



УДК 621.791.09:785.375:539.4

## ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КОЛЬЦЕВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СПЛАВА АМг6

**Л. М. ЛОБАНОВ, Н. А. ПАЩИН, А. Н. ТИМОШЕНКО, О. Л. МИХОДУЙ, П. В. ГОНЧАРОВ**  
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В настоящее время все большее развитие получают методы регулирования сварочных и технологических напряжений, основанные на предварительном деформировании свариваемых элементов, а также электродинамической обработке (ЭДО) сварных швов импульсным током. Целью работы является исследование влияния предварительного разжима свариваемых кромок и ЭДО на регулирование напряженного состояния образцов кольцевых сварных соединений из алюминиевого сплава АМг6, выполненных автоматической сваркой в среде аргона. Контроль напряженного состояния образцов осуществляли методом электронной спекл-интерферометрии с использованием специализированной оснастки. Предварительный разжим кромок осуществляли посредством оригинального устройства силонагружения. Значения предварительных растягивающих напряжений достигали предела текучести сплава АМг6. ЭДО производили на поверхности наплавленного металла в направлении «от середины к краям» при зарядном напряжении емкостного накопителя до 450 В. В результате проведенных исследований установлено, что предварительный разжим и ЭДО позволяют существенно снижать уровень остаточных напряжений в кольцевых сварных соединениях. Библиогр. 10, рис. 6.

*Ключевые слова:* электродинамическая обработка, предварительный разжим свариваемых кромок, алюминиевый сплав, растягивающие напряжения, сжимающие напряжения, кольцевое сварное соединение, автоматическая сварка, емкостной накопитель энергии, разряд тока, плоский индуктор

Сварные конструкции из алюминиевых сплавов находят все более широкое применение в различных отраслях современной промышленности. Одним из факторов, негативно влияющих на работоспособность сварных соединений, являются остаточные напряжения, высокий уровень которых снижает эксплуатационный ресурс конструкций при усталостных и динамических нагрузках, характерных для изделий транспортного машино-, авиа- и судостроения. Поэтому проблема регулирования сварочных остаточных напряжений является актуальной при сварке кольцевых стыковых соединений из легких сплавов.

Существующие методы регулирования напряжений крупногабаритных элементов конструкций, например предварительное деформирование собираемых под сварку деталей, имеют определенные ограничения, связанные с наличием специализированной оснастки, и не всегда могут быть реализованы в условиях поузловой или модульно-блочной сборки–сварки изделия [1].

В настоящее время все большее развитие получают методы регулирования сварочных и технологических напряжений, основанные на обработке металлических материалов и конструкций импульсными электромагнитными полями различной длительности и конфигурации [2–6].

В работе [7] показано, что взаимодействие механических и электромагнитных импульсов влияет на движение дислокационных ансамблей в кристаллических материалах, что вызывает изменение их напряженного состояния.

Одним из методов реализации совместного воздействия импульсного электрического поля плоского индуктора и динамической нагрузки на сварное соединение является электродинамическая обработка (ЭДО) [8]. Оборудование для ЭДО, отличающееся компактностью и мобильностью, позволяет использовать данный вид обработки для регулирования напряженного состояния сварных соединений при монтаже или ремонте крупногабаритных тонкостенных изделий. Применение ЭДО показало ее эффективность при ремонтной сварке судокорпусных конструкций из сплава АМг6 и позволило продлить их эксплуатационный ресурс [9].

Целью настоящей работы являются исследования эффективности регулирования остаточных сварочных напряжений в кольцевых стыковых соединениях из алюминиевого сплава АМг6 при их предварительном деформировании и ЭДО.

