Пентегов И.В.
Pentegov I.V.

доктор технических наук,
профессор, ведущий
научный сотрудник отдела
физики газового разряда и
техники плазмы,
Институт электросварки
им. Е.О. Патона НАН
Украины, г. Киев,
Украина

Рымар С.В.
Rymar S.V.

доктор технических наук,
старший научный сотрудник,
заведующий лабораторией
электротермии в
составе отдела физико-
металлургических процессов
сварки и электротермии
высокопрочных сталей,
Институт электросварки
им. Е.О. Патона НАН
Украины, г. Киев,
Украина

Губатюк Р.С.
Gubatyuk R.S.

младший научный
сотрудник лаборатории
электротермии в составе
отдела физико-металлурги-
ческих процессов сварки и
электротермии
высокопрочных сталей,
Институт электросварки
им. Е.О. Патона НАН
Украины, г. Киев,
Украина

УДК 536.12:621.78.01

DOI:

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО МЕТОДА ТЕПЛОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ФУРЬЕ В СЛУЧАЕ ПОПЕРЕЧНОГО ПОЛОСОВОГО ПОВЕРХНОСТНОГО НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ ТРУБЫ

Цель. Описание разработанной методики быстрого определения распределения тепловых полей в стенке трубы большого диаметра под поперечными полосовыми участками поверхностного нагрева и охлаждения с заданными вкладываемыми положительными или отрицательными удельными мощностями и применением модернизированного метода тепловых источников.

Методология. Методика основывается на научных положениях теоретической теплофизики – теории распространения тепла в сплошных средах для определения распределения тепловых полей в полупространстве и методе наложения тепловых полей.

Результаты. Методика позволяет гибко моделировать и быстро решать практические задачи по оценке распределения тепловых полей в стенке трубы большого диаметра под поперечными полосовыми участками поверхностного нагрева и охлаждения.

Оригинальность. Методика оперирует как с положительными источниками тепловой вкладываемой мощности для учета нагрева, так и с фиктивными отрицательными источниками тепловой мощности, имитирующими охлаждение.

Практическая ценность. Методика может применяться для быстрого расчета значений температур, а ее алгоритм – использоваться в автоматизированных технологических процессах для обеспечения необходимых режимов нагрева труб.

Ключевые слова: термообработка труб, тепловые расчеты, повышение скорости расчетов, распространение тепла, модернизированный метод тепловых источников, положитель-

ные источники тепловой мощности, отрицательные источники тепловой мощности.

APPLICATION OF THE MODERNIZED METHOD OF FOURIER HEAT SOURCES IN THE CASE OF TRANSVERSE STRIP SURFACE HEATING AND PIPE COOLING

Purpose. Description of the developed method for rapid determining the distribution of thermal fields in the wall of a large-diameter pipe under transverse strip sections of surface heating and cooling with specified positive or negative specific power inputs and using the modernized method of heat sources.

Methodology. The method is based on the scientific concepts of theoretical thermal physics – the theory of distributed heat in continuous media to determine the allocation of thermal fields in a half-space and the method of applying thermal fields.

Results. The technique allows to flexibly model and quickly solve practical problems of estimating the distribution of thermal fields in the wall of a large-diameter pipe under the transverse strip sections of surface heating and cooling.

Originality. The technique operates with both positive sources of heat input to account for heating, and with fictitious negative sources of thermal power simulating cooling.

Practical value. The technique can be used to quickly calculate temperature values, and its algorithm is used in automated technological processes to provide the necessary modes of heating pipes.

Key words: heat treatment of pipes, heat calculations, increase in speed of calculations, heat distribution, modernized method of heat sources, positive sources of heat output, negative sources of heat output.

Введение

Статья объясняет принцип практического применения модернизированного [1] метода тепловых источников Фурье [2, 3] при определении распределения температур в стенке трубы большого диаметра при поперечном полосовом поверхностном нагреве и охлаждении для нормализации металла сварного соединения и снятия остаточных напряжений в металле после сварки. Статья является продолжением работ [4, 6, 8], в которых области с источниками тепла приближенно заменены прямоугольниками, а пространственные интегралы заменены функциями интеграла вероятности «erf», через которые выражаются внутренние интегралы. Это позволяет перейти от операции интегрирования по поверхности к операции суммирования, а интегрирование осуществляется только по времени. При этом скорость расчета температур при поверхностном нагреве многократно увеличивается, по сравнению с традиционными методами расчетов, при

сохранении приемлемой для практических задач точности расчета.

