* = 4,0$ мм (табл. 2, № 5) σ_{xx} достигало значений $\sigma_{0,2}$ для стали Ст3. При этом ЭДО привело к снижению значений составляющих прогиба соответственно до 85 %.

Целесообразность проведения исследований влияния ЭДО на формоизменение сварных пластин из стали Ст3 в условиях пластического выгиба обоснована данными (см. рис. 3), где представлена сравнительная оценка влияния начальной нагрузки на эффективность ЭДО для стали Ст3 и сплава АМгб. На основании данных (см. рис. 3) можно сделать вывод, что если для сплава АМгб при переходе начальной нагрузки в упругопластическую область напряжений эффективность ЭДО

снижается, то для стали Ст3 — монотонно нарастает. С этой целью в пластине создавали остаточный прогиб $f_{пр}^* = 3,0$ мм, при котором значение σ_{xx} на наружной поверхности пластины достигло 330 МПа, что составляет $1,4\sigma_{0,2}$ для стали Ст3. При этом снижение поперечных прогибов максимально — до 90 % (табл. 2, № 6).

На основании данных (табл. 2) можно сделать вывод о том, что ЭДО с предварительным изгибом сварных пластин, создающим на поверхности шва напряжения на уровне предела текучести материала, позволяет практически устранить остаточное коробление продольных сварных соединений из сплава АМгб и снизить его на порядок в соединениях из конструкционных сталей.

При сопоставлении данных табл. 1 (№ 3, 6, 9) и табл. 2 (№ 2, 4, 6) можно сделать вывод, что ЭДО в условиях предварительного изгиба при значениях σ_{xx} , близких к $-\sigma_{0,2}$ для исследуемых металлов по эффективности сопоставима с обработкой по схеме ОСК, но более технологична из-за отсутствия необходимости позиционирования индуктора вдоль линии шва.

При этом трудоемкость ЭДО с использованием выгиба ниже, чем по схеме ОСК, так как при этом не требуется многократная перестановка электрода вдоль линии шва.

Выводы

1. Установлено, что различные варианты последовательности выполнения ЭДО сварных швов снижают уровень остаточного коробления тонколистовых сварных пластин из сплава АМгб и конструкционных сталей марок 30ХГСА и Ст3.

2. Показано, что ЭДО локализованного участка сварного шва, как и ЭДО шва в направлении «на проход», сравнимы по эффективности и снижают значения продольных и поперечных прогибов сварных пластин в несколько раз. Максимальная эффективность ЭДО имеет место при обработке поверхности шва в направлении «от середины к краям».

3. Применение «обратного» изгиба пластин, создающего на поверхности шва напряжения на



уровне предела текучести материала, в сочетании с ЭДО позволяет практически устранить остаточное коробление продольных сварных соединений из сплава АМгб и существенно снизить его в соединениях из конструкционных сталей.

1. *Сварные строительные конструкции* / Л. М. Лобанов, В. И. Махненко, В. И. Труфяков и др. — Киев: Наук. думка, 1993. — Т. 1. — 416 с.
2. *Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы* / Ю. В. Баранов, О. А. Троицкий, Ю. С. Авраамов и др. — М.: МГИУ, 2001. — 844 с.
3. *Батаронов И. Д.* Механизмы электропластичности // Сороковский образоват. журн. — 1999. — № 10. — С. 93–99.
4. *Эффективность* электродинамической обработки алюминиевого сплава АМгб и его сварных соединений / Н. А. Пашин, А. В. Черкашин, О. Л. Миходуй и др. // Автомат. сварка. — 2012. — № 1. — С. 3–7.
5. *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.
6. *Research on residual stress reduction by a low frequency alternating magnetic field* / F. Tang, A. L. Lu, J. F. Mei et al. // J. of Mater. Proc. Technology. — 1998. — № 74. — P. 255–258.
7. *Нестационарное* напряженно-деформированное состояние в длинном стержне, вызванное импульсами электрического тока высокой плотности / Г. В. Степанов, А. И. Бабуцкий, И. А. Мамеев и др. // Пробл. прочности. — 2011. — № 3. — С. 123–131.
8. *Лобанов Л. М., Пашин Н. А., Миходуй О. Л.* Влияние электроимпульсной обработки на остаточные деформации тонколистовых сварных конструкций // Автомат. сварка. — 2010. — № 3. — С. 13–17.
9. *Лобанов Л. М., Пашин Н. А., Логинов В. П.* Изменение напряженно-деформированного состояния после электродинамической обработки сварных соединений алюминиевого сплава АМгб // Там же. — 2007. — № 6. — С. 11–19.
10. *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 НАНУ, 2008. — 504 с.
11. *Касаткин Б. С., Лобанов Л. М., Павловский В. И.* Влияние начального изгиба свариваемых листов на остаточные деформации коробления // Автомат. сварка. — 1979. — № 9. — С. 38–41.
12. *Белл Дж. Ф.* Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. — Ч. 2. Конечные деформации. — М.: Наука, 1984. — 432 с.

Поступила в редакцию 04.06.2013

РЕМОНТ КАНАТОВЕДУЩЕГО ШКИВА СКИПОВОЙ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ

Компания «Стил Ворк» занимается выполнением работ по восстановлению, упрочнению и ремонту оборудования на предприятиях горно-металлургического комплекса Украины.

За годы существования компании специалистами накоплен богатый научный и практический опыт в области повышения ресурса оборудования, которое работает в условиях интенсивного абразивного износа в сочетании с повышенными температурами, динамическими нагрузками, увеличенным давлением. Компания для достижения наиболее оптимального результата всегда применяет комплексный подход к решению поставленных заказчиком задач.

Кроме производства биметаллических листов SWIP, которое продолжает успешно развиваться, компанией «Стил Ворк» в мае 2013 г. были выполнены работы по ремонту канатоведущего шкива скиповой подъемной установки на шахте Октябрьская ПАО «Криворожский железорудный комбинат». Ремонт производился под руководством и в соответствии с технологией, разработанной Институтом электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. Это уже второй успешный ремонт шкива, выполненный без его демонтажа.

Проделанная работа позволила ПАО «КЖРК» продлить срок службы основного дорогостоящего оборудования, что отсрочило инвестирование значительных финансовых средств для приобретения нового оборудования. Это в свою очередь привело к снижению затрат на добычу 1 т руды, что очень важно в современных условиях рынка.

Преимущества сотрудничества с ООО «Стил Ворк» уже оценили такие лидеры в металлургической и цементной промышленности Украины, как ПАО «СЕВГОК», ПАО «ЦГОК», ПАО «ИНГОК», ОАО «Арселор Миттал Кривой Рог», «ЕВРАЗ Сухая Балка», ПАО «Кривбассжелезорудком», ПАО «Полтавский ГОК», ЧАО «Донецксталь», ОАО «Хайдельберг Цемент Украина» и др.