УДК 621.791:539.374

ФОРМИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЛАСТИНЕ ИЗ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ СО СВАРНЫМ НАПЛАВОМ**Ткачева А.В., Абашкин Е.Е., Жилин С.Г., Комаров О.Н.***ФГБУН «Институт машиноведения и металлургии» Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМиМ ДВО РАН), Комсомольск-на-Амуре, e-mail: zhilin@imim.ru*

Конструкционные углеродистые стали отличаются повышенными физико-механическими свойствами, однако получению сварной конструкции, включающей элементы, выполненные из таких сталей, в значительной степени, препятствует высокий углеродный эквивалент. Этот параметр определяет склонность к образованию пор и трещин, появляющихся в результате внутренних напряжений, что приводит к усложнению технологии получения сварного соединения. В этой связи использование трудносвариваемых углеродистых сталей для получения сварных конструкций ограничено и определяет недостаток информации о влиянии локального нагрева на структуру и физико-механические свойства материала пластины из углеродистой стали. Необходимость получения неразъемного соединения с высокими прочностными и эксплуатационными характеристиками определяет актуальность поиска вариантов формирования и прогнозирования свойств материала, наплавляемого на поверхность стали с высоким углеродным эквивалентом. В работе представлены результаты изучения влияния точечного высокоинтенсивного нагрева на формирование остаточных напряжений в материале пластины, выполненной из стали 45. Приведена математическая модель, построенная на основе модели Прандтля – Рейса, где в качестве закона пластического течения принимается условие Ишлинского – Ивлева, в котором введены слагаемые, учитывающие упрочнение и вязкость. Предел текучести и упругие модули принимаются зависимыми от температуры. В качестве фазового перехода полагается условие фиксации упругих модулей при наивысшей температуре. Рассчитанные значения остаточных напряжений сравниваются с практическими, полученными с поверхности пластины, деформируемой в процессе нагрева, в ходе натурного эксперимента.

Ключевые слова: электродуговая сварка, углеродистая сталь, температурные напряжения, точечный нагрев, упругость, пластичность, вязкость, условие Ишлинского – Ивлева

FORMATION OF TEMPERATURE STRESSES IN A PLATE FROM CARBON STEEL WITH WELDED FUSION**Tkacheva A.V., Abashkin E.E., Zhilin S.G., Komarov O.N.***Federal state budgetary institution of science Institute of Machinery and Metallurgy of Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences, Komsomolsk-na-Amure, e-mail: zhilin@imim.ru*

Structural carbon steels are distinguished by enhanced physical and mechanical properties, however, a high carbon equivalent impedes the production of a welded structure including elements made of such steels to a large extent. This parameter determines the tendency to form pores and cracks resulting from internal stresses, which complicates the technology for producing a welded joint. In this regard, the use of hard-to-weld carbon steels to obtain welded structures is limited and determines the lack of information about the influence of local heating on the structure and physico-mechanical properties of the material of the carbon steel plate. The need to obtain an integral connection with high strength and operational characteristics determines the relevance of the search for options for the formation and prediction of the properties the material deposited on the surface of steel with high carbon equivalents. The paper presents the results of studying the influence of high-temperature heating on the formation of residual stresses in the material of a plate made of steel 45. A mathematical model based on the Prandtl-Reis model is presented, where the Ishlinsky-Ivlev condition is accepted as the law of plastic flow, in which the terms are introduced taking into account hardening and viscosity. The yield strength and elastic moduli are assumed to be temperature dependent. As a phase transition, the condition for fixing elastic modules at the highest temperature is assumed. The calculated values of the residual stresses are compared with the practical that obtained from the surface of a plate deformed during heating received from the full-scale experiment.

