

# РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ПРАВКИ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Л. М. ЛОБАНОВ, Н. А. ПАЩИН

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

Представлен новый технологический процесс послесварочной обработки сварных соединений – электродинамическая обработка импульсами электрического тока высокой плотности. Проведенный комплекс экспериментальных исследований на образцах из алюминиевого сплава АМг6 при различных параметрах импульсов электрического тока и индуктивности источника питания показал, что электродинамическая обработка влияет на структуру обработанного металла и позволяет существенно уменьшить остаточные напряжения в сварных соединениях, повысить их сопротивление усталости и хрупкому разрушению, а также устранить деформации коробления тонкостенных элементов конструкций. Разработанные технологии и аппаратура дали возможность выполнить электродинамическую обработку сварных соединений судокорпусных конструкций и ремонтных сварных швов промежуточного корпуса авиадвигателя, что способствовало увеличению их эксплуатационной надежности и долговечности. Библиогр. 8, рис. 18.

*Ключевые слова:* электродинамическая обработка, алюминиевый сплав, сварное соединение, остаточные напряжения, импульс тока, математическое моделирование, плотность тока, пластическая деформация

Высокие требования, предъявляемые к сварным конструкциям новой техники, вызывают необходимость развития технологий их послесварочной обработки. Перспективными являются процессы, основанные на воздействии электродинамических сил на проводящие материалы при прохождении импульсов электрического тока (ИЭТ), реализуемые в новом технологическом процессе — электродинамической обработке (ЭДО). Используя энергию ИЭТ и инициируемых ею электродинамических сил, воздействующих на обрабатываемые элементы металлических конструкций при ЭДО, можно влиять на напряженное состояние металлических материалов. Эффективность ЭДО определяется взаимодействием двух составляющих: электроимпульсной, реализуемой при протекании ИЭТ плотностью  $j$  по обрабатываемому изделию, и динамической, задаваемой амплитудно-частотной характеристикой волн динамических напряжений. Повышение эксплуатационных характеристик сварных соединений в результате ЭДО обусловлено комплексным влиянием следующих факторов. Так, в зоне обработки при действии электродинамических сил в металле шва формируются волны напряжений, которые, взаимодействуя с остаточными сварочными напряжениями, инициируют снижение последних. В результате ЭДО в металле образуются зоны с измельченными зернами, эволюция структуры которых определяется пластическим деформированием в условиях реализации электропластического эффекта (ЭПЭ),

основанного на электронно-дислокационном взаимодействии [1], инициируемом прохождением ИЭТ при  $j \geq 1$  кА/мм<sup>2</sup>.

Учитывая специфику ЭДО сварных конструкций, к которой можно отнести большую протяженность сварных соединений и их различное пространственное положение, предусмотрена возможность мобильного позиционирования аппаратурных средств, реализующих электродинамические воздействия. Особенности сварных соединений определяют требования к аппаратурным средствам, предназначенным для выполнения ЭДО, к которым можно отнести:

– аппаратурные средства для ЭДО должны состоять из отдельных составных частей, таких как источник ИЭТ (ИИЭТ), исполнительное электродное устройство (ЭУ), предназначенное для реализации электродинамических воздействий на обрабатываемое сварное соединение, а также средств коммуникации между ИИЭТ и ЭУ;

– эргономические характеристики ЭУ и средств его коммуникации с ИИЭТ должны обеспечивать удобство использования при реализации электродинамических воздействий с заданной длительностью, амплитудой и периодичностью в ручном режиме и в составе автоматизированных сварочных комплексов.

На основании анализа устройств генерирования импульсного тока установлено, что наиболее приемлемым для формирования ИЭТ в составе ИИЭТ является использование конденсаторных систем, которые имеют ряд преимуществ перед

другими устройствами, таких как возможность накопления контролируемого уровня энергии электрического заряда, создание различных форм и длительности ИЭТ, а также простота восстановления электрических параметров режима разряда. Наиболее эффективным способом регулирования параметров разряда ИЭТ является управление напряжением заряда емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) до прохождения разрядного импульса. Другим регулирующим параметром устройства является длительность импульса. Для этого необходимо обеспечить возможность изменения электрических параметров разрядного контура накопителя. Управляющим устройством, при помощи которого регулируется длительность импульса, является катушка индуктивности (КИ), входящая в состав ЭУ. При этом индуктивность катушки может изменяться в широком диапазоне. Исходя из требований, предъявляемых к ЭУ, рекомендовано применить КИ в форме плоского индуктора. Таким образом, управляющими параметрами ИИЭТ являются напряжение заряда ЕНЭ, которое можно изменять в широком диапазоне при помощи системы регулирования, а также индуктивность разрядного контура  $L$ . В настоящее время разрабо-

таны одно- и двухконтурные ИИЭТ, внешний вид которых показан на рис. 1.

Особенностью одноконтурного ИИЭТ (рис. 1, а) является непосредственное протекание ИЭТ главной цепи через обрабатываемый материал, двухконтурного — раздельное протекание тока по цепям, обеспечивающим электроимпульсную и динамическую составляющие электродинамического воздействия. Преимуществами одноконтурного ИИЭТ является простота конструкции, относительно малая масса (до 20 кг) и габариты (450×450×250 мм), мобильность позиционирования и простота в эксплуатации. К его недостаткам следует отнести отсутствие возможности регулирования частотных характеристик электроимпульсной и динамической составляющих электродинамического воздействия. Преимуществом двухконтурного ИИЭТ (рис. 1, б) является аппаратное регулирование частотных характеристик составляющих электродинамического воздействия, а недостатками — относительно большая масса (до 120 кг) и габариты (1500×450×450 мм).

Для реализации ЭДО с использованием одноконтурного ИИЭТ разработали специализированное ЭУ, конструкция которого обеспечивает протекание ИЭТ по одноканальной схеме.

