

УДК 51.74, 539.3, 621.9.011

Численное моделирование термомеханических процессов в зоне сварного шва плакированных сталей на стадии остывания

Р.А. Крекулева, О.И. Черепанов¹, Р.О. Черепанов²

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, 634050, Россия

¹Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, 634050, Россия²Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, 634050, Россия

Методами численного моделирования выполнено исследование процессов эволюции напряженно-деформированного состояния в сварном соединении двухслойной плакированной стали при охлаждении сварного шва в условиях свободного теплообмена с окружающей средой. Рассмотрен случай плоского напряженного состояния. Математическая модель квазистатического процесса деформирования сварного шва построена на основе вариационных уравнений термопластичности. Для расчета нестационарных тепловых полей использовался вариационный принцип Био. Полученные численные решения для стадии завершения охлаждения качественно согласуются с известными экспериментальными данными.

Ключевые слова: сварной шов, покрытие, термопластичность, теплопроводность

Numerical simulation of thermomechanical processes in the weld zone of cooling clad steels

R.A. Krekuleva, O.I. Cherepanov¹ and R.O. Cherepanov²

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050, Russia

¹Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, 634050, Russia²National Research Tomsk State University, Tomsk, 634050, Russia

Numerical simulation was performed to study the evolution of the stress-strain state in a welded joint of double-layer clad steel at the stage of weld cooling in free heat exchange with the surroundings. The case under consideration was the plane stress state. The used mathematical model of quasistatic deformation of the weld was based on variational equations of thermoplasticity. The transient thermal fields were calculated using the Biot principle. The numerical solutions derived for completion of cooling agree qualitatively with available experimental data.

Keywords: welded joint, coating, thermoplasticity, heat conductivity

1. Введение

Двухслойные (плакированные) стали являются перспективными композиционными материалами благодаря высокой прочности, износостойкости, коррозионной, жаро- и хладостойкости, относительно невысокой стоимости. Поскольку большинство изделий подвергается воздействию различных неблагоприятных факторов с поверхности, то применение двухслойных сталей позволяет обеспечить материалу нужные поверхностные свойства и в то же время снизить расход дорогостоящих высоколегированных сталей, сохраняя требуемую работоспособность конструкций. Вместе с тем, создание надежных сварных соединений плакированных сталей

является сложной технологической задачей. Исследование процессов, влияющих на качество сварного шва и прочности покрытия, представляет интерес для специалистов разного профиля. Основными методами исследования этих процессов является высокоскоростная киносъемка поверхностных явлений, исследование внутренней структуры материала и оценка прочностных свойств уже готового сварного соединения. Для изучения процессов в объеме материала одним из наиболее эффективных способов получения нужной информации является численное моделирование. Такой подход позволяет исследовать связь прочностных характеристик сварных соединений с наличием в них концентраторов

напряжений и процессов локализации деформаций. Решение этой задачи чисто экспериментальными методами не всегда оказывается успешным.

Численному моделированию деформации материалов с покрытием при термомеханических воздействиях и решению теплофизических задач применительно к сварочным процессам посвящено значительное количество работ, в частности [1–8]. В данной работе предложена методика численного исследования квазистатических процессов концентрации напряжений и локализации деформаций в сформированном сварном соединении при охлаждении. На основе численных расчетов сделан качественный анализ возможных сценариев проявления мезоструктурных эффектов и характерных особенностей неоднородного распределения напряжений и деформаций при охлаждении сварного шва.

Расчеты проведены для сварного соединения (сталь 09Г2С+08Х18Н10Т) с плакирующим слоем. Исследуемый образец является подобием реального сварного соединения, экспериментальные исследования которого проведены в работе [9].

2. Физическая постановка задачи

Рассматривается сварное соединение с двухсторонней X-образной разделкой (рис. 1). Материал основы — сталь 09Г2С ферритоперлитного класса, плакирующий слой — сталь 08Х18Н10Т аустенитного класса. Расчеты выполнялись для образца с металлом основы толщиной $L_1^1 = 37$ мм, на который нанесен плакирующий слой толщиной $L_1^2 = 5$ мм, длиной $L_2 = 73$ мм. В эксперименте [9] заполнение разделки осуществлялось за 22 прохода.

Учитывая довольно высокие характерные скорости процесса сварки [9], высокие температуры плавления, и относительно медленные процессы теплопередачи,

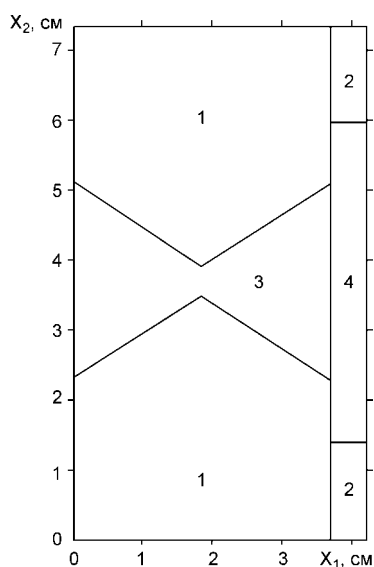


Рис. 1. Схема сварного соединения: материал основы (1), плакирующий слой (2), сварной шов основы (3), сварной шов плакирующего слоя (4)

Таблица 1
Теплопроводность и теплоемкость стали 09Г2С и плакирующего слоя, коэффициент теплоотдачи α при охлаждении в воздухе

