

УДК 621.791.75.011

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ И РЕГУЛИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛОКАЛЬНОГО ИМПУЛЬСА ТОКА ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ

**Л.М. Лобанов<sup>1</sup>**

акад. НАН Украины, д-р техн. наук

**В.А. Пивторак<sup>1</sup>**

канд. физ.-мат. наук

**В.В. Савицкий<sup>1</sup>**

канд. техн. наук

**Н.А. Пашин<sup>1</sup>**

канд. техн. наук

*<sup>1</sup>Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины*

Разработана электродная система для введения импульсов тока высокой плотности в исследуемый материал для локальной релаксации остаточных напряжений. Разработан новый неразрушающий метод определения остаточных напряжений на основе использования созданной электродной системы совместно с методом электронной спекл-интерферометрии. Применение импульсного электрического тока при повышенных энергетических параметрах применялось для регулирования напряженного состояния сварных конструкций. В статье представлены результаты практического применения разработанных технологий и оборудования.

Ключевые слова: Импульс тока высокой плотности, электроимпульсная обработка, электродинамическая обработка, неразрушающий метод определения остаточных напряжений, спекл-интерферометрия, регулирование остаточных напряжений.

Остаточные напряжения являются важным фактором, влияющим на прочность, качество и эксплуатационные свойства сварных конструкций. Проблема остаточных напряжений приобрела особую актуальность в связи с широким применением в ведущих отраслях современной промышленности высокопрочных сталей и легких сплавов для изготовления сварных конструкций, к которым предъявляются высокие требования к точности изготовления, надежности и долговечности в эксплуатации.

В настоящее время достигнуты значительные успехи в развитии методов и средств для определения и регулирования остаточных напряжений [1–3]. Широкое распространение при исследовании остаточных напряжений получил метод отверстий. Сотрудниками Института электросварки им. Е.О. Патона было предложено применение голографической интерферометрии совместно с высверливанием отверстий для определения остаточных напряжений [4]. В последующих работах другими авторами в исследованиях также использовалась голографическая интерферометрия [5, 6]. Развитие компьютерной техники позволило разработать высокоэффек-

тивные методики определения остаточных напряжений на основе применения электронной спекл-интерферометрии (ESPI) и высверливания малых отверстий [7–9], которые предоставляют достаточно широкие возможности для выявления локальных особенностей распределения остаточных напряжений.

Метод ESPI в сочетании с методом отверстий используется для оперативного и точного определения остаточных напряжений [8]. Он основан на применении оптической схемы спекл-интерферометра, в которой исследуемый объект симметрично освещается под одним и тем же углом с двух направлений, что дает возможность измерять компоненту вектора перемещений в плоскости объекта. Перемещения, вызванные релаксацией остаточных напряжений в материале вследствие высверливания несквозного отверстия, измеряются бесконтактным оптическим методом ESPI. Данные о перемещениях, измеренных вдоль окружности определенном расстоянии ( $2.5r_0$ ) от центра высверленного отверстия радиусом  $r_0$ , используются для определения остаточных напряжений по формулам, полученным в работе [8].

Однако высверливание даже малых отверстий накладывает определенные ограничения при исследовании напряженного состояния конструкций, в которых недопустимы какие-либо повреждения. Поэтому актуальным является создание неразрушающих методов измерения остаточных напряжений.

В Институте электросварки им. Е.О. Патона разработан принципиально новый неразрушающий способ упругой разгрузки остаточных напряжений, заключающийся в пропускании по толщине материала локального импульса электрического тока высокой плотности ( $10^7 - 10^{10} \text{ A/m}^2$ , длительность –  $10^{-4} - 10^{-2} \text{ c}$ ), изменяющегося по определенному закону. Прохождение тока через исследуемый участок вызывает в нем электродинамические процессы, что приводит к локальной релаксации остаточных напряжений [10]. Схема предложенного способа приведена на рис. 1. Для его реализации разработано компактное устройство, позволяющее создать импульсы тока высокой плотности.