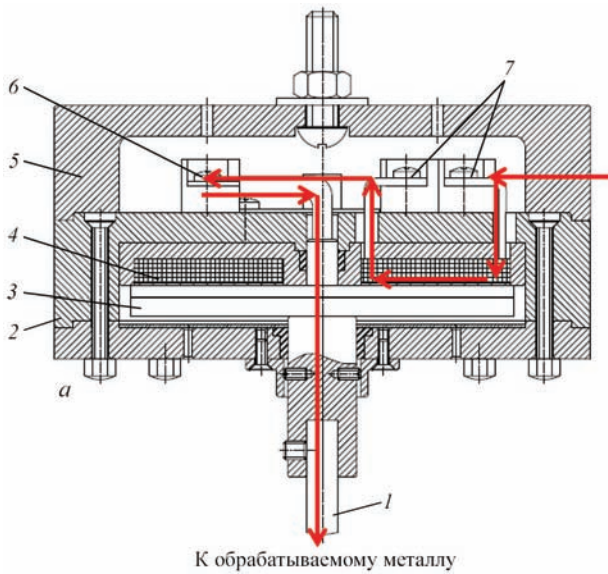
Конструктивная схема и внешний вид одноканального ЭУ представлены на рис. 2. ЭУ обеспечивает электрический контакт между разрядным контуром и обрабатываемым металлом по одному каналу, через который в последний вводится ИЭТ. ЭУ обеспечивает реализацию динамического и электроимпульсного воздействия на металл. Направление протекания ИЭТ по цепям ЭУ от ИИЭТ к обрабатываемому металлу показано стрелками на рис. 2, а. Рабочим органом ЭУ является электрод 1, закрепленный в корпусе 2. Рабочая поверхность электрода контактирует с обрабатываемым металлом. Корпус 2, жестко связанный с диском 3, совместно с электродом 1 входят в состав ударного механизма (УМ), который имеет возможность двигаться в вертикальном направлении. Диск 3 сопряжен с катушкой индуктивности 4. Сверху клеммы подключения закрыты крышкой 5, предназначенной также для позиционирования ЭУ в процессе обработки. Для подключения ЭУ к ИИЭТ сверху на корпусе 2 расположены клеммы 6 и 7. Клемма 6 обеспечивает протекание ИЭТ через электрод, а 7 — через катушку индуктивности.

Для двухконтурного ИИЭТ разработали двухканальную схему ЭУ. Конструкция двухканального ЭУ подобна представленной на рис. 2, но протекание ИЭТ по электроду 1 и катушке индуктивности 4 осуществляется раздельно.

При использовании ЭУ упирается в металл торцом электрода и выставляется перпендикуляр-



Рис. 1. Внешний вид одноконтурного (а) и двухконтурного (б) источников импульсного электрического тока для ЭДО



К обрабатываемому металлу

Рис. 2. Электродное устройство для ЭДО: а — конструктивная схема (1 — электрод; 2 — корпус; 3 — диск; 4 — катушка индуктивности; 5 — крышка; 6, 7 — клеммы); б — внешний вид

но к обрабатываемой поверхности. Прохождение ИЭТ через катушку индуктивности в диске возбуждает магнитное поле, инициирующее в диске вихревые токи. Взаимодействие наведенных токов  $I$  с возбужденным их магнитным полем приводит к возникновению электродинамической силы  $P$ . Схема ЭДО сварных соединений по одноканальной схеме представлена на рис. 3.

Осциллограммы динамического давления  $P$  и импульсного тока  $I$ , проходящего через пластину из алюминиевого сплава АМгб толщиной  $\delta = 4,0$  мм при напряжении заряда  $U_3 = 500$  В и емкости ЕНЭ  $C = 6600$  мкФ по одноканальной схеме, представлены на рис. 4. Воздействие ИЭТ —  $I$  на зону обработки при одноканальной схеме по длительности превышает период действия усилия  $P$  (рис. 4), что задается конфигурацией разрядного контура. Особенности двухканальной схемы обеспечивают независимое изменение длительности ИЭТ —  $I$  и  $P$  в диапазоне от 0 до 0,68 с, опреде-

ляемое параметрами электрической цепи отдельных разрядных контуров. Это позволяет задавать различные соотношения амплитудно-частотных характеристик токового и динамического воздействий на обрабатываемый металл.

Для позиционирования ЭУ относительно обрабатываемой поверхности и обеспечения надежного электрического контакта рабочей части электрода в зоне ЭДО разработали специализированный ручной инструмент (рис. 5). Конструктивными элементами инструмента является основание 2, на котором располагаются неподвижная рукоять 1 и плита крепления ЭУ 3. Рукоять предназначена для перемещения инструмента оператором, а на плите закреплены подсветка зоны ЭДО — 4, ЭУ — 5 и две опоры 6, которые совместно с электродом ЭУ обеспечивают трехточечное опирание инструмента на обрабатываемую поверхность металла.

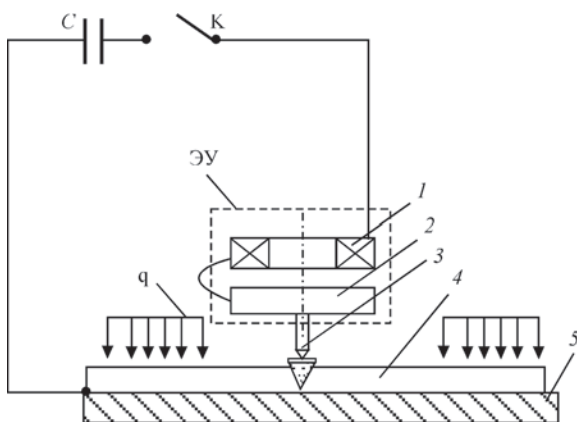


Рис. 3. Схема ЭДО сварных соединений (С — емкостной накопитель энергии; К — силовой ключ; q — фиксирующая нагрузка); 1 — индуктор; 2 — диск; 3 — электрод; 4 — обрабатываемый металл; 5 — сборочная плита

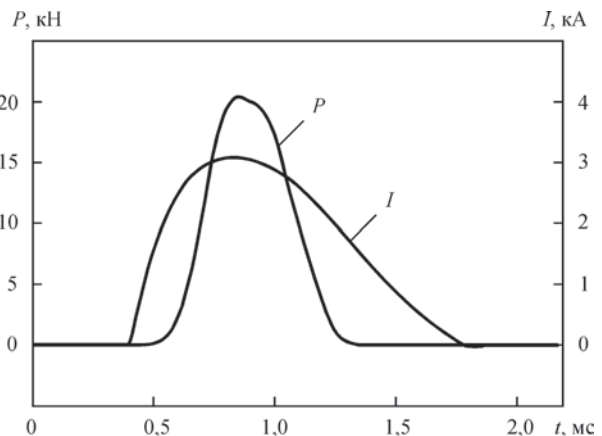


Рис. 4. Осциллограммы динамического давления  $P$  и импульсного тока  $I$ , проходящего через обрабатываемый металл при напряжении заряда  $U_3 = 500$  В, емкости ЕНЭ  $C = 5140$  мкФ и индуктивности  $L = 5,0$  мкГн ЭУ по одноканальной схеме разрядного контура

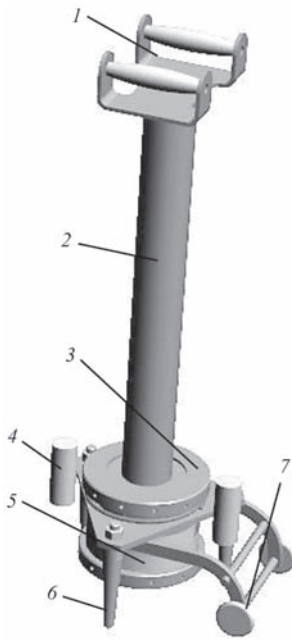


Рис. 5. Внешний вид ручного инструмента для ЭДО (1 — неподвижная рукоять; 2 — основание; 3 — механизм крепления ЭУ; 4 — подсветка; 5 — ЭУ; 6 — опора; 7 — транспортная тележка

Инструмент оборудован транспортной тележкой 7, предназначенной для рабочих и установочных перемещений ЭУ вдоль сварного соединения.

