

# РЕМОНТНАЯ СВАРКА ПРОМЕЖУТОЧНЫХ КОРПУСОВ АВИАДВИГАТЕЛЕЙ ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО МАГНИЕВОГО СПЛАВА МЛ10 С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Академик НАН Украины **Л. М. ЛОБАНОВ**, **Н. А. ПАЩИН**, канд. техн. наук,  
**А. В. ЧЕРКАШИН**, **Г. И. ТКАЧУК**, инженеры, **В. В. САВИЦКИЙ**, **О. Л. МИХОДУЙ**, кандидаты техн. наук,  
**К. В. ШИЯН**, **В. К. ЛЕВЧУК**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),  
**В. В. ЖЫГИНАС**, **А. П. ЛЯЩЕНКО**, инженеры (ГП Завод № 410 Гражданской авиации, г. Киев)

Разработана технология ремонтной сварки повреждений промежуточного корпуса авиадвигателя из магниевого сплава МЛ10, включающая электродинамическую обработку сварных швов с целью снижения уровня остаточных сварочных напряжений. Экспериментально установлено, что обработка практически устраняет остаточные напряжения в шве. Причем при зарядном напряжении до 200 В за рабочую смену оператор электродинамической обработки может выполнить не более 1100 актов электродинамического воздействия, а при напряжении 500 В — не более 100, что полностью удовлетворяет требованиям производственного цикла ремонтной сварки промежуточного корпуса авиадвигателя.

*Ключевые слова:* аргодуговая ремонтная сварка, электродинамическая обработка, магниевый сплав, корпуса авиадвигателей, напряженность магнитного поля, импульсный ток, зарядное напряжение, емкость конденсаторов, сварочные напряжения, эффективность обработки

Развитие современных технологий ремонта авиационной техники связано с поиском новых путей увеличения ресурса работы металлических конструкций из жаропрочных магниевых сплавов, восстановленных ремонтной сваркой. При этом одной из причин уменьшения эксплуатационного ресурса летательных аппаратов являются остаточные сварочные напряжения в ремонтных швах, негативно влияющие на сопротивление усталости, коррозионную стойкость и остаточные деформации конструктивных элементов самолета. Это вызывает необходимость исследования прогрессивных способов регулирования напряженного состояния сварных соединений, одним из которых является обработка импульсами электрического тока [1, 2].

Методом реализации воздействия импульсного тока на металлы является электродинамическая обработка (ЭДО), основанная на инициировании в материале электродинамических сил, возникающих при прохождении в обрабатываемом материале разряда тока [3]. Подробно механизмы электродинамического воздействия на обрабатываемый материал при ЭДО изложены в работе [4].

Одним из конструктивных элементов самолета, при ремонте повреждений которого используется сварка, является промежуточный корпус

авиадвигателя (ПКА). Назначение ПКА — крепление авиадвигателя на крыле самолета и термоизоляция конструктивных элементов планера от термического воздействия работающего двигателя. Внешний вид ПКА в сборе с двигателем Д-36 представлен на рис. 1, а. Условия эксплуатации ПКА определяют высокие требования к характеристикам усталостной и статической прочности конструкции при высоких (до 400 °С) температурах, а также к ее размерной стабильности, определяющей аэродинамические и тяговые характеристики двигателя Д-36. Исходя из этого статическая и усталостная прочность ремонтных сварных соединений ПКА должны соответствовать механическим характеристикам основного металла, а уровень остаточных сварочных напряжений — минимальным. Таким образом, представляется целесообразным оценить возможности ЭДО для снижения уровня остаточных сварочных напряжений в ремонтных швах ПКА.

Целью настоящей работы является разработка технологии ремонтной сварки повреждений ПКА с применением ЭДО.

