

УДК 539.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ДВУХСЛОЙНОМ ЦИЛИНДРЕ

Чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. ПЛЕСКАЧЕВСКИЙ Ю. М.,
асп. ЧИГАРЕВА Ю. А.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: juliachigareva@rambler.ru

MODELING OF STRESSED-DEFORMED STATE AND RESIDUAL STRESSES IN TWO-LAYER CYLINDER

PLESKACHEVSKY Yu. M., CHIGAREVA Yu. A.

Belarusian National Technical University

Разработан метод расчета термоупругопластического напряженно-деформированного состояния в двухслойных цилиндрических телах под воздействием резких изменений температуры на внешней границе, свободной от силовых нагрузок. Определены границы пластических зон при различных соотношениях между физико-механическими характеристиками внутреннего и внешнего цилиндров, распределение остаточных напряжений после температурной разгрузки.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, двухслойный цилиндр, пластическая зона.

Ил. 5. Библиогр.: 8 назв.

The paper presents a calculation method for thermo-elasto-plastic stressed-deformed state in two-layer cylindrical bodies due to abrupt temperature changes on outer load-free boundary. The boundaries of plastic zones at various relations correlations between stress-strain properties of the internal and external cylinders and distribution of residual stresses after temperature unloading have determined in the paper.

Keywords: stressed-deformed state, two-layer cylinder, plastic zone.

Fig. 5. Ref.: 8 titles.

Введение. Двухслойные цилиндрические элементы конструкций, составленные из стержня-сердечника и облегающей его оболочки-матрицы, широко распространены в различных технических системах, подвергающихся резким температурным воздействиям [1]. Определение в них напряженно-деформированного состояния в рамках термоупругости и термопластичности представляет интерес с теоретической и практической сторон. В случае стержней конечной длины с граничными условиями на концах важное значение имеют решения задач термоустойчивости с помощью соответствующих методов. В данной работе основное внимание уделяется получению решения граничных задач для случая длинных стержней в областях, где влиянием граничных условий на концах можно пренебречь, боковая поверхность свободна от силовых нагрузок, внешнее температурное поле неизменно вдоль стержня так, что решение задачи можно рассматривать

в произвольном сечении в рамках плоской модели.

1. Двумерная постановка задачи термоупругости для двухслойного стержня. Рассмотрим длинный цилиндрический стержень, имеющий радиус $R^{(i)}$, модули упругости $\lambda_{ijke}^{(i)}$, коэффициенты теплопроводности $\alpha_{ij}^{(i)}$. Стержень заключен во внешний цилиндр, соосный с ним, радиусом $R^{(e)}$, с модулями упругости $\lambda_{ijke}^{(e)}$, коэффициентами теплопроводности $\alpha_{ij}^{(e)}$. Боковая поверхность внешнего стержня свободная от напряжений и находится в осесимметричном температурном поле, неизменном вдоль стержня. Тогда перемещения, деформации, напряжения в произвольном сечении композитного стержня зависят только от текущего радиуса R .

Перейдем к безразмерным величинам во внутреннем и внешнем кругах:

$$r = \frac{R}{R^{(i)}}; \hat{u}^{(\alpha)} = \frac{u^{(\alpha)}}{R^{(i)}};$$

$$\hat{\sigma}_{ij}^{(\alpha)} = \frac{\sigma_{ij}^{(\alpha)}}{\lambda^{(\alpha)} + 2\mu^{(\alpha)}} \quad (\alpha = i, e), \quad (1)$$

где индекс $\alpha = i$ для внутреннего, а $\alpha = e$ для внешнего цилиндров.

Связь между напряжениями и деформациями имеет вид [2–4]:

$$\hat{\sigma}_{rr}^{(\alpha)} = \frac{du^{(\alpha)}}{dr} + \hat{\beta}^{(\alpha)} \frac{u^{(\alpha)}}{r} - \hat{\alpha}_r^{(\alpha)} \theta;$$

$$\hat{\beta}^{(\alpha)} = \frac{\lambda^{(\alpha)}}{\lambda^{(\alpha)} + 2\mu^{(\alpha)}};$$

$$\hat{\sigma}_{\varphi\varphi}^{(\alpha)} = \hat{\beta} \frac{du^{(\alpha)}}{dr} + \frac{u^{(\alpha)}}{r} - \hat{\alpha}_\varphi^{(\alpha)} \theta, \quad (2)$$

где θ – скачок температуры; $\hat{\alpha}_r^{(\alpha)}$, $\hat{\alpha}_\varphi^{(\alpha)}$ – коэффициенты теплопроводности в радиальном и окружном направлениях.

