

УДК 539.3, 51.74, 621.9.011

## Численное решение двумерной квазистатической задачи термопластичности: расчет остаточных термических напряжений при многопроходной сварке разнородных сталей

Р. А. Кректулева<sup>1,а</sup>, О. И. Черепанов<sup>2</sup>, Р. О. Черепанов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30, ТПУ

<sup>2</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 40, ТУСУР  
E-mail: <sup>а</sup> rakrekt@mail.ru

Получено 9 апреля 2012 г.

Разработана двумерная математическая модель для оценки напряжений в сварных соединениях, формируемых при многопроходной сварке многослойных сталей. Основой модели является система уравнений, которая включает вариационное уравнение Лагранжа инкрементальной теории пластичности и вариационное уравнение теплопроводности, выражающее принцип М. Био. Вариационно-разностным методом решается задача теплопроводности для расчета нестационарного температурного поля, а затем на каждом шаге по времени – квазистатическая задача термопластичности. Разностная схема построена на треугольных сетках, что дает некоторое повышение точности при описании положения границ раздела структурных элементов.

Ключевые слова: термопластичность, теплопроводность, многопроходная сварка, покрытие

### Numerical solution of a two-dimensional quasi-static problem of thermoplasticity: residual thermal stress calculation for a multipass welding of heterogeneous steels

R. A. Krektuleva<sup>1</sup>, O. I. Cherepanov<sup>2</sup>, R. O. Cherepanov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia

<sup>2</sup> Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia

**Abstract** . – A two-dimensional mathematical model was developed for estimating the stresses in welded joints formed during multipass welding of multilayer steels. The basis of the model is the system of equations that includes the Lagrange variational equation of incremental plasticity theory and the variational equation of heat conduction, which expresses the principle of M. Biot. Variational-difference method was used to solve the problems of heat conductivity and calculation of the transient temperature field, and then at each time step – for the quasi-static problem of thermoplasticity. The numerical scheme is based on triangular meshes, which gives a more accuracy in describing the boundaries of structural elements as compared to rectangular grids.

Keywords: thermoplasticity, thermal conductivity, multipass welding, coating

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2012, vol. 4, no. 2, pp. 345–356 (Russian).

Работа выполнена при поддержке Президента РФ (грант МД-202.2011.8).

## Введение

Среди множества факторов, определяющих прочность сварных соединений, значительную роль играют остаточные напряжения, которые развиваются при охлаждении расплава материала шва и его окрестностей. Как правило, при сварке плавлением шов формируется в результате нескольких проходов плавящегося электрода с довольно значительными интервалами по времени при последовательном послойном заполнении шва. Обусловленные этим неоднородность и нестационарность температурных полей порождают неоднородность напряженно-деформированного состояния, которую можно рассматривать как относительно самостоятельный структурообразующий фактор, влияющий на прочность сварного соединения. Развитие моделей, на основе которых можно получить реалистичную картину распределения остаточных напряжений при многопроходной сварке, является актуальной теоретической и прикладной задачей. В данной работе предложен метод численного исследования квазистатических процессов концентрации напряжений и локализации деформаций при формировании сварного соединения многопроходной сваркой плавлением.

Расчеты проведены для сварного шва с V-образной разделкой, заполнение которого осуществляется за пять проходов. Рассмотрен процесс сварки стали 09Г2С с плакирующим слоем из стали 08Х18Н10Т.

## Постановка задачи и метод решения

Из множества особенностей технологии создания сварных соединений, которые необходимо учитывать при расчете остаточных напряжений, можно выделить следующие: первоначальную форму разделки шва; различие физико-механических характеристик свариваемых материалов и материала электрода (электродной проволоки); неоднородность температурного поля, которая зависит от скорости сварки; количества слоев шва и времени нанесения каждого слоя при многопроходной сварке. Предлагаемый далее метод решения задачи термопластичности применительно к задачам расчета сварных соединений позволяет исследовать влияние этих факторов на распределение остаточных напряжений в сварных швах.

Рассмотрим сварное соединение в стали 09Г2С с плакирующим слоем из стали 08Х18Н10Т. В расчетах были заданы размеры модельного образца: толщина металла основы (сталь 09Г2С) –  $L_1^1 = 37$  мм, толщина металла покрытия (стали 08Х18Н10Т) –  $L_1^2 = 5$  мм, длина –  $L_2 = 73$  мм. Для образцов такого типа, согласно [Гост 16098-80], часто применяется V-образная разделка шва (см. рис. 1), которая и рассматривается далее. Моделировался процесс последовательного заполнения шва расплавом электродного металла за пять проходов. В начальный момент заполняется слой 3 (см. рис. 1), затем последовательно слои 4, 5, 6, 7. Задержка по времени между нанесением очередного слоя задавалась равной 4с, что соответствует характерным временам сварки небольших образцов. Одной из особенностей задачи является моделирование процессов изменения температурного поля и напряженно-деформированного состояния в образце с переменной геометрией, меняющейся по мере заполнения шва расплавом электродного металла. В качестве окружающей среды принят воздух, причем в начальный момент области 4–7 также считаются заполненными воздухом.

В качестве начальных условий при решении двумерной задачи термопластичности (плоское напряженное состояние) было принято, что в момент заполнения первого слоя шва напряжения и деформации в создаваемом сварном соединении отсутствуют.

Температура основного металла и покрытия в момент времени  $t = 0$ , а также температура внешней среды считаются постоянными  $T_0 = 273,15$  К. Исходное распределение температуры с максимальным значением  $T = 1820$  К в первом заполненном слое показано на рис. 2.

Расплав, охлаждаясь, прогревает соседние слои материала, что порождает развитие термических напряжений как в самом шве, так и в его окрестностях. Через 4с область 4 также заполняется расплавом с начальным распределением температуры, подобным распределению, приведенному на

рис. 2. Охлаждаясь, этот слой, в свою очередь, начинает прогревать более холодные соседние участки материала, внося соответствующие изменения в температурное поле и напряженно-деформированное состояние образца с изменившейся конфигурацией внешних границ. Этот процесс продолжается до полного заполнения шва, после чего идет медленное охлаждение в воздухе.