Keywords: electric arc welding, carbon steel, temperature stresses, spot heating, elasticity, ductility, viscosity, Ishlinsky-Ivlev condition

Уникальными прочностными и эксплуатационными свойствами конструкционных углеродистых сталей, как правило, пренебрегают при получении сварных конструкций. Причинами отказа от использования этих сталей в сварке являются повышенная трудоемкость процесса, вследствие высокого углеродного эквивалента, который определяет склонность неразъемного соединения к образованию пор и трещин, являющихся следствием внутренних на-

пряжений. Так как использование трудносвариваемых сталей с высоким углеродным эквивалентом ограничено при получении сварных конструкций недостаточное изученное представляется влияние локального нагрева на структуру и физико-механические свойства пластины. Актуальность исследований, связанных с изучением вопросов формирования и прогнозирования свойств материала, наплавляемого на поверхность углеродистой стали, определяется необхо-

димостью получения неразъемного соединения с высокими прочностными и эксплуатационными характеристиками.

Сборка металлоконструкций из неразъемных соединений, полученных сваркой, в ряде случаев затрудняется по причине нарушения геометрической точности, являющейся следствием температурного градиента, приводящего к появлению закалочных структур. Изменения структуры в области активного теплового воздействия свидетельствуют о протекании в металле пластического течения. Температурные напряжения, как правило, концентрируются в окрестности области теплового воздействия, приводя к появлению дефектов. Металл в области пластического течения обладает иными механическими характеристиками в отличие от основного металла. Предварительными исследованиями установлено, что предел текучести в этой области увеличивается, что свидетельствует об упрочнении материала. Также возможно появление области разупрочнения металла [1, 2]. Упругие модули понижаются в области высокой температуры и восстанавливают прежние значения при остывании не могут, что объясняется фазовыми изменениями [3].

Таким образом, проблемой при проектировании сварных конструкций из указанных видов сталей является определение величины остаточных напряжений и деформаций в зоне интенсивного температурного влияния с целью их регулирования. Этой проблеме посвящено значительное число работ [4–6], в том числе и авторами настоящего исследования [7, 8]. В работе [9] представлены результаты математического моделирования процесса точечного нагрева диска с образованием наплава. Однако такое решение не совпадает со значениями остаточных напряжений, зарегистрированными на поверхности пластины, поэтому было принято решение усложнить математическую модель введением вязкости и упрочнения в пластическое течение и сравнить результаты расчетов с экспериментальными данными.

Недостаточный объем информации об экономической эффективности применения трудносвариваемых углеродистых сталей определяет целый ряд проблем, связанных с оптимизацией таких технологических параметров производства, как расход электродного материала; трудоемкость сварочных и слесарных работ (связанных с разделкой кромок, устранением окалины и т.д.). Недостаток практической составляющей в экономических расчетах такого плана и, как следствие, возможности прогноза расхода материалов, трудовых и временных

затрат, определяют актуальность исследований, представленных в настоящей работе.

Цель исследования: разработка и экспериментальное подтверждение адекватной математической модели расчета остаточных напряжений в материале пластины из углеродистой стали со сварным наплавом на основе условия максимальных приведенных напряжений (Ишлинского – Ивлева) с введением слагаемых, отвечающих за упрочнение материала и вязкости при пластическом течении.

Материалы и методы исследования

В расчетах за основу математической модели принята модель Прандтля – Рейса, в которой деформации малы и складываются из обратимых e_{ij}^e и необратимых e_{ij}^p

$$d_{ij} = e_{ij}^e + e_{ij}^p = 0,5(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad (1)$$

где $u_{i,j}$ – компоненты вектора перемещений, d_{ij} – компоненты тензора полной деформации.

Обратимые деформации связаны с напряжениями σ_{ij} и температурой T законом Дюамеля – Неймана [10]

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

σ_{ij} – компоненты тензора напряжений, T , T_0 – текущая и начальная температура, λ , μ , K – упругие модули, μ – модуль сдвига G , $K = \lambda + \frac{2}{3}\mu$ – модуль всестороннего сжатия.