Уравнение равновесия в цилиндрической системе координат имеет вид [5]

$$\frac{d\hat{\sigma}_{rr}^{(\alpha)}}{dr} + \frac{\hat{\sigma}_{rr}^{(\alpha)} - \hat{\sigma}_{\varphi\varphi}^{(\alpha)}}{r} = 0 \quad (\alpha = i, e). \quad (3)$$

Подставляя (2) в (3), получим уравнение равновесия в перемещениях

$$\frac{d^2 \hat{u}^{(\alpha)}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\hat{u}^{(\alpha)}}{dr} - \frac{1}{r^2} \hat{u}^{(\alpha)} - \frac{\delta_{r\varphi}^{(\alpha)}}{r} \theta = 0, \quad (4)$$

где θ – скачок температуры.

Решение (4) представляется в виде

$$\hat{u}^{(\alpha)} = c_1^{(\alpha)} r + c_2^{(\alpha)} r^{-1} + \delta_{r\varphi}^{(\alpha)} r \theta. \quad (5)$$

Произвольные константы $c_1^{(\alpha)}$, $c_2^{(\alpha)}$ определяются из граничных условий, которые запишем в виде:

1) на боковой поверхности внешнего цилиндра при $r = r^*$

$$\hat{\sigma}_{rr}^{(e)} = 0, \quad r^* = R^{(e)}/R^{(i)}; \quad (6)$$

2) на границе внешнего и внутреннего цилиндров при $r = 1$:

$$\hat{u}^{(i)} = \hat{u}^{(e)}; \quad \hat{\sigma}_{rr}^{(e)} = \hat{\gamma} \hat{\sigma}_{rr}^{(i)};$$

$$\hat{\gamma} = \left(\lambda^{(i)} + 2\mu^{(i)} \right) \left(\lambda^{(e)} + 2\mu^{(e)} \right)^{-1}; \quad (7)$$

3) при $r = 0$ перемещение $\hat{u}^{(i)}$ должно быть конечным, откуда следует, что

$$c_2^{(i)} = 0. \quad (8)$$

Подставляя (5) в первое условие (7), закон Гука (2) и затем полученное выражение в (6), (7), получим три уравнения для нахождения констант $c_1^{(i)}$, $c_1^{(e)}$, $c_2^{(e)}$:

$$c_1^{(i)} = c_1^{(e)} + c_2^{(e)} + \delta_{r\varphi}^{(ie)} \theta;$$

$$A_1 c_1^{(e)} + B_1 c_2^{(e)} = D_1;$$

$$A_2 c_1^{(e)} + B_2 c_2^{(e)} = D_2;$$

$$A_1 = \hat{\beta}^{(e)} - \hat{\beta}^{(i)}; \quad B_1 = 2 + \hat{\beta}^{(i)} - \hat{\beta}^{(e)};$$

$$A_2 = 1 + \hat{\beta}^{(e)}; \quad B_2 = r^{-2} (\hat{\beta}^{(e)} + 1);$$

$$D_1 = \left[\hat{\beta}^{(e)} \delta_{r\varphi}^{(e)} - 2\delta_{r\varphi}^{(i)} + \hat{\alpha}_r^{(i)} - \hat{\alpha}_r^{(e)} - \delta_{r\varphi}^{(ie)} (1 + \hat{\beta}^{(i)}) \right] \theta;$$

$$D_2 = \hat{\alpha}_r^{(e)} - \hat{\beta}^{(e)} - \delta_{r\varphi}^{(e)}.$$

Решение системы (9) записывается в виде:

$$c_1^{(e)} = \frac{\Delta_1}{\Delta}; \quad c_2^{(e)} = \frac{\Delta_2}{\Delta}; \quad c_1^{(i)} = \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{\Delta} + \delta_{r\varphi}^{(ie)} \theta,$$

$$\Delta = A_1 B_2 - A_2 B_1; \quad \Delta_1 = D_1 B_2 - D_2 B_1; \quad (10)$$

$$\Delta_2 = A_1 D_2 - A_2 D_1.$$

Подставляя (10) в (5) и затем в (2), получим выражения для напряжений в композитном цилиндре, боковая поверхность которого подвергается скачку температуры и свободна от силовых нагрузок.

2. Уругопластическое установившееся состояние во внешнем цилиндре после резкого изменения температуры. При резком изменении температуры среды, в которой находится цилиндр, пластическое состояние может возникнуть, если выполняется условие пластичности

$$\hat{\sigma}_{rr}^{(e)} - \hat{\sigma}_{\varphi\varphi}^{(e)} = 2 \text{sign} \hat{\sigma}_{rr}^{(e)} \hat{Y}_0^{(e)}, \quad (11)$$

где $\text{sig} \hat{\sigma}_{rr}^{(e)}$ – функция знака $\hat{\sigma}_{rr}^{(e)}$; $\hat{Y}_0^{(e)}$ – предел пластичности материала внешнего цилиндра.