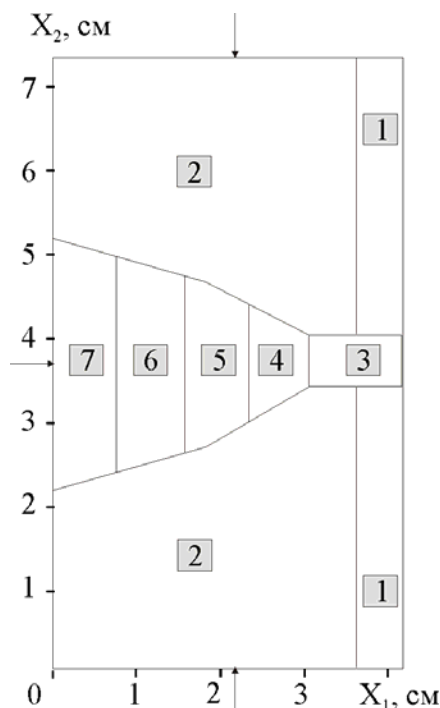


Рис. 1. Схема сварного соединения: 1 – плакирующий слой; 2 – основной металл; 3, 4, 5, 6, 7 – слои шва, которые последовательно наносятся при многопроходной сварке

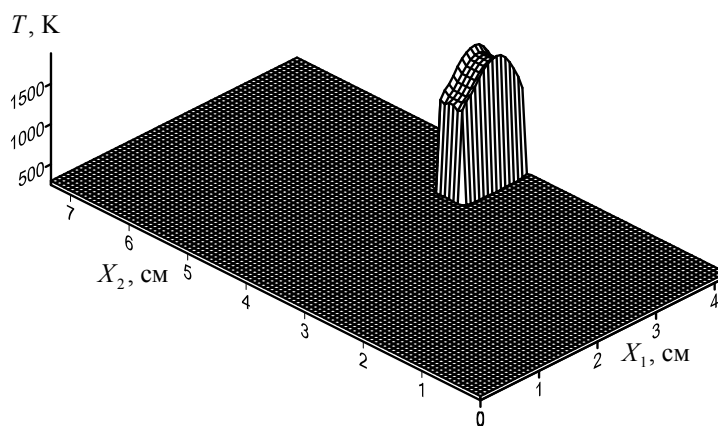


Рис. 2. Начальная температура в момент заполнения расплавом первого слоя шва

Физико-механические свойства сталей 09Г2С и 08Х18Н10Т: модуль Юнга  $E$ , модуль сдвига  $G$ , коэффициент Пуассона  $\nu$ , условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , временное сопротивление  $\sigma_b$ , плотность  $\rho$ , линейный коэффициент температурного расширения  $\alpha$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , теплоемкость  $C$  – в интервале температур от 273,15 К до 1 000 К были взяты из справочников [Сорокин, 1989; Зубченко, 2011; Григорьев, Мейлихов, 1991; Новикова, 1974; Антикайн, 1991]. По имеющимся данным, для каждой из необходимых характеристик были построены нормированные функции температуры  $f(T)/f(T_0)$ , которые показывают, во сколько раз увеличивается (уменьшается) каждая такая характеристика при температуре  $T$  по сравнению с её значением при отсчетной температуре

$T_0 = 273,15$  К, которой соответствуют значения, приведенные в таблице. Свойства сварного шва, зависящие от состава электродного материала, определялись расчетным путем по методике, описанной в работах [Герасимов, Кректулева, Люкшин, 2001; Кректулева, 2011].

Таблица 1. Физико-механические характеристики материалов при  $T = 273,15$  К

Материал	$E$ , ГПа	$G$ , ГПа	$\nu$	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\alpha \times 10^6$ , К <sup>-1</sup>	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$C$ , кДж/(кг·К)
08X18H10T	196	81	0,21	275	610	7900	16.4	15	461
Ст09Г2С	203	78	0,3	285	450	7890	11.5	80	461
Шов	201	79	0,21	275	560	7890	12.2	76	461

Нормированные функции температуры  $f(T)/f(T_0)$ , которые задавались в расчетах, показаны на рис. 3, 4.

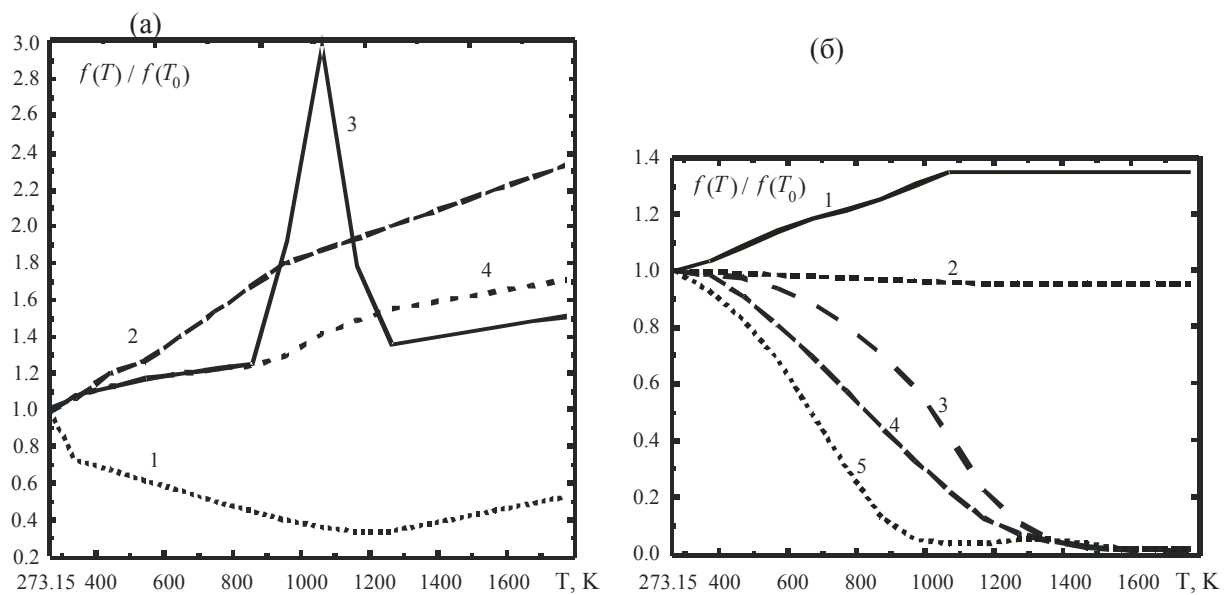


Рис. 3. Нормированные температурные зависимости: (а) теплопроводность стали 09Г2С и материала шва (1), теплопроводность стали 08Х18Н10Т (2), теплоемкость стали 09Г2С и материала шва (3), теплоемкость стали 08Х18Н10Т (4); (б) коэффициент температурного расширения (1), плотность (2), модуль сдвига (3), модуль Юнга (4), предел текучести стали 09Г2С (5)

