

УДК 539.3  
© 1990 г.

А. В. ГАЛАЗЮК, Я. П. РОМАНЧУК

## ОПТИМИЗАЦИЯ ОСТАТОЧНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ С ПРОДОЛЬНОМ СВАРНЫМ ШВОМ В ПРОЦЕССЕ ЕГО ЛОКАЛЬНОГО ОТЖИГА

Предлагается методика определения оптимальных температурных полей локального отжига [1, 2], обеспечивающих максимальное понижение уровня остаточных напряжений и получение требуемой структуры материала шва и околошовной зоны. Рассматривается круговая цилиндрическая оболочка с продольным сварным швом, в окрестности которого произошли структурные изменения, имеются остаточные деформации и напряжения. Околошовная зона подвергается локальному по кольцевой координате, переменному по толщине и не изменяющемуся в осевом направлении отжигу. Определено оптимальное температурное поле отжига, приведены соответствующие ему распределения временных и остаточных напряжений, даны рекомендации по выбору ширины зоны отжига.

**1. Постановка задачи.** Оболочка отнесена к ортогональным криволинейным координатам: осевой —  $x$ , кольцевой —  $\beta$  и нормальной к срединной поверхности —  $\gamma$ . Ставится задача об определении такого, изменяющегося в кольцевом направлении, линейного по толщине, постоянного вдоль оси оболочки на промежутке времени  $\tau_0 \leq \tau \leq \tau_1$  температурного поля выдержки

$$t(\beta, \gamma, \tau_0) = t(\beta, \gamma, \tau_1) = t(\beta, \gamma) = T_1(\beta) + \gamma/h T_2(\beta) \quad (1.1)$$

процесса отжига [4], которое обеспечило бы за счет релаксации напряжений в околошовной зоне  $|\beta| \leq \beta_1$  при температуре  $T_1(\beta) \geq T_*$  ( $T_*$  — температура начала релаксационных процессов и фазовых превращений) максимальное снятие остаточных сварочных напряжений и требуемую структуру материала. Здесь  $\tau_0$  — момент достижения температуры отжига,  $\tau_1$  — момент окончания выдержки при температуре отжига. Принимается, что изменение температуры по толщине оболочки  $\gamma/h T_2(\beta)$  мало по сравнению с усредненной по толщине температурой  $T_1(\beta)$  и при определении зоны релаксации им можно пренебречь. Требуемая структура материала в зоне релаксации напряжений обеспечивается соответствующим выбором скорости ее охлаждения  $dt(\beta, \gamma, \tau)/d\tau$  до уровня температуры  $T_*$  начала фазовых превращений.

Предполагается (а в дальнейшем показывается выполнение предполагаемого), что температурное поле  $t(\beta, \gamma)$  выдержки, создавая условия релаксации напряжений в области  $|\beta| \leq \beta_1$ , обеспечивает достаточно небольшие (не превышающие предела упругости) напряжения вне этой области  $|\beta| > \beta_1$ , а в сечениях  $\beta = \pm \beta_1$ , условия отсутствия напряжений и однозначности перемещений и поворотов, а температурные поля процесса охлаждения до температуры  $T_*$  в области  $|\beta| \leq \beta_1$  обеспечивают выполнение этих условий и на границе  $\beta = \beta_1$ . В результате такого отжига в оболочке остаточные напряжения возникнут только в зоне релаксации напряжений и будут вызываться (при соблюдении соответствующих условий на краях зоны  $\beta = \pm \beta_1$ ) следующими остаточными деформациями:

$$\varepsilon_x^{(0)}(\beta, \gamma, \tau_2) = \varepsilon_\beta^{(0)}(\beta, \gamma, \tau_2) = \varepsilon_t^{(0)}(t) + \varepsilon_\tau(t, \tau - \tau_1) = \varepsilon_0(\beta, \gamma)$$