ПКА представляет собой крупногабаритную литую конструкцию из магниевого сплава МЛ10 (рис. 1, б), которая состоит из наружной 1 и внутренней 2 цилиндрических обечаек, сопряженных между собой ребрами жесткости — стойками 4. Одной из конструктивных особенностей стоек является наличие в них внутренних полостей, по которым циркулирует охлаждающая жидкость, предназначенная для минимизации термического

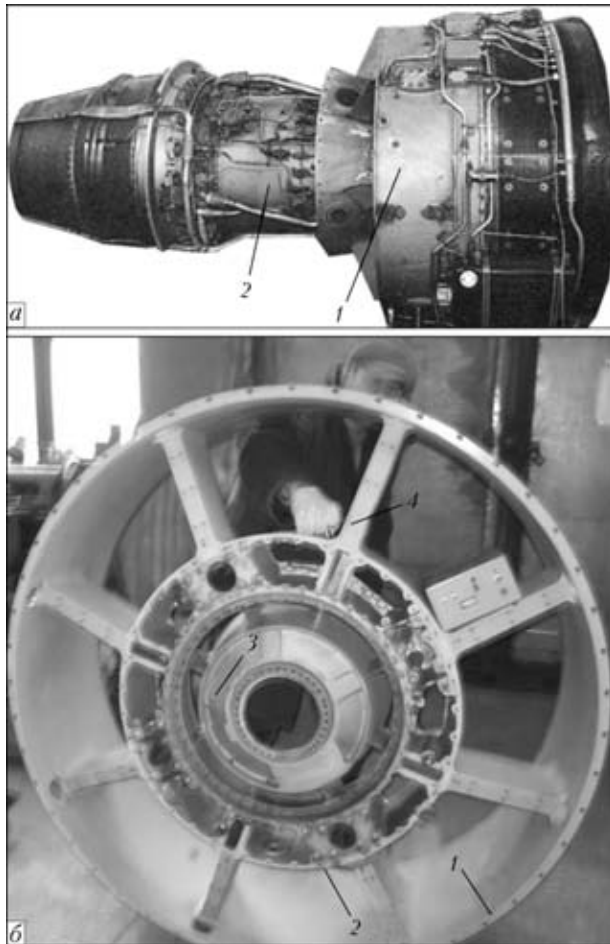


Рис. 1. Внешний вид ПКА (1) в сборе с авиадвигателем Д-36 (2) (а) и ПКА (б): 1–4 — см. в тексте

влияния работающего двигателя на ПКА. Наружная обечайка предназначена для монтажа ПКА на крыле самолета, а внутренняя — для крепления авиационного двигателя 3.

Наиболее характерными повреждениями ПКА (рис. 2), устраняемыми ремонтной сваркой, являются усталостные трещины, нарушающие целостность стоек в местах их сопряжения с наружной и внутренней обечайками (рис. 2, шов № 1, вид А). Реже встречается образование усталостных трещин на наружной поверхности внешней обечайки в зоне усиления под фланец трубопровода охлаждения (рис. 2, шов № 2, разрез А–А) и на усилении под систему крепления ПКА к крылу. Конструктивно узел крепления ПКА к крылу подобен представленному на разрезе А–А. Результатом приведенных эксплуатационных дефектов являются частичная потеря несущей способности конструкции и нарушение герметичности охлаждающих полостей ПКА.

Ремонт повреждений ПКА осуществляли с использованием ручной одно- и многопроходной аргонодуговой сварки неплавящимся электродом (АДС НЭ) в среде защитного газа на следующих режимах:  $U_{д} = 20 \text{ В}$ ,  $v_{св} = 1,5 \text{ мм/с}$ . В качестве защитного газа использовали чистый аргон марки

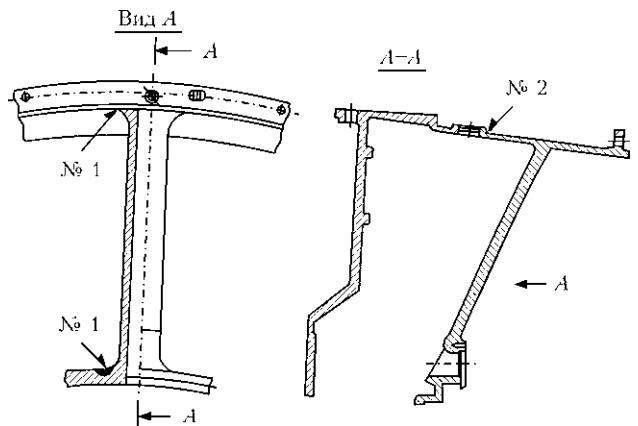


Рис. 2. Схема расположения ремонтных швов при эксплуатационных повреждениях ПКА в зоне сопряжения стойки с внешней и внутренней обечайками (швы № 1) и в зоне крепления трубопровода охлаждения (швы № 2)