Целью и задачей статьи является описание разработанной в Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины методики быстрого определения распределения тепловых полей в стенке трубы большого диаметра под поперечными полосовыми участками поверхностных нагревов и охлаждений с заданными вкладываемыми положительными или отрицательными удельными мощностями и применением модернизированного метода тепловых источников.

Задача *актуальна* в электротермии при определении распространения тепла в стенке трубы большого диаметра при узком полосовом поверхностном нагреве поперечных сварных соединений труб большого диаметра кольцевым индуктором [9] с током весьма высокой частоты или резистивными контактными нагревательными элементами, когда имеется только поверхностное вложение тепла. Нагрев сварных соединений необходим для нормализации металла шва и около-

шовной зоны для снятия остаточных напряжений в металле и восстановления в нем пластических свойств. Особенно это важно для сталей, применяемых в магистральных трубопроводах высокого давления.

Подобный процесс поверхностного нагрева труб большого диаметра, но широким индуктором, осуществляется также при гибке труб [9-11] при прохождении трубопроводом рельефной поверхности.

Методика расчета оперирует постоянным значением вкладываемой удельной мощности на интервале нагрева до заданной температуры, что на практике обеспечивается системой регулирования источника питания.

Обычно при достижении заданного уровня температуры на поверхности трубы мощность снижается таким образом, чтобы поддерживать данную температуру постоянной на протяжении некоторого времени, пока температура на внутренней стенке трубы также не достигнет необходимого значения. С этого момента начинается отсчет времени выдержки нагрева для обеспечения необходимых структурных превращений металла. Далее происходит отключение источника нагрева и, в зависимости от технологии, труба остывает естественным образом после ее гибки в горячем состоянии, или поверхность трубы интенсивно охлаждают сжатым воздухом при выполнении процесса нормализации металла. Нагрев, выдержка и охлаждение сварного соединения может осуществляться и повторяющимися циклами.

При выполнении процесса нормализации металла поперечных сварных соединений поверхность металла трубы вблизи антикоррозионного защитного синтетического покрытия, отстоящего от сварных швов на некотором расстоянии, необходимо интенсивно охлаждать для предотвращения его перегрева. Методика позволяет учесть охлаждение поперечных участков трубы введением в расчетную модель фиктивных отрицательных источников тепла.

Разработанная методика может применяться для быстрого расчета значений температур, а ее алгоритм – использоваться в автоматизированных технологических процессах для обеспечения необходимых режимов нагрева труб.

Созданные методы и методики применяются в Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины при разработке электротехнических систем вторичного нагрева сварных изделий.

Методика расчета

В работе [1] выведены формулы для определения распространения тепла в неограниченных и ограниченных пространствах и полупространствах при различных геометриях источников нагрева. Преобразуем данные формулы для рассматриваемого случая поперечного нагрева стальной трубы большого диаметра.

Пусть труба имеет внешний диаметр d и толщину стенки Δ . Поверхностный нагрев трубы осуществляется с внешней стороны трубы по ее периметру, с шириной источника поверхностного нагрева по длине отрезка $[X1, X2] = [-50 \text{ мм}, 50 \text{ мм}]$ и вкладываемой поверхностной удельной мощностью p_s , Вт/м², изменяемой во времени.

Введем ряд допущений. Используем средние значения теплофизических параметров за время нагрева. Средние значения коэффициентов теплопроводности λ и температуропроводности a на интервале нагрева от начальной температуры T_0 до наибольшей температуры T_1 определяются из выражений:

$$\lambda = \frac{1}{T_1 - T_0} \cdot \int_{T_0}^{T_1} \lambda_{st}(T) dT,$$

$$a = \frac{1}{T_1 - T_0} \cdot \int_{T_0}^{T_1} a_{st}(T) dT. \quad (1)$$

Здесь

$$a_{st}(T) = \lambda_{st}(T) / [c_{st}(T) \cdot \gamma]; \lambda_{st}, a_{st} \text{ и } c_{st}$$

– зависящие от температуры T опытные значения теплопроводности, Вт/(м·К), температуропроводности, м²/с, и удельной теплоемкости стали, Дж/(кг·К); γ – плотность стали, кг/м³.