Следует отметить, что экспериментальная оценка эффективности ЭДО с целью определения оптимального режима обработки сварных соединений является достаточно трудоемкой задачей, что связано с рассмотрением большого количества параметров режима ЭДО, типов сварных соединений и механических характеристик металлов и сплавов, подвергаемых обработке.

С целью оптимизации процесса выбора режима ЭДО разработана математическая модель нестационарных электрофизических [2] и динамических [3] процессов, определяющих механизм ЭДО сварных соединений. На базе модели осуществля-

ется выбор режимных характеристик для обеспечения параметров ИЭТ, достаточных для эффективного регулирования остаточного напряженного состояния металлических конструкций.

Адекватность и достоверность математического моделирования нестационарных процессов в обрабатываемом металле подтверждена экспериментальными исследованиями, проведенными на разработанном ИИЭТ (рис. 1, а) [2].

Описание электрофизических процессов при ЭДО осуществляли на основе редукции уравнений Максвелла к системе интегральных уравнений для плотности тока и электродинамических сил в зоне контакта электрода 3 и образца 4 (рис. 3).

На рис. 6 представлено распределение линий равной величины плотности ИЭТ  $j$  по толщине  $z$  пластины из сплава АМгб при  $L = 5$  мкГн,  $C = 5140$  мкФ,  $U_3 = 500$  В в момент времени  $t = 0,71$  мс (рис. 4), который соответствует максимальному значению ИЭТ в разрядном контуре. Можно видеть, что представленный режим обеспечивает значения плотности тока  $j \geq 1$  кА/мм<sup>2</sup>, которые могут инициировать ЭПЭ в обрабатываемом сплаве АМгб.

Реализацию ЭПЭ подтверждают данные рис. 7, где показано распределение линий равной величины радиальных пластических деформаций  $\epsilon_r$  растяжения по толщине  $z$  пластины из сплава АМгб при режиме ЭДО, аналогичном используемому на рис. 6. Представленное распределение  $\epsilon_r$  вызвано действием электродинамических сил, которые возникают при прохождении ИЭТ в зоне контакта электрода с обрабатываемым металлом. Можно видеть, что электродинамические силы обеспечивают электропластическое деформирование сплава АМгб в зоне обработки. Следует отметить, что взаимодействие деформаций, инициируемых ЭДО с остаточными сварочными пла-

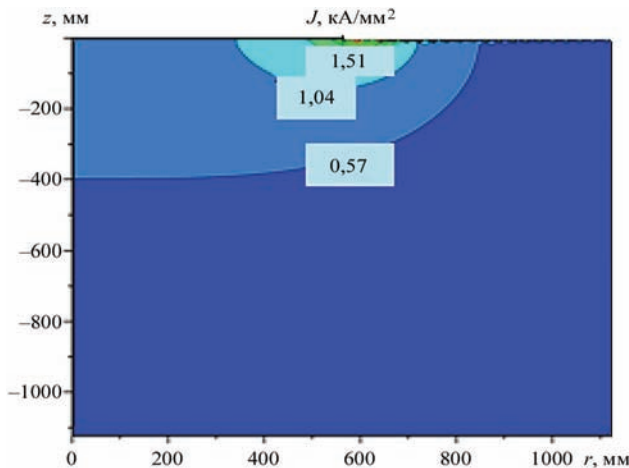


Рис. 6. Распределение линий равной величины плотности ИЭТ  $j$  по ширине  $r$  и толщине  $z$  пластины из сплава АМгб (пояснения см. в тексте)

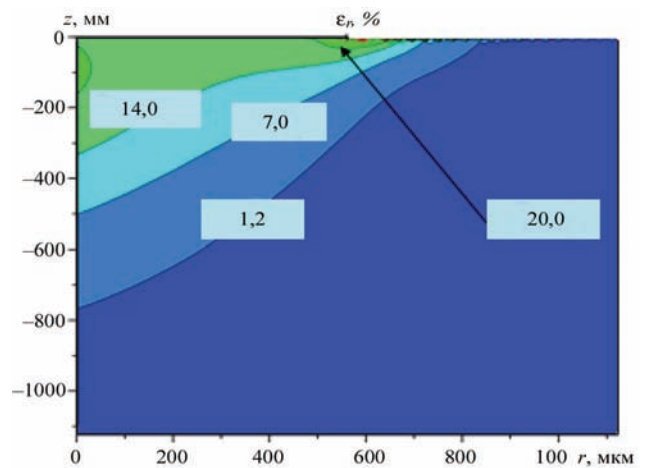


Рис. 7. Распределение линий равной величины радиальных пластических деформаций  $\epsilon_r$  по ширине  $r$  и толщине  $z$  пластины из сплава АМгб (пояснения см. в тексте)

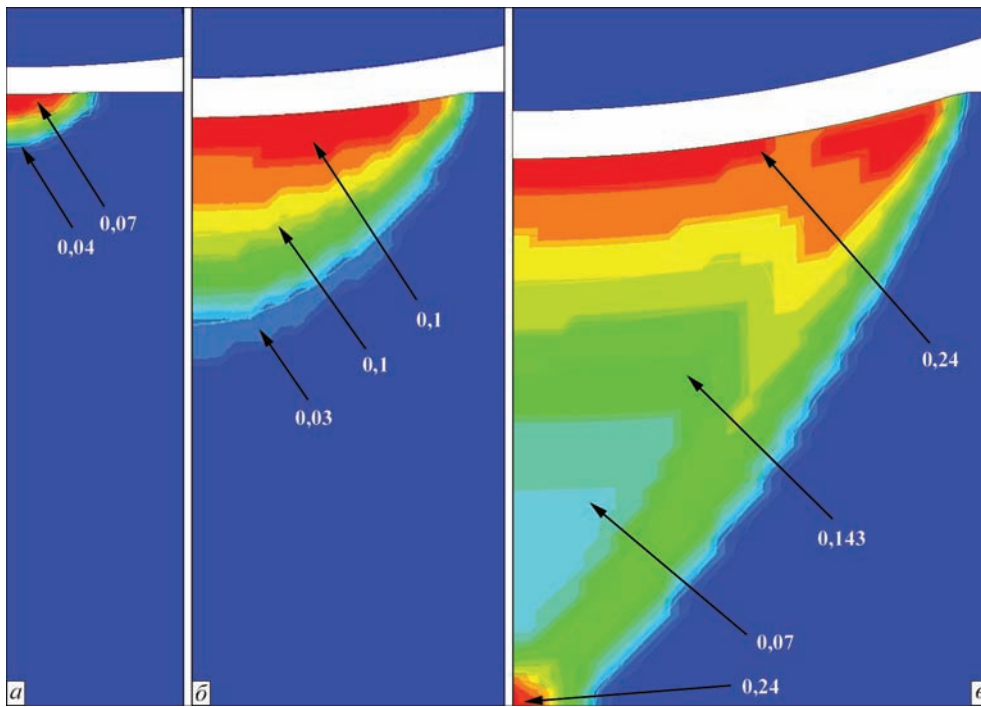


Рис. 8. Остаточное распределение эффективных пластических деформаций  $\epsilon_{eff}^p$  в поперечном сечении пластины из сплава АМгб толщиной  $\delta = 4$  мм при  $L = 5$  мкГн,  $C = 5140$  мкФ: а —  $U_3 = 200$  В; б — 500; в — 800

стическими деформациями сжатия, влияет на снижение напряженно-деформированного состояния сварных конструкций.