А, рекомендуемый для сварки герметичных соединений, к которым относятся швы № 1 и 2 (расход аргона 0,25...0,30 л/с). Ремонт стойки (рис. 2, шов № 1) осуществляли при токе 200...350 А за пять проходов, ремонт усиления под охлаждающую магистраль (рис. 2, шов № 2) — при токе 200...250 А за два прохода. Подготовку соединений под сварку проводили механической зачисткой с обеих сторон ремонтного соединения на ширину 15...30 мм с помощью стальной щетки (диаметр нержавеющей проволоки до 0,2 мм) и шабрением. Временной промежуток между механической зачисткой и сваркой не превышал 24 ч. Использовали присадочные прутки марки МЛ19 диаметром 6 мм, поверхность которых перед сваркой обрабатывали химическим травлением. Разделку кромок трещин выполняли с углом раскрытия 50...70°, с радиусом в корне более 3 мм до остаточной толщины 0,3...0,5 мм. АДС НЭ выполняли с сопутствующим местным подогревом зоны сварки, который реализовывали посредством наложения на основной металл специализированных нагревательных элементов на базе электрических тэнов. Температура нагрева составляла 150...200 °С. Первый проход выполняли на минимальном токе с выходом начального и концевых участков ремонтного шва на основной металл. При этом обеспечивали плавный переход от наплавленного металла к основному с заваркой кратера в режиме плавного гашения дуги. При вынужденной остановке процесса сварки из-за замены присадочного прутка выполняли перекрытие ранее наложенного шва на 20...30 мм. Поверхность перекрытия предварительно зачищали механическим путем.

Наличие остаточных напряжений в ремонтных швах ПКА в ряде случаев вызывает необходимость проведения послесварочной термообработки изделия в крупногабаритных электропечах, что является достаточно энергозатратной операцией.

Применение термообработки необходимо, когда проводится ремонтная сварка более двух поврежденных ПКА. В то же время имеют место случаи, когда восстановлению подлежит единичный дефект незначительной глубины и протяженности. Тогда применение общей термообработки не целесообразно. Практика применения послесварочного местного нагрева ремонтного шва посредством тэнов, используемых для сварки, показала низкую эффективность в результате высокой теплопроводности сплава МЛ10. Применение ЭДО позволяет снизить не только уровень остаточных напряжений в ремонтных швах малой протяженности без использования термообработки, но и заменить ее в перспективе, что снизит себестоимость восстановления ПКА. Следует отметить, что по результатам испытаний на статическое растяжение ЭДО не оказывает отрицательного влияния на механические характеристики ремонтных сварных соединений ПКА.

Влияние ЭДО на распределение остаточных напряжений, возникающих при двухпроходной наплавке шва № 1, изучали на образцах размером 350×200×8 мм. Перед выполнением наплавки по длине сварного шва ручной фрезой проводили надрез длиной, шириной и глубиной соответственно 200, 1,6...2,0 и 8...10 мм с последующей разделкой кромок по методике, изложенной выше. С целью воспроизведения операций ремонтной сварки ПКА по надрезанному участку выполняли двухпроходную сварку на режиме, приведенном выше. При этом геометрические характеристики наплавленного шва соответствовали параметрам ремонтного соединения, выполняемого на ПКА в заводских условиях.

Исследование влияния ЭДО на значение и распределение остаточных напряжений при выполнении шва № 2 проводили на образцах размерами 300×200×8 мм, содержащих элементы усиления под фланец трубопровода охлаждения, представленного на рис. 3 (разрез А–А). Перед наплавкой между бобышками выполняли надрез длиной, шириной и глубиной соответственно 50, 1,6...2,0 и 8...10 мм, имитирующий разрушение, разделку которого выполняли аналогично шву № 1. С целью имитации ремонтной сварки, проводимой при восстановлении повреждения, выполняли однопроходную наплавку длиной 50 мм между бобышками на режиме, указанном выше. После наплавки валика и полного остывания образцов выполняли ЭДО сварных соединений образцов на режимах, представленных в табл. 1.

Обработку сварных соединений выполняли вдоль продольной линии сварного шва в направлении от середины к краям.

