

А. В. Ткачева, С. Г. Жилин, Е. Е. Абашкин, О. Н. Комаров

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗОНЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ НЕРАЗЪЕМНОГО СОЕДИНЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ПРОТЯЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия

Аннотация. Представлена усовершенствованная математическая модель расчета остаточных напряжений в материале, формируемых в результате теплового воздействия в процессах автоматической сварки под слоем флюса на стык протяженных стальных элементов. Модель содержит параметры вязкости и деформационного упрочнения в критерии пластического течения. Она основана на методе численного исследования процесса наплавки, заключающегося в решении задачи теплопроводности и механической задачи, предполагающем, что материал пластины сплошной и деформируется упругопластически. Постановка тепловой задачи при моделировании процесса деформирования в зоне термического влияния рассматривается в одномерном случае, то есть с пренебрежением краевыми эффектами на концах длинных пластин. В математической формулировке задачи считали длину сопрягаемых пластин бесконечно большой, а ширину одинаковой. Работоспособность расчетной математической модели подтверждается сопоставимостью экспериментальных значений с полученными в результате расчетов.

Ключевые слова: упругость, пластичность, упрочнение, вязкость, температурные напряжения, фазовые переходы, зона термического влияния

DOI: 10.26293/chgpu.2019.41.3.004

УДК: 539.374+ 539.224

© Ткачева А. В., Жилин С. Г., Абашкин Е. Е., Комаров О. Н., 2019

Ткачева Анастасия Валерьевна

e-mail: 4nansi4@mail.ru, старший научный сотрудник, кандидат физ.-мат. наук, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия,

Жилин Сергей Геннадьевич

e-mail: zhilin@imim.ru, ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, доцент, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия,

Абашкин Евгений Евгеньевич

e-mail: abashkine@mail.ru, младший научный сотрудник, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия,

Комаров Олег Николаевич

e-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru, Врио директора института, ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, доцент, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия.

1. Введение.

Важным критерием оценки качества металлоконструкций является их эксплуатационная прочность. Высокие механические характеристики неразъемных соединений металлоконструкций, в значительной степени определяемые остаточными напряжениями, формируются, как правило, в процессе локального оплавления и последующего охлаждения зоны стыка соединяемых элементов в результате сварки. Наиболее распространенным способом получения неразъемных соединений является процесс автоматической сварки под слоем флюса, обеспечивающий равномерное протекание теплофизических явлений в сварочной ванне и ее защиту от взаимодействия с окружающей средой. Неразъемное соединение в таком процессе получают при помощи непрерывного электрода, выполненного в виде проволоки. На формирование материала стыковой зоны оказывает влияние ряд факторов: режимы теплового воздействия (тепловая мощность и скорость перемещения электрода), материалы проволоки (порошковой и сплошного сечения), флюса и т.д. Сложность в прогнозировании качественных характеристик материала зоны термического влияния на всем протяжении стыка определяет актуальность поиска расчетных вариантов формирования картины остаточных напряжений такой зоны.

Термомеханику процессов, происходящих при формировании неразъемного соединения сваркой, рассматривали известные советские и российские ученые: Рыкалин Н.Н., Болдырев А.М., Алешин П.А.. Попытка объяснить остаточные напряжения и деформации в зоне сварного шва вылилась в теорию сварочных процессов, которая описывает со стороны технической направленности – режимы, типы, механизмы сварки [1-3], со стороны исследовательской направленности – температурные поля, фазовые переходы, остаточные деформации и напряжения [4-7]. Эволюция представлений о процессах теплового воздействия на стыковую зону привела к необходимости считать материал сборки упругопластическим. Такой подход позволяет количественно и качественно оценить опытно наблюдаемое явление формирования полей остаточных напряжений в околошовной зоне, влияние которых на качество сборки преимущественно отрицательное. Область шва, теплоизолированного шлаком, традиционно появляющимся при сварке имеет повышенные теплоёмкостные и теплоизолирующие свойства, а значит имеет место проявление вязких свойств металла. Таким образом, наряду с упругими и пластическими свойствами металла математическая модель обязана учитывать и вязкие его свойства.

Построение обобщенной всеобъемлющей физико-механической модели сварочного процесса опирающейся на техническую и исследовательскую направленность является основной задачей инженера исследователя. Многофакторность процессов сварки определяет необходимость опытного подтверждения результатов математического моделирования. Таким образом, целью исследований является разработка математической модели распределения остаточных напряжений в зоне термического влияния неразъемного соединения стальных протяженных элементов.