$$\varepsilon_t^{(0)}(t) = \frac{1}{2h} \int_{\tau_0}^{t(\beta, \gamma)} \alpha_t(\xi) d\xi$$

$$\varepsilon_f(t, \tau - \tau_1) = \frac{1}{2h} \int_{t(\beta, \gamma)}^{\tau} \alpha_f(\xi, \tau - \tau_1) d\xi$$

$$\kappa_x^{(0)}(\beta, \gamma, \tau_2) = \kappa_\beta^{(0)}(\beta, \gamma, \tau_2) = -\kappa_t^{(0)}(t) + \kappa_f(t, \tau - \tau_1) \equiv \kappa_0(\beta, \gamma)$$

$$\kappa_t^{(0)}(t) = \frac{3}{2h^2} \int_{t(\beta, \gamma)}^{\tau} \gamma \alpha_t(\xi) d\xi$$

$$\kappa_f(t, \tau - \tau_1) = \frac{3}{2h^2} \int_{t(\beta, \gamma)}^{\tau} \gamma \alpha_f(\xi, \tau - \tau_1) d\xi$$

Здесь моменты времени  $\tau$  находятся из уравнения  $t(\beta_1(\tau - \tau_1), \gamma, \tau) = T_*$ ;  $\tau_2$  — момент завершения процесса охлаждения;  $\alpha_t(t)$ ,  $\alpha_f(t, \tau - \tau_1)$  — коэффициенты линейного расширения, зависящие от изменения фазового состояния и температуры;  $\varepsilon_t(t)$ ,  $\kappa_t(t)$ ,  $\varepsilon_f(t, \tau - \tau_1)$ ,  $\kappa_f(t, \tau - \tau_1)$  — чисто тепловая и фазовая деформации, соответственно.

Формирование требуемой структуры материала в области  $|\beta| \leq \beta_1$  шва  $\beta = 0$  однозначно зависит от скорости охлаждения и соответствующих остаточных деформаций  $\varepsilon_f$ ,  $\kappa_f$ , вызванных чисто фазовыми превращениями. Расчет остаточных напряжений от этих деформаций при заданном температурном поле отжига  $t(\beta, \gamma)$  и изменении коэффициента линейного расширения с температурой и временем  $\alpha_f(t, \tau - \tau_1)$  не представляет трудности и является самостоятельной задачей. При определении остаточного напряженно-деформированного состояния в результате отжига указанные остаточные напряжения следует просуммировать с остаточными напряжениями, вызванными чисто тепловой остаточной деформацией.

**2. Определение оптимального температурного поля отжига.** Остановимся на определении оптимальных чисто тепловых остаточных деформаций  $\varepsilon_t(t)$ ,  $\kappa_t(t)$ . Они представляются формулами (1.2), (1.3), в которых для данного материала зависимость коэффициента линейного расширения от температуры принимается известной, а функция  $t(\beta, \gamma)$  может быть варьирована в допустимых условиях задачи пределах.

С учетом того, что рассматриваемая оболочка находится в условиях плоской деформации, ее напряженное состояние, вызванное симметричными относительно сечения  $\beta = 0$  и соответствующими локальному отжигу чисто тепловыми деформациями

$$\varepsilon_t(t) = \begin{cases} \varepsilon_t^{(1)}(t) \\ \varepsilon_t^{(2)}(t) \\ \varepsilon_t^{(3)}(t) \end{cases}, \quad \kappa_t(t) = \begin{cases} \kappa_t^{(1)}(t), & 0 \leq \beta \leq \beta_1 \\ \kappa_t^{(2)}(t), & \beta_1 \leq \beta \leq \beta_2 \\ \kappa_t^{(3)}(t), & \beta_2 \leq \beta \leq \pi \end{cases}$$