T, К	09Г2С		08Х18Н10Е		α_0 , Вт/(м ² ·К)
	λ , Вт/(м·К)	C, кДж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	C, кДж/(кг·К)	
293.15	80	461	15	461	10
373.15	58	494	16	494	10
473.15	54	515	18	515	10
573.15	49	536	19	536	10
673.15	45	549	21	549	10
773.15	40	561	23	561	10
873.15	36	574	25	570	10
973.15	32	595	27	595	10
1073.15	29	–	26	–	10
1173.15	27	–	–	–	10

при расчетах процесса охлаждения и эволюции напряженно-деформированного состояния в первом приближении можно принять, что в момент завершения процесса создания сварного шва существенные напряжения в материале шва еще не успевают развиваться. На этом основании для моделирования было принято, что в начальный момент времени в исходном состоянии напряжения и деформации в материале шва отсутствуют. Они начинают развиваться в процессе затвердевания. Для расчета температурных полей в качестве первого приближения было задано начальное распределение с максимальной температурой 1 523 К в центре поперечного сечения шва.

Теплофизические и механические характеристики материалов основы и плакирующего слоя (табл. 1–3) были взяты из справочников [10–14]. Недостающие значения характеристик для более высоких температур рассчитывались путем линейной экстраполяции. Свойства сварного шва основы, зависящие от соответствующего состава электродного материала, определялись расчетным путем, как для материалов с не взаимодействующими фазами [15, 16]. Свойства сварного шва плакирующего слоя, определенные аналогичным способом, оказались практически такими же, как и свойства стали 08Х18Н10Т.

Таблица 2
Механические характеристики стали 09Г2С

T, К	E, ГПа	G, ГПа	ν	$\sigma_{0.2}$, МПа	σ_B , Па	ρ , кг/м ³	$\alpha \cdot 10^{-6}$, К ⁻¹
293.15	203	78	0.3	285	450	7890	11.5
373.15	207	77	–	–	–	7870	11.9
473.15	182	76	–	225	–	7830	12.5
573.15	153	73	–	195	–	7780	13.1
673.15	141	69	–	155	–	7740	13.6
773.15	–	68	–	–	–	7700	14.0
873.15	–	59	–	–	–	–	14.4
973.15	–	–	–	–	–	7610	15.0

Таблица 3
Механические характеристики стали 08X18H10E

T, K	$E, ГПа$	$G, ГПа$	ν	$\sigma_{0,2}, МПа$	$\sigma_B, Па$	$\rho, кг/м^3$	$\alpha \cdot 10^{-6}, K^{-1}$
293.15	196	81	0.21	275	610	7900	16.4
373.15	189	74	–	250	–	7870	16.6
473.15	182	71	–	215	–	7830	17.0
573.15	175	67	–	200	450	7780	17.4
673.15	167	63	–	175	440	7740	17.8
773.15	160	59	–	175	–	7700	18.2
873.15	153	57	–	175	390	7650	18.5
973.15	143	54	–	160	270	7610	18.8
1023.15	139	51	–	–	–	–	–
1073.15	135	49	–	–	–	7580	19.0

3. Математическая постановка задачи и метод расчета

Для численного моделирования квазистатических процессов деформирования сварного шва использован вариационно-разностный метод, который основан на вариационном уравнении Лагранжа инкрементальной теории пластичности [17]. При расчете нестационарных процессов охлаждения материала шва использовались уравнения, выражающие вариационный принцип Био [18–20] для задач теплопроводности.

Вариационное уравнение Лагранжа для задач инкрементальной теории пластичности имеет вид:

$$\begin{aligned} & \iiint_V (\sigma_{ij}^E + \Delta^* \sigma_{ij}) \delta(\Delta^* e_{ij}) dV^{(n)} - \\ & - \iiint_V (\bar{P}_i + \Delta \bar{P}_i) \delta(\Delta u^i) dV^{(n)} - \\ & - \iint_{S_\sigma} (\bar{R}_i + \Delta \bar{R}_i) \delta(\Delta u^i) dS^{(n)} = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\bar{P}_i, \Delta \bar{P}_i, \bar{R}_i, \Delta \bar{R}_i$ — заданные объемные и поверхностные силы и их приращения на очередном шаге с номером (n) по нагрузке; $\Delta u^i, \delta(\Delta u^i)$ — приращения компонент вектора перемещений и их вариации; $\Delta \sigma_{ij}^E + \Delta^* \sigma_{ij}$ — модифицированный тензор напряжений Кирхгофа.

В качестве меры приращения деформаций на каждом шаге нагружения используется модифицированный тензор деформаций Грина

$$\begin{aligned} 2\Delta^* e_{ij} &= \Delta u^i d_{,j} + \Delta u^j d_{,i} + \\ &+ (\Delta u^k d_{,i})(\Delta u^k d_{,j}), \quad d_{,j} = d/dX_j, \end{aligned} \quad (2)$$

где X_j — лагранжевы переменные ортогональной системы координат.

В качестве кинематических ограничений ставились условия

$$\begin{aligned} u_2 &= 0, \quad X_2 = L_2/2, \\ u_1 &= 0, \quad X_1 = L_1^1/2, \end{aligned} \quad (3)$$

где L_1^1, L_2 — размеры тела (металл основы) вдоль соответствующих осей.

Первое из этих условий определяет естественную симметрию решения относительно середины шва, второе вносит незначительные искажения в решение на соответствующей оси, но условие такого типа в квазистатических задачах необходимо, чтобы исключить движение тела как жесткого целого.