После введения импульса тока в локальный участок исследуемого объекта с остаточными напряжениями, происходит их разгрузка, которая вызывает перемещения точек поверхности в окрестности места введения импульса тока, измеряемые методом электронной спекл-интерферометрии. Объем материала, в котором происходит релаксация напряжений, представляет собой полусферу диаметром до 1 мм, и ее размер зависит от плотности импульса тока. Перемещения в точках вдоль окружности с центром в точке введения импульса измеряются с помощью разработанной в ИЭС спекл-интерферометрической системы, внешний вид

которой представлен на рис. 2. Измерения выполняются в следующей последовательности. Спекл-интерферометр устанавливается на поверхности объекта. Отраженная световая волна, характеризующая исходное состояние контролируемого участка, с помощью CCD-камеры вводится в память компьютера. После разгрузки напряжений путем воздействия локальным импульсом тока отраженная световая волна также вводится в память компьютера. После компьютерной обработки этих двух световых волн на мониторе наблюдается интерференционная картина полос, которая содержит информацию об остаточных напряжениях в контролируемом участке объекта.

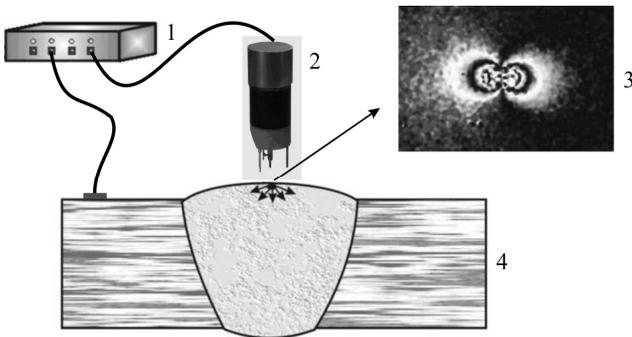


Рис. 1. Схема неразрушающего способа релаксации остаточных напряжений с помощью введения локального импульса тока: 1 – генератор импульсов тока высокой плотности; 2 – устройство для введения импульса тока в контролируемый участок; 3 – интерференционные полосы в окрестности точки введения импульса тока; 4 – сварное соединение

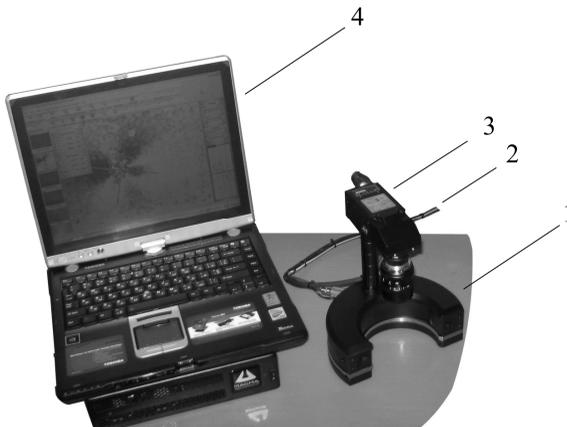


Рис. 2. Спекл-интерферометрическая измерительная аппаратура: 1 – спекл-интерферометр; 2 – световод, передающий излучение от лазера; 3 – CCD-камера; 4 – компьютер

Для оценки эффекта релаксации напряжений при воздействии локального импульса тока проведены эксперименты на балке равного сопротивления, изготовленной из алюминиевого сплава АМг6 (рис. 3). Нагружение такой балки сосредоточенной силой на свободном конце позволяет создать как сжимающие, так и растягивающие напряжения различного уровня не изменяющиеся по её длине. Вдоль поперечного сечения А-А в контролируемые точки исследуемого образца вводился импульс тока с заданными параметрами.