Проверка результатов математического моделирования возможна при использовании высокоточного экспериментального оборудования, благодаря которому произведена регистрация остаточных напряжений в зоне сварного шва. Экспериментальные данные сопоставлены с рассчитанными напряжениями, полученными в ходе ранее

Поступила 04.05.2019

Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-00414-19-00.

проводимых численных экспериментов [8-10], построенных на упруго пластической модели пластины. Натурными испытаниями установлено, что в материале сварного шва предел текучести повышается с увеличением ударной вязкости, что предопределило появление варианта построения новой математической модели, учитывающей упрочнение (эффект Баушингера) и вязкость, возникающие при пластическом течении.

В настоящей работе строится одномерная математическая модель сварки, результаты которой подтверждают экспериментальные данные о полученных остаточных напряжениях на поверхности сварной пластины.

2. Основы математической модели.

Рассмотрим в декартовой системе координат x, y, z стальную пластину шириной S . Длину пластин считаем бесконечно большой, чтобы иметь одномерную задачу теплопроводности. На краю пластины происходит быстрый разогрев со скоростью b так, что

$$T|_{x=0} = bt \quad (1)$$

где T – абсолютная температура, t – время. На другой границе считаем отток тепла из-за незначительности граничной кромки пренебрежительно малым

$$T_{,x}|_{x=S} = 0 \quad (2)$$

Здесь индексом после запятой обозначена производная по данной пространственной переменной. Условие (2) означает отсутствие теплового потока через границу $x = S$. Уравнение теплопроводности запишем в виде

$$T_{,t} = aT_{,xx} - \psi \left(1 - \psi_* \psi^{-1} e^{-\gamma x^2}\right) (T - T_0) \quad (3)$$

В (3) a – коэффициент температуропроводности. Последнее слагаемое в (3) задает отток тепла в окружающую среду. Постоянные ψ, ψ_* и γ задают интенсивность потери тепла в точке с координатой x, T_0 – комнатная температура. Выбор функции оттока тепла в (3) связан с теплоизоляционными способностями флюса. Постоянные позволяют приблизить теплоизоляционные свойства к полученным в ходе натурального эксперимента. Краевая задача для уравнения теплопроводности (3) с граничными условиями (1) и (2) далее решается численно. Проведение расчетов по конечно – разностному аналогу данной задачи не вызывает затруднений. В качестве начального условия краевой задачи принимаем $T(x, 0) = T_0$, где T_0 – комнатная температура.

Предполагаем деформации малыми, складываемыми из обратимых e_{ij}^e и необратимых e_{ij}^p деформаций

$$e_{ij} = e_{ij}^e + e_{ij}^p = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (4)$$

u_i – компоненты вектора перемещений ($i = 1, 2, 3$); В начальный момент времени полагаем, что необратимых деформаций в пластине нет. Зависимость деформации e_{ij}^e , напряжения σ_{ij} и температуры T запишем законом Дюамеля–Неймана.

$$\sigma_{ij} = (\lambda e_{kk}^e - 3\alpha K (T - T_0)) \delta_{ij} + 2\mu e_{ij}^e \quad (5)$$

где α – коэффициент линейного расширения, $\lambda, \mu, K = \lambda + \frac{2}{3}\mu$ – упругие модули, δ_{ij} – компоненты единичного тензора, составленного из символов Кронекера.

Необратимые деформации начнут расти, когда напряженное состояние достигнет поверхности нагружения (условия пластического течения).

$$\varepsilon_{ij}^p = \frac{de_{ij}^p}{dt} = \zeta \frac{\partial f(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}} \zeta > 0 \quad (6)$$

где $f(\sigma_{ij}) = 0$ – поверхность нагружения в пространстве напряжений. В качестве поверхности нагружения положим

$$f(\sigma_{ij}) = \max \left| \sigma_i - \eta \varepsilon_{ij}^p - c e_{ij}^p - \sigma \right| - \frac{4}{3} k; \quad \sigma = \frac{1}{3} \sigma_{jj}; \quad \zeta > 0 \quad (7)$$

k – предел текучести, η – коэффициент вязкости и c – коэффициент упрочнения. Выбор (7) объясняется тем, что, как показано в [9, 10], при выборе в качестве условия пластического течения максимальных касательных напряжений (критерий Треска–Сен-Венана) краевая задача, подобная той, что будет рассмотрена, может быть некорректной.

