

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ С АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ИМПУЛЬСОВ ТОКА ДЛЯ ПРОДЛЕНИЯ РЕСУРСА АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ЛЕГКИХ СПЛАВОВ*

Л. М. ЛОБАНОВ¹, Н. А. ПАЩИН¹, О. Л. МИХОДУЙ¹, А. В. ЧЕРКАШИН¹,
А. В. ЗАРУЦКИЙ², И. П. КОНДРАТЕНКО³

¹ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Нац. аэрокосмический ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». г. Харьков, ул. Чкалова, 17

³Институт электродинамики НАН Украины. 03057, г. Киев, просп. Победы, 56

Разработан и изготовлен генератор импульсного электрического тока (ИЭТ) нового поколения с управляемыми амплитудно-частотными характеристиками ИЭТ для электродинамической обработки (ЭДО) тонколистовых металлических конструкций. Применение нового класса оборудования позволяет существенно расширить возможности электродинамических воздействий за счет управляемой синхронизации динамической и электроимпульсной составляющих ЭДО. Исследовано влияние ЭДО на снижение уровня остаточных сварочных напряжений в сварных соединениях из магниевого сплава МЛ10. В качестве исследуемых образцов использовали фрагменты оболочки промежуточного корпуса авиадвигателя Д-36, содержащие ремонтные сварные швы. Установлено, что ЭДО позволяет снижать уровень остаточных сварочных напряжений от 120 до –40 МПа, обеспечивая их переход от растягивающих к сжимающим. Показано, что местное пластическое деформирование с применением ЭДО образцов стрингера крыла самолета из алюминиевого сплава Д16 в зоне технологических отверстий повышает сопротивление замедленному разрушению в 1,6...2,5 раза. Библиогр. 9, табл. 2, рис. 14.

Ключевые слова: электродинамическая обработка, импульс электрического тока, авиационные конструкции, остаточные напряжения, ремонтная сварка, корпус авиадвигателя, стрингер, технологическое отверстие

При ремонте технологических и эксплуатационных дефектов в авиационных конструкциях из магниевых сплавов используется аргонодуговая сварка неплавящимся электродом [1]. Одной из причин снижения эксплуатационных характеристик изделий являются остаточные сварочные напряжения в ремонтных швах, понижающие ресурс летательных аппаратов. Наличие остаточных напряжений вызывает необходимость проведения послесварочной термообработки конструкций в крупногабаритных электропечах, что требует значительных энергетических затрат и повышает себестоимость ремонтных мероприятий. При этом термообработка полностью не исключает вероятность появления усталостных трещин в ремонтных швах. Это стимулирует поиск и разработку альтернативных методов снижения уровня остаточных напряжений в сварных соединениях, одним из которых является электродинамическая обработка (ЭДО) [2, 3], основанная на одновременном воздействии на изделие или сварной шов импульсного тока и динамического давления токопроводящего электрода. Применение ЭДО снижает уровень остаточных напряжений в ремонтных

швах, что в ряде случаев может являться альтернативой термообработке. Это позволяет снизить себестоимость ремонтных технологий при восстановлении элементов авиационных конструкций.

В то же время в современных технологиях авиационного строительства актуальной является проблема упрочнения технологических отверстий в силовых элементах планера из алюминиевых сплавов с целью повышения их сопротивления замедленному разрушению [4]. Современные механические методы упрочнения отверстий, основанные на поверхностном пластическом деформировании, имеют ряд недостатков, которые могут быть устранены при использовании электродинамических воздействий.

Целью настоящей работы является исследование влияния ЭДО на регулирование уровня остаточных сварочных и технологических напряжений в элементах авиационных конструкций из легких сплавов.

Аппаратной основой для ЭДО конструкционных материалов и сварных соединений являются источник импульсного тока и электродное устройство, обеспечивающее прохождение тока через

* По материалам проекта, выполненного в рамках целевой комплексной программы НАН Украины «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» (2013–2015 гг.).

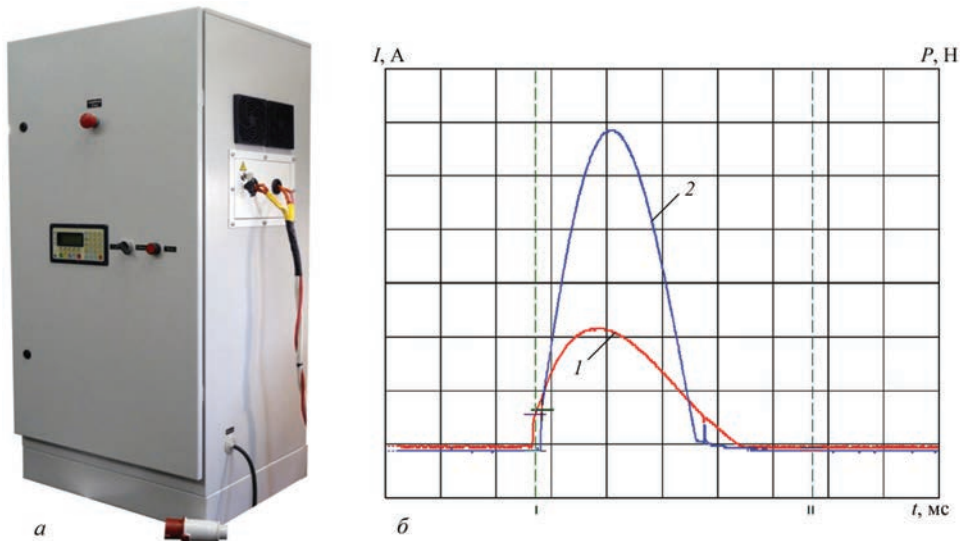


Рис. 1. Источник импульсного тока «Искра-4» для ЭДО конструкционных материалов: *a* — внешний вид; *б* — осциллограммы токовых импульсов динамического давления *I* и прямого пропускания тока *2* через обрабатываемый металл

зону обработки и одновременно контролируемое силовое воздействие на обрабатываемую поверхность. Обработка сварных соединений из легких сплавов осуществлялась при помощи разработанного и изготовленного в Институте электродинамики НАН Украины источника импульсного тока второго поколения «Искра-4» (рис. 1).

