



## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ТЕРМИЧЕСКАЯ ПРАВКА СВАРНЫХ ТОНКОЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Академик **Б. Е. ПАТОН**, академик НАН Украины **Л. М. ЛОБАНОВ**, **Г. А. ЦЫБУЛЬКИН**, д-р техн. наук,  
**О. В. МАХНЕНКО**, канд. техн. наук, **Ю. Н. ПЕРЕВЕРЗЕВ**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Разработана автоматизированная термическая правка сварных тонколистовых конструкций с деформациями бухтиноватости. Создан автоматизированный комплекс для термической правки сварных тонколистовых конструкций на основе математического моделирования, манипуляционного робота, системы измерения деформаций и микроплазменного источника нагрева. Автоматизированная термическая правка позволяет исключить квалифицированный ручной труд, обеспечивает высокое качество поверхности листа сварной конструкции, повышает производительность процесса, улучшает экологические показатели.

*Ключевые слова:* сварные тонколистовые конструкции, сварочные деформации, термическая правка, автоматизация процесса, математическое моделирование

Опыт изготовления сварных тонколистовых конструкций показывает, что часто встречаемый вид местных деформаций — коробление (бухтиноватость) металла листа образуется вследствие потери устойчивости от напряжений сжатия, вызванных продольной усадкой сварных швов от приварки ребер жесткости. Если эти деформации превышают допустимый уровень, обычно используют термическую правку, в результате которой в металле листа возникают пластические деформации укорочения, позволяющие убрать «лишний» металл.

Термическую правку сварных тонколистовых конструкций можно рассматривать как непродуктивные затраты. Так, на судостроительных заводах ее объемы по затратам квалифицированной рабочей силы составляют 10... 15 % суммарного объема затрат на сборку и сварку корпусных конструкций, а в некоторых случаях при правке тонкостенных конструкций могут достигать 40... 45 % и более [1–3]. При производстве корпусов вагонов деформации бухтиноватости составляют приблизительно 50 % всех видов сварочных деформаций формоизменения, а затраты на термическую правку могут достигать 20 % стоимости изготовления корпуса вагона [4]. При этом до настоящего времени нет данных относительно разработки и применения автоматизированной термической правки сварных тонкостенных конструкций.

Величина остаточных пластических деформаций при термической правке зависит от максимального значения и распределения температуры нагрева, мощности источника, количества и расположения мест нагрева, остаточных напряжений и жесткости конструкции, жесткости внешнего закрепления и пр. Таким образом, эффективность термической правки зависит от большого количества параметров, что является основной проблемой при автоматизации такой технологической операции. Одним из путей решения этой проблемы является выбор оптимальных параметров нагрева, количества и расположения пятен нагрева на основе

математического моделирования процесса термической правки для каждой конкретной конструкции. Современный уровень компьютерной техники и расчетных методов прогнозирования напряженно-деформированного состояния в тонколистовых конструкциях позволяет проводить такое моделирование и определять оптимальные параметры процесса термической правки оперативно, в режиме реального времени.

При автоматизации процесса термической правки тонколистовых сварных конструкций важен правильный выбор источника нагрева. Традиционно используется нагрев газовым пламенем, однако этот источник нагрева имеет ряд недостатков с точки зрения автоматизации процесса. Целесообразно рассмотреть возможность применения альтернативных источников нагрева, например, электросопротивлением, индукционным, плазменным и другими источниками. Для того чтобы автоматизировать контроль формы сварной конструкции и позиционирование нагревающего устройства, необходимо использовать либо промышленный робот либо специальный манипулятор.

**Математическое моделирование.** Оно может помочь решить две задачи. Во-первых, определить оптимальные параметры нагрева, при которых возможно получение максимальных остаточных пластических деформаций усадки при отсутствии местной потери устойчивости листа металла. Во-вторых, определить необходимое количество местных нагревов и их расположение для того, чтобы устранить или уменьшить деформации коробления конструкции в допустимых пределах. Математическое моделирование процесса термической правки должно выполняться оперативно, в режиме реального времени.