Замыкает описанную систему уравнение равновесия

$$\sigma_{ij,j} = 0. \quad (8)$$

Поскольку процесс получения неразъемного соединения сваркой сопровождается высокой температурой в зоне локального теплового воздействия, то зависимостями упругих модулей, предела текучести, коэффициента вязкости от температуры пренебрегать нельзя [11-13]. Поэтому положим, что

$$\begin{aligned} k(T) &= k_0(\tau)^2; \\ \eta(T) &= \eta_0(1 - \tau) \\ E(T) &= E_p - (E_p - E_0)\tau; \\ v(T) &= 0.5 - (0.5 - v_0)\tau; \\ \lambda &= \frac{Ev}{(1+v)(1-2v)}; \quad \mu = \frac{E}{2(1+v)}; \quad \tau = \frac{T_p - T}{T_p - T_0} \end{aligned} \quad (9)$$

В (6) E , v – модуль Юнга и коэффициент Пуассона соответственно, E_p – значения модуля Юнга при температуре плавления T_p . Если бы в материале свариваемых пластин не происходили структурные изменения, то зависимости (9) были бы справедливы как при активном процессе нагревания, так и при остывании и разгрузке. С целью учета возможных фазовых превращений будем считать, что упругие модули E и v при остывании не меняются. Через k_0 в (9) обозначим предел текучести материала при комнатной температуре T_0 , η_0 – коэффициент вязкости при T_0 .

Для конкретного случая $\sigma_z = 0$ и $e_y = 0$ уравнения (5) примут вид

$$\begin{aligned} \sigma_E &= (4\mu(\lambda + \mu)u_{x,x} - 6K\mu\alpha(T - T_0))(\lambda + 2\mu)^{-1}, \\ \sigma_y &= (2\mu\lambda u_{x,x} - 6K\mu\alpha(T - T_0))(\lambda + 2\mu)^{-1}, \end{aligned} \quad (10)$$

Из единственного нетривиального уравнения равновесия $\sigma_{x,x} = 0$ и (8), следует

$$u_x = \frac{3}{2} \int_0^x \alpha(T(\rho) - T_0) K(\rho) \gamma_1(\rho) d\rho + \frac{C_1}{4} \int_0^x \gamma_1(\rho) \gamma_2(\rho) \mu(\rho)^{-1} d\rho + C_2 \quad (11)$$

$$\gamma_1(\rho) = (\lambda(\rho) + \mu(\rho))^{-1}; \quad \gamma_2(\rho) = (\lambda(\rho) + 2\mu(\rho)),$$

$$\sigma_x = C_1; \quad \sigma_y = \left(\frac{\lambda}{2} C_1 - 3\alpha\mu K(T - T_0) \right) (\lambda + \mu)^{-1};$$

$$\sigma_z = 0; C_1 = -\frac{6 \int_0^s \alpha (T(\rho) - T_0) K(\rho) \gamma_1(\rho) d\rho}{\int_0^s \mu(\rho)^{-1} \gamma_1(\rho) \gamma_2(\rho) d\rho}; C_2 = 0$$

в которых постоянные интегрирования C_1 и C_2 являются функциями температуры и, следовательно, времени. Называя C_1 и C_2 постоянными интегрирования, подразумеваем только, что они не зависят от пространственной координаты. Для их определения в каждый момент времени следует воспользоваться рассмотренными выше граничными условиями ($u_x|_{x=0} = 0$; $u_x|_{x=s} = 0$). При нагревании напряжения растут по абсолютной величине и в итоге могут достичь одной из поверхностей нагружения.

3. Пластическое течение.

С ростом температуры пластины на линии $x = 0$ выполнится условие $(\sigma_x - c e_x^p - \eta \varepsilon_x^p) + (\sigma_z - c e_z^p - \eta \varepsilon_z^p) - 2(\sigma_y - c e_y^p - \eta \varepsilon_y^p) = 4k$; здесь зарождается пластическое течение. Следствие из закона Дюамеля-Неймана (10) следует переписать

$$\begin{aligned} \sigma_x &= (4\mu(\lambda + \mu)(u_{x,x} - e_x^p) + 2\mu\lambda(-e_y^p) - 6K\mu\alpha(T - T_0))(\lambda + 2\mu)^{-1}, \\ \sigma_y &= (2\mu\lambda(u_{x,x} - e_x^p) + 4\mu(\lambda + \mu)(-e_y^p) - 6K\mu\alpha(T - T_0))(\lambda + 2\mu)^{-1}, \end{aligned} \quad (12)$$