Пренебрежем потерями на конвекцию и излучение с поверхности трубы. Мысленно разрежем трубу по образующей (вдоль оси x) и распрямим ее. Устремим Z к бесконечности, что эквивалентно введению бесконечного количества зеркальных отражений по

оси z для запираания поперечных тепловых потоков, что допустимо при $d \gg \Delta$. В этом случае задача может быть сведена к нагреву неограниченной по оси z пластины с бесконечно длинным участком Z вкладываемой поверхностной мощности и для расчета температуры может быть использована формула (36) работы [1], в которой учтено, что $Z \rightarrow \infty$.

После преобразований запишем эту формулу (36) по определению распределения приращения температур по координатам x и y в виде:

$$\Theta(x, y, X_1, X_2, t) = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda} \cdot \int_0^t \frac{p_s(\tau)}{t - \tau} \cdot \sum_{\varepsilon=-L}^L e^{-\frac{(y-2\Delta \cdot \varepsilon)^2}{4a \cdot (t-\tau)}} \cdot \int_{X_1}^{X_2} e^{-\frac{(x_0-x)^2}{4a \cdot (t-\tau)}} dx_0 d\tau, \quad (2)$$

где t – текущее время, отсчитываемое от начала процесса нагрева; τ – время возникновения момента текущего импульса энергии, отсчитываемое от начала процесса нагрева; $(t - \tau)$ – время распространения тепла от текущего импульса энергии; L – количество зеркальных отражений вверх и вниз по оси y , отстоящих друг от друга на расстоянии 2Δ [12] для выполнения по методу Сирла непроводящих тепло граничных условий. На практике достаточно учесть 5...8 отражений L ; x_0 – координата по оси x элементарного точечного источника тепла.

Преобразуем второй интеграл в выражении (2):

$$\int_{X_1}^{X_2} e^{-\frac{(x_0-x)^2}{4a \cdot (t-\tau)}} dx_0 = \sqrt{\pi \cdot a \cdot (t-\tau)} \times \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{x - X_1}{2\sqrt{a \cdot (t-\tau)}} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{x - X_2}{2\sqrt{a \cdot (t-\tau)}} \right] \right\}. \quad (3)$$

Выражение (2) в этом случае примет вид:

$$\Theta(x, y, X_1, X_2, t) = \frac{1}{2\lambda} \cdot \sqrt{\frac{a}{\pi}} \cdot \int_0^t \frac{p_s(\tau)}{\sqrt{t-\tau}} \cdot \sum_{\varepsilon=-L}^L e^{-\frac{(y-2\Delta \cdot \varepsilon)^2}{4a \cdot (t-\tau)}} \times \operatorname{Erf}(x, X_1, X_2, a, t, \tau) d\tau. \quad (4)$$

Здесь функция (см. формулу (21) работы [1])

$$\operatorname{Erf}(x, X_1, X_2, a, t, \tau) = \operatorname{erf} \left[\frac{x - X_1}{2\sqrt{a \cdot (t-\tau)}} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{x - X_2}{2\sqrt{a \cdot (t-\tau)}} \right]. \quad (5)$$

Истинная температура будет равна:

$$T(x, y, X_1, X_2, t) = \Theta(x, y, X_1, X_2, t) + T_0. \quad (6)$$

При этом функция (6), с учетом выражения (4), тождественна формуле (36) работы [1].

В случае *постоянной* (не изменяемой во времени t) вкладываемой мощности $p_s = p'_s$ выражения (4) и (6) примут вид:

$$\Theta'(x, y, X_1, X_2, p'_s, t) = \frac{p'_s}{2\lambda} \cdot \sqrt{\frac{a}{\pi}} \cdot \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t-\tau}} \cdot \sum_{\varepsilon=-L}^L e^{-\frac{(y-2\Delta \cdot \varepsilon)^2}{4a \cdot (t-\tau)}} \times \operatorname{Erf}(x, X_1, X_2, a, t, \tau) d\tau; \quad (7)$$

$$T(x, y, X_1, X_2, p'_s, t) = \Theta'(x, y, X_1, X_2, p'_s, t) + T_0. \quad (8)$$

