



ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПРАВКИ СВАРНЫХ ТОНКОЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

О. В. МАХНЕНКО, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

На основе математического моделирования проведен анализ эффективности различных форм пятен нагрева при термической правке тонколистовых сварных конструкций с деформациями бухтиноватости. За критерий эффективности термической правки выбрано отношение объема остаточных пластических деформаций усадки в плоскости листа к вложенной энергии нагрева. Показано, что за счет оптимизации формы нагрева и его параметров можно повысить эффективность термической правки в несколько раз.

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

При изготовлении сварных тонколистовых конструкций затраты на термическую правку могут быть довольно значительными [1, 2], что обусловлено как большими объемами вложенного ручного квалифицированного труда, так и значительными энергозатратами. В последнее время предпринимались попытки уменьшить затраты на термическую правку за счет автоматизации этого процесса [3] с целью резкого сокращения объема ручного труда. При проведении работ по автоматизации термической правки сварных тонколистовых конструкций с деформациями бухтиноватости (выпучивания) на основе математического моделирования этого процесса выяснилось также, что заметной экономии энергозатрат можно достичь за счет оптимизации параметров нагрева.

В данной работе приведены результаты расчетов, направленные на повышение эффективности термической правки (ЭТП) за счет оптимизации параметров нагрева.

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

Значения остаточных пластических деформаций при термической правке зависят от целого ряда параметров таких, как форма пятна нагрева, мощность источника и время нагрева, материал

и толщина листа конструкции, условия охлаждения, максимальная температура нагрева и ее распределение. За ЭТП тонколистовых конструкций взято отношение объема остаточных пластических деформаций усадки в плоскости листа $V_{п.д}$ ко вложенной энергии нагрева Q_H

$$\text{ЭТП} = \frac{V_{п.д}}{Q_H} \text{ [мм}^3\text{/кДж]}. \quad (1)$$

Поскольку при термической правке деформаций выпучивания тонкого листа обшивки определяющей является усадка в плоскости листа, то объем остаточных пластических деформаций усадки может быть представлен как произведение площади последних $F_{п.д}$ в плоскости листа на его толщину δ . Такое допущение может быть принято для тонких листов при относительно равномерном распределении по их толщине пластических деформаций усадки. Соответственно вложенную энергию нагрева можно определить как произведение мощности источника P_H на время нагрева t_H

$$\text{ЭТП} = \frac{F_{п.д} \delta}{P_H t_H} \text{ [мм}^3\text{/кДж]}. \quad (2)$$

Традиционно при термической правке используют круглые пятна нагрева (в тонкостенных ($\delta \leq 5$ мм) конструкциях) или полосы нагрева (в конструкциях большой толщины). Считается, что длинные полосы нагрева ($L \geq 50\delta$) более эффективны (примерно в 4 раза) при правке, но имеют повышенный риск локальной потери устойчивости листа при нагреве [1, 4]. Известны также, но мало применимы на практике такие формы нагрева при термической правке, как нагрев по спирали и по кольцу.

Для исследования ЭТП тонкостенных конструкций с помощью различных по форме пятен нагрева использовали двухмерную расчетную модель нагрева пятна в пластине ограниченных раз-



меров с закрепленными или свободными по границе кромками при допущении наличия плоского напряженного состояния. Чтобы исключить влияние кромок пластины пятна нагрева располагались на достаточном удалении от них. Задача термопластичности решалась с помощью теории пластического течения Прандтля–Рейсса, ассоциированной условием текучести Мизеса. Температурная и механическая задачи просматривались последовательно во времени — от начала нагрева до полного остывания металла. На каждом этапе прослеживания линеаризованная задача решалась с помощью метода конечных элементов. Физическая нелинейность реализовывалась путем итераций [5]. В качестве материала тонколистовой конструкции была выбрана низкоуглеродистая сталь Ст3. При этом расчетная модель учитывала зависимость физико-механических свойств материала от температуры.