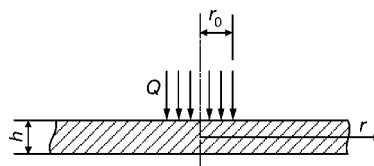


Рис. 1. Схема нагрева круглого пятна в листе металла ( $h$  — толщина листа;  $r_0$  — радиус пятна нагрева;  $Q$  — мощность источника нагрева)

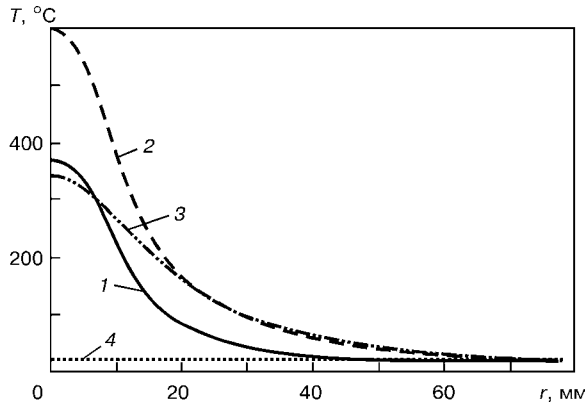


Рис. 2. Расчетные распределения температуры в стальном листе в разные моменты времени от начала нагрева: 1 –  $t = 10$ ; 2 – 30; 3 – 35; 4 – 300 с

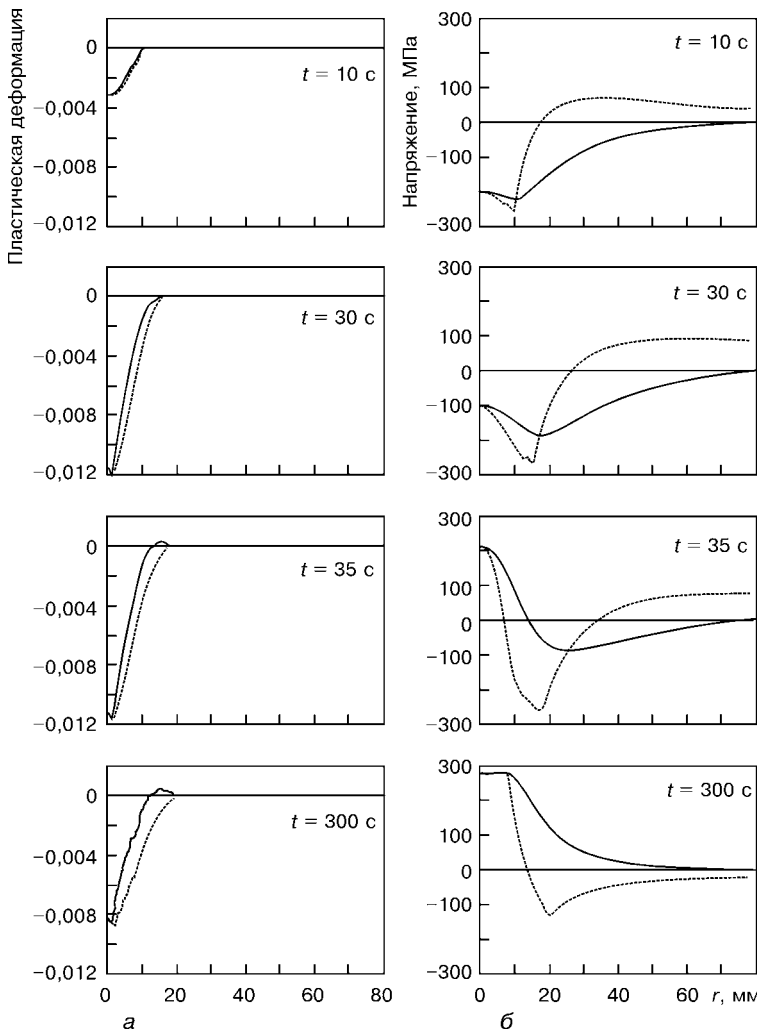


Рис. 3. Расчетные распределения пластических деформаций (а) и напряжений (б) в стальном листе в разные моменты времени от начала нагрева: сплошная кривая – радиальные деформации, точечная – тангенциальные

льного времени, т. е. математическая модель должна быть максимально упрощена. С этой целью форма пятна нагрева была выбрана круглой (рис. 1). Это позволило разработать для решения первой основной задачи одномерную модель нагрева круглого пятна в листе металла бесконечных размеров. Были приняты следующие допущения: плоское напряженное состояние и отсутствие перемещений из плоскости; симметрия в плоскости

листа; неограниченные размеры листа, что соответствует реальным условиям нагрева концентрированным источником на некотором удалении от края листа. При решении использовали методы решения задач термопластичности [5]. В результате последовательного прослеживания образования и развития пластических деформаций во время нагрева и остывания определяли остаточные пластические деформации усадки от такого нагрева в листе металла. Модель дополнена также возможностью учета процесса местной потери устойчивости. В результате путем последовательного уточнения определяли оптимальные параметры нагрева, при которых возможно получение максимальных остаточных пластических деформаций усадки при отсутствии местной потери устойчивости листа металла.