Перед выполнением АДС НЭ на поверхности образцов методом электронной спекл-интерферометрии проводили оценку начального уровня на-

пряжений в сплаве МЛ10. После сварки перед выполнением и после ЭДО определяли значения продольной составляющей  $\sigma_{xx}$  остаточных напряжений в зоне ремонтных швов. По результатам сопоставления параметров напряженного состояния до и после ЭДО оценивали эффективность обработки.

Оценка начального напряженного состояния на поверхности образцов сплава МЛ10 до сварки показала, что распределение напряжений на их внешней поверхности имело равномерный характер, а значения  $\sigma_{xx}$  находились в диапазоне 4...6 МПа.

Проводили ЭДО образцов с наплавленными швами № 1 и 2 сериями из пяти токовых разрядов на режимах, соответствующих зарядному напряжению  $U = 200$  и  $500$  В. Обрабатывали участки на поверхности наплавленных валиков, на которые воздействовали импульсами тока с текущим контролем изменения  $\sigma_{xx}$  в зоне ЭДО. Начальные и конечные участки швов длиной 10 мм, в которых значения начальных напряжений минимальны, обрабатывали на режиме № 1, а остальные поверхности валиков — на режиме № 2 из табл. 1.

Начальные значения  $\sigma_{xx}$  в металле однопроходного шва № 2 до и после обработки составляли соответственно 120 и 20 МПа. Начальный уровень  $\sigma_{xx}$  в двухпроходном шве № 1 до обработки был ниже и составлял 87 МПа. Это вызвано местным отпуском наплавленного первым проходом металла шва после выполнения второго прохода. После ЭДО значения  $\sigma_{xx}$  в измеряемой зоне не превышали 6,5 МПа, что сопоставимо с уровнем напряжений в основном металле до наплавки. Изменения значений  $\sigma_{xx}$  в швах № 1 и 2 в зависимости от количества импульсов тока  $n$  представлены на рис. 3, из которого видно, что максимальная эффективность электродинамического воздействия достигается после первого токового разряда ( $n = 1$ ), что позволяет снижать начальные значения  $\sigma_{xx}$  более чем на 50 %.

По результатам экспериментов, проведенных на фрагментах ПКА, можно сделать вывод, что ЭДО ремонтных наплавки в зоне характерных повреждений конструкции позволяет снизить уро-

**Таблица 1. Режимы ЭДО сварных соединений магниевого сплава МЛ10 (емкость накопителя  $C = 6600$  мкФ, скважность разрядов  $t_c = 60$  с)**

Номер режима ЭДО	Напряжение заряда $U$ , В	Ток заряда* $I$ , А	Давление электрода* $P$ , Н	Время разряда* $t_p$ , мс
1	200	1195	2792	1,2
2	500	3080	20461	1,6

\* Методика определения параметров ЭДО изложена в работе [4].

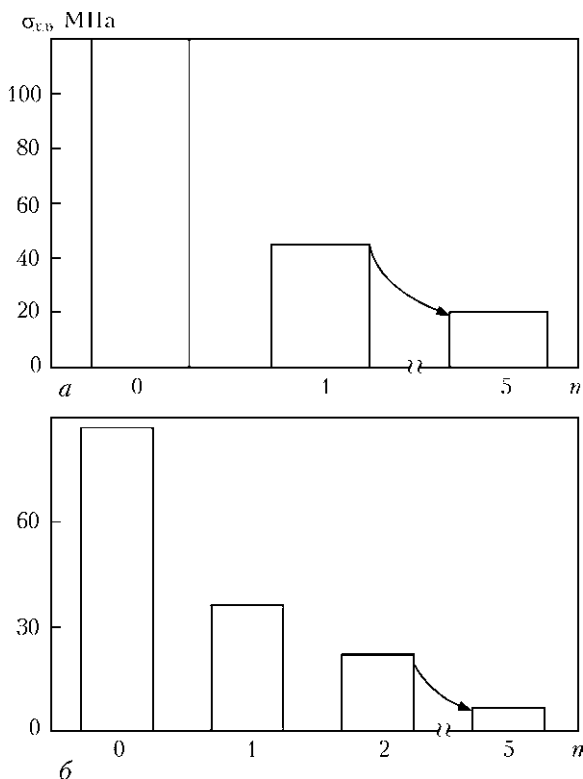


Рис. 3. Изменение значений напряжений  $\sigma_{св}$  в одно- № 1 (а) и двухпроходном № 2 (б) швах в зависимости от количества токовых разрядов  $n$

вень начальных сварочных напряжений практически до уровня основного металла.