Для оценки ЭТП (1), (2) площадь остаточных пластических деформаций в плоскости листа определялась интегрированием соответствующих компонент пластических деформаций по площади листа:

$$F_{п.д} = \iint \varepsilon_{xx} \varepsilon_{yy} dx dy \text{ [мм}^2\text{]}. \quad (3)$$

Расчетная модель также могла учитывать процесс локальной потери устойчивости листа металла во время нагрева пятна. С этой целью использовали разработанный подход, а именно, потеря устойчивости (выпучивание) происходит в достаточно большой области, где возникают температурные напряжения сжатия. Для оценки критического состояния, при котором происходит потеря устойчивости, использовали приближенный энергетический метод [6, 7]. В соответствии с ним риск потери устойчивости в некоторой произвольной области определяется знаком суммы

$$\mathcal{E} = U + W, \quad (4)$$

где U — потенциальная энергия изгиба; W — работа сварочных напряжений. Если $\mathcal{E} < 0$, то риск потери устойчивости достаточно высок. Влияние начального прогиба поверхности листа при оценке критического состояния не учитывалось. Все представленные ниже расчетные результаты

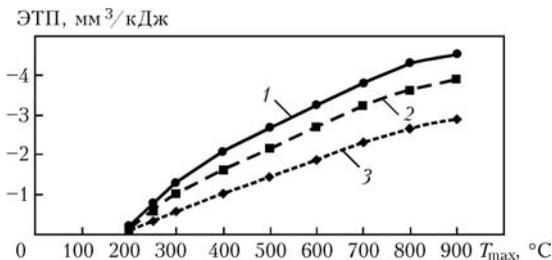


Рис. 1. Зависимость ЭТП стали Ст3 пятнами нагрева диаметром $d = 10$ мм от максимальной температуры нагрева T_{max} при различном времени нагрева до нее: 1 — $t_n = 5$; 2 — 10; 3 — 30 с

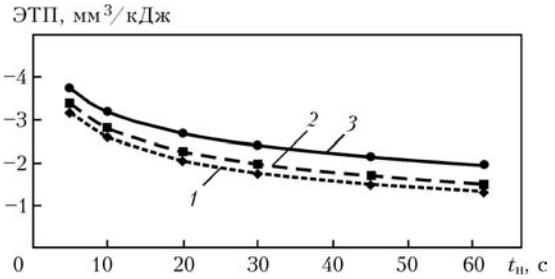


Рис. 2. Зависимость ЭТП стали Ст3 при нагреве круглыми пятнами различного диаметра от времени нагрева до $T_{max} = 625$ °C: 1 — $d = 6$; 2 — 10; 3 — 20 мм

получены для таких параметров нагрева, которые не должны приводить к локальной потере устойчивости соответствующего по толщине листа металла и допустимы для термической правки.

Расчетные результаты, представленные на рис. 1, подтвердили хорошо известный из практики факт, что ЭТП резко повышается с ростом максимальной температуры нагрева. Однако нагрев сталей выше 650 °C может вызывать нежелательное изменение структуры металла и деградацию его механических свойств. Поэтому при ЭТП нагрев сталей обычно ограничивают температурой 600...650 °C.

Расчетные результаты, представленные на рис. 1, 2, показывают, что ЭТП зависит от времени нагрева пятна до максимальной температуры: чем оно меньше, тем выше ЭТП. Это значит, что для повышения ЭТП необходим мощный источник нагрева, который, однако, не должен приводить к расплавлению поверхности листа.

Как видно из рис. 2, ЭТП можно повысить за счет увеличения диаметра пятна нагрева. При этом следует учитывать, почему с его увеличением возрастает вероятность локальной потери устойчивости (выпучивания) листа металла при нагреве. Поэтому максимальный диаметр пятна нагрева для данной толщины листа надо выбирать таким, чтобы заведомо не возникала локальная потеря устойчивости. На рис. 3 представлены данные, взятые из работы [4], о рекомендуемых диаметре пятна нагрева до 600 °C, а также расчетные

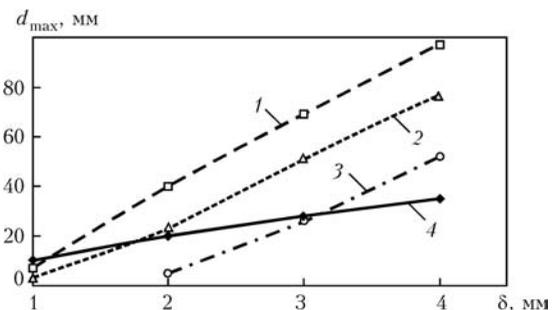


Рис. 3. Зависимость максимального диаметра d_{max} пятен нагрева, при которых не возникает местная потеря устойчивости, от толщины δ листа стали Ст3 при различном времени нагрева до $T_{max} = 600$ °C: 1 — $t_n = 10$; 2 — 30; 3 — 60 с; 4 — данные [4]



данные, полученные в работе [3] относительно максимальных диаметров пятен нагрева, при которых еще не возникает местная потеря устойчивости. Расчетные данные хорошо согласуются с экспериментальными при допущении, что при увеличении толщины листа металла возрастает время нагрева пятна до максимальной температуры. На рис. 3 видно, что максимальный диаметр пятна нагрева повышается с увеличением толщины листа металла и уменьшением времени нагрева до максимальной температуры.