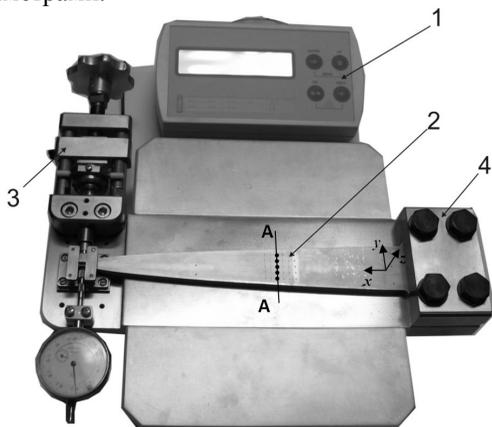


Рис. 3. Нагрузочное устройство с балкой равного сопротивления где:  
1 – цифровой индикатор; 2 – балка равного сопротивления;  
3 – узел механического нагружения; 4 – узел фиксации балки

В результате перераспределения напряжений в зоне введения импульса тока возникали перемещения, которые регистрировались с помощью представленной спекл-интерферометрической аппаратуры. Нарис.4 показаны картины интерференционных полос, характеризующие перемещения, которые были получены после введения локального импульса тока высокой плотности в точки поперечного сечения тестового образца с различными величинами напряжений. Интерферограммы свидетельствуют, что перемещения в окрестности введения импульса тока зависят от уровня напряжений. Значения перемещений линейно изменяются вдоль поперечного сечения балки также, как и величины напряжений. Но при этом в точке на нейтральной оси балки, где напряжения равны нулю, наблюдается начальный эффект от электродинамического воздействия импульса тока. Поэтому для одноосного напряженного состояния можно ввести следующую функцию:

$$\sigma_x = \psi(U_x - U_{x0}).$$

где  $U_x$  – измеряемое перемещение в заданной точке от центра зоны введения локального импульса тока,  $U_{x0}$  – начальные перемещения в этой точке от электродинамического воздействия импульса тока,  $\psi$  – экспериментально определяемый параметр, который зависит от материала объекта и энергетических характеристик электродной системы,  $\sigma_x$  – величина напряжений.

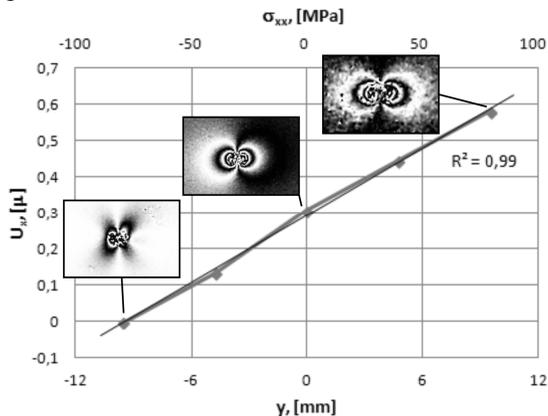


Рис.4. График зависимости перемещений от уровня заданных напряжений  $\sigma_x$ , измеренных методом электронной спекл-интерферометрии на расстоянии 1,25 мм от точки введения импульса тока

Проведенные эксперименты показали перспективность использования локального импульса тока для разгрузки остаточных напряжений в контролируемой зоне. Дальнейшие исследования позволят обеспечить практическое применение нового неразрушающего метода оперативного определения остаточных напряжений, основанного на использовании локального импульса тока высокой плотности в сочетании с электронной спекл-интерферометрией.

Применение электродной системы и источника с более высокими энергетическими параметрами локального импульса тока позволяет уменьшать остаточные напряжения и деформации сварных соединений. Для оценки влияния электродинамических воздействий на изменение напряженного состояния элементов сварных конструкций из алюминиевых сплавов проведен эксперимент на сварном стыковом соединении из сплава АМг6. Пластины размером 450x220x4 мм сваривались вдоль продольной кромки в автоматическом режиме за один проход неплавящимся электродом в среде аргона с присадочной проволокой СвАМг6 диаметром 2 мм. Технология сварки обеспечивала гарантированный провар по толщине и качественное формирование шва.