Проводили ЭДО натуральных ПКА в местах ремонтной наплавки на участках повреждения стойки (см. рис. 1, б) и усиления под фланец крепления трубопровода охлаждения (рис. 4). ЭДО выполняли на режимах, представленных в табл. 1 в последовательности, соответствующей обработке натуральных образцов. В течение цикла ЭДО регистрировали уровень начальных напряжений до и после наплавки, а также после ЭДО. Анализ текущих измерений параметров напряженного состояния ремонтных наплавки позволяет заключить, что после ЭДО уровень напряженного состояния в ремонтных наплавках близок к уровню основного металла ПКА.

Следует отметить, что ручной инструмент для ЭДО (рис. 4) обеспечивает доступ к ремонтным швам ПКА во всех пространственных положениях. Источник питания для ЭДО, масса которого не превышает 3 кг, является достаточно компактным, что позволяет размещать его на поверхности обрабатываемой конструкции в зоне действия оператора ЭДО. При этом операторы ЭДО подвержены воздействию импульсных электромагнитных полей. Это связано с тем, что инструмент, являющийся источником магнитного излучения, в процессе ЭДО находится в прямом контакте с рукой оператора. При этом показатели напряженности  $H$  магнитного поля (МП) не дол-



Рис. 4. ЭДО ПКА в зоне ремонтной наплавки усиления под фланец крепления трубопровода охлаждения стойки: 1 — усиление под фланец; 2 — ручной инструмент для ЭДО; 3 — источник питания для ЭДО

жны превышать предельно допустимые уровни (ПДУ), регламентируемые «Державними санітарними нормами та правилами при роботі з джерелами електромагнітних полів» (ДСН 3.3.6.096–2002). Определение параметров МП, соответствующих режимам обработки ПКА, является актуальной задачей, связанной с обеспечением мер производственной безопасности операторов ЭДО.

Основным источником МП является плоский индуктор, входящий в состав рабочего инструмента [4]. Амплитудное значение напряженности МП на рабочем месте оператора ЭДО зависит от импульсного тока, размеров и формы разрядного контура, а также расстояния между исполнителем и источником поля. При этом такие источники МП, как разрядный контур и блок емкостных накопителей, ввиду малых значений магнитного излучения не рассматривались.

На основании анализа амплитудно-частотных характеристик импульсов тока, применяемых при ЭДО [4], условия излучения МП при ЭДО относятся к нижнему пределу радиочастотного диапазона. Это позволило выделить диапазон частот от 1 до 10 кГц, в котором необходимо определять уровень МП, соответствующий электродинамическим воздействиям с зарядным напряжением 200...500 В.

Источником излучения МП являлся плоский индуктор, а в качестве зоны, максимально приближенной к источнику МП, выбрали кисть руки

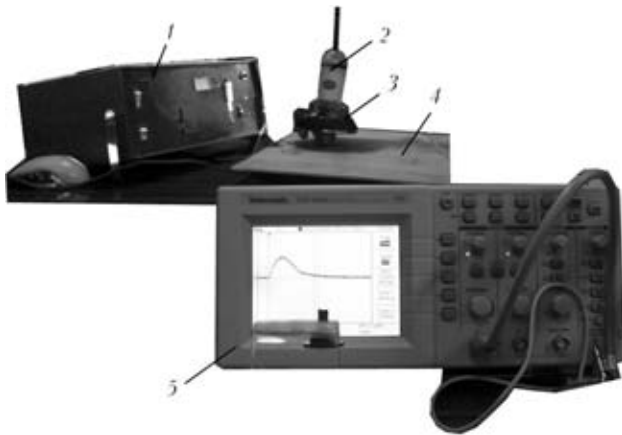


Рис. 5. Комплекс ГФИ-1 для измерения напряженности импульсного МП при ЭДО: 1 — источник питания для ЭДО; 2 — датчик Холла; 3 — плоский индуктор; 4 — образец сварного соединения; 5 — регистратор напряженности МП

оператора, расположенную на расстоянии 70 мм от индуктора.

Для оценки параметров МП использовали пластину с наплавленным валиком из сплава МЛ10.