Так как изменяется температура внешней среды, в которой находится цилиндр, то пластическое состояние при выполнении условия (11) реализуется на внешней поверхности при $r = r_*$. Однако вследствие того, что эта поверхность свободна от силовых нагрузок, должна происходить разгрузка, и таким образом пластичность будет развиваться на внутренней границе внешнего цилиндра, где концентрация напряжений максимальная. Если жесткость и предел пластичности внутреннего цилиндра не превосходят жесткости и предела пластичности внешнего, то во внутреннем цилиндре может возникнуть пластическое состояние. На практике часто внутренний цилиндр играет роль упрочняющего элемента, поэтому рассмотрим сначала случай, когда жесткость и предел пластичности внутреннего цилиндра значительно больше жесткости и предела пластичности внешнего. Тогда пластическое состояние, которое возникает в стационарном случае, можно рассматривать как результат действия давления $\hat{\sigma}_{rr}^{(e)}(1)$, приложенного на внутренней границе $r = 1$. Известно [6], что предел пластичности не остается постоянным, а может изменяться: уменьшаться вследствие термического разупрочнения (размягчения) или повышаться вследствие деформационного упрочнения [6]. Однако в первом приближении будем считать, что предел пластичности остается неизменным.

Пластическое состояние в рассматриваемом случае является статически определимым [5–7], т. е. для его нахождения достаточно воспользоваться уравнением равновесия (3) и условием пластичности (11), в котором для определенности положим $\hat{\sigma}_{rr}^{(e)} < 0$.

Подставляя (11) в (3), получим

$$\frac{d\hat{\sigma}_{rr}^{(e)}}{dr} - \frac{\hat{Y}_0^{(e)}}{r} = 0. \quad (12)$$

Интегрируя (12), находим

$$\hat{\sigma}_{rr}^{(e)} = \hat{Y}_0^{(e)} \ln r + c^{(e)}. \quad (13)$$

Так как в рассматриваемой модели на внешней границе при $r = r_*$ имеем $\hat{\sigma}_{rr}^{(e)} = 0$, то

пластическое состояние реализуется в зоне, прилегающей к внутренней границе $r = 1$, на которой задано давление $\hat{\sigma}_{rr}^{(i)}(1)$, полученное при решении термоупругой задачи. Исходя из того, что напряжения $\hat{\sigma}_{rr}^{(e)}$ в пластической зоне определяются формулой (13) с точностью до константы, определим ее из условия

$$\hat{\sigma}_{rr}^{(e)}(1) = \hat{\sigma}_{rr}^{(i)}(1). \quad (14)$$

Тогда $c^{(e)} = \hat{\sigma}_{rr}^{(i)}(1)$, а выражения для напряжений в пластической зоне имеют вид:

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_{rr}^{(e)} &= 2\hat{Y}_0^{(e)} \ln r - \hat{\sigma}_{rr}^{(i)}(1); \\ \hat{\sigma}_{\varphi\varphi}^{(e)} &= 2\hat{Y}_0^{(e)} \ln r - \hat{\sigma}_{rr}^{(i)}(1) + 2\hat{Y}_0^{(e)}. \end{aligned} \quad (15)$$

Известно, что перемещения и деформации для статически определимых задач можно найти различными способами, используя предположение о несжимаемости [4, 5] или ассоциированные законы течения [5, 7].

Рассмотрим соотношения Генки [5]:

$$\begin{aligned} \hat{e}_{rr}^{(e)} &= \frac{d\hat{u}^{(e)}}{dr} = -\hat{\psi}^{(e)}\hat{Y}_0^{(e)} + \hat{K}^{(e)}\sigma^{(e)}; \\ \hat{e}_{\varphi\varphi}^{(e)} &= \frac{\hat{u}^{(e)}}{dr} = -\hat{\psi}^{(e)}\hat{Y}_0^{(e)} + \hat{K}^{(e)}\sigma^{(e)}; \\ K^{(e)} &= \frac{1-2\nu^{(e)}}{E^{(e)}}; \quad \hat{K}^{(e)} = K^{(e)}(\lambda^{(e)} + 2\mu^{(e)})^{-1}, \end{aligned} \quad (16)$$