Формула (8) дает возможность решить и обратную задачу – определить значение постоянной вкладываемой мощности p'_s для нагрева изделия от температуры T_0 до температуры T_1 в точке с координатами x и y за время t при ширине поверхностного нагрева по длине отрезка $[X_1, X_2]$. Для этого из выражения (7) выразим p'_s для случая, когда $\Theta' = T_1 - T_0$:

$$p'_s(x, y, X_1, X_2, t) = (T_1 - T_0) / F(x, y, X_1, X_2, t), \quad (9)$$

где функция F определяется с учетом выражения (7) по формуле:

$$F(x, y, X_1, X_2, t) = \frac{1}{2\lambda} \cdot \sqrt{\frac{a}{\pi}} \cdot \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t-\tau}} \cdot \sum_{\varepsilon=-L}^L e^{-\frac{(y-2\Delta \cdot \varepsilon)^2}{4a \cdot (t-\tau)}} \times \operatorname{Erf}(x, X_1, X_2, a, t, \tau) d\tau, \quad (10)$$

Нахождение p'_s сокращает время на поиск значения постоянной вкладываемой мощности в формуле (8) при нагреве изделия от температуры T_0 до заданной температуры T_1 в точке с координатами x и y за время t .

При термической обработке поперечных сварных швов труб большого диаметра для нормализации металла шва и околошовной зоны необходимо предотвратить перегрев защитного покрытия труб. Обычно покрытие выполняется из полиэтилена, не допускаю-

щего его нагрев выше $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Защитное покрытие отстоит от поперечного сварного шва трубы (торца трубы) на расстояние около 150 мм . Для предотвращения его перегрева поверхность металла трубы вблизи от защитного покрытия необходимо охлаждать, например, потоками воды или сжатого воздуха.

Модернизированный метод тепловых источников Фурье позволяет производить расчет распространения тепловых полей при наличии участков, как нагрева, так и охлаждения. Для учета участков охлаждения в расчетную модель необходимо ввести фиктивные отрицательные источники тепловой мощности. В этом случае поверхностная удельная мощность p_s в уравнении (2) будет иметь отрицательный знак, то есть обеспечивать сток тепла с поверхности охлаждения. Мощность, обеспечивающая сток тепла,

является расчетной величиной, позволяющей определить распределение температурного поля при наличии участков охлаждения.

Пример расчета

Стальная труба имеет внешний диаметр $d = 1420\text{ мм}$, толщину стенки $\Delta = 27\text{ мм}$, что соответствует условию $d \gg \Delta$. Поверхностный нагрев осуществляется с внешней стороны трубы по ее периметру с шириной нагрева 100 мм : $X_1 = -50\text{ мм}$, $X_2 = 50\text{ мм}$. На рисунке 1, а показан участок стенки трубы 1, распрямленной по образующей – вдоль оси z , направленной перпендикулярно вглубь рисунка, с защитным покрытием 2 и поперечным сварным швом 3. На рисунке 1, б показаны три зеркальных отражения I, II и III этого участка вверх и вниз по оси y , отстоящие друг от друга на расстояние 2Δ .

Рисунок 1. Участок стенки трубы 1 распрямленной по образующей (вдоль оси z) с защитным антикоррозионным синтетическим покрытием 2 и сварным швом 3 (а), и три его зеркальных отображения I, II и III (б)

Необходимо нагреть сварное соединение трубы для нормализации металла шва и околошовной зоны с начальной температуры $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до температуры не выше $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ на внешней поверхности (верхняя поверхность на рисунке 1) нагреваемого участка за 5 мин и произвести выдержку при температуре не ниже $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ на внутренней поверхности

(нижняя поверхность на рисунке 1) нагреваемого участка (по центру шва) в течение $7,0 \dots 7,5\text{ мин}$. Далее необходимо интенсивно охладить нагретый участок трубы до температуры $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ на ее внешней поверхности со скоростью не менее $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ и не более $15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, после чего скорость охлаждения можно снизить менее чем $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$.

Для предотвращения повреждения защитного покрытия трубы нужно, чтобы температура на внешней поверхности трубы на расстоянии 150 мм влево и вправо от сварного шва не превышала 100 °С в течение всего процесса термообработки.