Генератор импульсов тока «Искра-4», внешний вид которого представлен на рис. 1, *a*, включает два независимых канала, каждый из которых содержит выпрямитель, зарядный инвертор, емкостной накопитель и управляемые разрядные цепи.

Первый канал генератора импульсов формирует токовый импульс *I* (рис. 1, *б*), который предназначен для создания динамического воздействия на зону обработки и подается на катушку индуктивности в электродном устройстве (ЭУ), являющимся рабочим инструментом ЭДО (рис. 2). Второй канал генератора импульсов формирует

токовый импульс *2* (рис. 1, *б*), согласованный по длительности с продолжительностью динамического давления (токовый импульс *I*) на зону обработки. Импульс тока второго канала подается непосредственно на электрод ЭУ и передается в обрабатываемое изделие. Электрическая цепь второго канала генератора замыкается через контактный кабель, который закрепляется на изделии.

Конструктивно ЭУ (рис. 2, *a*) состоит из электрода *1*, выполненного из тугоплавкого проводящего материала, закрепленного в обойме *3* фиксирующими устройствами *2* и *20*. Обойма соединена с диском из неферромагнитного материала *16*, который опирается на каркас *б* с размещенной в нем катушкой индуктивности *14* с встроенным плоским индуктором *15*. Катушка закреплена на каркасе винтами *11*. Нижняя стенка каркаса *4*, закрепленная винтами *5*, выполняет роль немагнитной подкладки под диском и демпфером *17*. Верхняя

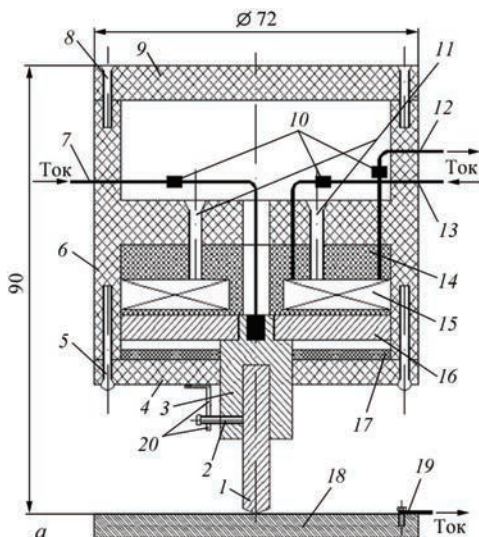


Рис. 2. Электродное устройство для ЭДО с независимыми каналами токовых импульсов: *a* — конструктивная схема (позиции указаны в тексте); *б* — внешний вид

(защитная) крышка 9 каркаса закреплена в корпусе ЭУ винтами 8. Подвод токового импульса 2 (рис. 1, б) от источника питания осуществляется проводом 7. Замыкание разрядного контура, обеспечивающего подвод токового импульса 2 к обрабатываемому металлу 18 осуществляется клеммой 19. Токовый импульс 1 (рис. 1, б) проходит через катушку по проводам 12, 13. Подводы 7, 12, 13 ЭУ соединены с внешними цепями контактными клеммами 10. Внешний вид ЭУ представлен на рис. 2, б.

Работа ЭУ осуществляется следующим образом. При протекании импульсного тока через катушку возбуждается магнитное поле, инициирующее в диске вихревые токи. Взаимодействие наведенных токов с возбужденным их магнитным полем приводит к возникновению электродинамической силы. При этом в первой фазе воздействия электродинамическая сила прижимает электрод к обрабатываемому материалу, а во второй направление силового воздействия изменяется на противоположное — электрод отталкивается от обрабатываемого материала. Очевидно, что воздействие импульсного тока на зону обработки по длительности не должно превышать длительность прижимающего усилия, как показано на рис. 1, б.

Таким образом, конструкция источника импульсного тока подчинена требованиям согласованной длительности импульсов и исключения электроискровых явлений в зоне обработки. Управление каналами в генераторе импульсов «Искра-4» реализовано на трех микроконтроллерах и программируемой логике, позволяющих регулировать параметры импульсов тока (амплитуду), задержку одного импульса по отношению к другому, визуализировать параметры импульсов на световом дисплее. Длительность импульсов по обоим каналам определяется параметрами электрической цепи разрядных контуров и может изменяться дискретно путем добавления/уменьшения индуктивности контуров. Дополнительные индуктивности устанавливаются с наружной стороны корпуса генератора, для чего предусмотрены контактные группы на боковой поверхности генератора.

В целом основные технические характеристики двухканального источника импульсных токов следующие:

- электропитание — трехфазная сеть 380 В с нулевым проводом;
- гальваническая развязка вход-выход — трансформаторная 2,5 кВ;
- полная установленная мощность — 7 кВА;
- количество каналов — 2;
- амплитуда импульсов тока в каждом канале — до 4,5 кА (0...4,5 кА);



Рис. 3. Внешний вид промежуточного корпуса авиадвигателя из жаропрочного магниевых сплава МЛ10

- длительность импульса тока по каналу 1 — 680 мкс;
- длительность импульса тока по каналу 2 — 550 мкс;
- фазовый сдвиг импульсов тока по каналам — 10...100 мкс;
- интервал следования импульсов — 0,8...1,0 с;
- режимы работы — ручной/автоматический.