определяется формулами [5]:

$$N_i = \begin{cases} N_i^{(1)} \\ N_i^{(2)} \\ N_i^{(3)} \end{cases}, \quad M_i = \begin{cases} M_i^{(1)}, & 0 \leq \beta \leq \beta_1 \\ M_i^{(2)}, & \beta_1 \leq \beta \leq \beta_2 \\ M_i^{(3)}, & \beta_2 \leq \beta \leq \pi \end{cases} \quad (i = 1, 2)$$

$$N_1^{(m)} = -D_0^{(m)} \varepsilon_t^{(m)} + C_1^{(m)} + B_1^{(m)} \cos \beta$$

$$M_1^{(m)} = (D_0^{(m)}/3) h \kappa_t^{(m)} + (h^2/3R) B_1^{(m)} \cos \beta - v_m R [(1 + h^2/(3R^2)) A_1^{(m)} \cos \beta + C_0^{(m)}],$$

$$N_2^{(m)} = A_1^{(m)} \cos \beta \quad (2.1)$$

$$M_2^{(m)} = -R (A_1^{(m)} \cos \beta + C_0^{(m)}), \quad D_0^{(m)} = 2E_m h \quad (m = 1, 2, 3)$$

$$\sigma_1^{(m)} = (N_1^{(m)} + 3\gamma h^{-2} M_2^{(m)})/(2h), \quad \sigma_2^{(m)} = (N_2^{(m)} + 3\gamma h^{-2} M_1^{(m)})/(2h)$$

При этом принимаются следующие интегральные условия равновесия в сечениях  $x = \text{const}$ :

$$\int_0^{2\pi} N_1 d\beta = 0, \quad \int_0^{2\pi} M_1 \cos \beta d\beta = 0, \quad \int_0^{2\pi} M_1 \sin \beta d\beta = 0$$

и условия механического сопряжения областей  $0 \leq \beta \leq \beta_1$ ,  $\beta_1 \leq \beta \leq \beta_2$ ,  $\beta_2 \leq \beta \leq \pi$ , которые приводятся к следующим соотношениям

$$A_1^{(1)} = A_1^{(2)} = A_1^{(3)} = A, \quad C_0^{(1)} = C_0^{(2)} = C_0^{(3)} = C$$

$$\int_0^{\beta_1} \kappa_2^{(1)} d\beta + \int_{\beta_1}^{\beta_2} \kappa_2^{(2)} d\beta + \int_{\beta_2}^{\pi} \kappa_2^{(3)} d\beta = 0$$

$$\kappa_2^{(m)} = [D_1^{(m)} (1 + \nu_m^2)]^{-1} (M_2^{(m)} - \nu_m M_1^{(m)}) + \alpha_i^{(m)} h^{-1} T_2^{(m)} + h^{-1} \kappa_f^{(m)}$$

Здесь  $D_1^{(m)} = 2/3 E_m h (1 - \nu_m^2)^{-1}$ ,  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $M_1$ ,  $M_2$  — соответственно осевые и окружные усилия и моменты,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  — осевое и окружное напряжения. Оптимальным для поставленной задачи температурным полем выдержки  $t(\beta, \gamma)$  будет такое, которое обеспечивает минимальный уровень временных температурных напряжений во всей оболочке при условиях отсутствия напряжений и однозначности перемещений и углов поворотов в сечениях  $\beta = \pm \beta_1$ . Такое температурное поле выдержки будем определять для момента  $\tau = \tau_0$  начала процесса отжига, минимизируя в области локального отжига функционал энергии упругой деформации оболочки [3], который записывается в виде

$$K = K_1 + K_2$$

$$K_1 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\beta_1} \frac{1}{D_0^{(1)}} F_0^{(1)} (N_1^{(1)}, N_2^{(1)}, M_1^{(1)}, M_2^{(1)}) d\beta$$

$$K_2 = \frac{1}{2\pi} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{1}{D_0^{(2)}} F_0^{(2)} (N_1^{(2)}, N_2^{(2)}, M_1^{(2)}, M_2^{(2)}) d\beta \quad (2.2)$$

$$F_0^{(i)} = (N_1^{(i)})^2 - 2\nu_i N_1^{(i)} N_2^{(i)} + (N_2^{(i)})^2 + D_*^{(i)} (1 - \nu_i^2)^{-1} [(M_1^{(i)})^2 - 2\nu_i M_1^{(i)} M_2^{(i)} + (M_2^{(i)})^2], \quad D_*^{(i)} = D_0^{(i)} / D_1^{(i)} \quad (i=1, 2)$$