В качестве примера на рис. 2 и 3 приведены расчетные данные распределений температуры, пластических деформаций и напряжений в стальном (Ст 3) листе толщиной 2 мм в разные моменты времени от начала нагрева. Радиус пятна нагрева 10 мм, эффективная мощность источника нагрева 245 Дж/с, время нагрева 30 с. На рис. 4 приведены данные из работы [6] относительно рекомендуемых диаметров нагрева до температуры 600 °С, а также полученные расчетные данные относительно максимальных диаметров пятна, при которых еще не возникает местной потери устойчивости при различном времени нагрева до температуры 600 °С. Чем меньше время нагрева, тем больше максимальный радиус пятна нагрева. Для получения этих данных использовали разработанный подход, в котором потеря устойчивости происходит в достаточно большой области, где возникают температурные напряжения сжатия. Для оценки критического состояния, при котором происходит потеря устойчивости, использовали метод Бубнова-Галеркина для жесткой круглой пластины, шарнирно опирающейся по контуру и свободной в радиальном направлении [7].

После того, как вычислены оптимальные параметры круглого пятна нагрева для данного материала и толщины листа металла, необходимо определить количество таких пятен нагрева и их расположение для данной конструкции с учетом ширины и длины зоны бухтиноватости, количества волн бухтиноватости и их максимальных прогибов (рис. 5). Для оценки «лишней» площади  $F$  листа, которую необходимо убрать при термической правке в рамках зоны бухтиноватости  $0 < x < a$ ,  $0 < y < b$ , в общем виде используется формула

$$F = \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b \left[ \left( \frac{dU_z}{dx} \right)^2 + \left( \frac{dU_z}{dy} \right)^2 \right] dx dy, \quad (1)$$

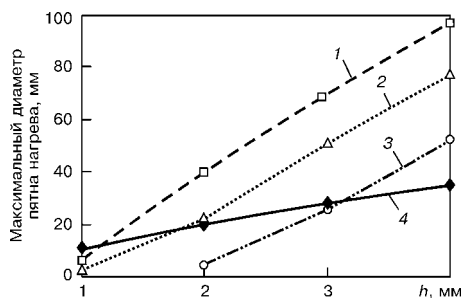


Рис. 4. Зависимость максимального диаметра пятна нагрева от толщины листа: 1 –  $t = 10$  с; 2 – 30 с; 3 – 60 с; 4 – расчетные данные Кузьминова

где  $U_z$  – перемещение точек листа в нормальном к поверхности направлении.

Величину  $F$  можно также приблизительно определить, если известно только значение максимального прогиба  $f_0$  в центре зоны бухтиноватости  $0 < x < a$ ,  $0 < y < b$ :

$$F = \frac{f_0^2 \pi^2}{8} \left( \frac{a}{b} + \frac{b}{a} \right) \quad (2)$$

В результате нагрева круглого пятна в листе металла образуются остаточные пластические деформации усадки  $\epsilon_{rr}^p(r)$ ,  $\epsilon_{\beta\beta}^p(r)$  (где  $r$  – текущий радиус), которые приводят к уменьшению площади листа металла

$$F_1 = 2\pi \int_0^\infty r (\epsilon_{rr}^p + \epsilon_{\beta\beta}^p) dr \quad (3)$$

Таким образом, если определены величины «лишней» площади листа металла  $F$  и уменьшения площади листа металла от одного пятна нагрева  $F_1$ , то необходимое количество пятен нагрева приблизительно равно

$$N = \frac{F}{F_1} \quad (4)$$

При определении оптимального размещения пятен нагрева по площади листа металла с бухтиноватостью используются следующие основные правила [6, 8]:

пятна нагрева не могут быть расположены возле приваренных ребер жесткости ближе, чем на 75...100 мм, иначе созданные нагревом пластические деформации усадки увеличат прогиб бухтиноватости аналогично действию усадки от сварных швов;