Применяя выражение (9), определим значение постоянной вкладываемой удельной мощности p'_s для нагрева внешней поверхности трубы от температуры $T_0 = 20$ °С до температуры $T_1 = 1050$ °С в точке с координатами $x = 0$ мм и $y = 0$ мм за время $t = 5$ мин: $p'_s(0 \text{ мм}, 0 \text{ мм}, -50 \text{ мм}, 50 \text{ мм}, 5 \text{ мин})$. Удельная мощность оказывается равной $p'_s = 537$ кВт/м², или, умножив ее на площадь поверхностного нагрева $100 \text{ мм} \cdot \pi \cdot 1420 \text{ мм} = 0,446 \text{ м}^2$, получаем вкладываемую мощность 240 кВт.

В расчете количество зеркальных отражений L ограничим пятью.

Используя формулы (4) и (7), запишем выражение для определения распределения тепловых полей за время t при наличии участка нагрева и охлаждения $[-50 \text{ мм}, 50 \text{ мм}]$ и двух пар участков охлаждения $[-150 \text{ мм}, -100 \text{ мм}]$, $[100 \text{ мм}, 150 \text{ мм}]$ и $[-100 \text{ мм}, -50 \text{ мм}]$, $[50 \text{ мм}, 100 \text{ мм}]$:

$$T(x, y, t) = \Theta(x, y, -50 \text{ мм}, 50 \text{ мм}, t) + \Theta(x, y, -150 \text{ мм}, -100 \text{ мм}, t) + \Theta(x, y, 100 \text{ мм}, 150 \text{ мм}, t) + \Theta(x, y, -100 \text{ мм}, -50 \text{ мм}, t) + \Theta(x, y, 50 \text{ мм}, 100 \text{ мм}, t) + T_0. \quad (11)$$

В первом члене выражения (11) (по сути, в формуле (4)) для обеспечения заданного нагрева, выдержки и охлаждения вкладываемая и отводимая удельная мощность, изменяемая с течением времени t , равна:

$$p_s(t) = p'_s \cdot \begin{cases} 1,000 \text{ if } t \leq t_1; \\ 0,742 \text{ if } t_1 < t \leq t_2; \\ 0,576 \text{ if } t_2 < t \leq t_3; \\ 0,486 \text{ if } t_3 < t \leq t_4; \\ 0,440 \text{ if } t_4 < t \leq t_5; \\ 0,412 \text{ if } t_5 < t \leq t_6; \\ 0,398 \text{ if } t_6 < t \leq t_7; \\ 0,388 \text{ if } t_7 < t \leq t_8; \\ 0,383 \text{ if } t_8 < t \leq t_9; \\ 0,378 \text{ if } t_9 < t \leq t_{10}; \\ -0,950 \text{ if } t_{10} < t \leq t_{11}; \\ -0,285 \text{ if } t_{11} < t \leq t_{13}; \\ 0,000 \text{ if } t > t_{13}, \end{cases} \quad (12)$$

в первой паре охлаждаемых участков, то есть во втором и третьем членах, отводимая мощность:

$$p_{s,1}(t) = p'_s \cdot \begin{cases} 0,000 \text{ if } t \leq t_3; \\ -0,285 \text{ if } t_3 < t \leq t_{12}; \\ 0,000 \text{ if } t > t_{12}, \end{cases} \quad (13)$$

отводимая мощность во второй паре участков – в четвертом и пятом членах:

$$p_{s,2}(t) = p'_s \cdot \begin{cases} 0,000 \text{ if } t \leq t_{10}; \\ -0,950 \text{ if } t_{10} < t \leq t_{11}; \\ -0,285 \text{ if } t_{11} < t \leq t_{13}; \\ 0,000 \text{ if } t > t_{13}. \end{cases} \quad (14)$$

Здесь время $t_1 = 5,0$ мин; $t_2 = 5,5$ мин; $t_3 = 6,5$ мин; $t_4 = 7,5$ мин; $t_5 = 8,5$ мин; $t_6 = 9,5$ мин; $t_7 = 10,5$ мин; $t_8 = 11,5$ мин; $t_9 = 12,5$ мин; $t_{10} = 13,5$ мин; $t_{11} = 15,0$ мин; $t_{12} = 16,5$ мин; $t_{13} = 18,5$ мин.