В качестве объекта исследования авторами использованы образцы кольцевых сварных соединений из сплава АМг6, сваренных встык. Перед

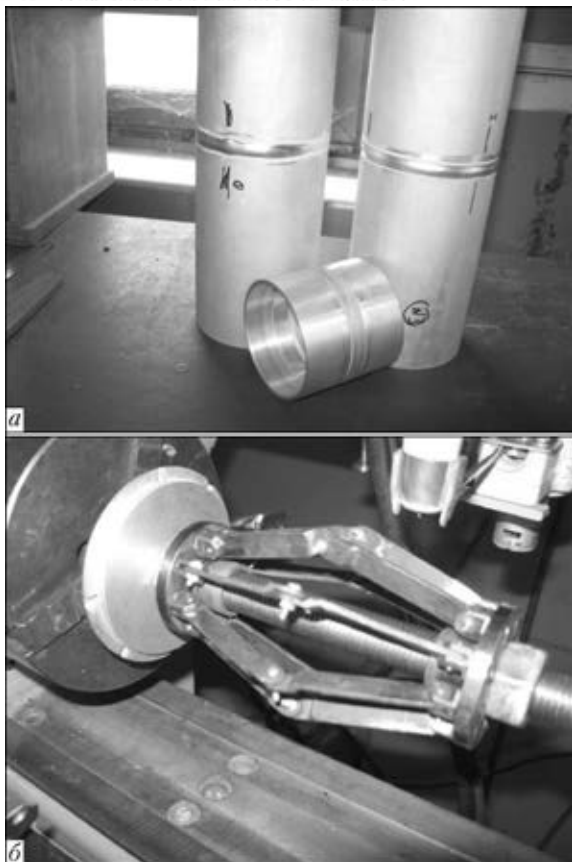


Рис. 1. Общий вид образцов кольцевых стыков из сплава АМг6 (а) и сборочное устройство для их сварки (б) (справа — нагружающая гайка)

сваркой образцы подвергали термообработке с целью устранения в них технологических напряжений, вызванных механической обработкой.

Образцы кольцевого соединения, выполненные встык (рис. 1, а), собирали из двух цилиндрических заготовок сплава АМг6 диаметром 100 мм, высотой 150 мм и толщиной стенки 3 мм. Для обеспечения заданных сборочных зазоров, полного проплавления и формирования обратного валика применяли специализированное сборочное устройство, внешний вид которого представлен на рис. 1, б. Принцип работы устройства основан на преобразовании поступательного движения винтовой пары в радиальное усилие распорных рычагов системы разжимающих шарниров, в местах сочленения которых устанавливали разрезные подкладные кольца с формирующей канавкой. Значение разжимающего усилия подкладных колец регулировали нагружающей гайкой, что обеспечивало гарантированную взаимную центровку цилиндрических заготовок, подкладных колец и оптимальную ориентацию сборочного зазора относительно сварочной головки.

В зоне свариваемых кромок кольцевых стыков задавали два уровня значений начального напряженного состояния  $\sigma_0$  путем их радиального разжима. С помощью механического деформометра контролировали уровень компоненты начального

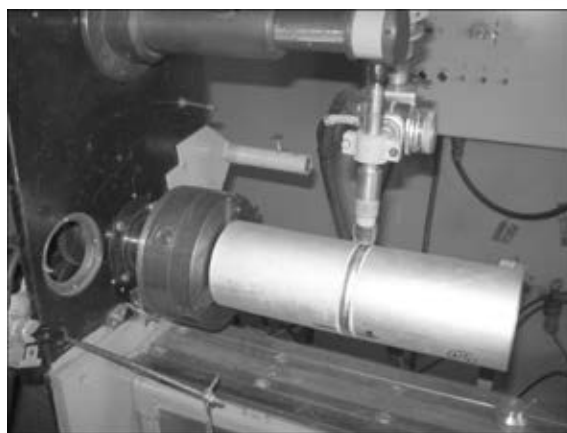


Рис. 2. Аргондуговая сварка образцов кольцевых стыков из сплава АМг6

напряженного состояния в окружном направлении на расстоянии 10 мм от стыка.

В образцах первого типа значения начальных напряжений не превышали 10...15 МПа, что позволило обеспечить как необходимую точность сборки кольцевого стыка под сварку, так и распределение остаточных напряжений, характерное для натуральных конструкций, сваренных без применения силовых устройств.

В образцах второго типа начальные напряжения достигали значения  $\sigma_{0,2}$  для сплава АМг6, что обеспечило формирование пластических деформаций растяжения при сварке и, как следствие, полей сжимающих напряжений в шве.