Проводили исследования влияния ЭДО на регулирование остаточных напряжений в сварных соединениях магниевых сплава. С этой целью использовали образцы, которые являлись фрагментами наружной цилиндрической оболочки промежуточного корпуса авиационного двигателя Д-36 диаметром 1,5 м [2, 3], изготовленной из жаропрочного магниевых сплава МЛ10 (рис. 3).

Геометрические характеристики образцов (рис. 4), представлявших собой фрагменты цилиндрической оболочки размерами 330×200×8 мм и стрелой продольного прогиба 20 мм, позволяли моделировать напряженное состояние в окрестности ремонтных сварных швов корпуса.

На образцах выполняли сварные швы, аналогичные используемым при ремонте корпуса, а также их ЭДО с текущим контролем значений остаточных напряжений после сварки и обработки.

На наружную поверхность образцов наносили надрезы длиной, шириной и глубиной соответственно 200, 2 и 4 мм, имитирующие повреждение корпуса [3]. По надрезанному участку ручной аргодуговой сваркой выполняли двухпроходный шов с использованием скандийсодержащего присадочного материала на режиме, который представлен в табл. 1. Внешний вид образца со сварным швом представлен на рис. 4.

Оценку напряженного состояния наружной поверхности образцов сварных соединений проводили бесконтактным методом электронной спекл-интерферометрии, основанном на измерении перемещений при упругой разгрузке объема

Таблица 1. Режим сварки ремонтных соединений промежуточного корпуса из сплава МЛ10

Номер прохода	Напряжение дуги U , В	Ток сварки I , А	Скорость сварки v , мм/с	Расход Аг, л/с
1	20	250	1,7	0,25
2	20	350	1,7	0,35

металла в исследуемых точках на поверхности образца, вызванной сверлением несквозных отверстий [5]. Применяли аппаратный комплекс (рис. 5), в котором исследуемый участок образца 4, закрепленного на сборочной плите 5, освещали лучом лазера, входящего в состав оптического интерферометра 3 под одним и тем же углом с двух направлений и таким образом определяли компоненты вектора перемещений в плоскости. Данные измерений перемещений после сварки и ЭДО регистрировали и обрабатывали с помощью специализированных блоков 1 и 2, входящих в состав комплекса.

После сварки и ЭДО регистрировали изменения напряженного состояния сварных соединений в окрестности ремонтных швов. По результатам сравнения значений напряжений до и после обработки определяли эффективность процесса ЭДО.

С использованием генератора импульсов «Искра 4» выполняли ЭДО сварных соединений образцов серий импульсов электрического тока (ИЭТ). При этом амплитудные значения импульсного тока и динамического давления достигали соответственно 3080 А и 20460 Н, а сдвиг фаз между ними составлял 0,1 мс, что обеспечивало синхронизацию электроимпульсной и динамической составляющих электродинамического воздействия.

Последовательность выполнения ЭДО и схемы расположения измеряемых участков поверхности исследуемых образцов представлены на рис. 6.

Перед выполнением ЭДО регистрировали начальное напряженное состояние образца вдоль линий $A-A$ и $B-B$ (рис. 6). Вдоль оси 0-0 на участке поверхности наплавленного металла сварного шва длиной 100 мм выполняли ЭДО № 1 серий из 20 ИЭТ в направлении «от центра к краям», как показано на рис. 6, после завершения которой регистрировали изменение напряженного состояния вдоль линий $A-A$ и $B-B$. Затем выполняли ЭДО № 2 основного металла на расстоянии 12 мм от



Рис. 4. Образец ремонтного сварного соединения из магниевого сплава МЛ10

линии 0-0 серий из 20 ИЭТ в направлении «на проход» с последующим контролем остаточных напряжений вдоль линии $B-B$.

Эпюры продольной компоненты плоского напряженного состояния σ_x до обработки, а также после ЭДО № 1 и 2 представлены на рис. 7.

На рис. 7, а показано распределение σ_x вдоль линии $A-A$ (рис. 6) после сварки (кривая 1) и ЭДО №1 (кривая 2), из которого можно видеть, что до обработки имеет место монотонное нарастание растягивающих σ_x вдоль линии шва, а их средние значения составляют 120 МПа. После ЭДО № 1 характер распределения σ_x вдоль линии $A-A$ существенно не изменился, но наблюдается понижение их средних значений до 70 МПа.

Распределение σ_x на наружной поверхности образца после сварки вдоль линии $B-B$, перпендикулярной линии шва (рис. 6), представлено на рис. 7, б, (кривая 1). Неуравновешенность эпюры σ_x связана со значительной изгибной составляющей напряжений на поверхности образца, вызванной его исходной кривизной. При этом максимальное значение растягивающих σ_x в измеряемом сечении достигает предела текучести сплава МЛ10 — $\sigma_{0,2} = 120$ МПа на расстоянии 12 мм от центра шва.

Влияние электродинамических воздействий на напряженное состояние сварного соединения подтверждает распределение σ_x после ЭДО № 1 вдоль линии $B-B$, показанное на рис. 7, б (кривая 2), из которого видно, что на обработанном участке центра шва σ_x изменили знак от растягивающих к сжимающим, значения которых достигли -40 МПа. На участках поверхности, соответствующих максимальным значениям $\sigma_x = 120$ МПа, после ЭДО № 1 σ_x снижались до 40 МПа, что со-