Необходимо отметить, что для температур выше 1 000 К экспериментальная информация по характеристикам материалов практически отсутствует, поэтому использованные в расчетах оценки упругих модулей и предела текучести вблизи температуры плавления имеют характер качественных оценок, отражающих то, что материал при высокой температуре практически беспрепятственно течет при низком уровне напряжений.

Система вариационных уравнений, решение которых описывает изменение температуры материала с течением времени и эволюцию напряженно-деформированного состояния, имеет вид

$$\iiint_V (\lambda_{ij} d_{,j} T) \delta(d_{,j} T) dV^{(n)} + \iiint_V C_\varepsilon T \delta T dV^{(n)} - \iint_{S_G} n_i T \lambda_{ij} \delta(d_{,j} T) dS^{(n)} + \iint_{S_\alpha} \alpha_m (T - T_m) (T dt) dS^{(n)} = 0, \quad (1)$$

$$\iiint_V (\sigma_{ij}^E + \Delta^* \sigma_{ij}) \delta(\Delta^* e_{ij}) dV^{(n)} - \iiint_V (\bar{P}_i + \Delta \bar{P}_i) \delta(\Delta u^i) dV^{(n)} - \iint_{S_\sigma} (\bar{R}_i + \Delta \bar{R}_i) \delta(\Delta u^i) dS^{(n)} = 0. \quad (2)$$

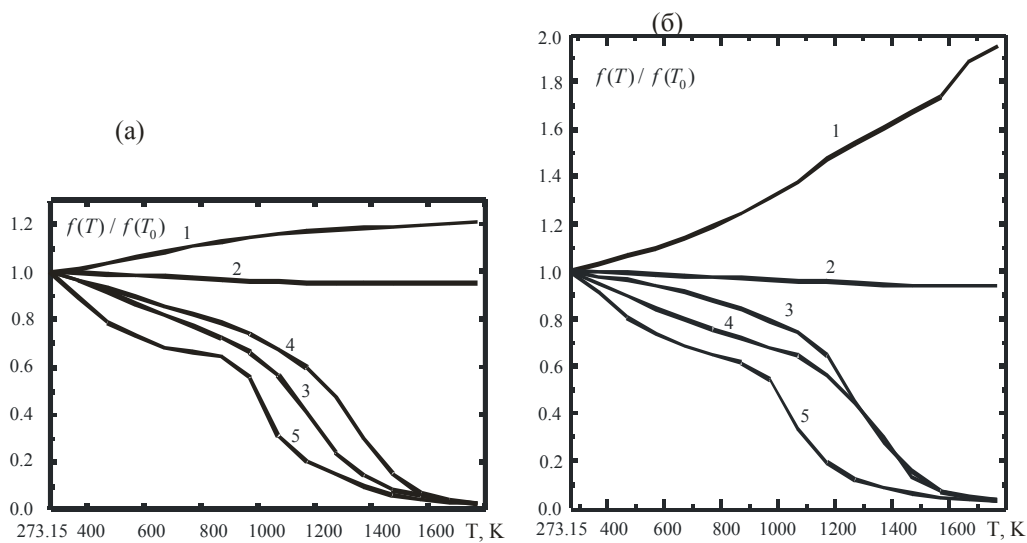


Рис. 4. Нормированные температурные зависимости: (а) коэффициент термического расширения (1), плотность (2), модуль сдвига (3), модуль Юнга (4), предел текучести (5) стали 08X18H10T; (б) – то же для материала шва

При записи уравнения (1) приняты следующие обозначения:  $\lambda_{ij}$  – тензор коэффициентов теплопроводности;  $T$  – абсолютная температура;  $d_{,j} = \partial / \partial X_j$  – оператор дифференцирования по лагранжевой переменной  $X_j$ ;  $\delta(d_{,j}T) = (d_{,j}T)dt$  – вариация градиента температуры;  $C_\varepsilon$  – теплоемкость единицы объема материала;  $\delta T = \dot{T}dt$  – вариация температуры (точкой сверху обозначена производная по времени);  $\alpha_m$  – коэффициент теплообмена на поверхности  $S_\alpha$ , ограничивающей объем  $V$  тела;  $T_m$  – температура окружающей среды. В вариационном уравнении (2)  $\bar{P}_i, \Delta \bar{P}_i, \bar{R}_i, \Delta \bar{R}_i$  – заданные объемные и поверхностные силы и их приращения на шаге по времени с номером ( $n$ );  $\Delta u^i, \delta(\Delta u^i)$  – приращения компонент вектора перемещений и их вариации;  $\Delta \sigma_{ij}^E + \Delta^* \sigma_{ij}$  – модифицированный тензор напряжений Кирхгофа;  $\Delta^* e_{ij}$  – тензор Грина (приращения деформаций).

Таким образом, для расчета нестационарных процессов формирования сварного соединения используется уравнение (1), выражающее вариационный принцип М. Био для нестационарных задач теплопроводности. Анализ квазистатических процессов деформирования сварного шва проводится на основе вариационного уравнения Лагранжа инкрементальной теории пластичности [Васидзу, 1987; Био, 1975; Новацкий, 1975; Новацкий, 1970].

На границах раздела материала с внешней средой (воздух) были заданы условия свободного теплообмена при значении  $\alpha_m = 50$  Вт/(м·К), что соответствует охлаждению поверхности при скоростях воздушного потока порядка 10 м/с.