Необратимые деформации развиваются, если напряженное состояние достигнет поверхности нагружения согласно ассоциированному закону пластического течения [11]

$$\epsilon_{ij}^p = \frac{de_{ij}^p}{dt} = d\xi \frac{\partial f(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}}; d\xi > 0; f(\sigma_{ij}) = 0, \quad (3)$$

$f(\sigma_{ij}, \eta, c, k) = 0$ – уравнения поверхности нагружения в пространстве напряжений, k – предел текучести материала, c , η – коэффициенты упрочнения и вязкости.

В качестве наступления пластического течения использовано условие максимальных приведенных напряжений Ишлинского – Ивлева [12, с. 120]

$$f = \max \left| \sigma_i - \eta \epsilon_i^p - c \epsilon_i^p - \sigma \right| - \frac{4}{3} k = 0, \quad \sigma = \frac{1}{3} \sigma_{jj}. \quad (4)$$

Распределение температуры задается законом температуропроводности [13]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a T_{,jj} - \chi(T - T_0), \quad (5)$$

где a – коэффициент температуропроводности, χ – коэффициент теплоотдачи $\chi = 2\beta(\zeta\rho h)^{-1}$ β – коэффициент теплоотдачи от деформируемого и проводящего тепло тела в окружающую среду, ζ – удельная теплоемкость на единицу массы, ρ – плотность материала пластины, h – толщина пластины.

Принимая во внимание высокую температуру нагрева материала, в отличие от классического случая теории температурных напряжений, задаваемой зависимостями (1)–(3), когда в них λ , μ , η , k постоянные величины, связали их зависимости от температуры

$$\begin{aligned} k(T) &= k_0 (\tau)^2; \quad \eta(T) = \eta_0 (1 - \tau); \quad \nu(T) = 0,5 - (0,5 - \nu_0) \tau; \\ \lambda &= \frac{2\nu\mu}{1 - 2\nu}; \quad \tau = \frac{T_p - T}{T_p - T_0}; \\ \mu &= \mu_0 (-65,94 \cdot 10^{-3} T^2 + 41,08 T + 77,82 \cdot 10^3) \cdot 84000^{-1}. \end{aligned} \quad (6)$$

В (6) k_0 , η_0 , ν_0 , μ_0 – предел текучести, коэффициенты вязкости, коэффициенты Пуассона, модуль сдвига при комнатной температуре, T_p – температура плавления металла.

Завершает систему уравнений (1–6) уравнение равновесия

$$\sigma_{ij,i} = 0. \quad (7)$$

Для проведения натурного эксперимента использовали пластины шириной 100 мм, длиной 200 мм, толщиной 12 мм, выполненные из конструкционной углеродистой стали 45 (ГОСТ 1050-2013). Остаточные напряжения определяли на рентгенодифрактометрическом анализаторе RIGAKU MSF-3M до начала теплового воздействия (с целью подтверждения малых значений напряжений) и после остывания. В центре пластины (рис. 1), помещали источник тепла (электрическая дуга) и производили нагрев до температуры $T(0, t_*) = T_p$ с образованием сварного наплава, вследствие переноса присадочного материала в зону нагрева.

Для проверки теоретических расчетов математической модели и определения влияния теплового воздействия электрической дуги опытные испытания проводили на универсальной машине AG-X plus SHIMADZU при постоянной скорости перемещения захватов 0,05 мм/с.

Результаты исследования и их обсуждение

При постановке задачи с упругим деформированием в цилиндрической системе координат (r, φ, z) располагаем пластину,

которая нагревается от источника тепла, находящегося в центре $r = 0$

$$T(r, t) = Vt, \quad 0 \leq r \leq r_0, \quad (8)$$

где V – скорость нагрева, r_0 – радиус пятна нагрева. Когда температура в центре пластины станет равной $T(0, t_*) = T_p$ – источник тепла отводится и материал пластины остывает.