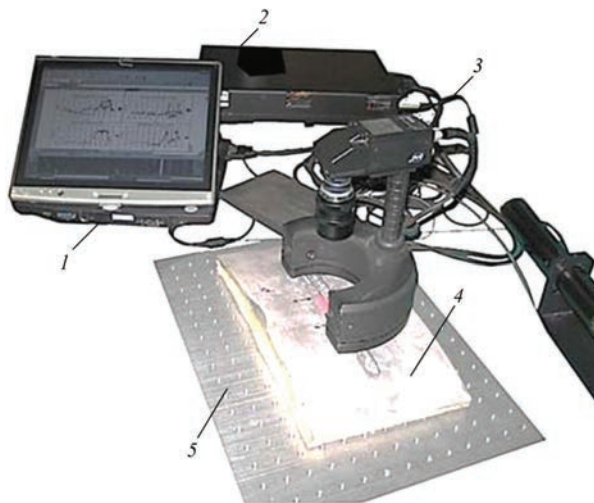


Рис. 5. Общий вид аппаратного комплекса для регистрации напряженного состояния образцов сплава МЛ10 методом спекл-интерферометрии: 1 — блок регистрации сигнала; 2 — блок обработки оптического сигнала; 3 — оптический интерферометр; 4 — образец; 5 — сборочная плита

ставляет 35 % их начальных значений. В целом, можно заключить, что в результате ЭДО достигается снижение остаточных сварочных напряжений с их переходом от растягивающих к сжимающим в зоне обработки (рис. 7, б, кривые 1, 2).

Распределение σ_x вдоль линии Б-Б после ЭДО № 2 представлено на рис. 7, б (кривая 3), из которого можно видеть, что после ЭДО № 2 имеет место формирование области сжимающих напряжений, локализованной на участке электродинамических воздействий, где значения σ_x понижаются до -20 МПа при неизменных значениях σ_x в центре шва, равных -40 МПа. Меньшую эффективность электродинамического воздействия при ЭДО № 2 основного металла по сравнению с ЭДО № 1 металла шва можно объяснить большей пластичностью литой структуры последнего. Так, относительное удлинение δ сплава МЛ10 = 3,6 %, а литой структуры сварного шва, выполненного с использованием скандийсодержащего присадочного материала, достигает более 6 % [1]. При этом, согласно данным работы [6], эффективность ЭДО повышается с увеличением пластичности обрабатываемого материала.

Характер распределения σ_x в основном металле после ЭДО № 2 близок наблюдаемому после ЭДО № 1 в центре шва. На участке кривой 3 между зонами ЭДО № 1 и 2, имеет место понижение σ_x до 60 МПа, составляющее только 50 % значения σ_x после сварки (перед выполнением ЭДО № 1 и № 2), что подтверждает локализованный характер электродинамических воздействий. Исходя из сказанного, определение оптимального расстояния L между зонами электродинамических воздействий, обеспечивающего гарантированное перекрытие обработанных участков, является важным аспектом при разработке технологии ЭДО. С целью определения оптимального значения L при заданных электрических параметрах процесса, на образце сварного соединения (рис. 4) выполняли ЭДО № 1 металла шва, изменяя значение L между зонами ЭДО. После серии ИЭТ регистрировали снижение начальных σ_x в результате обработки — $\Delta\sigma$, определяя эффективность ЭДО отношением ($\Delta\sigma/\sigma_x$).

Регистрацию значений $\Delta\sigma$ проводили по линии шва на расстоянии между зонами ЭДО, равному $L/2$. Максимальное значение L задавали равным 20 мм, последовательно снижая его до 5 мм. Зависимость $\Delta\sigma/\sigma_x = f(L)$ представлена на рис. 8, из которого можно видеть, что при значении $L \geq 20$ мм эффективность ЭДО близка к нулю, что свидетельствует об отсутствии перекрытия зон электродинамического воздействия при заданном режиме ЭДО. При $L = 15, 12$ и 8 мм значения $\Delta\sigma/\sigma_x$ достигали соответственно 10, 21 и 38 %, что свидетельствует о частичном перекрытии зон ЭДО.

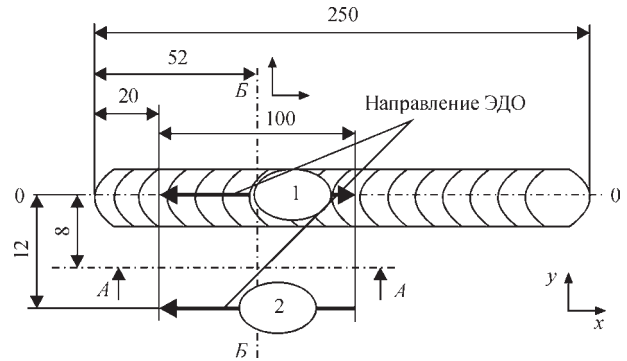


Рис. 6. Последовательность выполнения ЭДО и схемы расположения измеряемых участков поверхности образцов сплава МЛ10, где А-А и Б-Б — линии измерений; 1...2 — последовательность ЭДО

что свидетельствует о частичном перекрытии зон ЭДО. При снижении L до 5 мм и менее показатели эффективности стабилизировались на значении $\Delta\sigma/\sigma_x = 60$ %, что свидетельствует о том, что при L , не превышающем 5 мм, имеет место гарантированное перекрытие зон электродинамического воздействия.

Таким образом, при заданных энергетических параметрах электродинамических воздействий ЭДО сплава МЛ10 целесообразно проводить с «шагом», не превышающим 5 мм.