Сварку неплавящимся электродом кольцевых стыков выполняли на установке «MAGIC WAVE-3000» (рис. 2) при положении горелки «углом назад» с углом наклона к горизонтали  $60^\circ$ . При меньших значениях угла имеет место нестабильное горение дуги, сопровождающееся периодическими выплесками металла из сварочной ванны. Угол между продольными осями неплавящегося электрода и бодена с присадочной проволокой составлял  $90^\circ$ . Процесс осуществляли при линейной скорости 5,4 мм/с, сварочном токе 165 А и напряжении дуги 18 В.

Начальное напряженное состояние образцов кольцевых сварных соединений измеряли бесконтактным методом электронной спекл-интерферометрии. Использовали метод, который основан на измерении деформаций при упругой разгрузке объема металла в исследуемых точках на поверхности образца, вызванной сверлением несквозных отверстий диаметром 1,0 мм [10]. Применяли оптическую схему интерферометра, в которой исследуемый участок образца освещали лучом лазера под одним и тем же углом с двух направлений и таким образом определяли плоскостные компоненты вектора перемещений, характеризующие деформацию образца в плоскости. Угол между нормалью к точке исследуемой поверхности и направлением освещения составлял  $57^\circ$ . Выбор



метода обусловлен необходимостью сохранения целостности образца после регистрации его начального напряженного состояния. Образцы с известным уровнем начальных напряжений подвергали импульсной обработке, а затем повторно измеряли результирующие значения напряжений. Сопоставив параметры напряженного состояния до и после импульсной обработки на конкретном образце сварного соединения, можно судить об эффективности процесса ЭДО. Для определения изменения уровня напряженного состояния сварных соединений спекл-методом использовали малогабаритный интерферометр, который устанавливали непосредственно на поверхность исследуемого образца (рис. 3). Прибор состоит из таких основных компонентов, как спекл-интерферометр, ССD-камера, световод, основания с тремя конусными опорами. Для качественной установки прибора на цилиндрической поверхности кольцевого шва разработали специализированную оснастку. Параметры напряженного состояния образцов кольцевых швов фиксировали только на наружной поверхности соединений.

Измерение напряжений спекл-интерферометрическим методом выполняли после установки интерферометра на поверхности образца. Отраженную световую волну, характеризующую начальное напряженное состояние металла, вводили в память компьютера. Затем в заданной точке поверхности сварного соединения специализированным инструментом сверлили сквозное отверстие диаметром и глубиной 1,0 мм. После упругой разгрузки напряжений, вызванной сверлением, отраженная световая волна также вводилась в память компьютера. После компьютерной обработки световых волн, полученных до и после локальной упругой разгрузки остаточных напряжений, средствами визуализации получали интерференционную картину полос в окрестности отверстия, содержащую информацию о параметрах напряженного состояния в контролируемой точке на поверхности образца. При обработке металла сварного соединения импульсами тока в нем изменяется напряженное состояние, параметры которого определяются в следующем цикле измерений. Цикл включает запись параметров отраженной световой волны до и после сверления, получение интерференционной картины полос, содержащих характеристики напряженного состояния. Разность значений напряжений, получаемых в первом и втором циклах измерений, является показателем эффективности процесса ЭДО применительно к сварным соединениям.

Распределение напряженного состояния изучали на наружной поверхности кольцевых соединений по изменению значений двух его компонент — вдоль  $\sigma_x$  и перпендикулярно  $\sigma_y$  линии шва.

Для обработки образцов импульсами тока использовали установку, основным элементом которой является емкостной накопитель энергии, а рабочим устройством — плоский индуктор, соединенный с диском из неферромагнитного материала и цилиндрическим электродом, сферический торец которого является зоной энерговыделения при контакте с обрабатываемой поверхностью сварного соединения в момент разряда. Диск предназначен для реализации динамической составляющей электродинамического воздействия на металл. Принципы работы установки, изложенные в работе [8], основаны на переходных электродинамических процессах, которые протекают в металле образца при разряде емкостного накопителя.

Для ЭДО образцов использовали сборочное устройство (рис. 4), предназначенное для позиционирования индуктора относительно обрабатываемого образца, а также фиксированного контакта торца электрода с поверхностью металла с усилием прижатия до 60 кг.