Таким образом, за счет снижения времени нагрева до максимальной температуры и увеличения диаметра круглого пятна нагрева до максимально возможного без возникновения местной потери устойчивости можно повысить ЭТП круглыми пятнами нагрева примерно в 2 раза, по сравнению с параметрами нагрева, обычно используемыми при газопламенном нагреве.

Полосы нагрева при термической правке могут быть получены стационарным распределенным или движущимся концентрированным источником нагрева. В первом случае нагрев осуществляется по всей длине полосы одновременно. Примером такого источника нагрева может служить оборудование для термической правки судостроительных конструкций норвежской фирмы «Thermex», работающее на основе индукционного нагрева. Традиционно используемый нагрев полос газопламенной горелкой осуществляют с помощью движущегося концентрированного источника нагрева.

На рис. 4 представлены расчетные данные зависимости ЭТП от длины полосы нагрева. ЭТП при движущемся источнике нагрева значительно (в 1,5...2,0 раза) выше, чем при распределенном. Поскольку данные получены для полосы нагрева шириной 10 мм, расчетные точки при длине полосы 10 мм приблизительно соответствуют круглому пятну нагрева. Легко заключить, что при переходе от круглого пятна к полосе нагрева, а также с увеличением ее длины ЭТП существенно возрастает и при некоторой длине полосы становится постоянной. При нагреве длинной полосы ЭТП приблизительно в 2 раза выше, чем в случае

круглого пятна при одинаковом времени нагрева до максимальной температуры и распределенном источнике нагрева, и в 3 раза выше при одинаковой мощности нагрева с использованием движущегося источника.

Наблюдается еще одно отличие полосы нагрева от круглого пятна нагрева. При сокращении времени нагрева до максимальной температуры круглыми пятнами ЭТП возрастает, а полосами нагрева распределенным источником — снижается (см. пересечение линий на рис. 4) при переходе от круглого пятна к полосе нагрева в случае распределенного источника нагрева.

Итак, широко используемый в настоящее время при термической правке газопламенный нагрев с помощью длинных полос движущейся горелкой является достаточно эффективным, т. е. параметры нагрева длинных полос достаточно оптимальны для получения максимальных остаточных пластических деформаций усадки. Это подтверждает сложившееся мнение, что ЭТП с помощью длинных полос нагрева значительно выше, чем с помощью круглых пятен. Результаты данного расчетного исследования показали, что ЭТП с помощью длинных полос нагрева движущимся источником может быть повышена за счет увеличения скорости движения источника нагрева при сохранении максимального нагрева, т. е. повышения мощности концентрированного источника.

Известно, что длинные полосы нагрева более склонны к местной потере устойчивости листа металла во время нагрева, чем круглые пятна. Получены расчетные данные относительно изменения максимальной ширины полос нагрева (неподвижный источник), когда еще не возникает местная потеря устойчивости, в зависимости от ее длины, толщины листа стали Ст3 и времени нагрева до $T_{max} = 600 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 5). Данные, полученные для листов стали малой толщины (3, 4 и 5 мм), объясняют тот факт, почему для таких толщин практически не применяется нагрев полосами неподвижным источником нагрева, т. е. одновременный нагрев по всей длине полосы, например, индукционным нагревателем. Видно, что при минимальной (10...20 мм) ширине полосы нагрева максимальная ее длина при реальном времени нагрева 30 ($\delta = 4 \text{ мм}$) и 60 с ($\delta = 5 \text{ мм}$) составляет не более 100 мм.