Представленные результаты исследований показали, что с помощью ЭДО можно регулировать

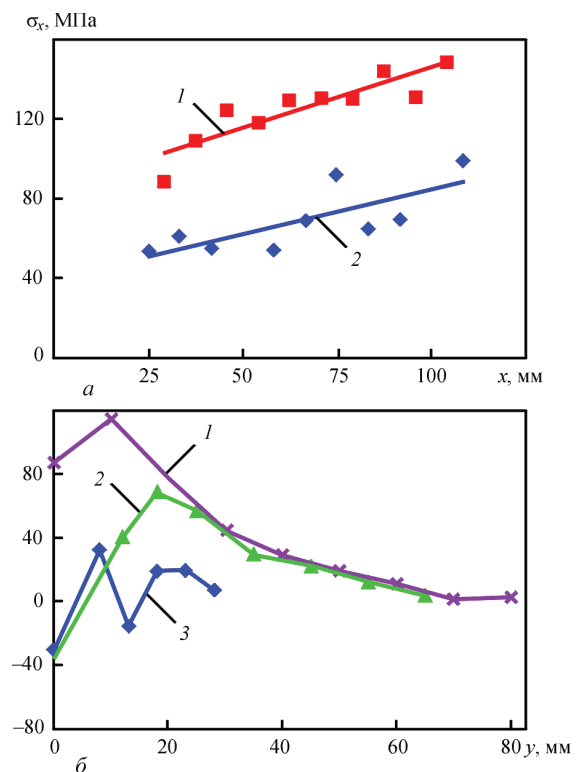


Рис. 7. Распределение напряжений σ_x в образце сварного соединения из сплава МЛ10 (рис. 2): а — кривая 1 — σ_x до ЭДО вдоль А-А (рис. 6, а), 2 — σ_x вдоль А-А после ЭДО № 1, где значение $X = 0$ соответствует точке начала шва на рис. 6; б — 1 — σ_x до ЭДО вдоль Б-Б, 2 — σ_x после ЭДО № 1 вдоль Б-Б, 3 — σ_x после ЭДО № 1 и 2 вдоль Б-Б

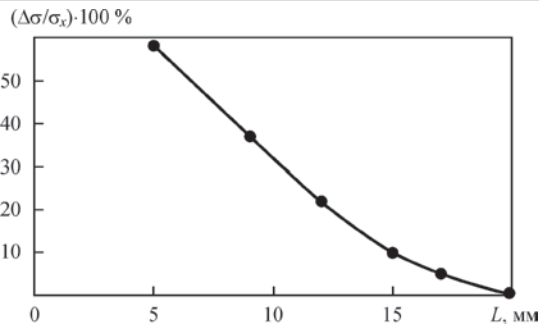


Рис. 8. Влияние расстояния L между зонами ЭДО на эффективность обработки $\Delta\sigma/\sigma_x$

уровень остаточных напряжений на поверхности сварных соединений из сплава МЛ10. После ЭДО значения остаточных сварочных напряжений существенно понижаются. Применение электродинамических воздействий может положительно сказаться на характеристиках усталостной прочности сварных соединений из магниевого сплава МЛ10 при циклических нагрузках, что позволит повысить эксплуатационный ресурс авиационных конструкций из магниевых сплавов [2].

Конкурентоспособность авиационных изделий, особенно пассажирских и транспортных самолетов, в значительной степени определяется их оптимальными весовыми характеристиками. Так, масса конструкции при заданном взлетном весе и проектном ресурсе должна быть минимальной.

Стремление к достижению ресурса в 60...80 тыс. летных часов при условии минимизации массы конструкции требует внедрения в производство новых материалов и различных методов повышения усталостной долговечности как регулярных зон, так и зон конструктивной нерегулярности.

Для уменьшения количества авиационного топлива, которое не вырабатывается и не сливается, в стрингерах нижних панелей крыла (рис. 9, а) выполняют отверстия для его перетекания (рис. 9, б). Эксплуатация и наземные испытания самолетов показывают, что такие отверстия являются очагами образования усталостных трещин и могут привести к преждевременному разрушению конструкции крыла. С этой проблемой столкну-

лись на этапе ресурсных испытаний ближнемагистрального пассажирского самолета SSJ-100, многоцелевого самолета Бе-200 и др. [4].

Для повышения выносливости нижних панелей крыла самолета в зоне отверстий для перетекания топлива используют различные технологические приемы, большинство из которых базируется на местном глубоком пластическом деформировании (МГПД) в зоне отверстия. К таким методам относятся барьерное обжатие и дорнование, применяемые как раздельно, так и совместно, основанные на локальном деформировании материала и создании остаточных напряжений сжатия в зоне повышенной концентрации [7].

Барьерное обжатие заключается во вдавливании на некотором расстоянии от отверстия цилиндрического пуансона заданного профиля, в результате чего в области отверстия образуются поля сжимающих остаточных напряжений, повышающие его долговечность (рис. 10).

Дорнование заключается в протяжке с натягом через отверстие специализированного цилиндрического инструмента–дорна, приводящей к выдавливанию части материала на поверхность детали, интенсивному пластическому деформированию отверстия и, как следствие, образованию сжимающих напряжений.

Несмотря на высокую эффективность данных методов МГПД, повышающих усталостную долговечность отверстий в диапазоне от 1,5 до 10 раз [4, 7] в зависимости от материала и толщины стрингера, им присущи определенные недостатки. Так, оборудование для реализации методов МГПД является достаточно габаритным [4], а технологический цикл обработки одного отверстия занимает достаточно продолжительное время.

Перспективным представляется использование ЭДО для реализации МГПД, основанное на нормальном индентировании профилированного пуансона в зоне отверстия при электродинамическом воздействии ИЭТ. Преимуществами ЭДО по сравнению с традиционными методами МГПД является высокая мобильность позиционирования рабочего инструмента, что позволяет осуществ-