На боковой поверхности S_σ в рассматриваемой задаче ставились условия в напряжениях следующего вида:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}^E n_j &= \bar{R}_i = 0, \\ S_\sigma : \{X_1 = 0, X_1 = L_1, X_2 = 0, X_2 = L_2\}. \end{aligned} \quad (4)$$

На каждом шаге нагружения использовались линеаризованные соотношения связи приращений напряжений и деформаций:

$$\Delta^* \sigma_{ij} = C_{ijkl}^* \Delta^* e_{kl} - \beta_{ij}^* \Delta T, \quad (5)$$

где ΔT — изменение температуры на очередном шаге по времени, найденное из решения задачи теплопроводности; C_{ijkl}^* — тензор касательных модулей; β_{ij}^* — соответствующий тензор температурных напряжений.

Тензоры C_{ijkl}^*, β_{ij}^* в уравнениях (5) рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} C_{ijpq}^* &= C_{ijpq}^T - \\ &- \alpha^* \frac{\left(\frac{\partial f(\sigma_{rs}, \beta, T)}{\partial \sigma_{ij}} C_{ijpq}^T \right) \left(\frac{\partial f(\sigma_{rs}, \beta, T)}{\partial \sigma_{pq}} C_{ijpq}^T \right)}{H + \left(\frac{\partial f(\sigma_{rs}, \beta, T)}{\partial \sigma_{ij}} C_{ijpq}^T \frac{\partial f(\sigma_{rs}, \beta, T)}{\partial \sigma_{pq}} \right)}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\beta_{pq}^* = \alpha_{ij} C_{ijpq}^*,$$

$$\alpha^* = \begin{cases} 0, & \text{если } f(\sigma_{ij}, \beta, T) < 0 \text{ или} \\ & f(\sigma_{ij}, \beta, T) = 0, \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \Delta^* \sigma_{ij} < 0; \\ 1, & \text{если } f(\sigma_{ij}, \beta, T) > 0 \text{ или} \\ & f(\sigma_{ij}, \beta, T) = 0, \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \Delta^* \sigma_{ij} \geq 0, \end{cases}$$

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

Функция упрочнения H определяется формулой:

$$\begin{aligned} H &= 24(I_1^0 - \sigma_{kk}) \alpha p(\beta) \times \\ &\times \left[\frac{1}{3} \frac{I_1^0}{a} (1 - \text{sign}(\sigma_{kk}) \delta) - \beta^2 \right] F^2(\gamma, T). \end{aligned} \quad (7)$$

Условие текучести имеет вид:

$$f(\sigma_{ij}, \beta, T) = s_{ij} s_{ij} - 2p(\beta)(I_1^0 - \sigma_{kk}) F(\gamma, T) = 0, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} p(\beta) &= p_0 - \text{sign}(\sigma_{kk}) p_1 + \\ &+ [(1 - \text{sign}(\sigma_{kk}) \delta)(2/3) I_1^0 / a] \beta - \beta^2, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\beta = a \epsilon_{kk}^{pl}, \quad \gamma = \frac{\epsilon_{kk}^{pl}}{\epsilon^D},$$

где $s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_{kk} / 3$ — девиатор напряжений; ε_{kk}^{pl} — объемная пластическая деформация; $p_0, p_1, \delta, I_1^0, a, \varepsilon^D$ — параметры модели.

Параметры модели определялись по справочным данным для пределов текучести σ_{02} при одноосном растяжении, σ_{02c} при сжатии, а также временных сопротивлений σ_B и σ_{Bc} — при растяжении и сжатии соответственно. В качестве правдоподобной оценки параметра пластического разрыхления $\varepsilon^D = (\rho^D - \rho_0) / \rho_0$ (ρ_0 — плотность недеформированного материала, ρ^D — плотность материала при достижении временного сопротивления течению) задавалось значение $\varepsilon^D = 0.02$, что обусловлено недостатком экспериментальных данных для рассматриваемых материалов и условий нагружения. Функция $F(\gamma, T)$ в условии (8) позволяет учесть эмпирические зависимости пределов текучести от температуры. Расчет параметров модели осуществлялся по формулам:

$$\begin{aligned} I_1^0 &= \sqrt{(\sigma_B^2 + \sigma_{Bc}^2 - \sigma_{02}^2 - \sigma_{02c}^2) / (2\varepsilon^D)}, \\ p_0 &= \frac{\sigma_{02c}^2 + \sigma_{02}^2}{6I_1^0}, \quad p_1 = \frac{\sigma_{02c}^2 - \sigma_{02}^2}{6I_1^0}, \\ \delta &= \frac{\sigma_{Bc}^2 - \sigma_B^2 + \sigma_{02}^2 - \sigma_{02c}^2}{\sigma_{Bc}^2 + \sigma_B^2 - \sigma_{02}^2 - \sigma_{02c}^2}, \\ a &= \sqrt{\frac{I_1^0}{3\varepsilon^D} [1 - \text{sign}(\sigma_{kk})\delta]}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} F(\gamma, T) &= \frac{1}{2} \gamma \left\{ f_B^2(T) + f_{Bc}^2(T) - \right. \\ &\quad \left. - \text{sign}(\sigma_{kk}) \left[f_{Bc}^2(T) - f_B^2(T) \right] \right\} + \\ &\quad + \frac{1}{2} (1 - \gamma) \left\{ f_{02}^2(T) + f_{02c}^2(T) - \right. \\ &\quad \left. - \text{sign}(\sigma_{kk}) \left[f_{02c}^2(T) - f_{02}^2(T) \right] \right\}, \quad 0 \leq \gamma \leq 1, \end{aligned}$$

где $f_B(T), f_{Bc}(T), f_{02}(T), f_{02c}(T)$ — нормированные функции, которые показывают, во сколько раз уменьшается (увеличивается) соответствующий предел текучести при температуре T по сравнению с его значением при температуре $T = 293.15$ К.