Обработку импульсами тока проводили вдоль сварного шва с шагом 5 мм. Распределение продольных остаточных напряжений в поперечном сечении шва обработанного и необработанного сварного стыкового соединения представлено на рис. 5. Видно, что электродинамическая обработка (ЭДО) сварного соединения на указанном режиме привела к значительному снижению остаточных напряжений.

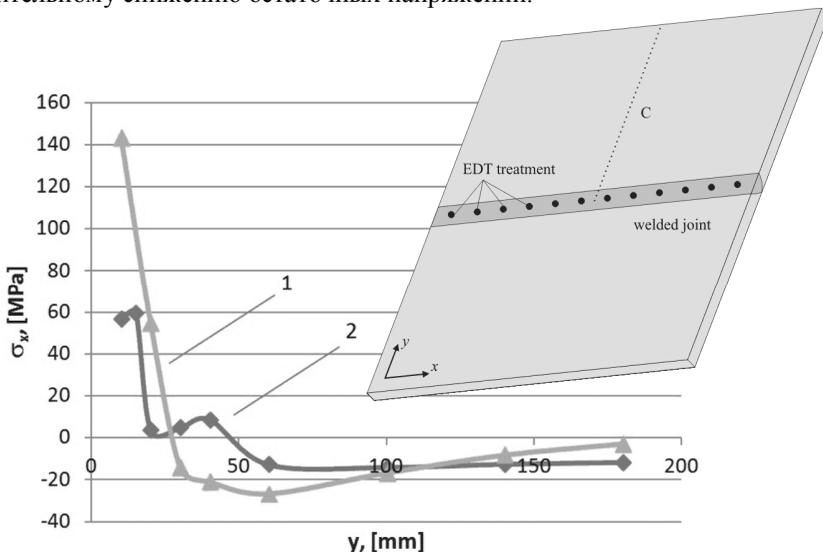


Рис. 5. Распределение продольных остаточных напряжений в поперечном ко шву сечении до обработки (1) и после электродинамической обработки (2) сварного шва

Необходимость регулирования остаточного коробления тонколистовых металлических конструкций, вызванного сваркой, является одной из актуальных проблем современного сварочного производства.

Перспективным подходом к правке сварных конструкций, является ЭДО. Как показано выше, воздействие токовых импульсов на сварное соединение приводит к релаксации напряженно-деформированного состояния, определяющего параметры остаточного формоизменения. Исследования влияния электродинамических воздействий на остаточное формоизменение элементов сварных конструкций проводили на тонколистовых фрагментах обшивки и силового набора судовых корпусов длиной до 10 метров с толщиной обшивки 3-5 мм из сплава АМг6. ЭДО применяли после восстановления эксплуатационных повреждений корпусов, для устранения которых использовали технологию ремонта, включающую в себя механическую разделку трещин с последующей их заваркой.

Проводили ЭДО ремонтных швов силового набора и обшивки корпуса с целью снижения уровня их остаточного коробления от сварки. После ремонтной сварки в поперечной жесткости днища формировался продольный прогиб со стрелой - до 15 мм, что делало невозможным обеспечение плоскостности при сборке обшивки днища. Использование ЭДО (рис. 6,а) уменьшило стрелу прогиба поперечной жесткости до 1,0 мм, что позволило обеспечить плоскостность её сопряжения с настилом днища до требуемых допусков. Необходимость выполнения ЭДО обшивки продиктована тем, что в зоне ремонтного шва возникало локальное выпучивание днища со стрелой прогиба до 8 мм, что затрудняло обеспечение гидродинамических характеристик судна. Применение ЭДО (рис. 6,б) позволило снизить остаточную величину прогиба практически до нулевых значений.