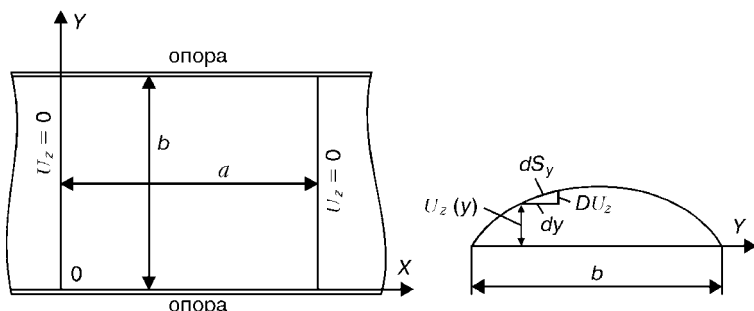


Рис. 5. Схема участка сварной конструкции размером  $a \times b$  с деформацией бухтиноватости

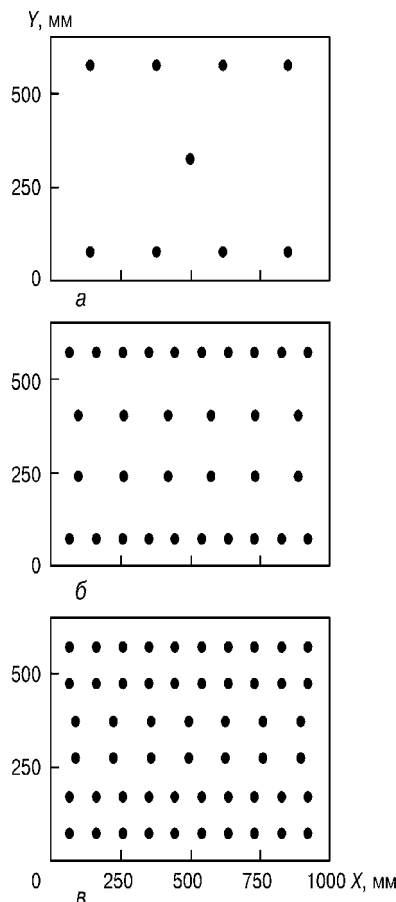


Рис. 6. Размещение пятен нагрева для различных максимальных прогибов бухтиноватости 5 (а), 10 (б) и 13 мм (в)

пятна нагрева в первую очередь размещаются вдоль приваренных ребер жесткости в зоне остаточных напряжений сжатия, что в некоторой степени способствует образованию и развитию пластических деформаций усадки;

расстояние между соседними пятнами нагрева определяется таким образом, чтобы температурные поля от пятен нагрева не влияли друг на друга, что позволяет проводить термическую правку без перерывов на охлаждение листа металла;

если при выполнении указанных выше правил невозможно расположить все необходимое количество пятен нагрева по площади листа, то процесс термической правки следует разбить на два, три или больше серий нагрева, которые выполняются после остывания листа металла.

На рис. 6 приведен пример размещения круглых пятен нагрева (радиус пятна нагрева 10 мм, мощность источника нагрева 245 Дж/с, время нагрева 30 с) по площади листа размером  $1000 \times 650 \times 2$  мм для различных максимальных прогибов бухтиноватости (5, 10 и 13 мм). Параметры пятна нагрева найдены как оптимальные с точки зрения максимальных остаточных пластических деформаций усадки для листа металла из стали марки Ст3 толщиной 2 мм при максимальной температуре нагрева  $600^\circ\text{C}$ , времени нагрева 30 с и отсутствии местной потери устойчивости листа во время нагрева.



Рис. 7. Источник индукционного нагрева токами высокой частоты с нагревающим устройством

**Выбор источника нагрева.** Традиционно, как уже отмечалось, для термической правки используется нагрев газовым пламенем. Однако этот источник нагрева имеет ряд недостатков с точки зрения автоматизации процесса и обеспечения стабильных характеристик нагрева. К тому же газопламенный нагрев имеет низкие экологические показатели.

Испытания источника нагрева электросопротивлением выявили такой существенный недостаток, как повышенные требования к чистоте поверхности листа металла, а также повреждения поверхности листа, что при термической правке недопустимо.

Источник индукционного нагрева токами высокой частоты на основе генератора мощностью 15 кВт и специально разработанного индукционного нагревающего устройства (рис. 7) показал эффективность для толщины листа металла от 6 мм и выше. Для меньшей толщины используемый источник индукционного нагрева не обеспечивал малых размеров пятна нагрева, что приводило к местной потере устойчивости листа металла.