Функции $f_B(T), f_{Bc}(T), f_{02}(T), f_{02c}(T)$ задавались по имеющимся в справочной литературе данным о температурной зависимости параметров.

При температурах выше 1100 К в расчетах использовалась модель идеально упругопластического тела с соответствующими оценками предела текучести, что было сделано в силу следующих причин. При высоких температурах большинство материалов обладает относительно высокой пластичностью, и едва ли правомочно говорить о существенном упрочнении и накоплении микрповреждений, которые учитываются в модели

вида (8). Кроме того, это вынужденная мера, обусловленная недостатком экспериментальной информации о характеристиках материалов при более высоких температурах для расчета параметров модели.

При численном моделировании деформации сварного соединения каждый значимый элемент структуры и соответствующие ячейки конечно-разностной сетки наделяются своим набором физико-механических характеристик, а также отличаются от других элементов видом функций пластичности и температурных зависимостей параметров. На границах структурных элементов в расчетах задавались условия равенства перемещений.

Замена непрерывных функций и производных в уравнении (1) их конечно-разностными аналогами позволяет записать систему уравнений относительно неизвестных узловых перемещений Δu_q^k :

$$\begin{aligned} &\left\{ \Delta u_q^k \left(\frac{1}{2} \delta_{klq}^k \right) C_{ijkl}^* \left(\frac{1}{2} \delta_{ijp}^\beta \right) + \right. \\ &\quad \left. + (\sigma_{ij}^E - \beta_{ij}^* \Delta T) \left(\frac{1}{2} \delta_{ijp}^\beta \right) \right\} \Delta V_p^{(n)} - \\ &\quad - (\bar{P}_p^\beta + \Delta \bar{P}_p^\beta) \Delta V_p^{(n)} - (\bar{R}_p^\beta + \Delta \bar{R}_p^\beta) \Delta S_p^{(n)} = 0, \end{aligned} \quad (11)$$

где Δu_q^k — приращения компонент вектора перемещений; p — номер ячейки сетки; q — номер вершины в ячейке; $\delta_{klp}^k, \delta_{ijp}^\beta$ — конечно-разностные операторы для вычисления компонент тензоров деформаций и их вариаций; $\Delta V_p^{(n)}, \Delta S_p^{(n)}$ — площадь и длина контура ячейки на очередном шаге по нагрузке.

Детальное описание схемы перехода к вариационно-разностным уравнениям вида (11) на прямоугольных сетках приводится в [21]. Несколько более эффективный, но и более трудоемкий способ построения вариационно-разностных уравнений вида (6) для расчета напряженно-деформированного состояния рассмотрен в [22].

Основой алгоритма расчета нестационарного температурного поля при охлаждении сварного шва является уравнение, которое выражает вариационный принцип Био [18–20] для задач теплопроводности:

$$\begin{aligned} &\iiint_V (\lambda_{ij, j} T) \delta(d, j T) dV^{(n)} + \iiint_V C_\varepsilon T \delta T dV^{(n)} + \\ &\quad + \iiint_V T^2 \beta_{ij}^* \delta \varepsilon_{ij} dV^{(n)} - \iiint_V T \delta \bar{w} dV^{(n)} - \\ &\quad - \iint_{S_G} n_i T \lambda_{ij} \delta(d, j T) dS^{(n)} + \\ &\quad + \iint_{S_\alpha} \alpha (T - T_m) (T dt) dS^{(n)} = 0, \end{aligned} \quad (12)$$

где T — абсолютная температура; λ_{ij} — тензор коэффициентов теплопроводности; β_{ij}^* — тензор коэффициентов термических напряжений; $\delta(d, j T) = (d, j T) dt$ — вариация градиента температуры; $\delta \varepsilon_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij} dt = D_{ij} dt$

вариации компонент тензора деформаций (точкой сверху обозначена производная по времени); C_ϵ — теплоемкость единицы объема материала; $\delta T = \dot{T}dt$ — вариация температуры; $\delta \bar{w} = \dot{\bar{w}}dt$ — вариация мощности \bar{w} внутренних источников тепла; α — коэффициент теплообмена; T_m — температура окружающей среды.

Так как моделировался процесс охлаждения образца без дополнительных механических нагрузок, то влиянием слагаемых во второй строке уравнения (12) можно пренебречь и рассматривать несвязанную задачу теплопроводности. В рамках этих допущений и получены обсуждаемые далее результаты.

В вариационном уравнении (12) начальные и граничные условия учитываются в интегралах по объему и поверхности тела. На части поверхности S_T должно быть задано изменение температуры $\Delta T = \dot{T}dt$, на части поверхности S_G — градиент температуры $d_{,j}T = \bar{G}_j$. Граничные условия свободного теплообмена с окружающей средой задаются на части поверхности S_α .