Устройство (рис. 4, а) состоит из опорной балки 2 с ложементом из электротехнической меди марки М1, являющимся элементом разрядного контура. Ложемент, расположенный на лицевой стороне балки и соединенный с контактным проводом емкостного накопителя, предназначен для гарантированного прижатия образца 1 в момент токового разряда. Для фиксации плоского индуктора 6 использовали прижимную балку 5, позиционирование которой относительно образца осуществляли направляющими шпильками, а вертикальное усилие прижатия создавали нагружающими гайками 4. Увеличенные фрагменты зоны позиционирования электрода на обрабатываемой поверхности при ЭДО кольцевых соединений представлены на рис. 4, б, где показано расположение плоской катушки индуктивности 7 относительно диска из неферромагнитного материала 8 и элек-

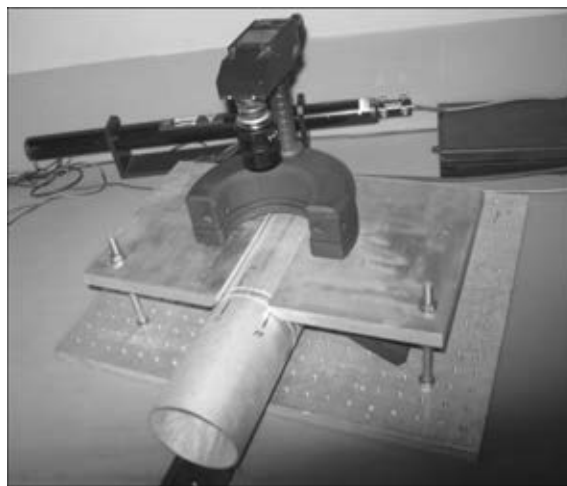


Рис. 3. Прибор и специализированная оснастка для измерения остаточных напряжений сварных кольцевых соединений из сплава АМгб методом спекл-интерферометрии

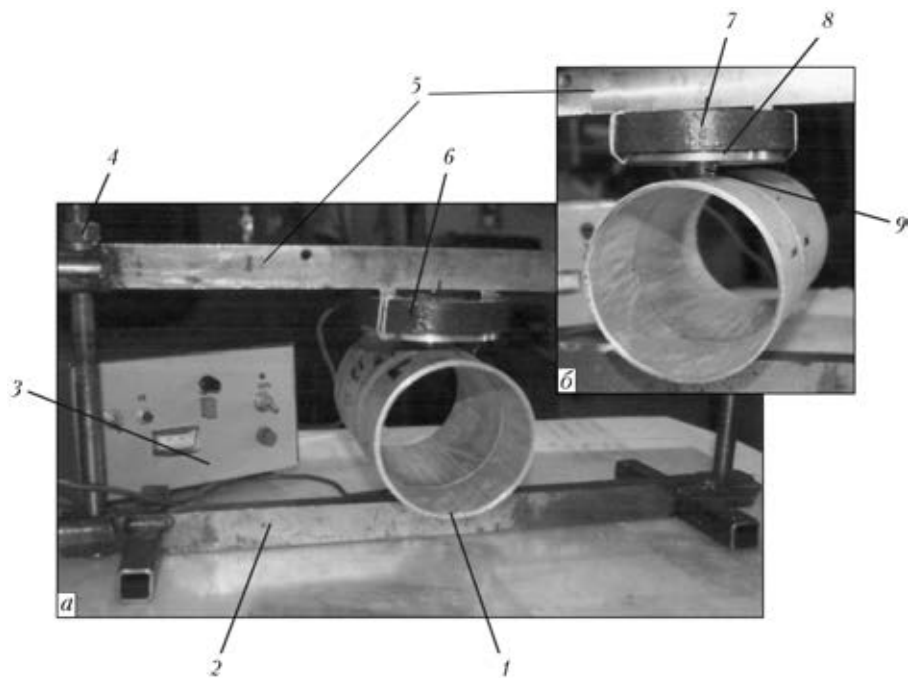


Рис. 4. Сборочное устройство для ЭДО сварных кольцевых соединений из сплава АМг6 (а) и позиционирования индуктора (б): 1 — образец; 2 — балка опорная; 3 — источник питания ЭДО; 4 — шпилька направляющая с нагружающей гайкой; 5 — балка прижимная; 6 — индуктор; 7 — катушка индуктивности; 8 — диск; 9 — электрод

трода 9. Контроль усилия вертикальной нагрузки гаек 3 осуществляли с помощью динамометрического ключа. Установлено, что оптимальным усилием прижатия, обеспечивающим гарантированный контакт торца электрода при отсутствии повреждения обрабатываемой поверхности, является значение нагрузки, близкое к 40 кг.