Эпюра изменения мощности $p_s(t)$ на участке $[-50 \text{ мм}, 50 \text{ мм}]$ показана на рисунке 2, а, мощностей $p_{s,1}(t)$ на участках $[-150 \text{ мм}, -100 \text{ мм}]$, $[100 \text{ мм}, 150 \text{ мм}]$ и $p_{s,2}(t)$ на участках $[-100 \text{ мм}, -50 \text{ мм}]$, $[50 \text{ мм}, 100 \text{ мм}]$ – на рисунке 2, б, соответственно ломаные линии 1 и 2.

Значения времен $t_1 \dots t_{13}$ и коэффициентов в выражениях (12) – (14) найдены численным подбором для обеспечения необходимых условий нагрева и охлаждения участков трубы на рисунке 3. На рисунке 3 приведены зависимости изменения температур T от времени t при нагреве и охлаждении поперечного сварного соединения трубы, полученные по формуле (11), с учетом выражений (12) – (14). Кривая 1 – температура на внешней поверхности трубы по центру нагрева в точке с координатами $x = 0$ мм, $y = 0$ мм. Кривая 2 – температура на внутренней поверхности трубы по центру нагрева в точке с координатами $x = 0$ мм, $y = \Delta$. Кривая 3 – температура на внешней поверхности трубы на расстоянии 150 мм от центра нагрева в точке с координатами $x = 150$ мм, $y = 0$ мм. Горизонтальными штрихпунктирными прямыми на рисунке обозначены значения температур, равные 1050 °С, 950 °С, 500 °С и 100 °С.

Из рисунка 2, а видно, что до 5 мин нагрева вкладываемая мощность наибольшая и постоянна до достижения температуры на поверхности трубы предельно допустимого значения 1050 °С (см. кривую 1 на рисунке

Рисунок 2. Эпюры изменения вкладываемых $p_s(t)$ (а) и отводимых $p_{s,1}(t)$ и $p_{s,2}(t)$ – ломаные линии 1 и 2 (б) мощностей

3). От 5 до 13,5 мин нагрева вкладываемая мощность плавно уменьшается для поддержания постоянного значения температуры на поверхности трубы 1050 °С. Через 6,3 мин нагрева температура на внутренней поверх-

ности трубы достигает необходимого уровня 950 °С, после чего в течение заданных 7,5 мин, то есть до 13,8 мин, производится выдержка нагрева на нижней поверхности трубы от 950 до 982 °С (см. кривую 2 на рисунке 3).

Рисунок 3. Зависимости температур $T(t)$

Через 6,3 мин от начала процесса нагрева температура на внешней стороне трубы на расстоянии 150 мм от центра нагрева достигает 100 °С (см. кривую 3 на рисунке 3). Начиная с этого времени и до 16,5 мин от начала процесса термообработки трубы участки $[-150 \text{ мм}, -100 \text{ мм}]$ и $[100 \text{ мм}, 150 \text{ мм}]$ перед полиэтиленовым защитным покрытием трубы должны охлаждаться водой, обычно через кольцевые спрейеры для отвода мощности. Отвод тепловой мощности учитывается отрицательными источниками нагрева $p_{s,1}$. В результате температура на расстоянии 150 мм от центра нагрева во всем промежутке времени термообработки трубы не превосходит 100 °С.

После того как произведена выдержка нагрева на внутренней поверхности трубы, подводимая мощность отключается и происходит интенсивный отвод тепла с поверхности трубы. В методике расчета это моделируется вводом отрицательных источников тепла с удельной мощностью $p_{s,2}$ на участках $[-50 \text{ мм}, 50 \text{ мм}]$, $[-100 \text{ мм}, -50 \text{ мм}]$ и $[50 \text{ мм}, 100 \text{ мм}]$. Здесь отрицательные источники моделируют процесс обдува сжатым воздухом из кольцевых спрейеров, установленных по периметру данных участков охлаждения. Отводимая тепловая мощность обеспечивает снижение температуры с 1050 °С до 500 °С со скоростью $(1050 \text{ °С} - 500 \text{ °С}) / [60 \cdot (14,5 \text{ мин} - 13,5 \text{ мин})] = 9,17 \text{ °С/с}$.