Функционалы  $K_1$  и  $K_2$  с учетом (2.1) преобразуются в функционалы, заданные на множестве допустимых функций  $\varepsilon_i^{(i)}$ ,  $\kappa_i^{(i)}$ .

Ставится вариационная задача минимизации функционалов (2.2) на множестве допустимых функций  $\varepsilon_i^{(i)}$ ,  $\kappa_i^{(i)}$ , обеспечивающих стационарность следующих функционалов

$$G_{\kappa_i}[\varepsilon_i^{(i)}] = \int_{\beta_{i-1}}^{\beta_i} \cos \kappa_i \beta \varepsilon_i^{(i)} d\beta = A_{\kappa_i},$$

$$\Phi_{L_i}[\kappa_i^{(i)}] = \int_{\beta_{i-1}}^{\beta_i} \cos L_i \beta \kappa_i^{(i)} d\beta = B_{L_i} \quad (i=1, 2)$$

где  $A_{\kappa_i}, B_{L_i}$  — некоторые постоянные.

Решение поставленной вариационной задачи представляется в виде

$$\varepsilon_i^{(i)}(\beta) = \sum_{j=0}^{\kappa_i} \lambda_j \cos^j \beta, \quad \kappa_i^{(i)}(\beta) = \sum_{n=0}^{L_i} \gamma_n \cos^n \beta$$

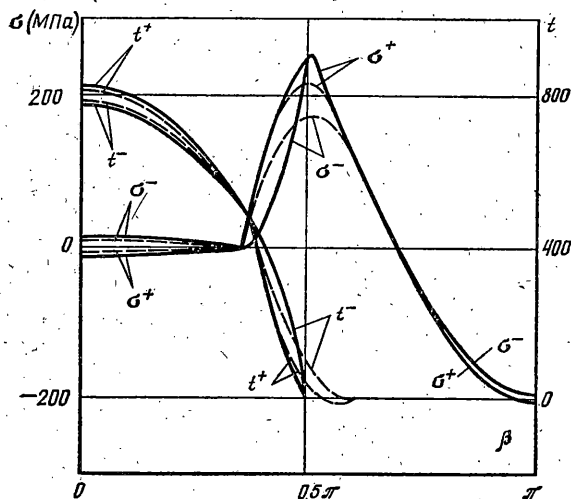
Пусть  $\alpha_i(t) = \alpha_i = \text{const}$ . Тогда  $\varepsilon_i^{(i)}(\beta) = \alpha_i T_1^{(i)}$ ,  $\kappa_i^{(i)}(\beta) = \alpha_i T_2^{(i)}$ .

Усредненное по толщине температурное поле  $T_1^{(i)}(\beta)$  и перепады температуры по толщине  $T_2^{(i)}(\beta)$  определялись для случая  $K_1 = L_1 = 1$ ,  $K_2 = L_2 = 2$  при следующих дополнительных ограничениях:  $N_1^{(1)}(0) = 0$ ,