ЭДО стыковых швов кольцевых соединений выполняли при напряжении заряда 450 В и емкости накопителя 6600 мкФ. Обработку проводили вдоль центра шва в направлении «от середины к краям» с шагом 10 мм таким образом, чтобы первые две зоны импульсных воздействий

располагались на двух противоположных сторонах кольцевого шва, а последующие две — через 90° по отношению к предыдущим. При этом на каждый участок поверхности у линии сплавления приходилось до пяти электродинамических воздействий.

На кольцевых сварных стыках, выполненных без упругопластического разжима кромок, зафиксировано остаточное напряженное состояние, которое характеризуется максимальными значениями продольной  $\sigma_x = 175$  МПа и поперечной компоненты  $\sigma_y = 125$  МПа (рис. 5, а). При этом если растягивающие  $\sigma_x$  монотонно убывают практически до нулевых значений в околошовной зоне, то для  $\sigma_y$  характерна немонотонность распределения значений в области шва, варьируемых от 0 до 50 МПа.

В образцах, сваренных с применением предварительного разжима кромок, напряженное состояние характеризуется трансформацией продольной компоненты растягивающих  $\sigma_x$  в область сжатия до значений  $-125$  МПа при некотором понижении растягивающих  $\sigma_y$  до 75 МПа (рис. 5, б). Таким образом, предварительное силовое воздействие на свариваемые кромки кольцевого соединения приводит к увеличению их диаметров, при этом позитивно влияет на распределение  $\sigma_x$  при практически незначительном влиянии на  $\sigma_y$ . Это можно объяснить подобием механизмов предварительного разжима кольцевых элементов и растяжения плоских пластин и панелей [1].

В образцах, сваренных без разжима кромок с последующей ЭДО, продольная составляющая  $\sigma_x$  также изменила не только значение, но и знак, в результате ее значения составили до  $-100$  МПа, в то время как значения  $\sigma_y$  понизились до 100 МПа

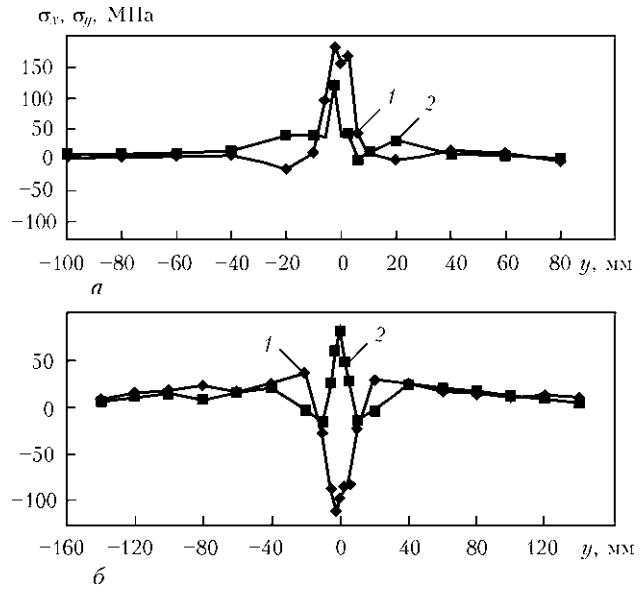


Рис. 5. Остаточное напряженное состояние в кольцевом сварном соединении из сплава АМг6 продольной (1) и поперечной (2) компоненты напряжений без упругопластического разжима (а) и после сварки с предварительным разжимом кромок (б)

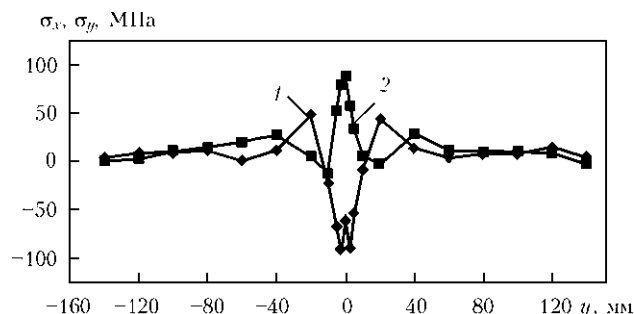


Рис. 6. Напряженное состояние в образце кольцевого соединения после ЭДО продольной (1) и поперечной (2) компоненты напряжений

(рис. 6), что сопоставимо с вариантом сварки в условиях разжима кромок (см. рис. 5, б).