Влияние динамической составляющей электродинамического воздействия определяли на основе теории пластического течения, базируемой на соотношениях Прандтля–Рейсса. На рис. 8 представлено остаточное распределение эффективных пластических деформаций  $\epsilon_{eff}^p$  в поперечном сечении ненапряженной пластины из сплава АМгб толщиной  $\delta = 4$  мм после одиночного ИЭТ на режиме ЭДО при  $L = 5$  мкГн,  $C = 5140$  мкФ и  $U_3 = 200 \dots 800$  В. Можно видеть, что при  $U_3 = 200$  В зона пластического деформирования с диапазоном значений  $\epsilon_{eff}^p = 0,04 \dots 0,07$  локализована у поверхности пластины (рис. 8, а). При увеличении  $U_3$  до 500 В зона пластического деформирования с диапазоном значений  $\epsilon_{eff}^p = 0,03 \dots 0,17$  распространена практически до центральной зоны сечения пластины (рис. 8, б). Нарастание значения  $U_3$  до 800 В (рис. 8, в) инициирует распространение зоны пластического деформирования в диапазоне  $\epsilon_{eff}^p = 0,07 \dots 0,24$  по всему сечению пластины.

При этом, в отличие от данных рис. 8, а, б, имеет место отражение волны деформирования от обратной поверхности пластины, подтверждаемое равенством значений  $\epsilon_{eff}^p = 0,24$  на обеих сторонах образца, а также их снижением в его центре.

Данные рис. 8, б подтверждает распределение радиальной компоненты остаточных напряжений  $\sigma_r$  после одиночного ИЭТ при  $U_3 = 500$  В, показанное на рис. 9. Можно видеть, что распространение  $\epsilon_{eff}^p$ , определяемое динамическим воздействием, ини-

цирует в зоне обработки и на удалении от нее поля остаточных напряжений сжатия, соответственно  $\sigma_r = -73,8$  и  $-40,5$  МПа. Суперпозиция  $\sigma_r$  сжатия с остаточными сварочными напряжениями растяжения может существенно снизить пиковые значения напряжений в сварном соединении.

В целом, анализируя данные рис. 6–9, можно заключить, что электродинамические и динамические воздействия, рассматриваемые отдельно в рамках математического моделирования процесса ЭДО, оказывают существенное влияние на напряженно-деформированное состояние сплава АМгб, что подтверждается экспериментальными исследованиями, результаты которых представлены ниже.

Исследования эволюции структуры конструкционных материалов в результате ЭДО позволили определить особенности влияния электродинамических воздействий на механизм пластического деформирования металлов и сплавов в результате обработки. Особенности структуры и рельефа фрактограмм изучали с использованием растровой и сканирующей электронной микроскопии.

Исследовали влияние ЭДО на особенности разрушения плоских образцов алюминиевого сплава АМгб, обработанных ЭДО по одноканальной схеме. Проводили обработку одиночным ИЭТ основного металла и сварных соединений с размерами рабочей части  $150 \times 30 \times 4$  мм на режиме ЭДО при напряжении заряда  $U_3 = 500$  В и емкости ЕНЭ  $C = 6600$  мкФ.

Для определения влияния электродинамического воздействия на изменение структуры ма-

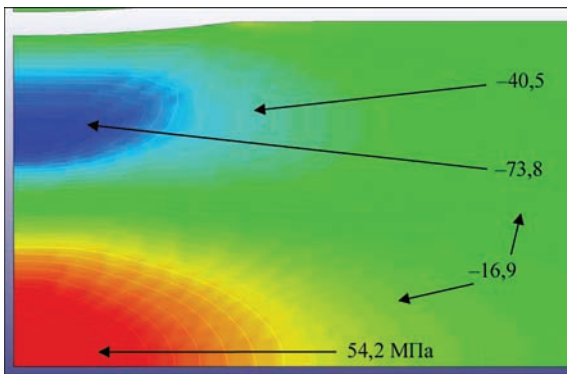


Рис. 9. Распределение радиальной компоненты остаточных напряжений  $\sigma_r$  после одиночного ИЭТ при  $U_3 = 500$  В

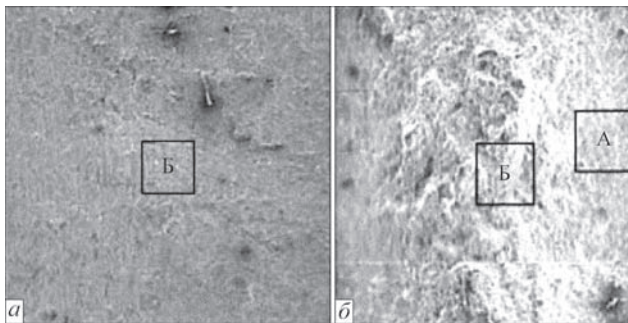


Рис. 10. Фрактограммы ( $\times 33$ ) изломов сплава АМг6, полученных при разрушении образцов без ЭДО (а) и после ЭДО (б) (зона А — обработанный участок вблизи поверхности металла; Б — средний участок излома)

териала проводили сравнение топографии макрорельефа разрушения образцов сплава АМг6 в исходном состоянии (рис. 10, а) и после ЭДО (рис. 10, б) на режиме, представленном выше, из которого видно, что изломы имеют преимущественно волокнистое строение с гребнями отрыва, образовавшимися по механизму смешанного разрушения [4].

Для изучения рельефа изломов после электродинамического воздействия использовали образцы с односторонней проработкой материала. На рис. 10, б (зона А) можно видеть, что излом с обработанной стороны имеет более развитое волокнистое строение по сравнению с исходным состоянием (рис. 10, а). Глубина распространения волокон достигает 3,0 мм по толщине образца, что подтверждает данные рис. 8, б и характеризует электродинамическое воздействие как объемное. При углубленном изучении рельефа излома после ЭДО (зона Б на рис. 10, б) наблюдали развитые группы плоских линий скольжения, ориентация которых совпадала с обработанной поверхностью образца. При этом скольжение имеет признаки ротационного механизма [5], что свидетельствует об интенсивном протекании процесса объемного пластического течения материала в условиях электродинамических воздействий.