Напряженность  $H$  импульсного МП определяли с помощью аппаратного комплекса ГФИ-1 (датчик Холла), аналоговый сигнал которого регистрировал осциллограф ГДС-1002 с функцией преобразования Фурье. Аттестованный датчик и осциллограф обеспечивали измерения спектра напряженности МП  $H$  от 8 до 16000 А/м. Амплитудные значения импульсного тока регистрировали с использованием пояса Роговского по методике, изложенной в работе [4]. Исследовали три диапазона частот МП при разряде емкостного накопителя: 0...5, 50...1000 и 1000...10000 Гц. Значения зарядного напряжения емкостного накопителя энергии, при котором проводили измерения напряженности МП  $H$ , принимали равными 200

Таблица 2. Спектральный состав и относительная энергетическая нагрузка МП при ЭДО ПКА (время разряда  $t_p = 0,0022$  с)

Зарядное напряжение $U$ , В	ОЭН МП			Допустимое время разряда $t_{доп}$ , с	Допустимое количество разрядов $n_{доп}$
	Диапазон частот, Гц				
	0...5	50...1000	1000...10000		
200	0,64	4197	1705	2,45	1100
500	8,35	51968	13426	0,22	100

и 500 В, что обеспечивает энергию заряда соответственно 300 и 800 Дж и близко к параметрам ЭДО, используемым при обработке ремонтных швов ПКА. Датчик Холла крепили на внешней поверхности индуктора в зоне расположения руки оператора (рис. 5), что позволило изучать параметры горизонтальной и вертикальной составляющих  $H$  магнитного потока при ЭДО. Регистрацию значений  $H$  проводили в процессе одиночного разряда емкостного накопителя через индуктор, установленный на образец сварного соединения (рис. 5).

Значения импульсного тока  $I$  и вертикальной составляющей напряженности  $H$  импульсного МП при ЭДО с зарядным напряжением 200 и 500 В представлены на рис. 6. Следует отметить, что соотношение значений напряженности  $H$  в вертикальной и горизонтальной плоскостях равно 10/1, что позволяет не учитывать последнюю при расчетах характеристик МП.

Установлено, что амплитудные значения  $I$  при  $U = 200$  и 500 В соответственно равны 1200 и 3000 А, а время протекания тока не превышает 1,4 мс (рис. 6, кривые 1). Амплитудные значения  $H$  при аналогичных значениях  $U$  соответственно равны 10000 и 30000 А/м, а период воздействия МП составляет 2,2 мс (рис. 6, кривые 2). Следует отметить, что при сопоставлении кривых 1 и 2, отражающих соотношение значений импульсного тока и напряженности МП за период токового разряда, видно, что при затухании  $I$  до нулевых значений в измеряемой зоне регистрировали остаточный магнитный поток, период действия которого составляет 0,75...0,9 мс. В момент достижения  $I$  нулевых значений напряженность  $H$  остаточного МП при  $U = 200$  и 500 В составляла соответственно 4000 и 10000 А/м. Наличие МП после прекращения действия тока в разрядном контуре можно объяснить остаточной намагниченностью плоского индуктора, а также протеканием затухающего тока в диске из неферромагнитного материала, входящего в состав рабочего инструмента.

На основании полученных данных провели расчетную оценку относительной энергетической нагрузки (ОЭН) в исследуемом спектре частот МП, которую выполняли по методике [5]:

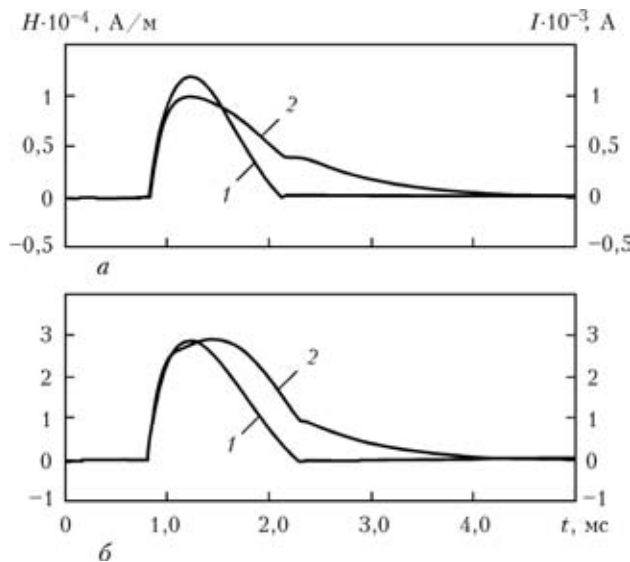


Рис. 6. Амплитудные значения импульсного тока  $I$  (1) и напряженности магнитного поля  $H$  (2) при зарядном напряжении 200 (а) и 500 (б) В