Теплоотводом от боковых поверхностей пластины пренебрегаем из-за малой толщины. Распределение температуры в материале пластины во время исследования определяется из закона теплопроводности (5) в цилиндрической системе координат

$$\frac{\partial T}{\partial t} = aT - \chi(T - T_0). \quad (9)$$

Поскольку решения температурной задачи (8)–(10) получают с помощью численных методов [13, с. 6] или аналитически [14, с. 53], то переходим к механической задаче.

В условиях плоского напряженного состояния ($\sigma_z = 0$) из зависимостей закона Дюамеля – Неймана имеем

$$\begin{aligned} \sigma_r &= (4\mu g u_{r,r} + 2\lambda \mu r^{-1} u_r - 6K\mu T_0 \theta) w^{-1}, \\ \sigma_\varphi &= (2\lambda \mu u_{r,r} + 4\mu g r^{-1} u_r - 6K\mu T_0 \theta) w^{-1}, \\ w &= \lambda + 2\mu, g = \lambda + \mu. \end{aligned} \quad (10)$$

Рис. 1. Схема определения остаточных напряжений:
1 – стальная пластина; 2 – место наплавки; 3 – точки снятия данных

Подстановка (10) в уравнение равновесия

$$\sigma_{r,r} + r^{-1}(\sigma_r - \sigma_\phi) = 0 \quad (11)$$

приводит к уравнению для вычисления перемещения u_r

$$\Phi u_{r,rr} + \zeta u_{r,r} + \omega u_r + \beta = 0, \quad (12)$$

$$\Phi = 4\mu g w^{-1},$$

$$\zeta = 4(\mu^2 \lambda_{,r} + \mu_{,r}(\lambda^2 + 2\lambda\mu + 2\mu^2))w^{-2} + 4\mu g w^{-1} r^{-1},$$

$$\omega = 2(2\mu^2 \lambda_{,r} + \lambda^2 \mu_{,r})w^{-2} r^{-1} - 4\mu g w^{-1} r^{-2},$$

$$\beta = -\theta T_0(8\mu^2 \lambda_{,r} + 2(3\lambda^2 + 4\lambda\mu + 4\mu^2)\mu_{,r})(\lambda + 2\mu)^{-2} - 6K\mu T_0 \theta_{,r}(\lambda + 2\mu)^{-1}.$$

В качестве граничных условий выбираем условия

$$u_r|_{r=0} = 0, \quad \sigma_r|_{r=R} = 0, \quad (13)$$

где R – расстояние до края пластины.

В случае зависимости упругих модулей от температуры решить дифференциальное уравнение (12) совместно с граничными условиями (13) возможно только численно. Аналитическое решение при постоянных упругих модулях приведено в [9].

С некоторого момента в центре нагрева выполняется условие пластического течения $2(\sigma_z - c e_z^p - \eta \epsilon_z^p) - (\sigma_r - c e_r^p - \eta \epsilon_r^p) - (\sigma_\phi - c e_\phi^p - \eta \epsilon_\phi^p) = 4k$. Образуется упругопластическая граница $r = n_1(t)$. В области $0 \leq r \leq n_1(t)$ материал пластически течет, образуются и развиваются необратимые деформации. Закон Дюамеля – Неймана запишется в виде

$$\begin{aligned} \sigma_r &= (4\mu g(u_{r,r} - e_r^p) + 2\mu\lambda(r^{-1}u_r - e_r^p) - 6K\mu\alpha(T - T_0))w^{-1}, \\ \sigma_y &= (2\mu\lambda(u_{r,r} - e_r^p) + 4\mu g(r^{-1}u_r - e_r^p) - 6K\mu\alpha(T - T_0))w^{-1}. \end{aligned} \quad (14)$$