где $\hat{\psi}^{(e)}$ – функция, удовлетворяющая уравнению

$$\frac{d\hat{\psi}^{(e)}}{dr} + \frac{2}{r}\hat{\psi}^{(e)} + \frac{2\hat{K}^{(e)}}{r} = 0. \quad (17)$$

Интегрируя (17), получим

$$\hat{\psi}^{(e)} = -\hat{K}^{(e)} + \frac{c_2^{(e)}}{r^2}. \quad (18)$$

Константа интегрирования $c_2^{(e)}$ может быть найдена из следующих условий. Так как пластическая зона прилегает к внутренней границе $r = 1$, а ее внешняя граница $r_1^{(e)}$ располагается в интервале $1 < r_1^{(e)} \leq r_*$, то произвольная константа интегрирования $c_2^{(e)}$ может быть опре-

делена из условий, заданных на границе пластической и упругой зон во внешнем цилиндре, а именно непрерывности смещений

$$u_{(p)}^{(e)}(r_1^{(e)}) = u_{(e)}^{(e)}(r_1^{(e)}), \quad (19)$$

где нижний индекс «*p*» означает пластичность, «*e*» – упругость.

Условие непрерывного перехода пластического состояния в упругое является также [5]

$$\hat{\psi}(r_1^{(e)}) = \frac{1}{2\hat{G}^{(e)}}. \quad (20)$$

Условия (18), (19) будут выполнены, если

$$c_2^{(e)} = r_1^{(e)} \left(\frac{1}{2\hat{G}^{(e)}} + \hat{K}^{(e)} \right). \quad (21)$$

Во внешнем цилиндре вследствие пластических деформаций после снятия нагрузки возникнут остаточные напряжения, распределение которых описывается формулами, представляющими собой разность между выражениями (2) и (14) в зоне $1 < r \leq r_1^{(e)}$, а для $r_1^{(e)} \leq r$ напряжения определяются формулами (2). На рис. 1 изображено распределение напряжений $\hat{\sigma}_{rr}^{(e)}$, $\hat{\sigma}_{\varphi\varphi}^{(e)}$ (сплошные линии) и остаточных напряжений $\hat{\sigma}_{\varphi\varphi}^{(r)}$ (пунктир).

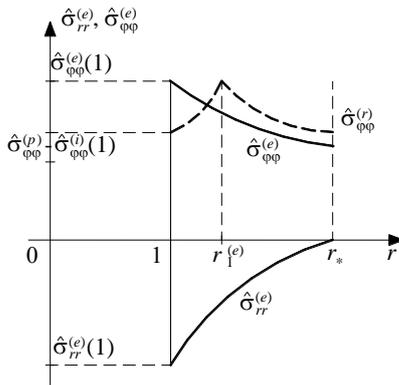


Рис. 1. Распределение напряжений $\hat{\sigma}_{rr}^{(e)}$, $\hat{\sigma}_{\varphi\varphi}^{(e)}$

и остаточных напряжений $\hat{\sigma}_{\varphi\varphi}^{(r)}$ во внешнем цилиндре [5]

3. Уругопластическое деформирование в соосных цилиндрических телах. Рассмотрим длинный цилиндр, состоящий из двух жестко скрепленных соосных цилиндров с разными физико-механическими свойствами, так, что

жесткость и предел пластичности внутреннего цилиндра не превосходят жесткость и предел пластичности внешнего.

Композитный цилиндр находится в среде, температура которой резко падает так, что в установившемся состоянии выполняется условие пластичности во внутреннем и внешнем цилиндрах

$$\hat{\sigma}_{\varphi\varphi}^{(\alpha)} - \hat{\sigma}_{rr}^{(\alpha)} = \hat{Y}_0^{(\alpha)} \quad (\alpha = i, e). \quad (22)$$

В пластических зонах внешнего и внутреннего цилиндров, прилегающих к внутренней границе контакта $r = 1$, выполняется уравнение равновесия

$$\frac{d\hat{\sigma}_{rr}^{(\alpha)}}{dr} + \frac{\hat{\sigma}_{rr}^{(\alpha)} - \hat{\sigma}_{\varphi\varphi}^{(\alpha)}}{r} = 0. \quad (23)$$

Интегрируя (23), получим:

$$\hat{\sigma}_{rr}^{(\alpha)} = 2\hat{Y}_0^{(\alpha)} \ln r + c_1^{(\alpha)}; \quad (24)$$

$$\hat{\sigma}_{\varphi\varphi}^{(\alpha)} = \hat{\sigma}_{rr}^{(\alpha)} + 2\hat{Y}_0^{(\alpha)}.$$