Малые размеры зоны концентрированного нагрева удалось обеспечить с помощью микроплазменного источника нагрева МПИ-4 мощностью 2 кВт с плазмотроном косвенного действия (рис. 8). При этом микроплазменный нагрев не зависит от чистоты поверхности, не повреждает поверхность листа металла при правильно выбранном режиме, легко управляется, имеет низкое потребление энергии и высокие экологические показатели. К недостаткам следует отнести сложность обеспечения стабильных характеристик при продолжительных режимах работы. Учитывая доступность источника нагрева МПИ-4 и возможность создания горелки косвенного действия, был выбран микроплазменный источник нагрева.

Лазерный источник нагрева расфокусированным лучом удовлетворяет практически всем требованиям, предъявляемым к источнику нагрева для термической правки тонколистовых конструкций:

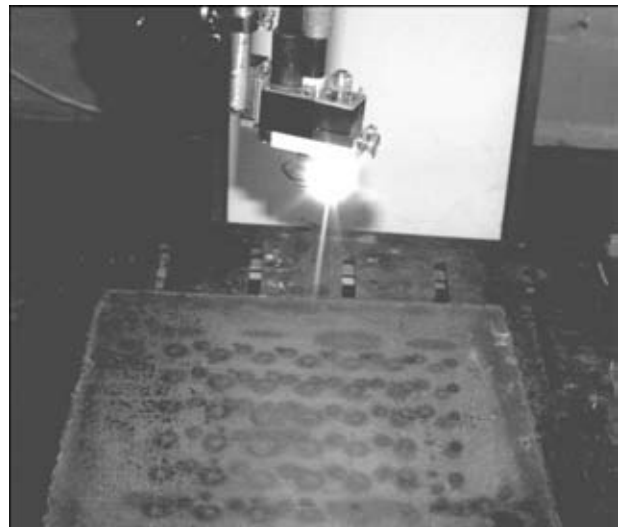


Рис. 8. Микроплазменный источник нагрева МПИ-4 с горелкой косвенного действия

высококонцентрированный нагрев, простота регулировки и управления, стабильность характеристик, экологичность. Основной недостаток — высокая стоимость. Однако, учитывая современную тенденцию к резкому снижению цены на лазерные источники, можно отнести их к наиболее перспективным источникам нагрева для автоматизации процесса термической правки.

**Система контроля деформаций конструкции.** Автоматизация процесса термической правки тонколистовых конструкций потребовала создания системы оценки величины деформаций. Разработанная система обеспечивает измерение деформаций в программно задаваемых точках, равномерно расположенных с определенным шагом по всей площади листа конструкции. При этом по разработанному алгоритму [9] осуществляется локализация точек максимальных деформаций, измеряются и фиксируются в памяти робота координаты этих точек и значения самих деформаций. На основе данной информации управляющая программа определяет количество и расположение пятен нагрева, необходимых для термической правки бухтиноватости, либо прекращает процесс, если деформации конструкции находятся в допуске. В

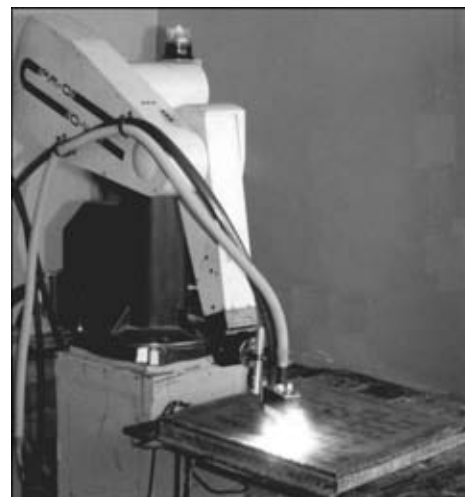


Рис. 9. Автоматизированный комплекс для термической правки тонколистовых сварных конструкций

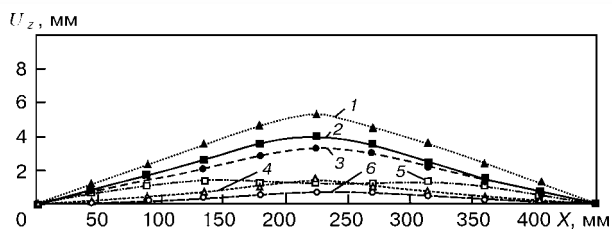


Рис. 10. Результаты измерения прогибов  $U_z$  сварных образцов в центральном поперечном сечении до (1–3) и после (4–6) автоматизированной термической правки; 1–6 — номера образцов