Нарастание плотности обработанных участков поликристаллической структуры приводит

к деформационному упрочнению, что подтвердили результаты измерений твердости  $HV$ , которые проводили на приборе М-400 фирмы «Лесо» при величине нагрузки 0,1 Н. Значения  $HV$  для необработанного материала (рис. 10, а, зона Б) составляли 824 МПа. Максимальные значения  $HV$  — 1290...1310 МПа наблюдали у обработанной поверхности (рис. 10, б, зона А), где наряду с плоским имело место ротационное скольжение. Таким образом, твердость сплава АМг6 после ЭДО повышается на 35...40 % по сравнению с необработанным.

Металлографические исследования сплава АМг6 в исходном состоянии и после ЭДО на описанном выше режиме показали, что структура необработанного тока металла состоит из дисперсных выделений  $\beta$ -фазы  $Al_3Mg_2$  в обрамлении силицида магния  $MgSi$ , где  $\beta$ -фаза имеет большую площадь и более светлый оттенок в окружении темных линий и точечных включений силицида магния. При этом обработанная структура характеризуется измельченным зерном, что повышает сопротивление металла замедленному разрушению.

С использованием метода «тонких фольг» [6] исследовали тонкую исходную структуру сплава АМг6, а также ее эволюцию в результате динамического и электродинамического воздействий по одноканальной схеме ЭДО. Динамическое воздействие реализовывали, исключив прохождение ИЭТ через обрабатываемый металл. Проводили обработку одиночным ИЭТ образцов размерами  $150 \times 30 \times 4$  мм на режиме ЭДО при напряжении заряда  $U_3 = 350$  В и емкости ЕНЭ  $C = 6600$  мкФ.

Как показали результаты исследований (рис. 11), зерна необработанного металла характеризуются субструктурой (рис. 11, а) с размерами  $d_c$  в пределах  $\sim 1,8 \dots 5,0$  мкм, а также равномерное распределение плотности дислокационной структуры между объемом  $\rho_{об}$  и границей  $\rho_{гр}$  зерен. Величина  $\rho_{об}$  достигает  $6 \cdot 10^9$  см $^{-2}$ , а  $\rho_{гр}$  —  $8 \cdot 10^9$  см $^{-2}$ , что приводит к отсутствию градиента плотности дислокаций  $\Delta\rho_{об}$  в объеме зерен.

В металле после динамического воздействия (рис. 11, б) наблюдается субструктура как дисперсного  $d_c \sim 1,1$  мкм, так и крупного размера  $d_c \sim 3,2$  мкм, без формирования четких субграниц. Зафиксировано увеличение уровня плотности дислокаций у межзеренных границ  $\rho_{гр}$ , а также градиент  $\Delta\rho_{об}$  между внутренним объемом зерен  $\rho_{об} \sim 6 \cdot 10^8 \dots 4 \cdot 10^9$  см $^{-2}$  и  $\rho_{гр} \sim 2 \cdot 10^{11}$  см $^{-2}$ .

После электродинамического воздействия металл характеризуется формированием субструктур (рис. 11, в) с четкими границами  $d_c = 0,8 \dots 2,5$  мкм. При этом имеет место понижение плотности дислокаций  $\rho_{гр}$  по сравнению с металлом после ди-

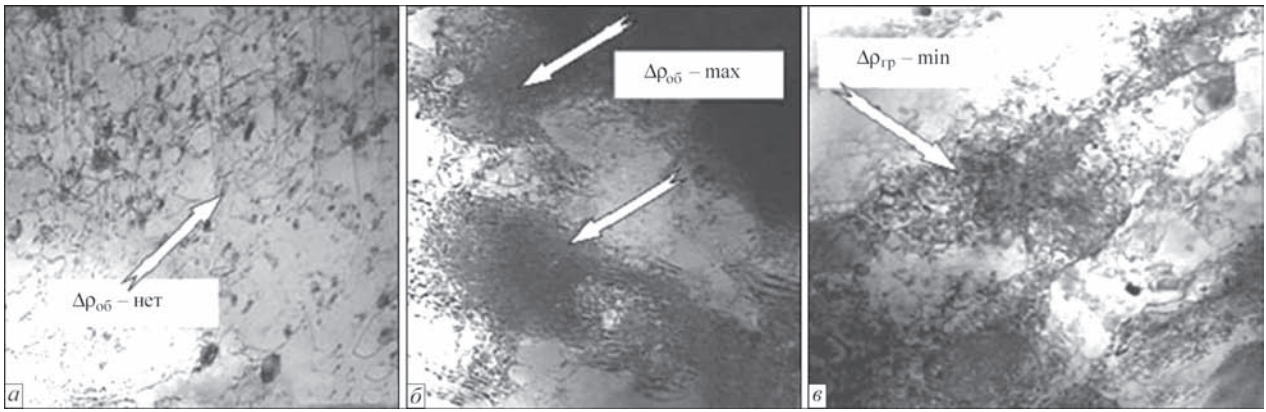


Рис. 11. Тонкая структура сплава АМгб: а — в исходном состоянии ( $\times 25000$ ); б —  $\Delta\rho_{об}$  максимально после динамического воздействия ( $\times 22000$ ); в —  $\Delta\rho_{гр}$  минимально после электродинамического воздействия ( $\Delta\rho_{гр}$ ,  $\Delta\rho_{об}$  — градиенты плотности дислокаций по границам и в объеме зерен)

намического воздействия, а также равномерное их распределение по всему объему металла (без резких градиентов по границам зерен  $\Delta\rho_{гр}$ ) между внутренним объемом зерен  $\rho_{об} \sim 2 \dots 3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  и у межзеренных границ  $\rho_{гр} \sim 6 \dots 8 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ .

Формирование данной структуры подтверждает предложенную концепцию, основанную на теории электронно-дислокационного взаимодействия [1], о вкладе ИЭТ в релаксацию остаточных напряжений.

Для оценки влияния электродинамических воздействий на остаточные напряжения проводили обработку образцов стыковых сварных соединений из сплава АМгб размерами  $400 \times 300 \times 4$  мм с центральным швом, выполненным встык автоматической сваркой ТИГ на режиме при напряжении дуги  $U_d = 18$  В, сварочном токе  $I_d = 250$  А и скорости  $v_{св} = 3,1$  мм/с. Двустороннюю обработку сварных пластин выполняли сериями ИЭТ на режиме ЭДО при напряжении заряда  $U_3 = 550$  В и емкости ЕНЭ  $C = 6600$  мкФ. Расстояние между зонами приложения электродинамических воздействий не превышало 5 мм. Измерения остаточных напряжений проводили с использованием методики электронной спекл-интерферометрии [7].