Обычно при малой толщине листа стали нагрев полосами осуществляют движущимся источником, например, газопламенной горелкой. Для нагрева полос движущимся источником получены расчетные данные (рис. 6), демонстрирующие зависимость максимальной длины полосы нагрева при заданной ее ширине от скорости движения источника. Из рисунка видно, что чем выше скорость движения источника, тем больше максимально возможная длина полосы нагрева. Это

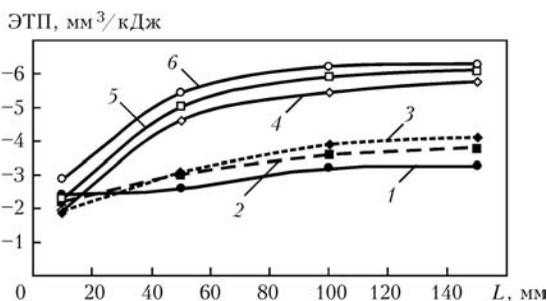


Рис. 4. Зависимость ЭТП стали Ст3 от длины L полосы нагрева шириной 10 мм при распределенном источнике нагрева и различных времени нагрева до $T_{max} = 625 \text{ }^\circ\text{C}$ и скорости движущегося источника нагрева: 1–3 — см. рис. 3; 4 — $v = 1,12$; 5 — 2,50; 6 — 5,00 мм/с

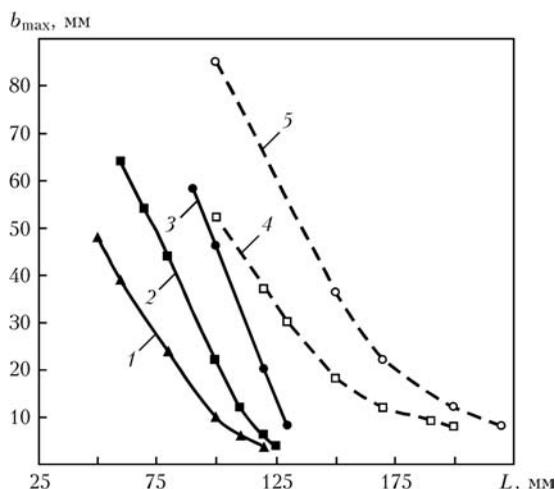


Рис. 5. Зависимость максимальной ширины b_{max} полосы нагрева (при неподвижном источнике нагрева), при которой не возникает местная потеря устойчивости, от ее длины L при различных толщине листа металла и времени нагрева до $T_{max} = 600$ °С: 1 — $\delta = 3$ мм ($t_H = 10$ с); 2, 4 — 4 мм (соответственно 30 и 10 с); 3, 5 — 5 мм (соответственно 60 и 30 с)

объясняется снижением погонной энергии нагрева с увеличением скорости источника для достижения заданной максимальной температуры. По сравнению с неподвижным распределенным источником нагрева при движущемся источнике можно нагреть значительно более длинные полосы без угрозы потери устойчивости. Так, при толщине металла 3 мм с помощью распределенного источника можно нагреть полосы шириной 20 мм и максимальной длиной 80 мм за время нагрева до максимальной температуры 10 с, а при движущемся источнике можно увеличить длину полос до 280 мм при скорости источника нагрева 10 мм/с. Расчет показал, что при толщине металла 3 мм и ширине полосы нагрева 10 мм ее длина при движущемся источнике нагрева не ограничена при любой скорости его движения. Аналогичные результаты получены для металла толщиной 4 и 5 мм при ширине полос нагрева соответственно 20 и 25 мм. Эти расчетные данные хорошо согласуются с рекомендуемыми значениями ширины нагреваемых полос (при которых обшивка обычно не теряет устойчивость), полученных на основе большого объема эксперименталь-

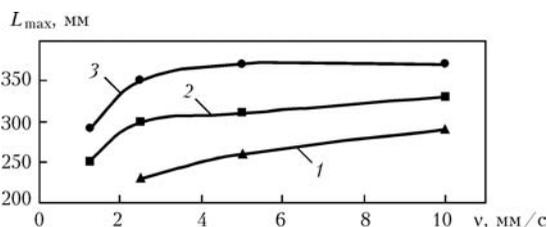


Рис. 6. Зависимость максимальной длины L_{max} полосы нагрева, при которой не возникает местная потеря устойчивости, от скорости движения v источника нагрева при $\delta = 3$ мм и $b = 20$ мм (1); $\delta = 4$ мм и $b = 30$ мм (2); $\delta = 5$ мм и $b = 40$ мм