Тензор приращений деформаций на каждом шаге по времени имеет вид

$$2 \cdot \Delta^* e_{ij} = \Delta u^i \cdot d_{,j} + \Delta u^j \cdot d_{,i} + (\Delta u^k \cdot d_{,i}) \cdot (\Delta u^k \cdot d_{,j}), \quad d_{,j} = \partial / \partial X_j, \quad (3)$$

где  $X_j$  – лагранжевы переменные ортогональной системы координат.

В качестве кинематических ограничений при решении уравнения (2) ставились условия

$$u_1 = 0, \quad X_1 = L_1 / 2, \quad X_2 = 0, \quad X_2 = L_2, \quad u_2 = 0, \quad X_2 = L_2 / 2, \quad (4)$$

где  $L_1, L_2$  – размеры тела вдоль осей  $X_1, X_2$  соответственно.

Такие условия соответствуют фиксации образца в двух точках и оси симметрии шва (указаны стрелками на рис. 1).

Граничные условия в напряжениях на боковой поверхности образца  $S_\sigma$  имеют вид

$$\sigma_{ij}^E n_j = \bar{R}_i = 0, S_\sigma : \{X_1 = 0, X_1 = L_1, X_2 = 0, X_2 = L_2\}. \quad (5)$$

Такие же условия задавались на границах областей 3–7, контактирующих с внешней средой, до тех пор, пока соседняя область не заполнена следующим слоем расплава. На всех внутренних границах раздела ставились условия идеального кинематического контакта (равенство перемещений).

На каждом шаге по времени использовались линеаризованные соотношения связи приращений напряжений и деформаций

$$\Delta^* \sigma_{ij} = C_{ijkl}^* \Delta^* e_{kl} - \beta_{ij}^* \Delta T, \quad (6)$$

где  $\Delta T$  – изменение температуры за время  $\Delta t$  (шаг по времени при решении уравнения теплопроводности (1)),  $C_{ijkl}^*$  – тензор касательных модулей,  $\beta_{ij}^*$  – соответствующий тензор температурных напряжений.

Формулы для расчета касательных модулей  $C_{ijkl}^*$ ,  $\beta_{ij}^*$  имеют вид

$$C_{ijpq}^* = C_{ijpq}^T - \alpha^* \cdot \frac{\left( \frac{\partial f(\sigma_{rs}, T)}{\partial \sigma_{ij}} \cdot C_{ijpq}^T \right) \cdot \left( \frac{\partial f(\sigma_{rs}, T)}{\partial \sigma_{pq}} \cdot C_{ijpq}^T \right)}{H + \left( \frac{\partial f(\sigma_{rs}, T)}{\partial \sigma_{ij}} \cdot C_{ijpq}^T \cdot \frac{\partial f(\sigma_{rs}, T)}{\partial \sigma_{pq}} \right)}, \beta_{pq}^* = \alpha_{ij} C_{ijpq}^*, \quad (7)$$

$$\alpha^* = \begin{cases} 0, (f(\sigma_{ij}, T) < 0) \wedge \left( (f(\sigma_{ij}, T) = 0) \vee \left( \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \cdot \Delta^* \sigma_{ij} < 0 \right) \right), \\ 1, (f(\sigma_{ij}, T) > 0) \wedge \left( (f(\sigma_{ij}, T) = 0) \vee \left( \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \cdot \Delta^* \sigma_{ij} \geq 0 \right) \right), \end{cases}$$

где  $C_{ijpq}^T, \alpha_{ij}$  – тензоры изотермических упругих постоянных и коэффициентов температурного расширения, а  $f(\sigma_{ij}, T)$  – функция текучести.

Функция упрочнения  $H$  определяется формулой

$$H = 24(I_1^0 - \sigma_{kk})ap \left[ \frac{1}{3} \frac{I_1^0}{a} \right] F^2(T). \quad (8)$$

В расчетах использовалось условие текучести вида

$$f(\sigma_{ij}, T) = s_{ij} s_{ij} - 2p(I_1^0 - \sigma_{kk})F(T) = 0, p = \text{const}, \quad (9)$$

где  $s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \cdot \sigma_{kk} / 3$  – девиатор напряжений;  $p, I_1^0, a$  – параметры модели.

Параметры модели определялись по справочным данным для пределов текучести  $\sigma_{02}$  и временного сопротивления  $\sigma_B$  при одноосном растяжении. Расчет этих параметров осуществлялся по формулам

$$I_1^0 = \sqrt{(\sigma_B^2 - \sigma_{02}^2) / \varepsilon^D}, p = \frac{\sigma_{02}^2}{3I_1^0}, a = \sqrt{\frac{I_1^0}{3\varepsilon^D}}, F(T) = f_B^2(T), \quad (10)$$

где  $f_B(T) = f_{02}(T)$  – нормированная функция, которая показывает, во сколько раз изменяется предел текучести при температуре  $T$  по сравнению с его значением при температуре  $T = 273,15$  К,  $\varepsilon^D$  – параметр модели, который в расчетах задавался равным  $\varepsilon^D = 0,05$ .

Упругопластическая модель среды (8)–(10) представляет собой упрощенный вариант модели Драгона–Мруза [Драгон, Мруз, 1983], в уравнениях которой отброшены слагаемые, описывающие деформационное упрочнение, но учтен рост пределов текучести с падением температуры.