Из ассоциированного закона пластического течения находим $\varepsilon_x^p = \varepsilon_z^p = \zeta$, $\varepsilon_y^p = -2\zeta$, $e_x^p = e_z^p = \zeta\tau + \tilde{e}_x^p$, $e_y^p = -2\zeta\tau + \tilde{e}_y^p$. Слагаемые $\zeta\tau$ являются приращением необратимой деформации \tilde{e}_x^p , существовавшей или зародившейся на предыдущем временном шаге, $\tau = \Delta t$ шаг по времени. Из (12) и уравнения равновесия $\sigma_{x,x} = 0$ находим

$$\begin{aligned} u_x &= \int_0^x f_1(\rho) d\rho + C_1 \int_0^x f_2(\rho) d\rho + C_3; \quad C_3 = 0; \\ \sigma_x &= C_1; \quad \sigma_y = \int_0^x f_3(\rho) d\rho + C_1 \int_0^x f_4(\rho) d\rho; \\ e_x^p &= e_z^p = \zeta\tau + \tilde{e}_x^p; \quad e_y^p = -2\zeta\tau + \tilde{e}_y^p. \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} f_1 &= (1.5K(\eta + (A + 2\mu)\tau)\alpha(T(\rho) - T_0) + \mu\eta\tilde{e}_x^p - 2/3\mu\tau k) \times \\ &\quad \times ((\eta + \tau c)(\lambda + \mu) + 2\mu K\tau)^{-1}; \\ f_2 &= (4\mu)^{-1} + 0,25(\eta + (A + 2\mu)\tau)((\eta + \tau c)(\lambda + \mu) + 2\mu K\tau)^{-1}; \\ f_3 &= (-3\mu K\alpha(T(\rho) - T_0)(\eta + c\tau) + 6\mu K\eta\tilde{e}_E^p - 4\mu Kk\tau)((\eta + \tau c)(\lambda + \mu) + 2\mu K\tau)^{-1}; \\ f_4 &= (0,5\lambda\eta + (K\mu + 0,5\lambda c)\tau)((\eta + \tau c)(\lambda + \mu) + 2\mu K\tau)^{-1}; \\ \zeta &= (6^{-1}C_1\mu + K\mu\alpha(T(\rho) - T_0) - \tilde{e}_x^p(2\mu K + (\lambda + \mu)c) - 2/3(\lambda + \mu)k) \times \\ &\quad \times ((\eta + \tau c)(\lambda + \mu) + 2\mu K\tau)^{-1} \end{aligned}$$

Коэффициенты интегрирования C_1 , C_2 , C_3 находятся из граничных условий, моделирующих равенство перемещений на упругопластической границе и ($u_x|_{x=0} = 0$; $u_x|_{x=s} = 0$). Область пластического течения будет расти пока идет процесс нагревания.

4. Разгрузка.

Отведение источника тепла приводит к образованию разгружающей упругопластической границы материала пластины (рис.1). В условиях присутствия накопленных и со временем неизменяющихся необратимых деформаций p_x и p_y соотношения закона Дюамеля-Неймана вместе с уравнением равновесия позволяют записать решение в области данного обратимого деформирования в виде

$$\begin{aligned} \sigma_x &= C_1, \quad \sigma_y = -3K\mu\alpha\gamma_1\alpha(T(\rho) - T_0) + p_y\gamma_1 + 0.5\gamma_1C_1 \\ u_x &= \frac{3}{2} \int_0^x \alpha(T(\rho) - T_0) K(\rho) \gamma_1(\rho) d\rho + \frac{C_1}{4} \int_0^x \gamma_1(\rho) \gamma_2(\rho) \mu(\rho)^{-1} d\rho + C_4 + \\ &\quad + 0.5 \int_0^x \lambda(\rho) \gamma_1(\rho) p_y(\rho) d\rho + \int_0^x p_x(\rho) d\rho \end{aligned} \quad (14)$$

5. Повторное пластическое течение.