$$OЭН = \frac{H_m}{ПДУ}, \quad (1)$$

где  $H_m$  — напряженность МП, А/м (показания датчика Холла); ПДУ — данные стандарта ДСН 3.3.6.096–2002.

Время работы оператора  $t_o$  задавали восьмичасовой рабочей сменой, что составляет 28 800 с. Полный период действия  $t_p$  импульсного МП, как показано на рис. 6, а, составлял 2,2 мс для всех исследуемых значений зарядного напряжения.

Допустимые значения экспозиции оператора  $t_{доп}$  и количество включений инструмента  $n_{доп}$  в исследуемом МП вычисляли по методике [5]:

$$t_{доп} = \frac{t_o}{2 \sum OЭН}, \quad (2)$$

$$n_{доп} = \frac{t_{доп}}{t_p}. \quad (3)$$

Из данных расчета параметров МП, представленных в табл. 2, можно заключить, что при зарядном напряжении до 200 В за рабочую смену оператор ЭДО может выполнить не более 1100 актов электродинамического воздействия, а при напряжении 500 В — не более 100.

При этом количество электродинамических воздействий на одно изделие не превышает 20...30 разрядов. Таким образом, производственный цикл восстановления ПКА, включающий ЭДО, обеспечивает безопасные условия работы операторов ЭДО при условии заряда емкостного накопителя до максимального значения напряжения в 500 В.

The technology was developed for repair welding of damages in air engine intermediate cases (AEIC) of magnesium alloy ML10. The technology comprises electrodynamic treatment (EDT) of the welds aimed at reducing the level of residual welding stresses. It was experimentally proved that the treatment provides elimination of residual stresses in the welds. At a charging voltage of up to 200 V per shift the EDT operator can perform maximum 1100 electrodynamic actions, and at 500 V — maximum 100 actions, which fully meets requirements of the production cycles of repair welding of AEIC.

## Выводы

1. Разработана технология ремонтной сварки повреждений ПКА из магниевого сплава МЛ10, включающая ЭДО сварных швов с целью снижения уровня остаточных сварочных напряжений.

2. По результатам ЭДО натуральных фрагментов ПКА с характерными повреждениями изделия, восстановленными ремонтной сваркой, установлено, что ЭДО позволяет устранить остаточные напряжения в шве.

3. Разработана экспериментальная методика, на базе которой исследовано влияние зарядного напряжения на напряженность магнитного поля при ЭДО сварных соединений магниевого сплава МЛ10.

4. Установлено, что при зарядном напряжении до 200 В за рабочую смену оператор ЭДО может выполнить не более 1100 актов электродинамического воздействия, а при напряжении 500 В — не более 100, что обеспечивает производственный цикл ремонтной сварки ПКА из магниевого сплава МЛ10.

1. Степанов Г. В., Бабуцкий А. И. Моделирование релаксации напряжений при действии импульсного электрического тока высокой плотности // Пробл. прочности. — 2007. — № 2. — С. 113–120.
2. Антонов Ю. А., Рагозин Ю. И. Импульсный метод снятия остаточных напряжений // Физ. и хим. обработки материалов. — 2001. — № 3. — С. 91–95.
3. Лобанов Л. М., Пащин Н. А., Логинов В. П. Влияние электродинамической обработки на напряженное состояние сварных соединений алюминиевого сплава АМг6 // Автомат. сварка. — 2007. — № 6. — С. 11–13.
4. Эффективность электродинамической обработки алюминиевого сплава АМг6 и его сварных соединений / Л. М. Лобанов, Н. А. Пащин, А. В. Черкашин и др. // Там же. — 2012. — № 1. — С. 3–7.
5. Левченко О. Г. Охорона праці в зварювальному виробництві. — К.: Основа, 2010. — 240 с.

Поступила в редакцию 20.07.2012