Точно также, как и при решении вариационного уравнения Лагранжа, замена непрерывной неизвестной функции температуры и производных конечно-разностными аналогами приводит к системе уравнений относительно неизвестных значений температуры $T_q^{(n+1)}$ в узлах конечно-разностной сетки:

$$\begin{aligned} & \left\{ \left[(T_q^{(n+1)} \Delta_{,iq}) \lambda_{ij} (\Delta_{,jp}) \right] + \right. \\ & + C_\epsilon T_p^{(n+1)} / (4\Delta t) + T_p^{(n+1)} \beta_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} \left. \right\} \Delta V_p^{(n)} - \\ & - \left\{ C_\epsilon T_p^{(n)} / (4\Delta t) + w \right\} \Delta V_p^{(n)} - \\ & - n_i (\lambda_{ij} \bar{G}_{,j})_p \Delta S_p^{(n)} + \\ & + \alpha (T_p^{(n+1)} - T_m^{(n+1)})_p \Delta S_p^{(n)} = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь $T_q^{(n+1)}$ — неизвестные значения температуры в узлах на очередном шаге Δt по времени; $\Delta_{,iq}$ — конечно-разностные операторы для вычисления пространственных производных от температуры в ячейках сетки; $T_q^{(n)}$ — узловые температуры, найденные на предыдущем временном шаге или заданные начальными условиями для исходного состояния, а в остальном система обозначений та же, что и при записи уравнений (11).

Для производной по времени от температуры в произвольном узле сетки использовалась аппроксимация:

$$\left(\frac{dT}{dt} \right)_q = \frac{T_q^{(n+1)} - T_q^{(n)}}{\Delta t}. \quad (14)$$

Уравнения (11), (13) на каждом шаге по времени решались методом исключения Гаусса. Описанная схема расчета температурного поля относится к классу неявных, безусловно устойчивых разностных схем второго порядка точности по пространственным переменным и первого порядка по времени [23–25]. Достоинством метода является возможность проведения расчетов с относительно большим шагом по времени. В то же время требуется значительный объем памяти компьютера и большое число арифметических операций для решения системы (13) на каждом временном шаге. В качестве ориентировочной оценки целесообразно использовать оценку шага по времени для явных разностных схем:

$$\Delta t \equiv (\min(\Delta X_1, \Delta X_2))^2 / \max(\lambda_{ij} / C_\epsilon), \quad (15)$$

где $\Delta X_1, \Delta X_2$ — величины шага по соответствующей пространственной координате. Расчеты показывают, что при решении вариационной задачи теплопроводности зачастую вполне приемлемым оказывается десятикратное, а то и более, увеличение шага (в зависимости от характерных скоростей процесса) по сравнению с величиной, определенной формулой (15). Однако необходимо учитывать дополнительное ограничение, связанное с необходимостью соблюдения условия малости шага по характерному параметру нагружения при решении уравнений (11). Таким характерным параметром нагружения в рассматриваемой задаче является изменение температуры ΔT на произвольном шаге по времени. Поэтому величина Δt при решении задачи теплопроводности ограничивается еще и условием относительно малых изменений температуры на каждом шаге решения задачи термопластичности.

4. Обсуждение результатов моделирования

При моделировании квазистатического процесса деформирования в результате охлаждения сварного сое-

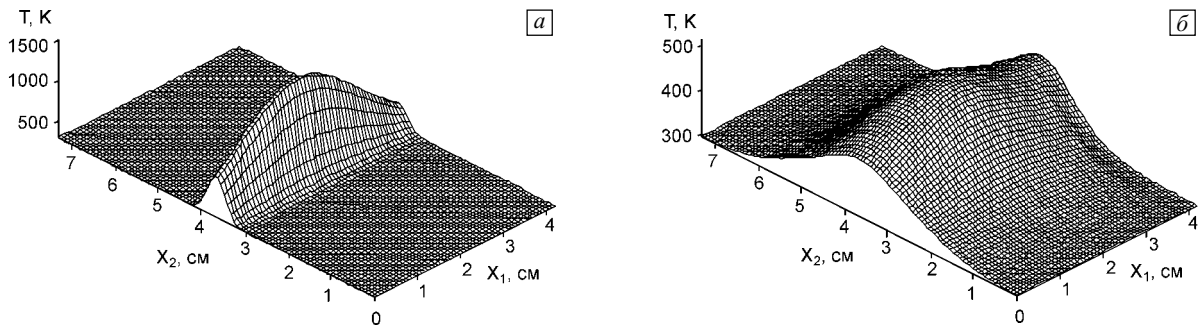


Рис. 2. Начальное поле температуры сварного соединения, $T_{\max} = 1523$ К (а) и распределение температуры в момент времени $t = 4.2$ с (б)

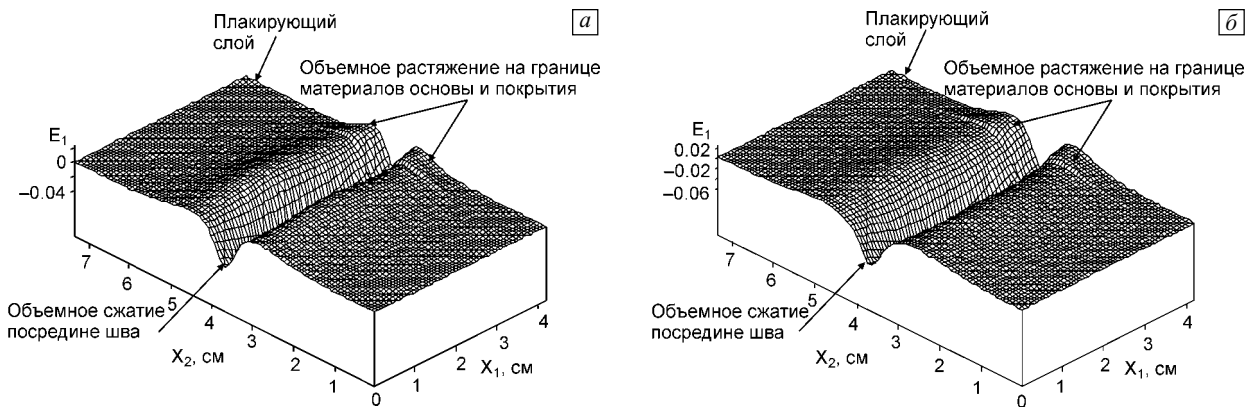


Рис. 3. Распределение объемной деформации в момент времени $t = 2.1$ (а) и 4.2 с (б)