В некоторый последующий момент времени на линии $x = 0$ выполнится условие пластичности $2(\sigma_y - Ae_y^p - \eta\varepsilon_y^p) - (\sigma_x - Ae_x^p - \eta\varepsilon_x^p) - (\sigma_z - Ae_z^p - \eta\varepsilon_z^p) = 4k$. Выполнение условия пластичности Ишлинского-Ивлева на границе $x = 0$ приводит к развитию новой области пластического течения. Следуя уравнению равновесия $\sigma_{x,x} = 0$, зависимостям закона Дюамеля-Неймана и ассоциированному закону пластического течения для напряжений, перемещений и необратимых деформаций получаем:

$$\begin{aligned} u_x &= \int_0^x f_1(\rho) d\rho + C_1 \int_0^x f_2(\rho) d\rho + C_5 \\ \sigma_x &= C_1; \quad \sigma_y = \int_0^x f_3(\rho) d\rho + C_1 \int_0^x f_4(\rho) d\rho; \\ e_x^p &= e_z^p = \zeta\tau + \tilde{e}_x^p; \quad e_y^p = -2\zeta\tau + \tilde{e}_y^p \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} f_1 &= (1.5K(\eta + (A + 2\mu)\tau)\alpha(T(\rho) - T_0) + \mu\eta\tilde{e}_x^p - 2/3\mu\tau k) \times \\ &\quad \times ((\eta + \tau c)(\lambda + \mu) + 2\mu K\tau)^{-1}; \\ f_2 &= (4\mu)^{-1} + 0,25(\eta + (A + 2\mu)\tau)((\eta + \tau c)(\lambda + \mu) + 2\mu K\tau)^{-1}; \\ f_3 &= (-3\mu K\alpha(T(\rho) - T_0)(\eta + \tau c) + 6\mu K\eta\tilde{e}_E^p - 4\mu Kk\tau)\tau((\eta + \tau c)(\lambda + \mu) + 2\mu K\tau)^{-1}; \\ f_4 &= (0,5\lambda\eta + (K\mu + 0,5\lambda A)\tau)((\eta + \tau c)(\lambda + \mu) + 2\mu K\tau)^{-1}; \\ \zeta &= (6^{-1}C_1\mu + K\mu\alpha(T(\rho) - T_0) - \tilde{e}_x^p(2\mu K + (\lambda + \mu)c) - 2/3(\lambda + \mu)k) \times \\ &\quad \times ((\eta + \tau c)(\lambda + \mu) + 2\mu K\tau)^{-1} \end{aligned}$$

6. Остаточные напряжения.

В ходе остывания материала пластины на линии $x = 0$ образуется разгружающая упругопластическая граница $x = m_2(t)$, которая, продвигаясь, достигает границы $x = n_2(t)$. По мере охлаждения пластины температурный градиент перестает существовать, происходит разгрузка. Остаточные напряжения и перемещения в материале закрепленной пластины определяются из соотношений.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= C_1, \quad \sigma_y = 0.5\lambda C_1 g^{-1} - 3K\mu g^{-1} p_y, \\ u_x &= C_1 \int_0^x w(\rho) x (4\mu(\rho) g(\rho))^{-1} d\rho + \int_0^x p_x(\rho) d\rho + 0.5 \int_0^x \lambda(\rho) g^{-1}(\rho) p_y(\rho) d\rho, \\ C_1 &= \left(\int_0^S p_x(\rho) d\rho + 0.5 \int_0^S \lambda(\rho) g^{-1}(\rho) p_y(\rho) d\rho \right) \left(\int_0^S w(\rho) x (4\mu(\rho) g(\rho))^{-1} d\rho \right)^{-1}. \\ g &= \lambda + \mu, \quad w = \lambda + 2\mu \end{aligned}$$

На рисунке 2 изображено распределение остаточных напряжений в материале стальной пластины (Ст3). Кривая 1 изображает остаточное напряжение σ_y ($\sigma_x = 0.0987k_0$), где $\eta = 0$, $c = 0$. Кривая 2 – σ_y ($\sigma_x = 0,0624k_0$), где $\eta = 0$, $c = 80$. Кривая 3 – σ_y ($\sigma_x = 0,008k_0$), где $\eta = 8$, $c = 0$ (η (Пас)). Кривая 4 – σ_y ($\sigma_x = 0,0012k_0$), где $\eta = 8$, $c = 80$ (Па).

Точки на поле графика отражают данные, полученные в результате натурального эксперимента с использованием метода рентгенодифрактометрии. Метод основан на определении межплоскостного расстояния между кристаллическими решетками с помощью измерения угла отражения луча. Исследование проводилось на анализаторе остаточных напряжений RIGAKU MSF-3M.