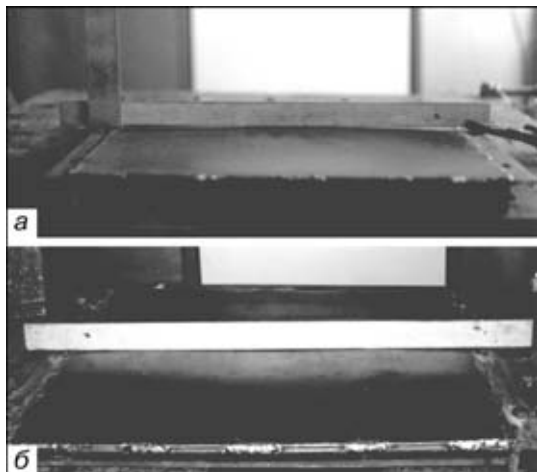


Рис. 11. Сварной образец № 1 (450×450×2 мм) до (а) и после (б) автоматизированной термической правки

качестве измерительного элемента системы контроля использовали потенциометрический датчик линейных перемещений, обладающий удовлетворительной точностью ( $\pm 0,2$  мм) и простотой обработки сигнала.

**Автоматизированный комплекс.** На основе разработанных математических моделей создан автоматизированный комплекс для термической правки тонколистовых сварных конструкций (рис. 9), включающий манипуляционный робот РМ-01 (PUMA 560), оснащенный системами контроля деформаций и управления процессом правки, и микроплазменный источник нагрева. Датчик деформаций и плазмотрон, выполняющий роль нагревающего устройства, размещены на рабочей головке робота таким образом, чтобы переход от операции измерения к операции нагрева и, наоборот, происходил в результате простого поворота головки, выполняемого по команде робота. Управляющая программа может находиться в управляющем блоке робота либо в компьютере, который имеет прямую связь с системой управления роботом. Процесс автоматизированной правки происходит следующим образом. Оператор вводит в компьютер данные о материале и толщине листа металла, энергетические параметры источника нагрева и размеры пятна нагрева. Компьютер определяет оптимальную продолжительность нагрева (при необходимости могут быть рассчитаны оптимальные мощность нагрева и радиус пятна). Затем оператор в режиме «обучения» фиксирует в памяти робота координаты трех угловых точек поверхности листа, для того чтобы задать границы области бухтиноватости и так называемую нулевую плоскость, относительно

которой и будут производиться измерения деформаций. Далее процесс правки происходит полностью в автоматическом режиме: сначала изменяется деформация листа, затем данные измерений обрабатываются, после чего происходит нагрев необходимого количества пятен в определенных программой местах. Некоторое заданное время робот ждет остывания конструкции, после чего повторяет измерения деформаций. Данные измерений обрабатываются и процесс правки заканчивается (если деформации конструкции в допуске), либо повторяется с учетом последних измерений.

**Результаты испытаний.** С помощью созданного комплекса в лабораторных условиях были проведены эксперименты по автоматизированной термической правке тонколистовых конструкций на малых образцах размером 450×450 мм. Образец получали приваркой листа (Ст 3) толщиной 2 мм к рамке из уголка 50×50 мм. Величину деформаций бухтиноватости регулировали погонной энергией или длиной сварных швов. На рис. 10 приведены результаты измерений прогибов трех сварных образцов 450×450×2 мм в центральном поперечном сечении до и после автоматизированной термической правки. На рис. 11 показан сварной образец № 1 с деформацией бухтиноватости до правки и после. Величина прогиба была уменьшена с 4 до 1,4 мм. Учитывая малые общие размеры образца, это хороший результат. Серия экспериментов подтвердила принципиальную возможность применения автоматизированной термической правки тонколистовых конструкций. Преимущества автоматизированной правки очевидны — процесс безударный, исключает квалифицированный ручной труд, обеспечивает высокое качество поверхности сварной конструкции, повышает производительность в результате оптимизации процесса и возможности управления одним оператором нескольких комплексов, улучшает экологические показатели.

## Выводы

1. Впервые показана возможность создания технологии автоматизированной термической правки сварных тонколистовых конструкций с деформациями бухтиноватости.