Здесь 14,5 мин – время от начала процесса термообработки до достижения температуры 500 °С на внешней поверхности трубы под центром индуктора.

Отметим, что температура на внешней поверхности трубы после ее интенсивного охлаждения становится меньше температуры на внутренней поверхности трубы.

Через 15 мин от начала процесса термообработки интенсивность отбора тепла снижается за счет уменьшения отрицательной мощности (уменьшения интенсивности обдува воздухом). Мощность отводится до достижения температуры на внутренней поверхности трубы 100 °С – через 18,7 мин от начала процесса термообработки. Далее принудительный отвод тепловой мощности прекращается, и труба охлаждается до температуры окружающей среды естественным образом.

На рисунке 4, а изображена картина распределения температур по толщине трубы в момент времени 5 мин от начала процесса нагрева, когда температура на поверхности достигает заданного уровня 1050 °С. На рисунке 4, б показано распределение температуры в момент времени 18 мин от начала процесса термообработки трубы, на котором видно влияние зон отвода тепла на участках $[-150 \text{ мм}, -100 \text{ мм}]$, $[100 \text{ мм}, 150 \text{ мм}]$ и $[-50 \text{ мм}, 50 \text{ мм}]$.

Рисунок 4. Картины распределения температур по толщине трубы в моменты времени от начала процесса термообработки 5 мин (а) и 18 мин (б)

Регулирование вложением положительной и отрицательной мощности для обеспечения необходимых температур на участках трубы может осуществляться с помощью температурных датчиков, фиксирующих температуры на поверхностях трубы и связанных с системами управления подаваемой мощности на участки нагрева и системами управления количеством и скоростью подаваемой воды и сжатого воздуха на участки охлаждения.

Таким образом, методика определения распределения тепла на основе модернизированного метода тепловых источников Фурье позволяет гибко моделировать и быстро решать практические задачи по оценке распределения тепловых полей в стенке трубы большого диаметра под поперечными полосовыми участками поверхностного нагрева и охлаждения с заданными вкладываемыми положительными и отрицательными удельными мощностями.

Результаты, получаемые при использовании данной методики определения тепла, хорошо коррелируют с результатами, получаемыми при применении различных пакетов программ, использующих численные методы

расчета, и экспериментальными данными [13, 14].

Дальнейшие работы целесообразно направить на совершенствование разработанной методики определения распределения тепла с учетом внутренних источников нагрева для моделирования проникновения индуцированного тока частотой меньше нескольких килогерц вглубь трубы.

Выводы

1. Разработанная методика определения распределения тепла на основе модернизированного метода тепловых источников Фурье позволяет гибко моделировать и быстро решать практические задачи по оценке распределения тепловых полей в стенке трубы большого диаметра под поперечными полосовыми участками поверхностного нагрева и охлаждения с заданными вкладываемыми положительными и отрицательными удельными мощностями.

2. Методика позволяет определять режимы нагрева и охлаждения для выполнения нормализации металла поперечных сварных соединений труб большого диаметра в магистральных трубопроводах.

Список литературы

1. Пентегов И.В. К теории метода тепловых источников, используемого при анализе тепловых процессов в электротехнических системах // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. – Т. 10. – № 3. – С. 5–15.
2. Fourier J.B. *Théorie analytique de la chaleur*. – Paris: Chez Firmin Didot, père et fils, 1822. – 639 p.
3. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. – М.: Машгиз, 1951. – 297 с.
4. Пентегов И.В., Рымар С.В. Практическое применение метода тепловых источников при анализе тепловых процессов в электротехнических системах // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2016. – Т. 12. – № 3. – С. 11–17.
5. Кирьянов Д.В. MathCAD 14. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 704 с.
6. Пентегов И.В., Рымар С.В. Применение метода тепловых источников при учете рас-

пределения источников тепла при индукционном нагреве // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2016. – Т. 12. – № 4. – С. 5–12.

7. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.

8. Пентегов И.В., Рымар С.В., Петриенко О.И. Сокращение времени счета в методе тепловых источников Фурье // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2017. – Т. 13. – № 4. – С. 24–36.

9. Индукционный нагрев для сварки и родственных технологий / А.С. Письменный / Под ред. Б.Е. Патона. – Киев: Ин-т электро-сварки им. Е.О. Патона, 2005. – 140 с.