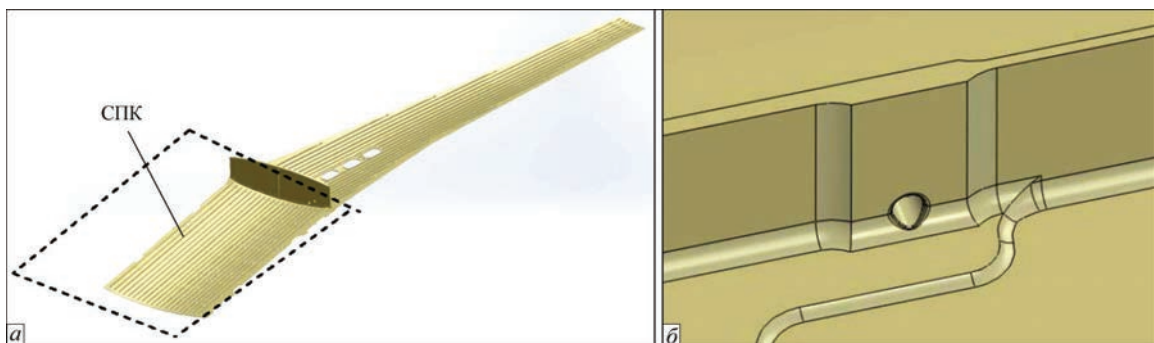


Рис. 9. Внешний вид нижней панели крыла самолета: а — общий вид стрингерной панели крыла (СПК); б — отверстие для перетекания топлива в стрингере

влять обработку отверстий в различных пространственных положениях, в том числе и на эксплуатируемых авиационных конструкциях. При этом время обработки одного отверстия (без учета установки инструмента) по сравнению с МГПД во много раз меньше.

Исследовали различные схемы МГПД методом ЭДО (МГПД ЭДО), направленные на создание области сжимающих напряжений в зоне отверстия, а также пластического деформирования его поверхности (рис. 11).

Схема разрядного контура для МГПД ЭДО представлена на рис. 11, а. Опираемый на жесткое основание стрингер 2 помещали между пуансоном 1 и матрицей 3. Пуансон жестко связан с диском 6 из неферромагнитного материала, являющимся подложкой для плоского индуктора 5. При запуске разрядного цикла конденсатора С контактором К, между индуктором и диском индуцируется электродинамическая сила, стремящаяся оттолкнуть их друг от друга, вектор которой направлен по нормали к плоскости стрингера. Воздействие электродинамической силы на пуансон и матрицу инициирует их нормальное внедрение в обрабатываемый материал, обеспечивая тем самым МГПД в зоне отверстия.

Учитывая особенности традиционных схем, описанных выше [4, 7], электродинамическое воздействие использовали как силовой фактор, обеспечивающий динамическое внедрение рабочего инструмента в обрабатываемый металл. Предложены три схемы МГПД ЭДО, такие как ЭДО-дорнование (рис. 11, б), совместное ЭДО-дорнование-обжатие (рис. 11, в), ЭДО-обжатие (рис. 11, г).

Отличием ЭДО-дорнования от традиционного является использование, вместо протягиваемого через отверстие дорна, цилиндрических пуансона 1 и матрицы 3, рабочие поверхности которых выполнены в виде усеченных конусов (рис. 11, б). Электродинамическое воздействие инструментов на обрабатываемый металл обеспечивает МГПД поверхности отверстия стрингера 2. При этом интенсивность пластического деформирования можно регулировать изменением уровня запасенной энергии и количества ИЭТ.

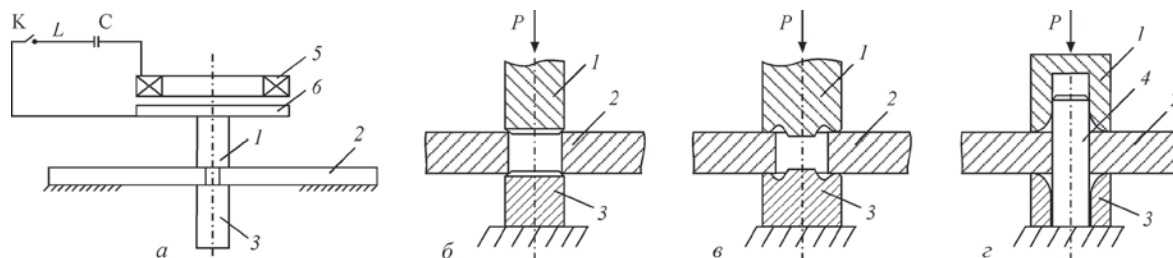


Рис. 11. ЭДО технологических отверстий: а — схема разрядного контура для МГПД ЭДО технологических отверстий; б — ЭДО-дорнование; в — совместное ЭДО-дорнование-обжатие; г — ЭДО-обжатие; 1 — пуансон; 2 — стрингер с отверстием; 3 — матрица; 4 — направляющая втулка; 5 — индуктор; 6 — диск; К — контактор; С — конденсатор; P — электродинамическое воздействие



Рис. 10. Стрингер нижней панели крыла с системой из трех отверстий, упрочненных барьерным обжатием (БО), контур которого указан стрелкой

Совместное ЭДО-дорнование-обжатие (рис. 11, в) является развитием ЭДО-дорнования, где профилированные пуансон 1 и матрица 3, кроме МГПД собственно отверстия, обеспечивают обжатие металла на поверхности стрингера за зоной отверстия. При этом конусные части инструмента, внедряемые в обрабатываемую поверхность в процессе МГПД, обеспечивают центровку пуансона и матрицы относительно кромки отверстия.

При ЭДО-обжатии (рис. 11, г) центровка пуансона 1 и матрицы 3 относительно отверстия в стрингере 2 осуществляется посредством цилиндрической направляющей втулки 4.

Исследования эффективности различных схем МГПД ЭДО проводили на образцах алюминиевого сплава Д16 (рис. 12), используемого в авиационной при изготовлении стрингерных панелей крыла самолета. Геометрические характеристики образцов показаны на рис. 12, а.