2. Создан автоматизированный комплекс для термической правки сварных тонколистовых конструкций на основе математического моделирования, манипуляционного робота, системы измерения деформаций и микроплазменного источника нагрева.

3. Процесс автоматизированной термической правки позволяет исключить квалифицированный ручной труд, обеспечивает высокое качество поверхности листа сварной конструкции, повышает производительность процесса, улучшает экологические показатели.

4. Автоматизированная термическая правка сварных тонколистовых конструкций может найти применение в отраслях промышленности, которые производят различные корпусные сварные конструкции: судо-, вагоно-, резервуаростроении и пр.



1. *Сварные* строительные конструкции: Справочник / Под ред. Л. М. Лобанова. — Т. 1: Основы проектирования конструкций. — Киев: Наук. думка, 1993. — 416 с.
2. *Лопатин Н. И.* Расчет общих и местных сварочных деформаций при сварке тонколистовых конструкций из алюминиевых сплавов // *Вопр. материаловедения*. — 1998. — № 4. — С. 47–52.
3. *Заикин В. М.* Расчет режимов тепловой безударной правки сварных конструкций из алюминиево-магниевого сплавов // *Автомат. сварка*. — 1984. — № 6. — С. 62–66.
4. *Matsui S.* Prevention of welding deformations in thin-skin welded structures // *J. of the Light Metal Welding and Construction*. — 1982. — 20, № 1. — P. 3–11.
5. *Махненко В. И.* Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. — Киев: Наук. думка, 1976. — 320 с.
6. *Кузьминов С. А.* Сварочные деформации судовых корпусных конструкций. — Л.: Судостроение, 1974. — 286 с.
7. *Вольмир А. С.* Устойчивость деформируемых систем. — М.: Наука, 1967. — 984 с.
8. *Михайлов В. С.* Правка судовых сварных корпусных конструкций. — Л.: Судостроение, 1972. — 253 с.
9. *Цыбульский Г. А.* Алгоритм поиска максимальных деформаций листовых конструкций с помощью манипуляционного робота // *Автомат. сварка*. — 1999. — № 6. — С. 55–57.

Automated thermal strightening of welded sheet structures with buckling deformations has been developed. An automated system has been designed for thermal sraightening of welded sheet structures, based on application of mathematical simulation, manipulation robot, deformation measurement system and microplasma heat source. Automated thermal strightening allows elimination of skilled manual labour, provides a high quality of the surface of a welded structure sheet, improves process efficiency and ecological characteristics.

Поступила в редакцию 31.10.2002



## ПРОБЛЕМЫ СВАРКИ, МЕТАЛЛУРГИИ И РОДСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

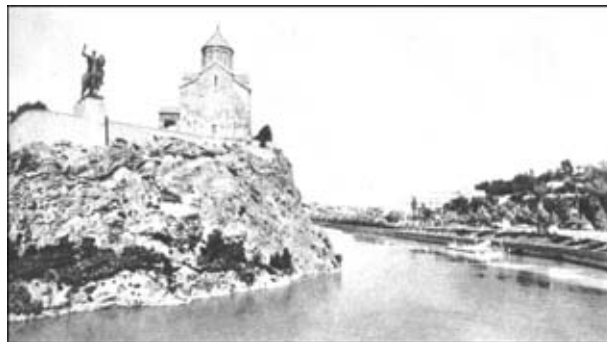
VIII Международная научно-техническая конференция

октябрь 2003 г.

г. Тбилиси

### ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Ассоциация сварщиков Грузии  
 Институт металлургии и материаловедения  
 им. Ф. Н. Тавадзе АН Грузии  
 Межгосударственный научный совет по сварке  
 и родственным технологиям  
 Грузинский технический университет  
 Институт электросварки им. Е. О. Патона  
 НАН Украины  
 Международная Ассоциация «Сварка»  
 Департамент Грузии по науке и технологиям  
 Союз научных и инженерных обществ Грузии  
 Международная нефтяная корпорация Грузии  
 Инженерная академия Грузии  
 Государственный военный научно-технический  
 центр «Дельта»  
 Балканский союз металлургов



### ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ:

*Сварка*  
*Металлургия*  
*Материаловедение*  
*Коррозия и защита металлов*  
*Экология, безопасность человека*  
*и природы*  
*Родственные технологии*

**Справки по тел.:** +(955 32) 227511,  
**факс:** +(955 32) 221965 *Якобашвили С. Б.*  
**тел.:** +(955 32) 370267 *Бараташвили И. Б.*