10. Письменный А.С. Расчет индукционных систем электротермической гибки сварных трубопроводов // Автоматическая сварка. – 1991. – № 10. – С. 39–42.

11. Электротермическая гибка труб в полевых условиях / О.М. Иванцов, В.К. Лебедев, А.С. Письменный, М.Е. Шинлов //

Строительство трубопроводов. – 1992. - № 8. – С. 18–19.

12. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники: В 3 ч. – Ч. 3: Теория электромагнитного поля. – М.: Энергия, 1969. – 352 с.

13. Пантелеймонов Е.А., Письменный А.С. Особенности локального индукционного нагрева труб с толщиной стенки 30 мм // Сварщик. – 2011. - № 3. – С. 26–28.

14. Письменный А.А., Письменный К.А. Моделирование электромагнитных и тепловых процессов в системах индукционной термической обработки сварных соединений высокопрочных труб // Сварщик. – 2018. - № 1. – С. 22–27.

References

1. Pentegov I.V. K teorii metoda teplovykh istochnikov, ispol'zuemogo pri analize teplovykh protsessov v elektrotekhnicheskikh sistemah // Elektrotekhnicheskije i informatsionnyje komplekсы i sistemy. – 2014. – Т. 10. - № 3. – P. 5–15.

2. Fourier J.B. Théorie analytique de la chaleur. – Paris: Chez Firmin Didot, père et fils, 1822. 639 p.

3. Rykalin N.N. Raschety teplovykh protsessov pri svarke. – М.: Mashgiz, 1951. – 297 p.

4. Pentegov I.V., Rymar S.V. Prakticheskoe primeneniye metoda teplovykh istochnikov pri analize teplovykh protsessov v elektrotekhnicheskikh sistemah // Elektrotekhnicheskije i informatsionnyje komplekсы i sistemy. – 2016. – Т. 12. - № 3. – P. 11–17.

5. Kir'janov D.V. MathCAD 14. – SPb.: BKhV-Peterburg, 2007. – 704 p.

6. Pentegov I.V., Rymar S.V. Primeniye metoda teplovykh istochnikov pri uchete raspredeleniya istochnikov tepla pri

induktsionnom nagreve // Elektrotekhnicheskije i informatsionnyje komplekсы i sistemy. – 2016. – Т. 12. - № 4. – P. 5–12.

7. Tihomirov P.M. Raschet transformatorov. – М.: Energoatomizdat, 1986. – 528 p.

8. Pentegov I.V., Rymar S.V., Petrijenko O.I. Sokrashcheniye vremeni scheta v metode teplovykh istochnikov Fur'je // Elektrotekhnicheskije i informatsionnyje komplekсы i sistemy. – 2017. – Т. 13. - № 4. – P. 24–36.

9. Induktsionnyj nagrev dlja svarki i rodstvennykh tehnologij / A.S. Pis'mennyj / Pod redaktsiej B.E. Patona. – Kiev: Institut elektrosvarki imeni E.O. Patona, 2005. – 140 p.

10. Pis'mennyj A.S. Raschet induktsionnykh sistem elektrotermicheskoy gibki svarnykh truboprovodov // Avtomaticheskaja svarka. – 1991. - № 10. – P. 39–42.

11. Elektrotermicheskaja gibka trub v polevykh uslovijak / O.M. Ivantsov, V.K. Lebedev, A.S. Pis'mennyj, M.E. Shinlov // Stroitel'stvo truboprovodov. – 1992. - № 8. – P. 18–19.

12. Polivanov K.M. Teoreticheskije osnovy elektrotehniki: V 3 ch. – Ch. 3: Teorija elektromagnitnogo polja. – М.: Energija, 1969. – 352 p.

13. Pantelejmonov E.A., Pis'mennyj A.S. Osobennosti lokal'nogo induktsionnogo nagreva trub s tolshchinoj stenki 30 mm // Svarshchik. – 2011. - № 3. – P. 26–28.

14. Pis'mennyj A.A., Pis'mennyj K.A. Modelirovanje elektromagnitnykh i teplovykh protsessov v sistemah induktsionnoj termicheskoy obrabotki svarnykh sojedinenij vysokoprochnykh trub // Svarshchik. – 2018. - № 1. – P. 22–27.