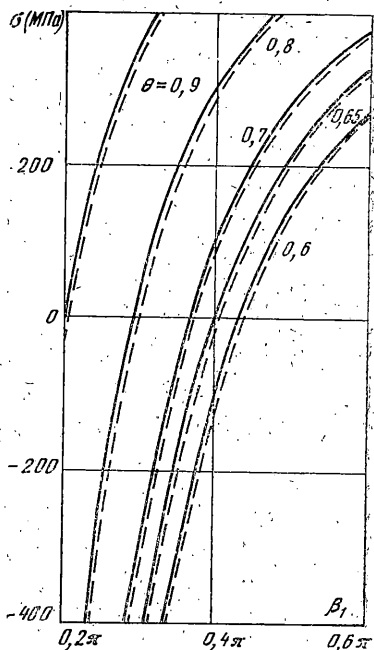
$N_1^{(1)}(\beta_1)=0, M_1^{(2)}(\beta_1)=0, N_2^{(2)}(\beta_1)=0, M_2^{(2)}(\beta_1)=0, T_1^{(1)}(0)=T_0, T_1^{(1)}(\beta_1)=T_*, \varepsilon_t^{(1)}(\beta_1)=\varepsilon_t^{(2)}(\beta_1), T_1^{(2)}(\beta_2)=0, \varkappa_t^{(1)}(\beta_1)=\varkappa_t^{(2)}(\beta_2).$

Численные исследования проведены для оболочки с параметрами:  $R=245$  мм,  $2h=5$  мм,  $\nu=0,33$ ,  $E_1=6,5 \cdot 10^4$  МПа,  $E_2=E_3=9,5 \cdot 10^4$  МПа,  $T_0=800^\circ$  С,  $T_*=520^\circ$  С,  $\alpha_t=9,3 \cdot 10^{-6}$  град $^{-1}$ .

На фиг. 1 приведены температурные поля выдержки  $t(\beta, \gamma)$  процесса отжига на внешней ( $t^+$ ) и внутренней ( $t^-$ ) поверхностях оболочки и вызываемые ими временные (при  $\tau=\tau_0$ ) осевые температурные напряжения  $\sigma^+, \sigma^-$  на соответствующих поверхностях оболочки при фиксированной ширине зоны релаксации  $\beta_1=0,35\pi$  и зонах локального нагрева  $\beta_2=0,5\pi$  — сплошные линии и  $\beta_2=$



Фиг. 1.



Фиг. 2.

$=0,6\pi$  — штриховые линии. Отметим, что в рассматриваемом случае кольцевые напряжения  $\sigma_z=0$ . Как видно из рисунка в области релаксации напряжений температурные напряжения невелики и имеют чисто моментный характер. Перепады температуры невелики и уменьшаются с увеличением отношения  $R/h$ . Остаточные напряжения  $\sigma_0^+, \sigma_0^-$  на внешней и внутренней поверхности оболочки согласно принятой схеме отжига, равны по величине и противоположны по знаку временным температурным напряжениям в зоне релаксации и равны нулю вне ее.

На фиг. 2 приведена зависимость временных температурных напряжений  $\sigma^-$  — сплошные линии,  $\sigma^+$  — штриховые линии в сечении  $\beta=\pi$  от ширины зоны релаксации  $\beta_1$  при различных значениях параметра  $\theta=T_*/T_0$ , которая дает возможность, задавшись конкретными значениями для выбранного материала, определить минимальную ширину зоны релаксации, при которых напряжения в сечении  $\beta=\pi$  не превышают допустимых.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Винокуров В. А. Отпуск сварных конструкций для снижения напряжений. М.: Машиностроение, 1973. 215 с.
2. Сагалевич В. М. Методы устранения сварочных деформаций и напряжений. М.: Машиностроение, 1974. 248 с.
3. Григолюк Э. И., Подстригач Я. С., Бурак Я. И. Оптимизация нагрева оболочек и пластин. Киев: Наук. думка, 1979. 364 с.
4. Беседина Л. П., Бурак Я. И. Определение и исследования рациональных режимов отжига, оптимальных температурных полей выдержки и вызываемых ими остаточных напряжений в сварных цилиндрических оболочках // Тр. III Всес. симпозиума «Остаточные технологические напряжения». Кутаиси. 1988. С. 51–59.
5. Подстригач Я. С., Ярема С. Я. Температурні напруження в оболонках. Київ: Наук. думка, 1961. 212 с.

Львов

Поступила в редакцию  
27.09.1988