динения (рис. 1) было принято, что в начальный момент времени деформации и напряжения в материале отсутствуют. В качестве кинематических ограничений ставились условия симметрии вида (3), исключающие движение тела как жесткого целого, внешние границы (см. формулы (4)) свободны от напряжений. Условие симметрии вносит небольшое дополнительное возмущение в решение, которое просматривается на приведенных далее рисунках, но не искажает принципиальной картины деформирования образца. Для задачи теплопроводности на границах были заданы условия свободного теплообмена в воздухе при коэффициенте теплообмена $\alpha_0 = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Начальное распределение температуры было принято в виде, показанном на рис. 2, а, с максимальной температурой $T_{\text{max}} = 1523 \text{ К}$ в центре разделки. Изменение температурного поля, обусловленное внутренним теплообменом и теплообменом с окружающей средой, ведет к постепенному падению максимума температуры в центре образца и прогреву соседних областей. К моменту времени $t = 4.2$ с температура в центре сварного шва падает до 511 К (рис. 2, б), так что основные процессы деформации близки к завершению. Для последующей интерпретации результатов расчета напряженно-деформированного состояния необходимо отметить, что в рассматриваемых условиях ос-

новное влияние на деформированное состояние на первоначальных этапах оказывает не теплообмен с внешней средой, а перераспределение тепла внутри образца. Однонаправленный процесс охлаждения идет только в центральной части шва, изначально нагретой до максимальной температуры, которая постепенно падает. В соседних, более холодных, областях сначала происходит прогревание, а затем и в них начинается падение температуры. Поэтому основная масса материала сварного соединения последовательно подвергается сначала нагреву, а затем охлаждению. Такой цикл нагрузки несколько отличным образом влияет на гидростатическое напряжение (давление) и напряжения сдвига (девиатор напряжений).

Следует отметить, что в зависимости от кинематических ограничений в условиях термических воздействий знаки гидростатического напряжения и деформации изменения объема могут не совпадать. В локальных областях материала при внешнем гидростатическом растягивающем напряжении $S_1 = \sigma_{kk}/3 > 0$ может происходить уменьшение объемной деформации $E_1 = \varepsilon_{kk} < 0$ и наоборот.

Распределение деформации объемного расширения-сжатия для моментов времени $t = 2.1$ и 4.2 с от момента начала охлаждения показано на рис. 3. Обращает на себя

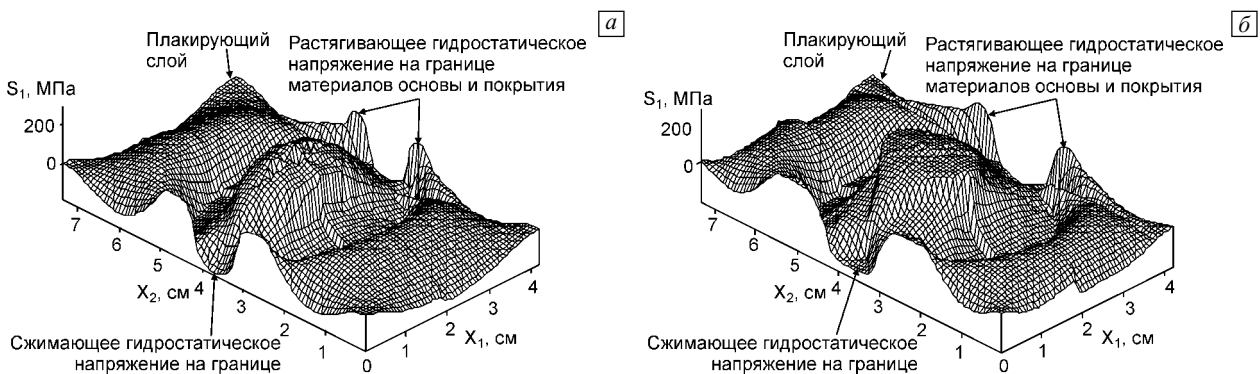


Рис. 4. Распределение гидростатического напряжения в момент времени $t = 2.1$ (а) и 4.2 с (б)

внимание тот факт, что в центральной части образца имеет место уменьшение объема (усадка), тогда как в окрестности этой области объемные деформации положительны. Локальное увеличение деформации объемного растяжения (указано на рис. 3 стрелками) наблюдается и на границе раздела материала шва и плакирующего слоя вблизи угловых точек первоначальной разделки шва.