Из ассоциированного закона пластического течения (3) находим $\epsilon_r^p = \epsilon_\phi^p = -\zeta$, $\epsilon_z^p = 2\zeta$, $e_r^p = e_\phi^p = -\zeta\tau + \tilde{e}_r^p$, $e_z^p = 2\zeta\tau + \tilde{e}_z^p$. Слагаемые $\zeta\tau$ являются приращением необратимой деформации $\tilde{e}_r^p$, существовавшей или зародившейся на предыдущем временном шаге, $\tau = \Delta t$ – шаг по времени. Выражаем ζ :

$$\zeta = -\left(3\mu K(u_{r,r} + r^{-1}u_r - 2\alpha(T - T_0)) + 2wk - 3(wc + 2\mu K)\tilde{e}_r^p\right)\left((3wc - 2g(\lambda - 2\mu))\tau + 3w\eta\right)^{-1}. \quad (15)$$

Решая численно уравнение равновесия (11) в области пластического течения с учетом (14) и (15) на каждом временном шаге находятся перемещения.

После отвода тепла в центре $r = 0$ необратимые деформации замедляют свой рост, образуется разгружающая упругопластическая граница $r = m_1(t)$. Здесь $\zeta(0, t) = 0$. Эта граница продвигается за границей $r = n_1(t)$, и через некоторый промежуток времени границы соединяются. В области разгрузки $0 \leq r \leq m_1(t)$ границы определяются из соотношений (14). Упругие модули (6) сохраняют значения при остывании, что моделирует фазовые переходы.

С распределением температуры пластины в области нагрева $r = 0$ выполняется условие $-2(\sigma_z - c e_z^p - \eta \epsilon_z^p) + (\sigma_r - c e_r^p - \eta \epsilon_r^p) + (\sigma_\phi - c e_\phi^p - \eta \epsilon_\phi^p) = 4k$; здесь зарождается повторное пластическое течение с границей $r = n_2(t)$, которое продвигается по материалу пластины до момента остывания. Остывание пластины приводит к затуханию пластического течения. Разгружающая упругопластическая граница $r = m_2(t)$ образуется в центре $r = 0$ ($\zeta(0, t) = 0$). При полном остывании границы $m_2(t)$ и $n_2(t)$ соединятся. Распределения перемещения в материале пластины находятся численно из решения дифференциального уравнения равновесия (11). На рис. 2 показаны распределения напряжений для пластин. Экспериментальные значения остаточных напряжений изображены на графиках точками и лежат в области полученных теоретических кривых, что подтверждает работоспособность математической модели.

Рис. 2. Распределение остаточных напряжений в материале пластины из стали 45:
1 – σ_{rr} , 2 – $\sigma_{\phi\phi}$, 3 – σ_{zz} (полученное в ходе натурного эксперимента)

Рис. 3. Диаграмма деформирования: 1 – до нагрева, 2 – после нагрева

Локальный нагрев оказывает влияние на структуру и физико-механические свойства материала пластины из углеродистой стали. Тепловое воздействие электрической дуги нагревает металл до температуры плавления в зоне контакта. При остывании в точке наплавления металла появляются высокие растягивающие напряжения.

Данные изменения происходят из-за перегрева металла и впоследствии его быстрого охлаждения, что приводит к росту остаточных напряжений в металле. Это оказывает влияние на физико-механические свойства материала пластины и приводит

к его упрочнению в зоне теплового воздействия. Образцы до и после теплового воздействия подвергались испытанию на растяжение (рис. 3). Из рис. 3 видно, что после воздействия электрической дуги на пластину предел текучести растет со снижением предела прочности.

При расчете экономической эффективности использования результатов, представленных в настоящей работе исследований, следует учитывать снижение трудозатрат при проектировании конструкций, узлы которых получены из сталей с высоким углеродным эквивалентом. Использование

результатов исследований не предполагает замену или модернизацию оборудования, и направлено на получение эффекта в виде снижения затрат на эксперименты при технологической проработке партии изделий из конкретной марки трудносвариваемой стали.

В конечном счете экономическая целесообразность результатов определяется сокращением расхода электрической энергии на получение бездефектного сварного соединения с глубоким проваром и меньшим короблением.