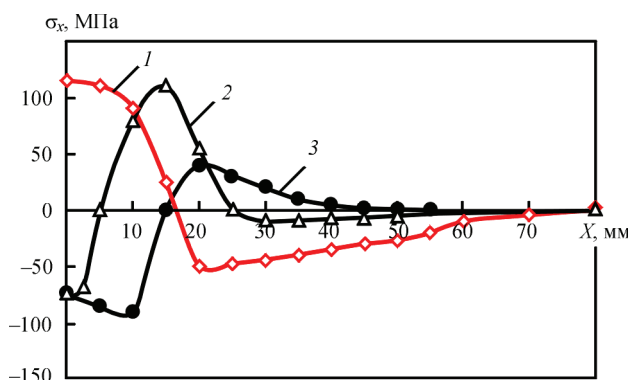


Рис. 12. Распределение продольных остаточных напряжений  $\sigma_x$  в поперечном сечении сварной пластины из сплава АМгб (кривая 1 — начальные  $\sigma_x$ ; 2 —  $\sigma_x$  после ЭДО вдоль оси шва; 3 —  $\sigma_x$  после ЭДО оси шва и основного металла на расстоянии 10 мм от оси шва)

Распределение продольных (вдоль линии сварного шва) остаточных напряжений  $\sigma_x$  до и после ЭДО, представлены на рис. 12. Видно, что исходный максимум  $\sigma_x$  не превышал 120 МПа (кривая 1). После ЭДО сварного соединения по оси шва начальные значения  $\sigma_x$  в шве изменились от 120 до  $-75$  МПа, а максимальные остаточные напряжения растяжения до 115 МПа сформировались на необработанной части пластины (кривая 2). После ЭДО шва и основного металла на расстоянии 10 мм от оси шва (кривая 3) значения  $\sigma_x$  изменяются от 90 до  $-100$  МПа, что сопоставимо с ЭДО центра шва. Анализируя данные рис. 12, можно видеть, что максимальная эффективность электродинамического воздействия достигается при ЭДО по оси шва и основного металла около линии сплавления (кривая 3).

Исследовали влияние ЭДО на сопротивление усталости образцов сварных соединений сплава АМгб толщиной  $\delta = 2$  мм (рис. 13), выполненных автоматической сваркой ТИГ (Аг) при значениях напряжения дуги, сварочного тока и скорости процесса соответственно  $U_{св} = 20$  В,  $I_{св} = 170$  А,  $v_{св} = 5,5$  мм/с. Двустороннюю обработку образцов вдоль линии сварного шва длиной 90 мм выполняли сериями ИЭТ на режиме двухканальной ЭДО при напряжении заряда  $U_3 = 430$  В и емкости ЕНЭ  $C = 5580$  мкФ. Расстояние между зонами приложения электродинамических воздействий составляло 5 мм, ширина рабочей части образца — 265 мм.

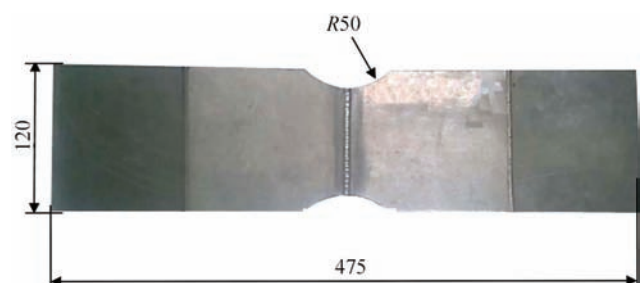


Рис. 13. Образец сварного соединения из сплава АМгб для усталостных испытаний

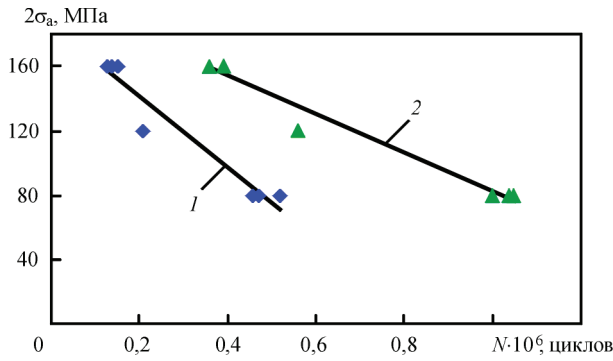


Рис. 14. Результаты испытаний на усталость образцов сварных соединений сплава АМг6 (см. рис. 9) в координатах  $2\sigma_a - N$  (кривая 1 — исходное состояние; 2 — после ЭДО)

Усталостные испытания на консольный изгиб образцов сварных соединений проводили на машине УПМ-02 при симметричном цикле с размахом амплитуды напряжений цикла в диапазоне  $2\sigma_a = 80 \dots 160$  МПа.

Из рис. 14, где представлены результаты испытаний на усталость в координатах  $2\sigma_a - N$  образцов в исходном состоянии и после ЭДО, можно видеть, что циклическая долговечность  $N$  образцов сварных соединений в исследуемом диапазоне  $2\sigma_a$  повышается в результате обработки до трех раз. При этом разрушение как исходных образцов, так и обработанных, происходит по линии сплавления.

На основании представленных выше результатов можно заключить, что ЭДО оказывает положительное влияние на повышение долговечности сварных соединений из сплава АМг6, в значительной степени определяемое снижением уровня остаточных сварочных напряжений.

Фрактографический анализ микрорельефа поверхности исходных и обработанных образцов, разрушенных в результате циклического нагружения при  $2\sigma_a = 160$  МПа (рис. 15) показал, что обработанный металл характеризуется диспергированием структурных элементов, таким как измельчение размера  $d_\phi$  фасеток в 3 раза (рис. 15, б) по сравнению с исходным состоянием до ЭДО (рис. 15, а). Это подтверждает положительное влияние электродинамических воздействий на

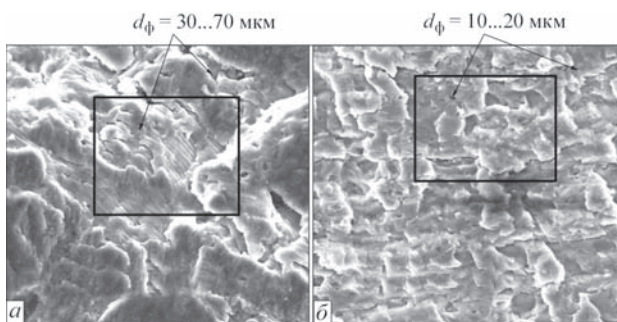


Рис. 15. Поверхности разрушения образцов сплава АМг6 после малоциклового нагружения ( $\times 810$ ): а — исходный образец; б — после ЭДО

эволюцию структуры обработанного металла для повышения его сопротивления к усталостному разрушению.