Охлаждающаяся центральная часть образца, в которой идет усадка, уменьшение объема, при падении температуры все время испытывает значительное положительное (растягивающее) гидростатическое напряжение, тогда как на периферию образца медленно (квазистатически), вслед за распространением тепла, продвигается волнообразный фронт относительно малого отрицательного гидростатического напряжения. Такое развитие событий иллюстрирует рис. 4, на котором показано, как происходит перераспределение гидростатического напряжения $S_1 = \sigma_{kk}/3$ с течением времени. В соответствии с принятой моделью линейно упрочняющейся и накапливающей микрповреждения среды (8), это вызывает два разнонаправленных процесса.

Растягивающее (положительное) гидростатическое напряжение действует как фактор, снижающий напряжение течения, но на первых этапах преобладающее влияние имеет упрочнение, обуславливающее общий локальный рост предела текучести. Поэтому в центральной части образца идет упрочнение материала. Можно ожидать, что при последующих эксплуатационных нагрузках в этой области будет несколько удлинен этап упругого деформирования, обратной стороной которого является снижение пластической податливости и относительно быстрое разрушение, если только не будут предприняты меры по снижению остаточных напряжений и ликвидации микрповреждений.

В то же время в этой расширяющейся зоне с движущейся границей материал испытывает значительные напряжения сдвига $S_2 = \sqrt{3/2 s_{ij} s_{ij}}$, распределение которых по моделируемому образцу для момента времени

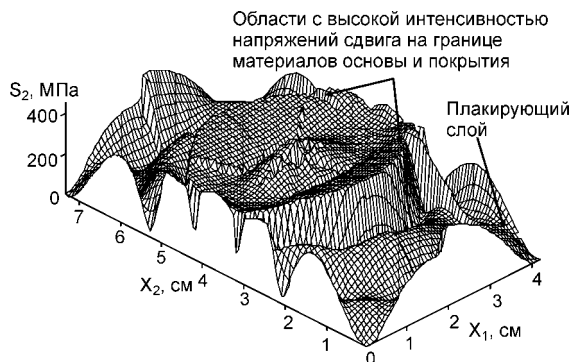


Рис. 5. Распределение интенсивности напряжений сдвига в момент времени $t = 2.1$ с

2.1 с показано на рис. 5. Это распределение также эволюционирует с течением времени и имеет волнообразный характер.

Значительные сдвиговые напряжения развиваются с течением времени на границе раздела материалов шва и плакирующего слоя в окрестности сварного соединения, причем охваченная ими область также расширяется с течением времени, что наглядно иллюстрируют рис. 5 и 6. Карта изолиний, рис. 6, а, показывает четкое разделение областей, в которых напряженно-деформированное состояние претерпевает существенные изменения. Волнообразный характер распространения по образцу сдвиговых напряжений хорошо просматривается при сравнении рис. 5 и рис. 6, б.

На рис. 5, 6 четко проявились границы первоначальной разделки шва, хотя по исходным механическим характеристикам материалы шва, основы и плакирующего слоя отличаются незначительно.

Общий анализ характеристик напряженно-деформированного состояния показывает, что при охлаждении сварного соединения наиболее полные предпосылки для разрушения создаются на границе с плакирующим сло-

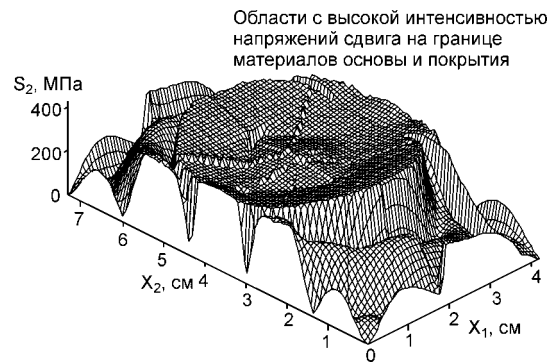
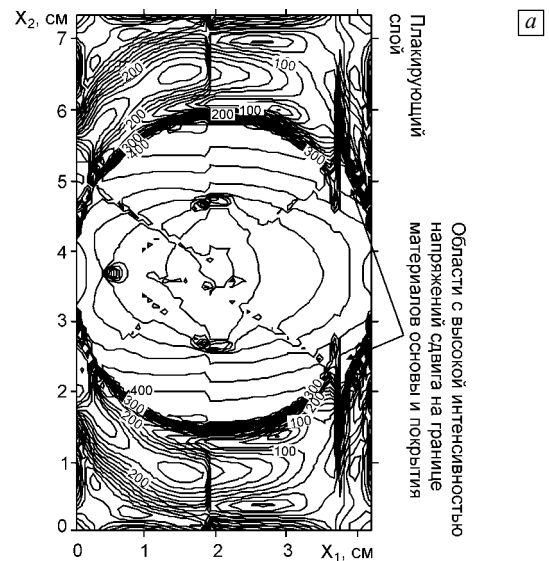


Рис. 6. Карта изолиний (а) и распределение (б) интенсивности напряжений сдвига в момент времени $t = 4.2$ с

ем по краям разделки шва. Эти области указаны стрелками на рис. 3–6. Именно здесь имеет место неблагоприятное совпадение трех факторов: высокая интенсивность напряжений сдвига, растягивающее гидростатическое напряжение, объемное расширение материала, которые в совокупности создают условия для раскрытия трещин. В экспериментах, описанных в работе [9], в этих же областях произошло отслоение лакирующего слоя от материала основы.