Выводы

С использованием условия максимальных приведенных напряжений (Ишлинско-го – Ивлева) с введением слагаемого, отвечающего за упрочнение материала и вязкости при пластическом течении, возможен расчет остаточных напряжений в материале пластины из углеродистой стали со сварным наплавом, что подтверждается натурным экспериментом. После проведения наплава в материале пластин повышается предел текучести, но при этом в несколько раз сокращается площадь текучести, что доказывает упрочнение материала пластины в результате проведения наплава.

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

Список литературы

1. Ерофеев В.В., Игнатьев А.Г. Обоснование режимов электронно-лучевой сварки изделий оболочкового типа из нагартованных сплавов АМГ6Н и АМГ6НПП // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2015. Т. 15. № 4. С. 53–61.
2. Полетаев Ю.В., Полетаев В.Ю. Влияние термического цикла сварки и повторного нагрева на структурно-фазовые изменения низколегированной CR-NI-MO-V стали // Вестник Донского государственного технического университета. 2016. Т. 16. № 4 (87). С. 96–103.
3. Никоненко Е.Л., Смирнов А.Н., Попова Н.А., Абабков Н.В., Князьков К.В. Структурно-фазовые изменения в зоне термического влияния стали 12ХН10Т после сварки модулированным током // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2019. Т. 21. № 3. С. 100–109.
4. Лешковцев В.Г., Покровский А.М. Расчёт закалочных напряжений в стальных деталях с учётом упруговязкопластических свойств и изменения фазового состава // Известия Российской академии наук. Механика твёрдого тела. 1999. № 2. С. 101–107.
5. Леонов В.П., Мизецкий А.В. Влияние локальных остаточных сварочных напряжений на начальную стадию развития трещин в сварных соединениях // Вопросы материаловедения. 2008. № 4 (56). С. 54–65.
6. Пазилова У.А., Ильин А.В., Круглова А.А., Мотовилина Г.Д., Хлусова Е.И. Влияние температуры и скорости деформации на структуру и характер разрушения высокопрочных сталей при имитации термического цикла сварки и послесварочного отпуска // Физика металлов и материаловедение. 2015. Т. 116. № 6. С. 642.
7. 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.
8. Буренин А.А., Ткачева А.В., Щербатюк Г.А. К использованию кусочно-линейных пластических потенциалов в нестационарной теории температурных напряжений // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. 2018. Т. 22. № 1. С. 23–39.
9. Буренин А.А., Каинг М., Ткачева А.В. К расчету плоских напряженных состояний в теории неустановившихся температурных напряжений в упругопластических телах // Дальневосточный математический журнал. 2018. Т. 18. № 2. С. 131–146.
10. Величко И.Г. Аналитический метод решения задач термоупругости с периодическими условиями для многослойных оснований // Механика машин, механизмов и материалов. 2015. № 4 (33). С. 42–49.
11. Артемов М.А., Барановский Е.С., Якубенко А.П. Соотношения изотропии и ассоциированный закон течения вестник ВГУ. Серия: Физика. Математика. 2014. № 4. С. 81–90.
12. Быковцев Г.И., Ивлев Д.Д. Теория пластичности // Владивосток: Дальнаука, 1998. 528 с.
13. Хаустов С.В., Харламов В.О., Кузьмин С.В. Численное моделирование тепловых процессов в сварке: учеб.-метод. пособие. Волгоград, 2016. 60 с.
14. Полянин А.Д., Зайцев В.Ф. Справочник по нелинейным уравнениям математической физики: Точное решение. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 432 с.
15. Проскурин В.Д., Майстренко Н.Ю. Повышение экономической эффективности дуговой сварки углеродистых сталей в защитной среде путем внедрения смеси газов // Промышленность: новые экономические реалии и перспективы развития: сборник статей I Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием): в 2-х частях. 2017. С. 257–261.