Как видно из рисунка 2 остаточные напряжения, полученные в результате натурального эксперимента, сопоставимы с остаточными напряжениями, полученными в результате математического моделирования. Основной проблемой в расчетах является определение коэффициентов η и c , так как они различны для каждого материала. Задача их поиска существенно упрощается ввиду наличия экспериментальных данных.

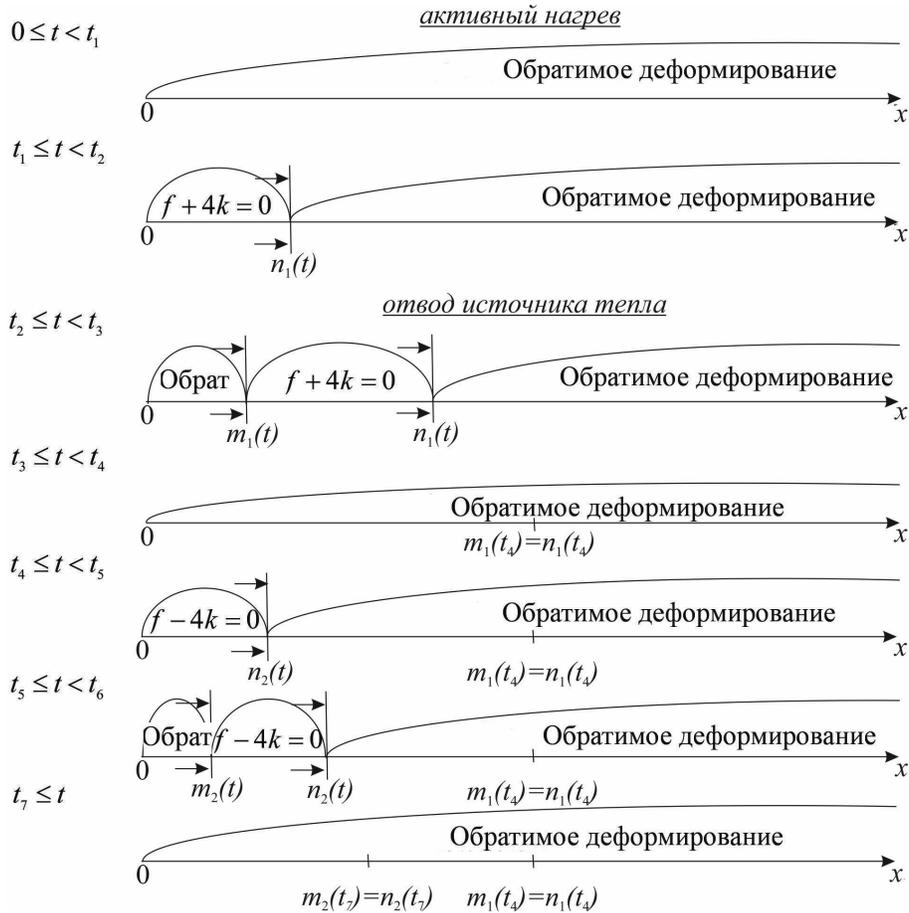


Рис. 1. Схема деформирования пластины

Описанная в этой работе математическая модель сварочного процесса, объясняет повышение значений предела текучести неразъемного соединения, полученного автоматической сваркой под флюсом. Упрочнение влияет на предел текучести. Это обстоятельство позволяет сделать вывод, что предел текучести возрастет или уменьшится в зависимости от знака выражения cp_{ii} . Так, экспериментально подтверждено, что предел текучести увеличился и стал равен $k = 1.07k_0$.

Расчеты последовательными шагами по времени убедительно показали, что во всех случаях возникает повторное (обратное) пластическое течение, в процессе которого формируются растягивающие остаточные напряжения и повышается предел текучести металла околошовной зоны, что и регистрируется последующими инструментальными измерениями на опытных образцах.