5. Заключение

В результате численного решения задачи термопластичности применительно к процессам создания сварных соединений показано, что при охлаждении сварного шва распределение напряжений и деформаций имеет волнообразный характер и эволюционирует в материале с течением времени. Неоднородность напряженно-деформированного состояния обусловлена как неоднородностью свойств материала сварного соединения, так и имеющим место циклом нагрева-охлаждения основной массы материала. Эти процессы приводят к формированию на границах материалов основного шва и покрытия локальных областей, в которых создаются необходимые механические предпосылки (сдвиг, положительное гидростатическое напряжение, объемное расширение) для разрушения. Возникновение в зонах интенсивной пластической деформации локальных зон объемного растяжения в вершине формирующейся трещины обнаружено экспериментально в работе [26]. Расположение опасных зон, обнаруженных в результате численного моделирования процесса охлаждения сварного шва, находится в хорошем соответствии с экспериментальными данными [9].

Литература

1. Люкшин П.А., Люкшин Б.А., Матолыгина Н.Ю., Панин С.В. Моделирование напряженно-деформированного состояния и потери устойчивости термобарьерного покрытия при тепловом ударе // Физ. мезомех. – 2011. – Т. 14. – № 1. – С. 33–41.
2. Янковский А.П. Влияние теплового воздействия на эффект упрочнения образцов с тонкими усиливающими покрытиями // Физ. мезомех. – 2011. – Т. 14. – № 1. – С. 43–53.
3. Крекулева Р.А., Батракин А.В., Бежин О.Н. Применение программного обеспечения MEZA для оценки дефектности сварных соединений на стадии проектирования // Сварка и диагностика. – 2009. – № 4. – С. 36–41.
4. Шангеев В.П., Исаев В.И., Черепанов А.Н. Численное моделирование лазерной сварки стальных пластин // Физ. мезомех. – 2011. – Т. 14. – № 2. – С. 107–114.
5. Юсиф С.А.К., Панин С.В., Люкшин П.А., Сергеев В.П. Напряженно-деформированное состояние на интерфейсе «керамическое теплозащитное покрытие – медная основа» // Физ. мезомех. – 2011. – Т. 14. – № 4. – С. 81–94.
6. Коноваленко И.С., Дмитриев А.И., Смолин А.Ю., Псахье С.Г. Об оценке прочностных свойств пористого керамического покрытия // Физ. мезомех. – 2011. – Т. 14. – № 2. – С. 39–45.
7. Балохонов Р.Р., Романова В.А. Особенности деформации и разрушения материала с покрытием в условиях динамического воздействия на поверхность. Численное моделирование // Физ. мезомех. – 2010. – Т. 13. – № 3. – С. 31–38.
8. Балохонов Р.Р., Романова В.А. Моделирование деформации и разрушения материалов с покрытиями различной толщины // Физ. мезомех. – 2009. – Т. 12. – № 5. – С. 45–55.
9. Гедрович А.И., Гольцов И.А., Каменская А.В., Васильев С.А. Дефекты при сварке плакированной стали 09Г2С+08Х18Н10Т // Научный вестник Луганского национального аграрного университета. Техн. науки. – 2009. – № 2. – С. 232–236.
10. Марочник сталей и сплавов. Справочник / Под общ. ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
11. Марочник сталей и сплавов. Справочник / Под общ. ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2011. – 784 с.
12. Физические величины. Справочник / Под ред. И.С. Григорьевой, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
13. Новикова С.И. Тепловое расширение твердых тел. – М.: Наука, 1974. – 294 с.
14. Антикайн П.А. Краткий справочник по металлам для оборудования и трубопроводов ТЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 168 с.
15. Люкшин Б.А., Герасимов А.В., Крекулева Р.А., Люкшин П.А. Моделирование физико-механических процессов в неоднородных конструкциях. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. – 272 с.
16. Крекулева Р.А. Компьютерное моделирование и анализ теплофизических процессов при сварке неплавящимся электродом с использованием теплоотводящих покрытий // Сварка и диагностика. – 2011. – № 4. – С. 45–51.
17. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. – М.: Мир, 1987. – 542 с.
18. Био М. Вариационные принципы в теории теплообмена. – М.: Энергия, 1975. – 209 с.
19. Новацкий В. Теория упругости. – М.: Мир, 1975. – 872 с.
20. Новацкий В. Динамические задачи термоупругости. – М.: Мир, 1970. – 256 с.
21. Черепанов О.И. Численное решение некоторых квазистатических задач мезомеханики. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. – 190 с.
22. Черепанов О.И., Черепанов Р.О., Никанкин А.А. Трехмерная математическая модель механического поведения тонкостенных конструкций двойной кривизны при квазистатических нагрузках // Доклады ТУСУР. – 2009. – Т. 20. – № 2. – С. 115–121.
23. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1977. – 736 с.
24. Самарский А.А., Соболев И.М. Примеры численного расчета температурных волн // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1963. – № 4. – С. 702–719.
25. Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. – М.: Наука, 1978. – 592 с.
26. Панин В.Е., Елсукова Т.Ф., Поткова Ю.Ф. Стадийность многоуровневого развития усталостных трещин как нелинейного автоволнового процесса поворотного типа // Физ. мезомех. – 2010. – Т. 13. – № 6. – С. 13–25.

Поступила в редакцию
20.12.2011 г.

Сведения об авторах

Крекулева Раиса Алексеевна, к.ф.-м.н., доц. ТПУ, rakrekt@mail.ru.
Черепанов Олег Иванович, д.ф.-м.н., проф. ТУСУР, oi_cherepanov@mail.ru
Черепанов Роман Олегович, к.ф.-м.н., снс НИИ ПММ ТГУ, cro096@ngs.ru