Замена непрерывных функций и производных в системе уравнений (1), (2) их конечно-разностными аналогами сводит задачу к решению системы алгебраических уравнений относительно значений температуры  $T_q^{(n+1)}$  и перемещений  $\Delta u_q^k$  в узлах сетки на каждом шаге  $\Delta t$  по времени:

$$\left\{ \left[ \left( T_q^{(n+1)} \Delta_{,iq} \right) \lambda_{ij} \left( \Delta_{,jp} \right) \right] + C_\varepsilon T_p^{(n+1)} / (4\Delta t) \right\} \Delta V_p^{(n)} - \left\{ C_\varepsilon T_p^{(n)} / (4\Delta t) \right\} \Delta V_p^{(n)} - n_i \left( \lambda_{ij} \bar{G}_{,j} \right)_p \Delta S_p^{(n)} + \alpha_m \left( T_p^{(n+1)} - T_m^{(n+1)} \right)_p \Delta S_p^{(n)} = 0, \tag{11}$$

$$\left\{ \Delta u_q^k \cdot \left( \frac{1}{2} \delta_{klq}^k \right) \cdot C_{ijkl}^* \cdot \left( \frac{1}{2} \tilde{\delta}_{ijp}^\beta \right) + \left( \sigma_{ij}^E - \beta_{ij}^* \Delta T \right) \cdot \left( \frac{1}{2} \tilde{\delta}_{ijp}^\beta \right) \right\} \Delta V_p^{(n)} - \left( \bar{P}_p^\beta + \Delta \bar{P}_p^\beta \right) \cdot \Delta V_p^{(n)} - \left( \bar{R}_p^\beta + \Delta \bar{R}_p^\beta \right) \cdot \Delta S_p^{(n)} = 0, \tag{12}$$

где  $\Delta_{,iq}$  – конечно-разностные операторы для вычисления пространственных производных от температуры в ячейках сетки;  $T_q^{(n)}$  – узловые температуры с предыдущего временного шага;  $\Delta u_q^k$  – приращения компонент вектора перемещений;  $p$  – номер ячейки сетки;  $q$  – номер вершины в ячейке;  $\delta_{klp}^k, \tilde{\delta}_{ijp}^\beta$  – конечно-разностные операторы для вычисления компонент тензоров деформаций и их вариаций;  $\Delta V_p^{(n)}, \Delta S_p^{(n)}$  – площадь и длина сторон контура ячейки на очередном шаге.

Производная температуры по времени аппроксимировалась соотношением

$$\left( \frac{dT}{dt} \right)_q = \frac{T_q^{(n+1)} - T_q^{(n)}}{\Delta t}. \tag{13}$$

При выборе шага по времени было использовано условие устойчивости явных разностных схем для задач теплопроводности:

$$\Delta t = \left( \min(\Delta X_1, \Delta X_2) \right)^2 / \max(\lambda_{ij} / C_\varepsilon), \tag{14}$$

где  $\Delta X_1, \Delta X_2$  – величины шага по пространственным переменным.

В силу безусловной устойчивости вариационно-разностной схемы вида (11) для решения задачи теплопроводности зачастую вполне приемлемо десятикратное увеличение шага по сравнению с величиной, определенной формулой (14), что позволяет ускорить расчеты.

Система вариационно-разностных уравнений (11), (12) на каждом шаге по времени решалась методом исключения Гаусса.

Другие детали перехода от непрерывной модели (1), (2) к системе вариационно-разностных уравнений (11), (12) описаны в работах [Черепанов, 2003; Черепанов, Черепанов, Никанкин, 2009]. Одной из особенностей предлагаемого метода расчета является использование сетки с треугольными ячейками, которая показана на рис. 5. Применение треугольных сеток позволяет, в частности, повысить точность описания границ раздела структурных элементов по сравнению с прямоугольными сетками. Расчеты проводились на сетке с шагом  $\Delta X_1 = \Delta X_2 = 1/3$  мм.

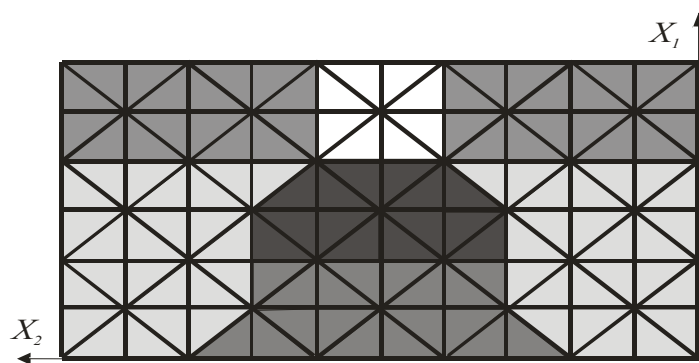


Рис. 5. Пример расчетной сетки и схема учета различий физико-механических характеристик структурных элементов

Каждый элемент внутренней структуры материала характеризуется индивидуальным набором физико-механических характеристик и их температурных зависимостей. В качестве схематичного примера на рис. 5 такие разнородные элементы структуры сварного шва выделены оттенками серого цвета, интенсивность которого является отличительным признаком элемента. Этот признак используется не только для идентификации пространственного положения структурного элемента, но и для определения момента времени его формирования. Такой подход позволяет построить алгоритм расчета тела переменной геометрии, который требуется для моделирования процесса последовательного заполнения шва при многопроходной сварке.

В начальный момент времени форма образца определяется только областями 1, 2, 3 (рис. 1), которые заполнены основным металлом и расплавом. На границах этой области ставятся условия в напряжениях вида (5), т. е. нормальные напряжения равны нулю на всех внешних поверхностях, включая контур первоначальной разделки. Вполне правомерно допущение, что в момент нанесения каждого следующего слоя напряжения внутри расплава электродного металла и на его свободной поверхности также равны нулю, что обеспечивает выполнение условий неразрывности напряжений на границах уже сформированной части соединения и этого нового слоя. Целесообразно отметить, что в уравнения модели (1)–(12) входят модифицированные тензоры напряжений Кирхгофа и модифицированный тензор Грина, поэтому лагранжевы координаты узлов сетки пересчитываются на каждом шаге в соответствии с соотношениями инкрементальной теории пластичности. В результате каждый новый слой расплава естественным образом «попадает» в деформированные ячейки сетки, что снимает проблему кинематического совмещения узлов уже сформированной части шва и нового слоя.

## Обсуждение результатов моделирования напряженно-деформированного состояния шва при многопроходной сварке

Особенности эволюции напряженно-деформированного состояния при многопроходной сварке связаны с тем, что при формировании шва материал соединения испытывает несколько циклов термического воздействия. Охлаждение расплава в области 3 (см. рис. 1, 2) и медленный прогрев соседних областей сменяются быстрым притоком тепла в момент нанесения следующего слоя. Послойное заполнение шва создает во всей области повторные циклы нагрева–охлаждения сварного соединения с принятой в расчетах периодичностью в 4с. Распределение температуры для моментов времени, непосредственно после формирования второго и следующих слоев шва, показаны на рис. 6. Характерно, что теплообмен с окружающим воздухом на первых секундах процесса практически не дает вклада в картину распределения температуры: основное значение имеет внутренний теплообмен и относительно высокая теплопроводность металла.