Уровень остаточных напряжений определяет параметры коробления сварных конструкций [8]. Проведены исследования влияния ЭДО на локальные деформации типа «бухтина», возникающие при сварке силового набора в листовых корпусных конструкциях. Использовали образцы из сплава АМг6 толщиной 4 мм (рис. 16). На рис. 16, а показаны размеры образца, представляющего собой пластину, к которой аргонодуговой сваркой угловыми швами приварены ребра жесткости. Режим сварки соответствовал  $U_{св} = 20$  В,  $I_{св} = 180$  А,  $v_{св} = 1,4$  мм/с. После изготовления образцов регистрировали значения прогиба  $f$  по центру образца (рис. 16, а). Затем провели обработку выпуклой поверхности образца серией импульсов с шагом 10 мм на режиме при  $U_3 = 500$  В и емкости ЕНЭ  $C = 6600$  мкФ. На рис. 16, б представлены остаточные формоизменения пластины до и после ЭДО-правки. Видно, что в результате электродинамических воздействий остаточные прогибы  $f$  уменьшаются до 1 мм, что является допустимым для большинства сварных изделий.

ЭДО применимо для повышения ресурса и уменьшения остаточного напряженно-деформированного состояния различных типов сварных конструкций.

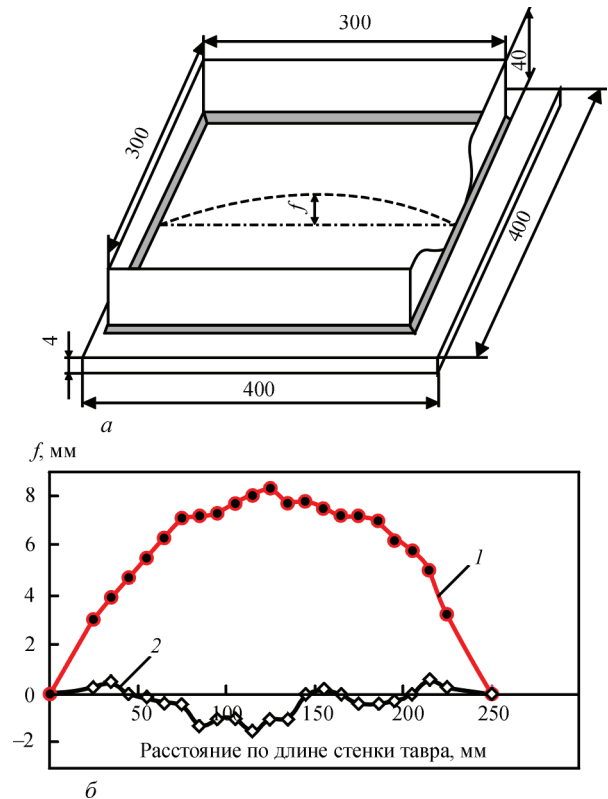


Рис. 16. Образец сварного соединения из сплава АМг6 с бухтиной: а — схема образца ( $f$  — прогиб); б — формоизменения образца (кривая 1 — исходные прогибы  $f$  по центру образца; 2 —  $f$  после ЭДО)



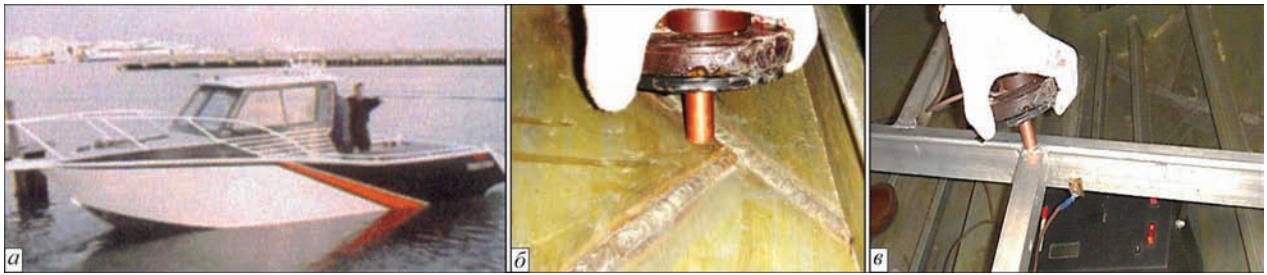


Рис. 17. Применение ЭДО при изготовлении корпуса судна из сплава АМгб: а — внешний вид корпуса; б — ЭДО-правка сварных соединений обшивки; в — ЭДО-правка балочных конструкций днища

Так, использование ЭДО при изготовлении и ремонте маломерных судов из сплава АМгб (рис. 17, а) позволило повысить эксплуатационные характеристики изделий. ЭДО-правка конструктивных элементов дала возможность существенно улучшить гидродинамические характеристики и обитаемость корпусов. Так, правка бухтин обшивки (рис. 17, б) обеспечила снижение местных прогибов в зоне сварных соединений с 10 до 1,5 мм, а устранение кривизны поперечных балок усиления днища (рис. 17, в) от 8 до 0,5 мм — гарантированное прилегание пайол. При этом ЭДО ремонтных сварных соединений обшивки и силового набора обеспечило снижение остаточных напряжений от 150 до 40 МПа, что позволило продлить ресурс эксплуатации корпусов до двух-шести раз.

Конструктивным элементом самолета АН-74 является промежуточный корпус авиадвигателя (ПКА), назначение которого — крепление двигателя Д-36 к крылу. ПКА представляет собой крупногабаритную полу литую конструкцию из жа-

ропрочного магниевого сплава МЛ10 (рис. 18), которая состоит из внешней и внутренней цилиндрических обечаек, сопряженных между собой ребрами жесткости — стойками, во внутренних полостях которых циркулирует охлаждающая жидкость. Характерными повреждениями ПКА, которые устраняют ремонтной сваркой, являются трещины усталости, нарушающие целостность внешней и внутренней обечаек, а также разрушения на лицевой поверхности внешней обечайки в зоне усиления под фланец трубопровода охлаждения. При этом максимальные значения растягивающих напряжений в ремонтных швах без термообработки достигают значения 120 МПа, что соответствует пределу текучести сплава МЛ10. Снижение напряжений с применением термообработки является достаточно дорогостоящей операцией, в ряде случаев на порядок превышающей стоимость ремонтной сварки. Применение ЭДО позволяет изменить распределение остаточных сварочных напряжений в ремонтных сварных швах от растягивающих к сжимающим, значение которых достигает  $-40$  МПа, что более эффективно, чем термообработка, и значительно ниже по стоимости.

Опыт практического использования ЭДО показал, что одноканальные ЭУ, ввиду их простоты и более длительного цикла заряда (по сравнению с двухканальными), целесообразно применять для правки тонколистовых сварных конструкций. В то же время двухканальные, в силу особенностей ввода импульсного тока в обрабатываемый материал, наиболее предпочтительны для снижения уровня остаточных сварочных напряжений. При этом малое время заряда, характерное для двухканальных ЭУ, позволяет реализовывать данный вид ЭДО совместно со сварочным циклом, что представляется перспективным для осуществления бездеформационной сварки конструкций ответственного назначения.