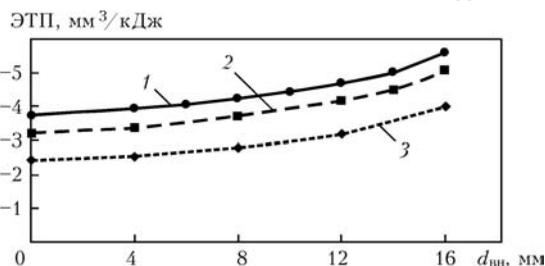


Рис. 7. Зависимость $ЭП$ стали Ст3 при нагреве кольцами с наружным диаметром 20 мм от внутреннего диаметра колец при времени нагрева до $T_{max} = 625$ °С $t_H = 5$ (1), 10 (2) и 30 с (3)

ных работ по безударной правке конструкций на судостроительных заводах [4].

Кольцевой нагрев на практике осуществить довольно сложно, но он отличается при этом высокой эффективностью. На рис. 7 представлены расчетные данные $ЭП$ для пятен нагрева в форме колец с наружным диаметром 20 мм при различных внутреннем диаметре кольца и времени нагрева до максимальной температуры. Расчетные точки при внутреннем диаметре кольца $d_{вн} = 0$ соответствуют случаю нагрева с помощью круглого пятна. Легко увидеть, что при переходе от круглого пятна к кольцу нагрева, а затем при уменьшении ширины кольца $ЭП$ заметно повышается. При этом так же, как и в случае круглого пятна, сокращение времени нагрева до максимальной температуры способствует значительному повышению $ЭП$.

Как и в случае нагрева длинной полосой, при использовании движущегося по кольцу источника нагрева (рис. 8) $ЭП$ выше, чем при использовании распределенного источника нагрева. Особенно повышение $ЭП$ заметно при большой ширине кольца. С уменьшением его наружного диаметра и снижением скорости нагрева $ЭП$ понижается.

С позиции риска местной потери устойчивости листа металла при нагреве расчеты показали, что значения максимальных наружных радиусов колец нагрева, при которых еще не возникает местная потеря устойчивости, мало зависят от ширины кольца и соответствуют расчетным значениям максимальных радиусов круглых пятен нагрева (см. рис. 3). Таким образом, нагрев по кольцу является перспективным при реализации его с по-

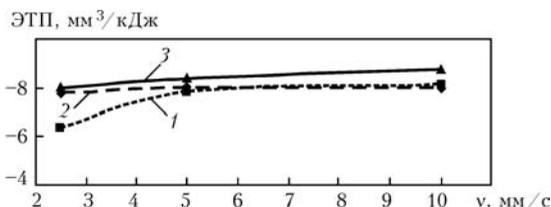


Рис. 8. Зависимость $ЭП$ от скорости движения источника нагрева по кольцу при толщине листа металла 3 мм и различных наружных $d_{нар}$ и внутренних $d_{вн}$ диаметрах кольца ($T_{max} = 625$ °С): 1 — $d_{нар} = 20$ мм, $d_{вн} = 15$ мм; 2 — $d_{нар} = 30$ мм, $d_{вн} = 20$ мм; 3 — $d_{нар} = 30$ мм, $d_{вн} = 25$ мм

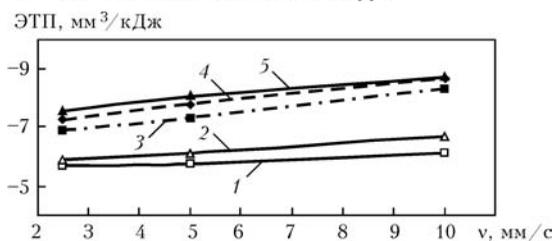


Рис. 9. Зависимость ЭТП от скорости движения v источника нагрева по спирали при толщине листа металла 3 мм и различных значениях ширины b нагрева и шага h спирали ($T_{\max} = 625 \text{ }^\circ\text{C}$): 1 — $b = 10 \text{ мм}$, $h = 10 \text{ мм}$; 2 — $b = 10 \text{ мм}$, $h = 10 \text{ мм}$; 3 — $b = 5 \text{ мм}$, $h = 10 \text{ мм}$; 4 — $b = 5 \text{ мм}$, $h = 20 \text{ мм}$; 5 — $b = 5 \text{ мм}$, $h = 30 \text{ мм}$

мощью современных источников нагрева (например, лазерного).