Следует отметить, что особенностью метода разжима является то, что он является комплексом технологических воздействий на соединение, выполняемых как перед сваркой, так и в процессе ее выполнения. Для реализации метода необходимо обеспечить доступ для крепления внутри свариваемых кромок разжимного устройства, выполнения разжима и удаления приспособления.

ЭДО применяется после выполнения сварного соединения и для его реализации не требуется обеспечение доступа к внутренним полостям сварного кольцевого соединения. При этом трудоемкость ЭДО кольцевых соединений сопоставима с трудозатратами, связанными с использованием приспособления для разжима.

Таким образом, при сравнении распределения  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  для двух вариантов выполнения образцов кольцевых соединений, показанных на рис. 5, б и 6, можно заключить, что ЭДО можно применять в условиях, когда метод предварительного разжима кромок не может быть реализован.

### Выводы

1. Разработана экспериментальная методика для оценки влияния предварительного разжима кромок и электродинамической обработки на изменение остаточного напряженного состояния кольцевых сварных соединений.

2. Установлено, что при предварительном разжиме свариваемых кромок кольцевого соединения из сплава АМгб, когда окружные напряжения достигают предела текучести, имеет место переход растягивающих напряжений на внешней поверхности кольцевого шва до 175 МПа в сжимающие, значения которых достигали -125 МПа.

3. Показано, что при электродинамической обработке снижение продольной компоненты напряжений достигает более 100 %.

1. *Сварные строительные конструкции*. В 3 т.: Т. 1. Основы проектирования конструкций / Л. М. Лобанов, В. И. Махненко, В. И. Труфяков и др. — Киев: Наук. думка, 1993. — 416 с.
2. *Research on residual stress reduction by a low frequency alternating magnetic field* / F. Tang, A. L. Lu, J. F. Mei et al. // *J. Mater. Proc. Technol.* — 1998. — 74. — P. 255–258.
3. Степанов Г. В., Бабуцкий А. И., Мамеев И. А. Перераспределение остаточных сварочных напряжений в результате обработки импульсным электромагнитным полем // *Пробл. прочности*. — 2004. — № 4. — С. 60–67.
4. Степанов Г. В., Бабуцкий А. И., Мамеев И. А. Нестационарное напряженно-деформированное состояние в длинном стержне, вызванное импульсами электрического тока высокой плотности // *Там же*. — 2011. — № 3. — С. 1231–1311.
5. *Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы* / Ю. В. Баранов, О. А. Троицкий, Ю. С. Аврамов и др. — М.: МГИУ, 2001. — 844 с.
6. Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Воробьев Е. В. Прочность материалов при криогенных температурах с учетом воздействия электромагнитных полей. — Киев: Изд. Ин-та проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАНУ, 2008. — 504 с.
7. *Движение дислокаций в кристаллах NaCl при комбинированном воздействии механических и электромагнитных импульсов, создаваемых электронным пучком* / В. И. Альшиц, Е. В. Даринская, М. А. Легеньков и др. // *Физ. твердого тела*. — 1999. — 41, вып. 11. — С. 2004–2006.
8. *Эффективность электродинамической обработки алюминиевого сплава АМгб и его сварных соединений* / Н. А. Пашин, А. В. Черкашин, О. Л. Миходуй и др. // *Автомат. сварка*. — 2012. — № 1. — С. 3–7.
9. *Ремонт судокорпусных конструкций из алюминиевого сплава АМгб с применением электродинамической обработки* / Н. А. Пашин, В. П. Логинов, А. И. Бабуцкий и др. // *Там же*. — 2010. — № 9. — С. 39–41.
10. Лобанов Л. М., Савицкий В. В., Ткачук Г. И. Методика определения остаточных напряжений в сварных соединениях и элементах конструкций с использованием электронной спекл-интерферометрии // *Там же*. — 2006. — № 1. — С. 10–13.

Поступила в редакцию 04.06.2013