### Список литературы

1. Баранов Ю. В., Троицкий О. А., Аврамов Ю. С. (2001) *Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы*. Москва, МГИУ.

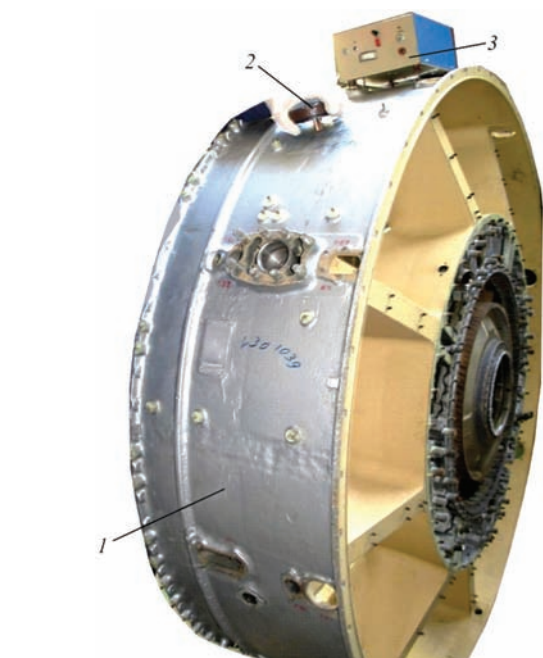


Рис. 18. Обработка методом ЭДО ремонтного шва на наружной поверхности внешней обечайки ПКА из сплава МЛ10: 1 — ПКА, 2 — электродное устройство; 3 — источник питания для ЭДО

2. Lobanov L. M., Kondratenko I. P., Zhiltsov A. V. et al. (2016) Electrophysical unsteady processes in the system to reduce residual stresses welds. *Tekhnichna Elektrodynamika*, **6**, 10–19.
3. Sidorenko Yu. M., Shlenskii P. S. (2013) On the Assessment of Stress-strain State of the Load-Bearing Structural Elements in the Tubular Explosion Chamber. *Strength of Materials*, **45**, **2**, 210–220.
4. Кишкина С. М., Браташев В. Л., Гук Н. В. (1988) *Разрушение алюминиевых сплавов. Атлас фрактограмм*. Москва, ВИАМ.
5. Яковлева Т. Ю. (2003) *Локальная пластическая деформация и усталость металлов*. Киев, Наукова думка.
6. Даровский Ю. Ф., Маркашова Л. И., Абрамов Н. П. (1985) Метод препарирования для электронно-микроскопических исследований. *Автоматическая сварка*, **12**, 60.
7. Лобанов Л. М., Пивторак В. А., Савицкий В. В., Ткачук Г. И. (2006) Методика определения остаточных напряжений в сварных соединениях и элементах конструкций с использованием электронной спекл-интерферометрии. *Там же*, **1**, 10–13.
8. Masubuchi K. (1980) *Analysis of Welded Structures*. Pergamon Press.

## References

1. Baranov, Yu.V., Troitsky, O.A., Avramov, Yu.S. (2001) *Physical principles of electropulse and electroplastic treatment and new materials*. Moscow, MGIU.
2. Lobanov, L.M., Kondratenko, I.P., Zhiltsov, A.V. et al. (2016) Electrophysical unsteady processes in the system to reduce residual stresses welds. *Tekhnichna Elektrodynamika*, **6**, 10–19.
3. Sidorenko, Yu.M., Shlenskii, P.S. (2013) On the assessment of stress-strain state of the load-bearing structural elements in the tubular explosion chamber. *Strength of Materials*, **45**(**2**), 210–220.
4. Kishkina, S.M., Bratashev, V.L., Guk, N.V. (1988) Fracture of aluminium alloys: Atlas of fractograms. Moscow: VIAM.
5. Yakovleva, T.Yu. (2003) *Local plastic deformation and fatigue of metals*. Kiev, Naukova Dumka.
6. Darovsky, Yu.F., Markashova, L.I., Abramov, N.P. (1985) Method of preparation for electron microscopic examinations. *Avtomatich. Svarka*, **12**, 60.
7. Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A., Savitsky, V.V. et al. (2006) Procedure for determination of residual stresses in welded joints and structural elements using electron speckle-interferometry. *The Paton Welding J.*, **1**, 24–29.
8. Masubuchi, K. (1980) *Analysis of welded structures*. Pergamon Press.

Л. М. Лобанов, М. О. Пашчин

ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України.  
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ  
ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ  
І ВИПРАВЛЕННЯ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ  
З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОЇ ОБРОБКИ

Представлено новий технологічний процес післязварювальної обробки зварних з'єднань — електродинамічна обробка імпульсами електричного струму високої щільності. Проведений комплекс експериментальних досліджень на зразках з алюмінієвого сплаву АМг6 при різних параметрах імпульсів електричного струму й індуктивності джерела живлення показав, що електродинамічна обробка впливає на структуру обробленого металу і дозволяє істотно зменшити залишкові напруги в зварних з'єднаннях, підвищити їх опір втомі і крихкому руйнуванню, а також усунути деформації жолоблення тонкостінних елементів конструкцій. Розроблені технології і апаратура дали можливість виконати електродинамічну обробку зварних з'єднань суднокорпусних конструкцій і ремонтних зварних швів проміжного корпусу авіадвигуна, що сприяло збільшенню їх експлуатаційної надійності і довговічності. Бібліогр. 8, рис. 18.

*Ключові слова:* електродинамічна обробка, алюмінієвий сплав, зварне з'єднання, залишкові напруження, імпульс струму, математичне моделювання, щільність струму, пластична деформація. Бібліогр. 8, рис. 18.

L.M. Lobanov, N.A. Pashchin

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.  
11 Kazimir Malevich str., 03680, Kiev-150, Ukraine.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

## DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY AND EQUIPMENT FOR REDUCTION OF RESIDUAL STRESSES AND STRAIGHTENING OF WELDED STRUCTURES WITH THE USE OF ELECTRODYNAMIC TREATMENT

A new technological process of postweld treatment of welded joints is presented which is the electrodynamic treatment by pulses of high-density electric current. The carried out complex of experimental investigations on specimens of aluminum alloy AMg6 at different parameters of electric current pulses and inductivity of power source showed that electrodynamic treatment influences the structure of treated metal and allows a significant reduction of residual stresses in welded joints, increasing their resistance to fatigue and brittle fracture, and also eliminating buckling deformations of thin-walled structural elements. The developed technologies and equipment provided the possibility of performing electrodynamic treatment of welded joints of ship-building structures and repair welds of intermediate body of aircraft engine, which facilitated their increased operational reliability and service life. 8 Ref., 18 Figures.

*Key words:* electrodynamic treatment, aluminium alloy, welded joint, residual stresses, current pulse, mathematical modeling, current density, plastic deformation

Поступила в редакцію 03.04.2017