В результате интенсивного нагрева в окрестности остывающего расплава быстро развиваются и достигают предела текучести напряжения сдвига  $S_2 = \sqrt{3/2s_{ij}s_{ij}}$ , распределение кото-



рых для момента времени  $t = 3.98$  с, предшествующего формированию второго слоя шва, показаны на рис. 7.

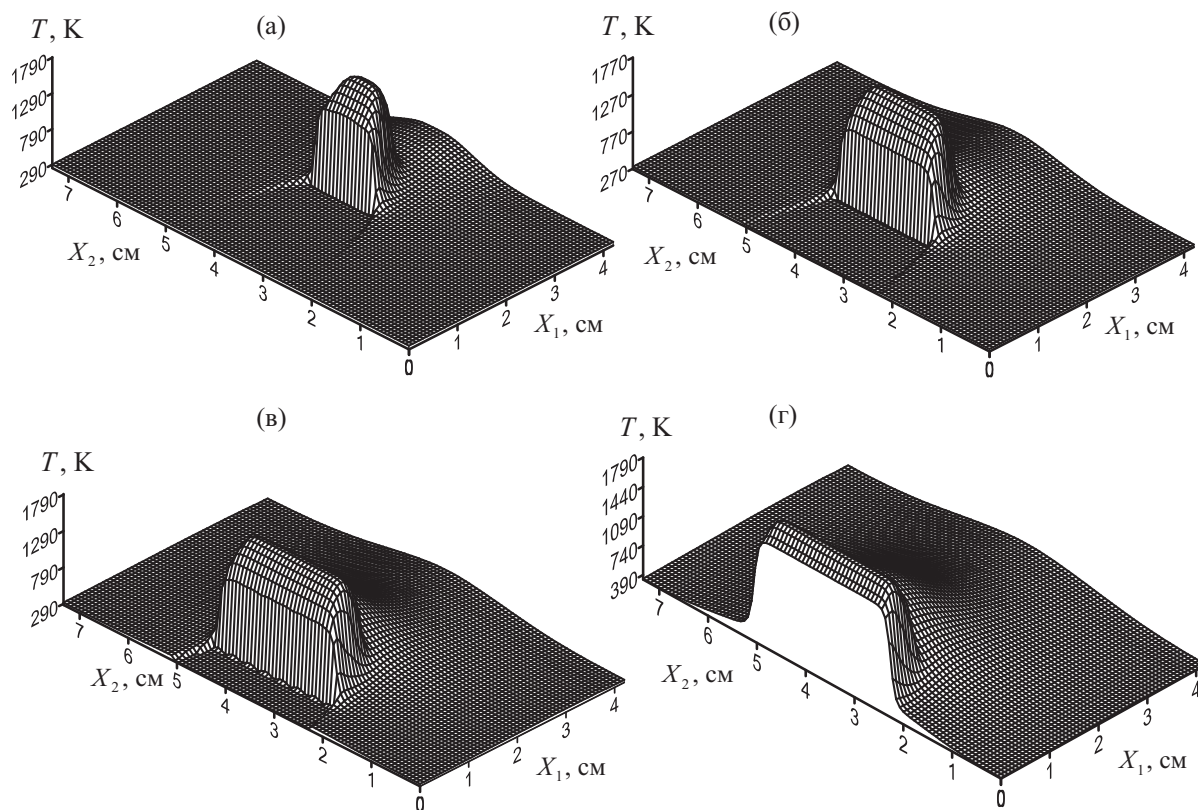


Рис. 6. Температура соединения в моменты заполнения слоев шва при  $t = 4,02$  с (а),  $t = 8,02$  с (б),  $t = 12,02$  с (в),  $t = 16,02$  с (г)

Следует отметить, с самого начала процесса значительные напряжения сдвига и их градиенты возникают на границе материала с покрытием по обе стороны шва. Это хорошо видно на рис. 7а, 7б. Обращает на себя внимание то, что наибольшие напряжения локализируются по границе практически правильной расширяющейся окружности, образуя круговые структуры. Свой вклад в специфику картины термических напряжений вносят плоскости максимальных касательных напряжений, ориентированные под углом  $45^\circ$  к продольной оси образца.

Формирование второго слоя шва и связанный с ним новый цикл нагрева–охлаждения приводит к тому, что на существующее поле напряжений накладывается новое, подобное первому, но более крупное по масштабу в силу больших размеров следующего слоя. Распределение напряжений для момента времени  $t = 7,98$  с показано на рис. 8. К этому моменту времени падение температуры первого слоя шва превысило  $1\,000$  К, напряжения в нем почти всюду вышли на предел текучести, соответствующий установившейся температуре. Теперь историю деформирования первого слоя шва и его окрестностей повторяет второй слой.

Наложение поля напряжений от второго слоя шва на уже существующие напряжения в свариваемом образце создает подобие интерференционной картины, которая хорошо видна на карте изолиний (см. рис. 8б). При этом продолжается рост опасных напряжений на границе с покрытием по обе стороны шва. На рис. 8а видно, как усиливающийся прогрев ранее холодного материала ведет к тому, что расширяется область упругих напряжений, постепенно охватывая весь модельный образец.

Формирование следующих слоев шва, которое в рассматриваемом примере заканчивается на 17 секунде, приводит к аналогичным изменениям напряженно-деформированного состояния. С течением времени температура образца постепенно выравнивается. К моменту времени

$t = 40,0$  с распределение температуры в образце близко к равномерному с максимумом 616 К. С этого момента поля напряжений изменяются относительно слабо, так как идет медленный процесс охлаждения за счет теплообмена с внешней средой.