Образцы обрабатывали при трех описанных схемах МГПД ЭДО на режиме, соответствующем уровню запасенной энергии электродинамического воздействия не более 800 Дж сериями от 5 до 15 ИЭТ. Количество ИЭТ в цикле МГПД ЭДО определялось типом используемого инструмента. Так, минимальное количество ИЭТ, равное 5, соответствовало ЭДО-дорнованию (рис. 11, б), а равное 15 — совместному ЭДО-дорнованию-обжатию (рис. 11, в).

После обработки зоны отверстий регистрировали уровень остаточных напряжений сжатия σ в зоне предполагаемого распространения усталост-

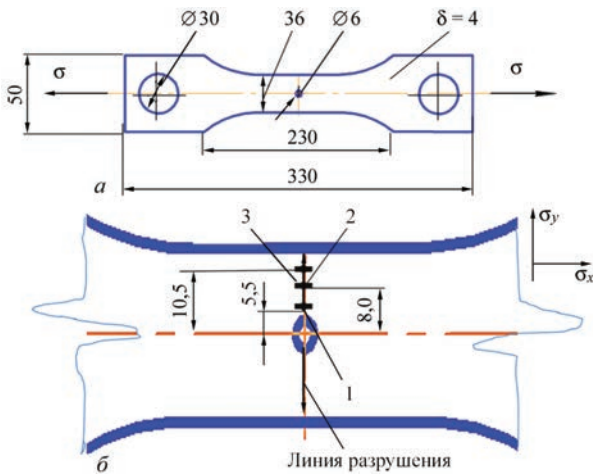


Рис. 12. Внешний вид образца стрингера с технологическим отверстием диаметром 6 мм из сплава Д16 для испытаний на сопротивление усталостному разрушению: *a* — геометрические характеристики образца (σ — направление прикладываемой нагрузки); *б* — зоны контроля остаточных напряжений (1...3 — измеряемые точки)

ной трещины (в точках 1–3), указанной стрелками на рис. 12, *б*, где также показаны направления компонент σ_x и σ_y . Для оценки напряженного состояния использовали неразрушающий метод приповерхностных акустических волн [8], что позволяло сохранять целостность образцов для последующих механических испытаний на сопротивление замедленному разрушению. Максимальное значение сжимающих σ_x в точке 1 достигало –80 МПа, 2 — –40 и 3 — –105 МПа, а σ_y — в точках 1 и 2 — –95 МПа, 3 — –120 МПа.

Испытания образцов проводили при мягком нагружении с текущей регистрацией количества циклов N до разрушения по отнулевому циклу нагрузки растяжением $\sigma_{max} = 200...203$ МПа. Значения

N получены для свободного отверстия, а $N_{\text{ЭДО}}$ — для обработанных. Испытания, результаты которых представлены в табл. 2, выполняли на установке, показанной на рис. 13.

Зависимость $\sigma_{max} = f(N)$ в логарифмических координатах для различных схем МГПД ЭДО представлена на рис. 14, где также показана усталостная кривая 1 для образцов со свободным отверстием (без МГПД ЭДО).

Анализируя данные табл. 2 и рис. 14, можно видеть, что МГПД ЭДО, реализуемые на основе ЭДО-дорнования (строки 2, 3) и ЭДО-дорнования-обжатия (4), повышают сопротивление замедленному разрушению образцов в зоне отверстия при $\sigma_{max} \sim 200$ МПа, определяемое отношением $N_{\text{ЭДО}}/N$, в 1,6 раза, а ЭДО-обжатие (5, 6) — в 2,5 раза.

На основании приведенных данных можно заключить, что предлагаемые схемы МГПД ЭДО позволяют повысить сопротивление разрушению технологического отверстия и учитывая возможности метода, такие как компактность и быстродействие оборудования, а также мобильность позиционирования рабочего инструмента, представляются перспективными для применения в производстве.

В то же время существуют возможности для повышения эффективности МГПД ЭДО, базируемые на расчетно-экспериментальных оценках, например [9]. Так, оптимизация формы рабочих конусов пуансона и матрицы для предлагаемых схем обработки, учитывающая скорость и величину динамического нагружения при нормальном внедрении инструмента в обрабатываемый материал, позволит обеспечить параметры напряженно-деформированного состояния металла в зоне отвер-

Таблица 2. Результаты испытаний образцов сплава Д16 с отверстием диаметром 6 мм после МГПД

Номер п/п	Схема МГПД ЭДО	Номер образца	σ_{max} , МПа	N^*	$N_{\text{ЭДО}}$	$N_{\text{ЭДО}}/N^*$
1	-	Свободное отверстие	202	11000	-	-
2	ЭДО-дорнование	1	203	-	19000	1,72
3		1*	202	-	16000	1,45
4	ЭДО-дорнование-обжатие	2*	203	-	17500	1,6
5	ЭДО-обжатие	3	201	-	27000	2,45
6		3*	200	-	28000	2,54

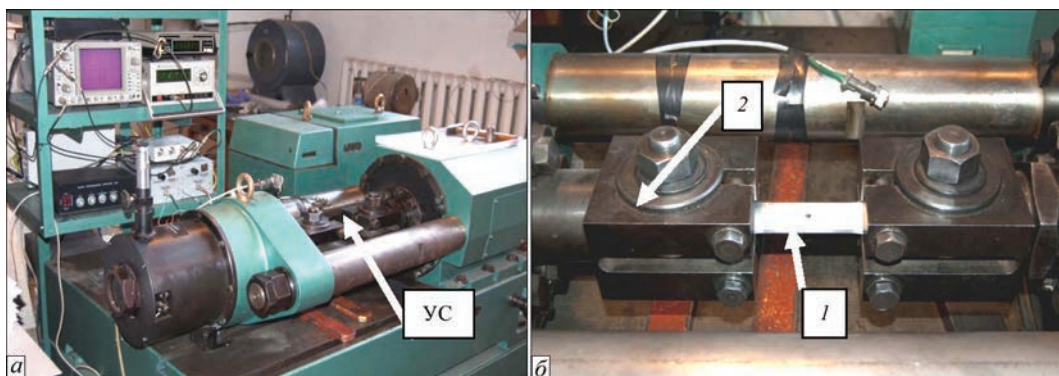


Рис. 13. Установка для усталостных испытаний образцов: *a* — общий вид (УС — устройство силовонагружения); *б* — УС (1 — образец стрингера с отверстием; 2 — блок захватов)