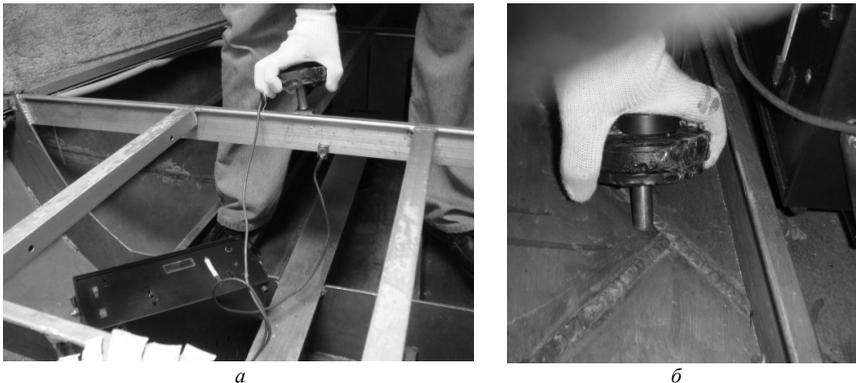


Рис. 6. Электродинамическая обработка сварных ремонтных швов корпуса судового корпуса

Представленные результаты исследований свидетельствуют об эффективности применения электродинамической обработки импульсами тока высокой плотности для регулирования напряженно-деформированных состояний сварных соединений и конструкций.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лобанов Л.М., Махненко В.И., Труфяков В.И. и др. Сварные строительные конструкции. Т.1. Основы проектирования конструкций// - Киев.:Науковадумка, 1993.- 416 с.
2. K. Masubuchi. Analysis of welded structures residual stresses, distortion and their consequences. London.-Pergamon Press, 1980 – 642 p.
3. D. Rodaj. Welding residual stresses and distortion.-Dusseldorf : DVS-Verlag, 2003.-397 p.

4. *Лобанов Л.М., Касаткин Б.С., Пивторак В.А., Андрущенко С.Г.* Определение остаточных напряжений методом голографической интерферометрии с использованием одной голограммы//Доклады АН СССР, 1983, т.271. №3, с.557-561.
5. *A. Makino, D. Nelson.* Residual-stress determination by single-axis holographic interferometry and hole drilling - Part I: Theory / Exp.Mech.-1994.-34.- pp. 66-78.
6. *S.T. Lin, C.T. Hsieh, C.P. Hu.* Two holographic blind-hole methods for measuring residual stresses. Exp.Mech.-1994.-34(2): pp.141-147.
7. *E. Ponslet, M. Steinzig.* Residual stress measurement using the hole drilling method and laser speckle interferometry. Part II: Analysis technique /Exp Techniques.-2003.-27(4): pp. 17-21.
8. *Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Савицкий В.В., Ткачук Г.И.* Методика определения остаточных напряжений в сварных соединениях и элементах конструкций с использованием электронной спекл-интерферометрии//Автоматическая сварка.2006.-№1 с.10-13.
9. *L. Lobanov, V. Pivtorak, V. Savitsky, G. Tkachuk.* Technology and Equipment for Determination of Residual Stresses in Welded Structures Based on the Application of Electron Speckle-Interferometry. Materials Science Forum 768, 166-173.
10. *Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Пацун М.О. та інші.* Нові методи оцінки технічного стану зварних з'єднань, визначення і регулювання залишкових напружень// Зб. „Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин”, ІЕЗ ім.Є.О.Патона НАНУ, 2006, с.368-373.