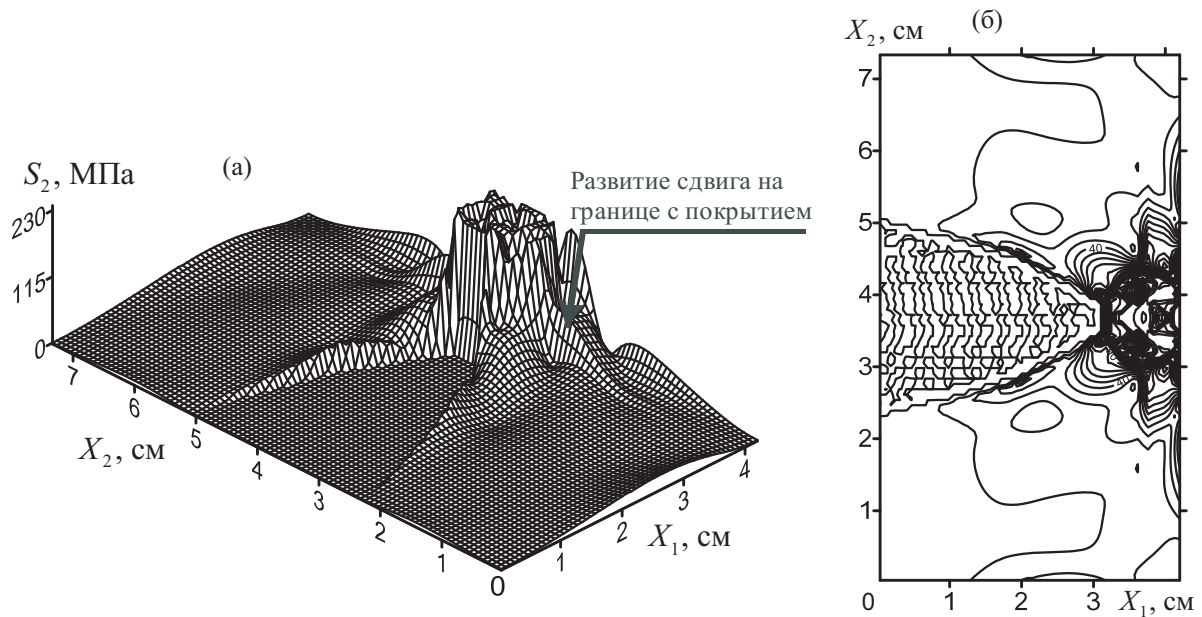


Рис. 7. Интенсивность (а) и карта изолиний (б) напряжений сдвига в момент времени  $t = 3,98$  с

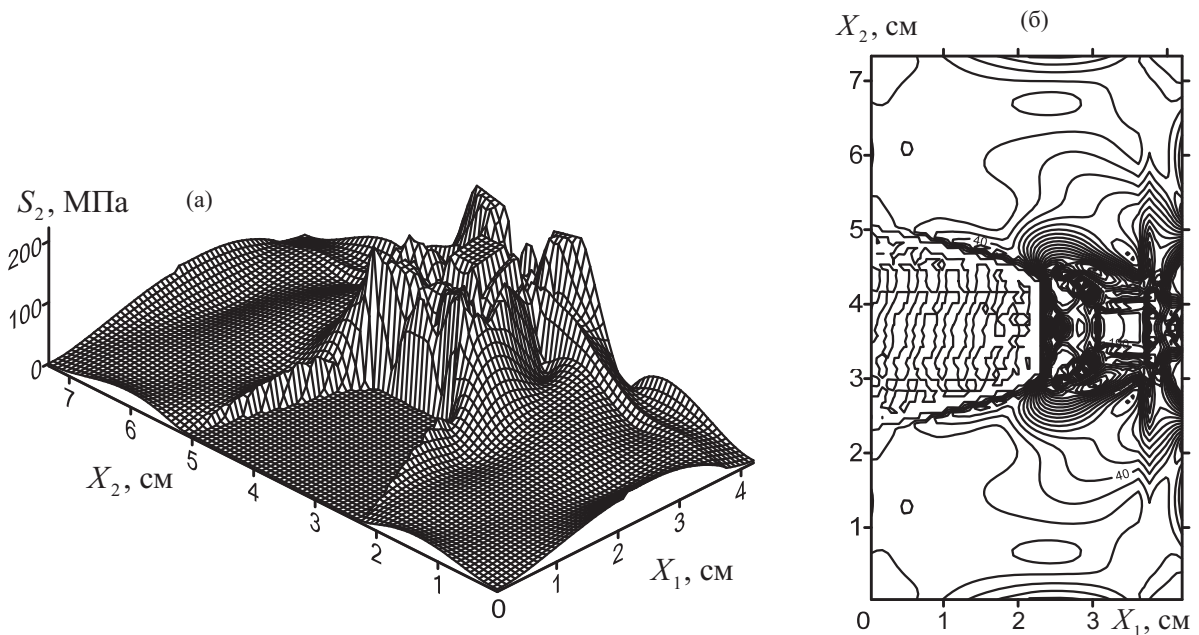


Рис. 8. Распределение (а) и карта изолиний (б) интенсивности напряжений сдвига в момент времени  $t = 7,98$  с

Распределение напряжений в сформированном сварном соединении при  $t = 40,0$  с показано на рис. 9. Видно, что многопроходный процесс сварки привел к выраженной неравномерности распределения напряжений и их концентрации по границам слоев шва. Полосы, где напряжения достигают предела текучести, сменяются областями упругих деформаций. Такой характер распределения остаточных напряжений позволяет говорить о том, что их можно рассматривать как относительно самостоятельный структурообразующий фактор, который будет сказываться на

эффектах локализации деформаций и концентрации напряжений при последующих эксплуатационных нагрузках конструкций со сварными швами.

Полученные результаты согласуются с основными положениями мезомеханики поверхностных слоёв и внутренних границ раздела [Панин, Фомин, Титов, 2003]. В работе [Панин, Фомин, Титов, 2003] отмечается, в частности, особая роль границ раздела между сварным швом, зоной термического влияния и основным металлом. Выполненные модельные расчеты эволюции напряженно-деформированного состояния в процессе многопроходной сварки показывают, что довольно существенное влияние на эффекты концентрации напряжений оказывают также границы раздела внутри шва, возникающие в результате его послойного заполнения расплавом. В процессе затвердевания материала шва на всех внутренних границах – в зоне контакта основного материала и плакирующего слоя, по границе разделки между основным материалом и материалом сварного шва, по границам сплавления внутри самого шва – имеет место концентрация напряжений, обусловленная неоднородным распределением теплофизических и физико-механических свойств, а также их температурными зависимостями.