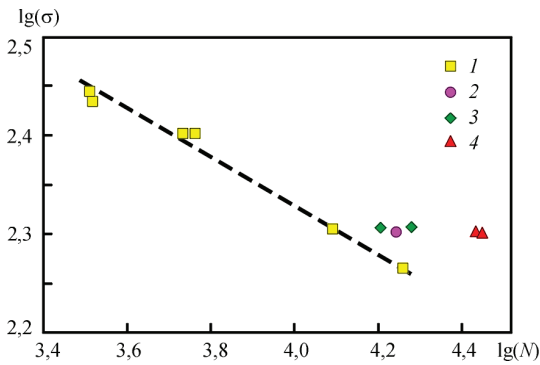


Рис. 14. Результаты испытаний при отнулевом цикле нагрузки величиной σ_{\max} образцов сплава Д16 с отверстием диаметром 6 мм при различных схемах МГПД ЭДО, где номера образцов соответствуют схемам в табл. 2; N — количество циклов до разрушения; кривая — сопротивление разрушению отверстия без МГПД ЭДО (1 — свободное отверстие; 2 — образец 2*; 3 — 1, 1*; 4 — 3, 3*

ствия, необходимые для эффективного торможения разрушения.

Результаты работы были апробированы в лаборатории прочности летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ».

На основании проведенных исследований по ЭДО сварных ремонтных соединений из магниевого сплава МЛ10 и технологических отверстий в алюминиевом сплаве Д16 можно заключить, что электродинамические воздействия позволяют в широком диапазоне регулировать напряженное состояние элементов тонколистовых конструкций из легких сплавов. Так, ЭДО сварных соединений магниевого сплава обеспечивает переход остаточных сварочных напряжений растяжения в сжимающие, а обработка сплава алюминия инициирует в нем поля сжимающих напряжений, повышая стойкость металла к замедленному разрушению при циклических нагрузках.

Развитие метода ЭДО для использования в различных технологических процессах позволит увеличить эксплуатационный ресурс металлических конструкций из легких сплавов.

Выводы

1. Разработан и изготовлен генератор импульсного электрического тока (ИЭТ) нового поколения с управляемыми амплитудно-частотными характеристиками ИЭТ для электродинамической обработки (ЭДО) тонколистовых металлических конструкций, что позволяет расширить возможности электродинамических воздействий за счет управ-

ляемой синхронизации динамической и электроимпульсной составляющих ЭДО.

2. Исследовано влияние ЭДО на снижение уровня остаточных напряжений в сварных соединениях из магниевого сплава МЛ10. Установлено, что с помощью ЭДО можно регулировать напряженное состояние сварных соединений из сплава МЛ10, достигая при этом сжимающих напряжений.

3. Показано, что местное пластическое деформирование с применением ЭДО образцов стрингера крыла самолета из алюминиевого сплава Д16 в зоне технологических отверстий повышает сопротивление замедленному разрушению в 1,6...2,5 раза.

1. Шаломеев В. А. Заварка поверхностных дефектов литья из сплава Мл-10 скандийсодержащим материалом / В. А. Шаломеев, Э. И. Цивирко, И. А. Петрик [и др.] // Автоматическая сварка. — 2009. — № 3. — С. 34–38.
2. Лобанов Л. М. Ремонтная сварка промежуточных корпусов из жаропрочного магниевого сплава МЛ-10 с применением электродинамической обработки / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, А. В. Черкашин // Автоматическая сварка. — 2012. — № 11. — С. 31–36.
3. Лобанов Л. М. Исследование остаточных напряжений в сварных соединениях жаропрочного сплава МЛ10 с применением электродинамической обработки / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. В. Савицкий [и др.] // Проблемы прочности. — 2014. — № 6. — С. 33–41.
4. Заруцкий А. В. Экспериментальное исследование долговечности образцов с упрочненными отверстиями. Сообщение 2. Программное нагружение / А. В. Заруцкий // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. Аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». — 2014. — Вып. 2(78). — С. 57–65.
5. Лобанов Л. М. Методика определения остаточных напряжений в сварных соединениях и элементах конструкций с использованием электронной спекл-интерферометрии / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, В. В. Савицкий [и др.] // Автоматическая сварка. — 2006. — № 1. — С. 25–30.
6. Лобанов Л. М. Влияние электродинамической обработки на напряженное состояние сварных соединений алюминиевого сплава АМг6 / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. П. Логинов // Автоматическая сварка. — 2007. — № 6. — С. 11–13.
7. Гребеников А. Г. Экспериментальное исследование влияния последовательного применения дорнования и барьерного обжата на усталостную долговечность стрингеров в зоне отверстия для перетекания топлива / А. Г. Гребеников, Г. А. Кривов, Е. Т. Василевский // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». — 2009. — Вып. 43. — С. 54–64.
8. Гуца О. И. Контроль напряжений на основе использования подповерхностных акустических волн / О. И. Гуца, В. Н. Смиленко, В. Н. Кот // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. — 2009. — № 1. — С. 11–13.
9. Фомичев П. А. Прогнозирование долговечности элементов конструкций с упрочненными отверстиями при регулярном нагружении / П. А. Фомичев, А. В. Заруцкий // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». — 2014. — Вып. 64. — С. 84–93.

Поступила в редакцию 22.12.2015