## REFERENCES

1. *L.M. Lobanov, V.I. Makhnenko, V.I. Trufiakov.* Welded engineering structures. - K: Naukova Dumka, 1993.-Vol.1 - 416 p.
2. *K. Masubuchi.* Analysis of welded structures residual stresses, distortion and their consequences. London.-Pergamon Press, 1980 – 642 p.
3. *D. Rodaj.* Welding residual stresses and distortion.-Dusseldorf : DVS-Verlag, 2003.-397 p.
4. *L.M. Lobanov, B.S. Kasatkin, V.A. Pivtorak, S.G. Andrushchenko* Determination of residual stresses by holographic interferography method using one hologram // Doklady AS USSR.-1983.-Vol.271.-No.3.- pp. 557-561.
5. *A. Makino, D. Nelson* Residual-stress determination by single-axis holographic interferometry and hole drilling - Part I: Theory / Exp.Mech.-1994.-34.- pp. 66-78.
6. *S.T. Lin,C.T. Hsieh,C.P. Hu.* Two holographic blind-hole methods for measuring residual stresses. Exp.Mech.-1994.-34(2): pp.141-147.
7. *E. Ponslet, M.Steinzig* Residual stress measurement using the hole drilling method and laser speckle interferometry. Part II: Analysis technique /Exp Techniques.-2003.-27(4): pp. 17-21.
8. *L. M. Lobanov, V. A. Pivtorak, V.V. Savitsky, G. I. Tkachuk:* Procedure for Determination of Residual Stresses in Welded Joints and Structural Elements using Electron Speckle-Interferometry. ThePatonWeldingJournal. 1/2006, pp.24-29.
9. *L.Lobanov, V.Pivtorak, V.Savitsky, G.Tkachuk.* Technology and Equipment for Determination of Residual Stresses in Welded Structures Based on the Application of Electron Speckle-Interferometry. Materials Science Forum 768, 166-173.
10. *L.M. Lobanov, V.A.Pivtorak, N.A.Pashchin et al.* New methods of evaluation of technical state of welded joints, determination and control of residual stresses. Collection of scientific papers.- E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU, 2006.-pp. 368-373.

УДК 621.791.75.011

*Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Савицький В.В., Пащин М.О.*

**Визначення та регулювання залишкових напружень з використанням імпульсів струму високої щільності // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2015**

Досліджується вплив локальних імпульсів струму на релаксацію напружень. Розроблено новий неруйнівний метод визначення залишкових напружень на основі використання електронної спекл-інтерферометрії в поєднанні з введенням імпульсів струму високої щільності. Створено нові технології регулювання залишкових напружень та деформацій з використанням електродинамічної обробки.

*Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Савицький В.В., Пащин Н.А.*

**Определение и регулирование остаточных напряжений с применением локального импульса тока высокой плотности // Сопротивление материалов и теория сооружений. – 2015**

Исследуется влияние локальных импульсов тока на релаксацию напряжений. Разработан новый неразрушающий метод определения остаточных напряжений на основе использования электронной спекл-интерферометрии в комбинации с введением импульса тока высокой плотности. Созданы новые технологии управления и регулирования остаточных напряжений и деформаций с применением электродинамической обработки.

*L.Lobanov, V.Pivtorak, V.Savitsky, N.Paschin*

**Determination and control of residual stresses using high-density local current pulses**

An electrode system for inducing a high density pulsed electric current into the material for local relaxation of residual stresses has been proposed. A non-destructive technology for determination of residual stresses using electron speckle interferometry in combination with a local pulsed electric current treatment has been developed. Application of pulsed electric current at increased power parameters was investigated for control of stressed state of welded structures. Results of practical application of the developed technologies and equipment are presented.

**ЛОБАНОВ Леонід Михайлович** академік НАН України, д.т.н., проф., заст. директора ІЕЗ ім.Є.О.Патона НАНУ

**ПІВТОРАК В'ячеслав Автономович** к.ф.-м.н., ст.наук.співр. відділу Оптимізації зварних конструкцій ІЕЗ ім.Є.О.Патона НАНУ

**САВИЦЬКИЙ Віктор Володимирович** к.т.н., ст.наук.співр. відділу Оптимізації зварних конструкцій ІЕЗ ім.Є.О.Патона НАНУ

**ПАЩИН Микола Олександрович** к.т.н., ст.наук.співр. відділу Оптимізації зварних конструкцій ІЕЗ ім.Є.О.Патона НАНУ

*Адреса робоча: 03680 Україна, м.Київ, вул. Малевича (Боженка), 11. Інститут електрозварювання ім.Є.О.Патона НАН України.*

*Роб. тел: +38044 2002455, +38044 2052312*

*E-mail [holo@paton.kiev.ua](mailto:holo@paton.kiev.ua)*