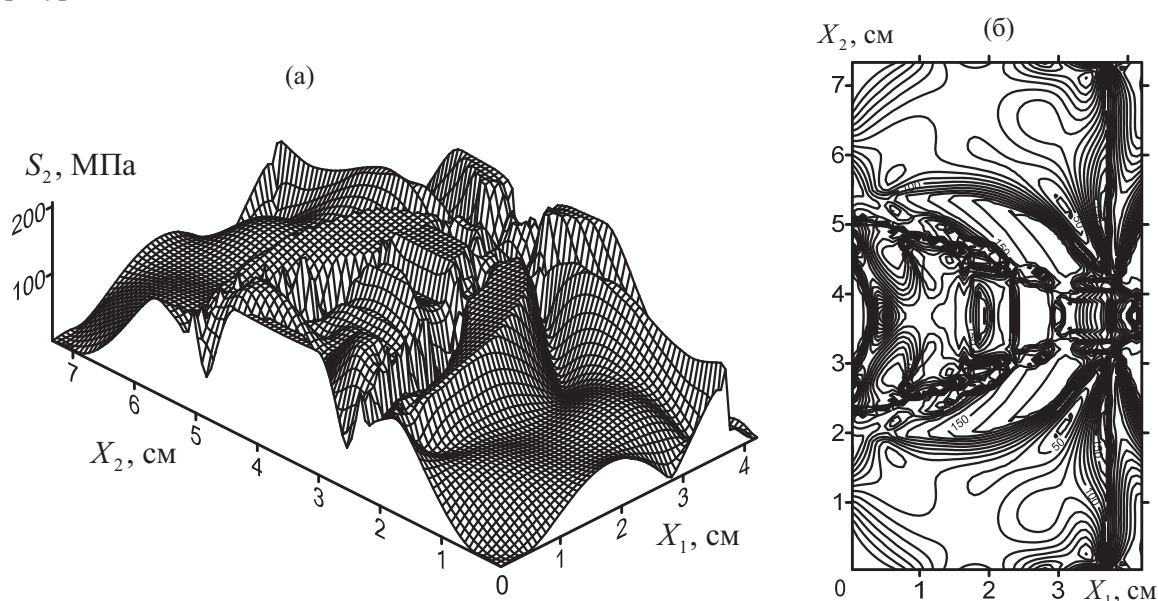


Рис. 9. Картина распределения (а) и изолинии (б) интенсивности напряжений в сформированном шве в момент времени  $t = 40,0$  с

## Заключение

Предложен алгоритм численного решения двумерных задач теплопроводности и термопластичности для тел переменной геометрии применительно к процессам многопроходной сварки плавлением разнородных материалов.

Показано, что неоднородность материала сварного соединения и нестационарность температурных полей порождают сложную картину концентрации остаточных напряжений и локализации деформаций, которые можно рассматривать как относительно самостоятельный структурообразующий фактор, определяющий прочность сварного соединения. Включение остаточных напряжений в число структурообразующих факторов влечет довольно существенные последствия для развития подходов к моделированию процессов деформации структурно-неоднородных материалов. С одной стороны, это позволяет свести многие задачи мезомеханики к теоретически хорошо изученным проблемам расчета тел с начальными напряжениями. Однако корректный учет начальных напряжений вновь ставит проблему анализа условий создания материала, его предыстории. Разработанная методика расчета остаточных термических напряжений при многопроходной сварке плавлением позволяет решать такие задачи для сварных соединений.

## Список литературы

- Антикайн П. А.* Краткий справочник по металлам для оборудования и трубопроводов ТЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 168 с.
- Био М.* Вариационные принципы в теории теплообмена. – М.: Энергия, 1975. – 209 с.
- Васидзу К.* Вариационные методы в теории упругости и пластичности. – М.: Мир, 1987. – 542 с.
- Гост 16098-80. Соединения сварные из двухслойной коррозионно-стойкой стали. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. – М.: Госстандарт России. – 89 с.
- Григорьев И. С., Мейлихов В. З.* Физические величины. Справочник / Под ред. И. С. Григорьева, В. З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
- Драгон А., Мруз З.* Континуальная модель пластически-хрупкого поведения скальных пород и бетона // Механика деформируемых твердых тел. Направления развития. – М.: Мир, 1983. – С. 163–188.
- Зубченко А. С.* Марочник сталей и сплавов. Справочник / Под общ. ред. А. С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2011. – 784 с.
- Кректулева Р. А.* Компьютерное моделирование и анализ теплофизических процессов при сварке неплавящимся электродом с использованием теплоотводящих покрытий // Сварка и диагностика. – 2011. – № 4. – С. 45–51.
- Люшкин Б. А., Герасимов А. В., Кректулева Р. А., Люшкин П. А.* Моделирование физико-механических процессов в неоднородных конструкциях. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. – 272 с.
- Новацкий В.* Динамические задачи термоупругости. – М.: Мир, 1970. – 256 с.
- Новацкий В.* Теория упругости. – М.: Мир, 1975. – 872 с.
- Новикова С. И.* Тепловое расширение твердых тел. – М.: Наука, 1974. – 294 с.
- Панин В. Е., Фомин В. М., Титов В. М.* Физические принципы мезомеханики поверхностных слоев и внутренних границ раздела в деформируемом твердом теле // Физическая мезомеханика. – 2003. – Т. 6, № 2. – С. 5–14.
- Сорокин В. Г.* Марочник сталей и сплавов. Справочник / Под общ. ред. В. Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
- Черепанов О. И.* Численное решение некоторых квазистатических задач мезомеханики. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. – 190 с.
- Черепанов О. И., Черепанов Р. О., Никанкин А. А.* Трехмерная математическая модель механического поведения тонкостенных конструкций двойкой кривизны при квазистатических нагрузках // Доклады ТУСУР. – 2009. – № 2(20). – С. 115–121.