Таким образом, сопоставимость экспериментальных значений с теоретическими пределами отклонений подтверждает работоспособность расчетной математической модели. Невозможным представляется упрощение данной модели в предположении,

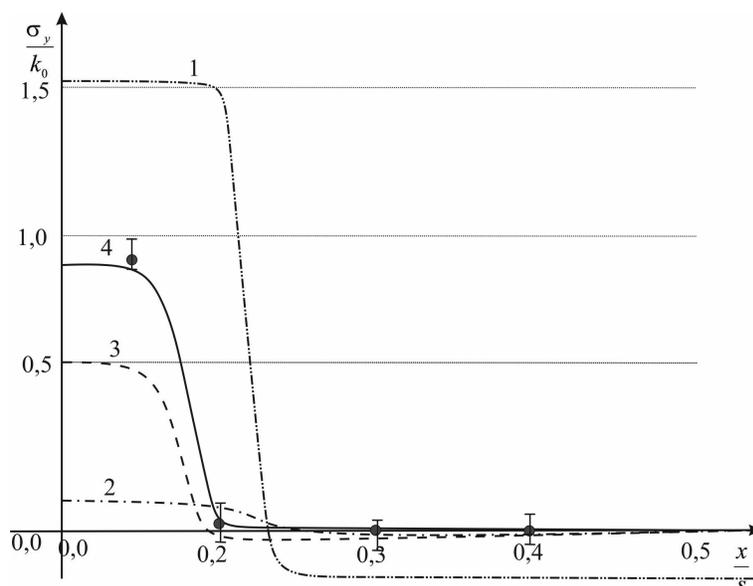


Рис. 2. Распределение остаточного напряжения в материале пластины.

что пластическое течение идеально или отток тепла от пластины по ее ширине постоянный. Теплоизоляция околошовной зоны, учет вязких свойств металла и его упрочнения в процессе необратимого деформирования задают итоговые механические свойства металла околошовной зоны и уровень остаточных напряжений в нем, что соответствует экспериментально полученным значениям.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сварка. Введение в специальность / В.А. Фролов, В.В. Пешков, А.Б. Коломенский [и др.]. М., 2004. 230 с.
- [2] Черепяхин А.А., Виноградов В.М., Шпунькин Н.Ф. Технология сварочных работ. Москва: Юрайт, 2017. 273 с.
- [3] Металлические конструкции. В 3 т. Т. 3 / под общ. ред. В.В. Кузнецова. М.: АСВ, 1999. 528 с.
- [4] Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. М.: Машгиз, 1951. 295 с.
- [5] Прохоров Н.Н. Физические процессы в металлах при сварке. Т.2. Внутренние напряжения, деформации и фазовые превращения. М: Металлургия, 1976. 600 с.
- [6] Монфаред Ф.Х., Пантелеенко А.Ф. Математическое моделирование сварочных деформаций в тонких пластинах // Вестник БНТУ. 2011. № 5. С. 18–25.
- [7] Биленко Г.А., Моргунов Е.А., Коробов Ю.С. Компьютерное моделирование напряженного состояния сварного соединения из нержавеющей стали 03X18H9M3, выполненного многопроходной орбитальной сваркой // Сварка и диагностика : сборник докладов Международного форума, Екатеринбург, 25–27 ноября 2014 г. Екатеринбург : УрФУ, 2015. С. 35–41.
- [8] Абашкин Е.Е., Каинг М., Ткачева А.В. Температурные напряжения пластины // Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева Серия: Механика предельного состояния. 2016. № 4(30). С. 24–33.
- [9] Абашкин Е.Е., Жилин С.Г., Комаров О.Н., Ткачева А.В. Влияние теплового режима совместного электродугового и алюмотермического воздействия на формирование структуры и свойств наплавляемого металла // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2018. Т. 20. № 2. С. 62–74.

- [10] Абашкин Е.Е., Ткачева А.В., Щербатюк Г.А. Условие пластичности максимальных приведённых касательных напряжений в качестве средства расчётов эволюции плоских напряжённых состояний // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2018. Т. 1. № 2(34). С. 51–62.
- [11] Механические свойства редких металлов / ред. Л. Д. Соколов. М. : Metallurgiya, 1972. 288 с.
- [12] Ершов В.И. Интенсификация формоизменяющих операций листовой штамповки Учебное пособие для ПТУ. М.: Высшая школа, 1989. 87 с.
- [13] Лихтман В.И., Ребиндер П.А., Карпенко Г.В. Влияние поверхностно-активной среды на процессы деформации металлов М.: Изд-во Академии наук СССР, 1954. 208 с.