На практике в случае сферической формы деформации бухтиноватости обшивки специалисты рекомендуют правку осуществлять местным нагревом по спирали [8]. С целью оценки ЭТП при таком нагреве проведены расчеты нагрева листа из низкоуглеродистой стали толщиной 3 мм. Движущийся источник с различной шириной нагрева ($b = 5$ и 10 мм) двигался со скоростью 2,5, 5,0 и $10,0 \text{ мм/с}$ по траектории в форме спирали с шагом, значение которого также задавали различными ($h = 10$ и 30 мм). Максимальная температура нагрева составляла $625 \text{ }^\circ\text{C}$. Результаты расчета (рис. 9) демонстрируют высокие значения ЭТП, которые возрастают с повышением скорости источника нагрева, уменьшением ширины нагрева и увеличением шага спирали. Однако расчеты показали, что риск местной потери устойчивости листа металла при нагреве по спирали достаточно высок, особенно, если количество витков спирали больше двух-трех. Определено, что риск потери устойчивости понижается при увеличении скорости источника нагрева и уменьшении шага спирали. Таким образом, осуществляя правку бухтиноватости местным нагревом по спирали, целесообразно повышать скорость источника нагрева, что одновременно увеличивает ЭТП и снижает риск местной потери устойчивости листа металла.

Выводы

1. За счет снижения времени нагрева до максимальной температуры и увеличения диаметра круглого пятна нагрева до максимально возможного без возникновения местной потери устойчивости листа металла можно повысить ЭТП примерно в 2 раза, по сравнению с параметрами

нагрева, используемыми в настоящее время при газопламенном нагреве, и приблизиться к значениям ЭТП с помощью длинных полос при распределенном источнике нагрева.

2. Поскольку при нагреве длинными полосами в случае движущегося источника значения ЭТП значительно (в $1,5 \dots 2,0$ раза) выше, чем при распределенном источнике, то широко используемый в настоящее время газопламенный нагрев достаточно эффективен. Повысить ЭТП при движущемся источнике нагрева можно как за счет увеличения его скорости, т. е. повышения его мощности, так и уменьшения ширины полосы нагрева. При распределенном источнике нагрева, наоборот, — повышение скорости нагрева (снижение времени нагрева полосы до максимальной температуры) и уменьшение ширины полосы приводит к снижению ЭТП. Причем в случае движущегося источника возможно нагреть значительно более длинные полосы без угрозы локальной потери устойчивости листа металла.

3. При нагреве пятна в форме кольца за счет увеличения наружного диаметра и уменьшения ширины кольца можно достичь высоких значений ЭТП как с помощью распределенного, так и движущегося источника нагрева. При этом в случае нагрева кольцами значения ЭТП сравнимы с эффективностью правки длинными полосами при движущемся источнике нагрева.

1. Михайлов В. С. Правка судовых сварных корпусных конструкций. — Л.: Судостроение, 1972. — 253 с.
2. Matsui S. Prevention of welding deformations in thin-skin welded structures / J. of the Light Metal Welding & Construction. — 1982. — 20, № 1. — P. 3–11.
3. Автоматизированная термическая правка сварных тонколистовых конструкций / Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, Г. А. Цыбулькин и др. // Автомат. сварка. — 2003. — № 7. — С. 3–8.
4. Кузьминов С. А. Сварочные деформации судовых корпусных конструкций. — Л.: Судостроение, 1974. — 286 с.
5. Махненко В. И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. — Киев: Наук. думка, 1976. — 320 с.
6. Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем. — М.: Наука, 1967. — 984 с.
7. Оценка напряженного состояния стенки рулонированных вертикальных цилиндрических резервуаров при вваривании листов-вставок / В. И. Махненко, А. Ю. Барвинко, Ю. П. Барвинко, П. Циарковски // Автомат. сварка. — 2002. — № 5. — С. 3–8.
8. Заикин В. М. Расчет режимов тепловой безударной правки сварных конструкций из алюминиево-магниевых сплавов // Там же. — 1984. — № 6. — С. 62–66.

Efficiency of different shapes of heat spots in thermal straightening of thin-sheet welded structures containing buckling distortions has been analysed on the basis of mathematical modelling. The value of ratio of volume of residual plastic shrinkage distortions in the sheet plane to heating energy input has been used as a criterion of the efficiency of thermal straightening. It is shown that the efficiency of thermal straightening can be increased several times through optimising the shape of the heat spots and other heating parameters.

Поступила в редакцию 19.02.2008