A. V. Tkacheva, S. G. Zhilin, E. E. Abashkin, O. N. Komarov

DISTRIBUTION OF RESIDUAL STRESSES IN THE HEAT-AFFECTED ZONE OF PERMANENT CONNECTION OF STEEL EXTENDED ELEMENTS

Institute of Machine Science and Metallurgy FEB RAS, Komsomolsk-on-Amur, Russia

Abstract. An improved mathematical model is presented for calculating residual stresses in a material that are formed as a result of thermal effects in automatic welding processes under a layer of reflux at the junction of extended steel elements. The model contains the parameters of viscosity and strain hardening in the criteria of plastic flow. It is based on the methods of numerical investigation of the surfacing process, which assumes that the material of the plates is solid and is deformed elastoplastic. The formulation of a thermal problem in modeling the process of deformation in the heat-affected zone is possible in one case when there is a need for a regional effect at the ends of long plates. In the mathematical interpretation of the problem, the length of the mating plates is read infinitely large, and the width is the same. The efficiency of the computational mathematical model is confirmed by a comparable experimental value obtained as a result of calculations.

Keywords: elasticity, plasticity, hardening, viscosity, temperature stresses, phase transitions, heat-affected zone

REFERENCES

- [1] Welding. Introduction to specialty /V.A. Frolov, V.V. Peshkov, A.B. Kolomensky [et al]. М., 2004. 230 p. (in Russian).
- [2] Cherepakhin A.A., Vinogradov V.M., Spunkin N.F. Welding technology. Moscow: Yurayt, 2017. 273 p. (in Russian).
- [3] Metal Structures. Vol. 3/ Ed. V.V. Kuznetsov. М.: ASV, 1999. 528 p. (in Russian).
- [4] Rykalin N.N. Heat Process Calculations for Welding. М.: Mashgiz, 1951. 295 p. (in Russian).
- [5] Prokhorov N.N. Physical processes in metals during welding. Vol.2. Entrapment of stress, deformations and phase transformations. Metallurgy, 1976. 600 p. (in Russian).

Tkacheva Anastasia Valerevna, Senior Researcher, Institute of Machine science and Metallurgy, Komsomolsk-on-Amur, Russia,

Zhilin Sergey Gennadievich, Leading Researcher, Candidate of Technical Sciences, assistant professor, Institute of Machine science and Metallurgy, Komsomolsk-on-Amur, Russia,

Abashkin Evgeny Evgenievich, Junior Researcher, Institute of Machine science and Metallurgy, Komsomolsk-on-Amur, Russia,

Komarov Oleg Nikolaevich, Acting Director, Candidate of Technical Sciences, assistant professor, Institute of Machine science and Metallurgy, Komsomolsk-on-Amur, Russia.

-
- [6] Montfared F.H., Panteleenko A.F. Mathematical modeling of welding deformations in thin plates// Vestnik BNTU. 2011. No 5. pp. 18–25. (in Russian).
- [7] Bilenko G.A., Morgunov E.A., Korobov Y.S. Computer simulation of stress state of 03X18H9M3 stainless steel welded joint made by multi-pass orbital welding // Welding and diagnostics: collection of reports of the International Forum, Yekaterinburg, November 25-27, 2014. Yekaterinburg: Urfu, 2015. pp. 35–41. (in Russian).
- [8] Abashkin E.E., Kaing M., Tkacheva A.V. Temperature Stresses Plate// Bulletin of the Yakovlev Chuvash State Pedagogical University. Series: Mechanics of Limit State. 2016. № 4(30). pp. 24-33. (in Russian).
- [9] Abashkin E.E., Gilin S.G., Komarov O.N., Tkacheva A.V. The influence of the thermal regime of the joint electric arc and aluminothermic action on the formation of the structure and properties of the deposited metal //The Journal of Perm National Research Polytechnic University. Mechanical engineering, materials science. 2018. Vol. 20. No. 2. pp. 62–74. (in Russian).
- [10] Abashkin E.E., Tkacheva A.V., Scherbatyuk G.A. Condition of plasticity of maximum given tangential stresses as a means of calculations of evolution of flat stressed states//Scientists of the note of Komsomolsky-on-Amur state technical university. 2018. Vol. 1. No. 2(34). pp. 51–62. (in Russian).
- [11] Mechanical properties of rare metals /ed. L. D. Sokolov. Moscow: Metallurgy, 1972. 288 p. (in Russian).
- [12] V.I. Ershov Intensification of Forming Operations of Sheet Stamping Tutorial for STP. M.: Vysshaya shkola, 1989. 87 p. (in Russian).
- [13] Lichtman V.I., Rebinder P.A., Carpenko G.V. Influence of surface-active environment on metal deformation processes M.: Izd-vo Akademii nauk SSSR, 1954. 208 p. (in Russian).