Константы $c_1^{(\alpha)}$ ($\alpha = i, e$) могут быть определены из граничных условий. На границе контакта цилиндров при $r = 1$ выполняются условия равенства напряжений (24) и перемещений:

$$\hat{\sigma}_{rr}^{(i)} = \gamma \hat{\sigma}_{rr}^{(e)}; \quad u^{(i)} = u^{(e)};$$

$$\gamma = (\lambda^{(i)} + 2\mu^{(i)}) (\lambda^{(e)} + 2\mu^{(e)})^{-1} \quad \text{при } r = 1. \quad (25)$$

Из (25) следует

$$c_1^{(i)} = \gamma c_1^{(e)}. \quad (26)$$

Для нахождения деформаций в пластических зонах используем соотношения Генки [5], которые имеют вид:

$$\hat{e}_{rr}^{(\alpha)} = \frac{d\hat{u}^{(\alpha)}}{dr} = -\hat{\psi}^{(\alpha)} \hat{Y}_0^{(\alpha)} + \hat{K}^{(\alpha)} \hat{\sigma}^{(\alpha)}; \quad (27)$$

$$\hat{e}_{\varphi\varphi}^{(\alpha)} = \frac{\hat{u}^{(\alpha)}}{r} = -\hat{\psi}^{(\alpha)} \hat{Y}_0^{(\alpha)} + \hat{K}^{(\alpha)} \hat{\sigma}^{(\alpha)}.$$

Используя условие сплошности [5], запишем

$$\frac{d\hat{e}_{\varphi\varphi}^{(\alpha)}}{dr} + \frac{\hat{e}_{\varphi\varphi}^{(\alpha)} - \hat{e}_{rr}^{(\alpha)}}{r} = 0. \quad (28)$$

Подставляя (27) в (28), получим

$$\frac{d\hat{\psi}^{(\alpha)}}{dr} + \frac{2}{r}\hat{\psi} + \frac{2\hat{K}^{(\alpha)}}{r} = 0. \quad (29)$$

Интегрируя (29), находим

$$\hat{\psi}^{(\alpha)} = -\hat{K}^{(\alpha)} + \frac{c_2^{(\alpha)}}{r^2}, \quad (30)$$

где произвольные константы $c_2^{(\alpha)}$ определяются на границах упругих и пластических зон во внешнем $r = r_2^{(e)}$ и внутреннем $r = r_2^{(i)}$ цилиндрах. Так как границы $r_2^{(e)}$ и $r_2^{(i)}$ неизвестны, необходимо задать условия, которые бы позволили определить их.

Перемещения при переходе через $r = r_2^{(i)}$ и $r = r_2^{(e)}$ должны быть непрерывны и $\hat{\psi}_{(r_2^{(i)})}^{(\alpha)} = 1/2G^{(\alpha)}$, что позволяет получить

$$c_2^{(\alpha)} = r_2^{(\alpha)^2} \left(\frac{1}{2G^{(\alpha)}} + \hat{K}^{(\alpha)} \right). \quad (31)$$

Используя (26), получим выражение для границ $r_2^{(\alpha)}$ между упругой и пластической зонами во внутреннем и внешнем цилиндрах

$$r_2^{(\alpha)^2} = \frac{2c_2^{(\alpha)}\hat{G}^{(\alpha)}}{1 + 2\hat{K}^{(\alpha)}\hat{G}^{(\alpha)}}. \quad (32)$$

4. Численные примеры решения задач о распределении напряжений в композитных цилиндрах. Рассмотрим две модели композитных цилиндров. В первом случае модель представляет собой два цилиндра. Внутренний цилиндр имеет сердечник, в четыре раза более жесткий, чем внешний, коэффициенты теплопроводности внутреннего цилиндра меньше коэффициентов теплопроводности внешнего в четыре раза, предел пластичности внешнего цилиндра в пять раз меньше предела пластичности внутреннего, скачок температуры 600 °С, радиусы внутреннего и внешнего цилиндров относятся как 1:2 при различных значениях параметра $\eta = \frac{r_* - r_2^{(e)}}{r_* - 1}$.

Зависимость радиального напряжения $\hat{\sigma}_{rr}$ от радиуса r показана на рис. 2.

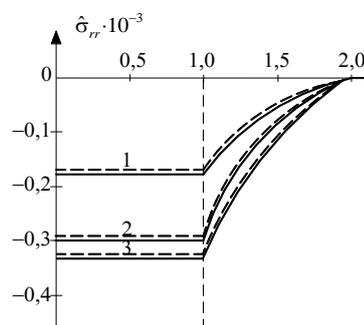


Рис. 2. Зависимость радиального напряжения $\hat{\sigma}_{rr}$ от радиуса r для первой модели при: 1 – $\eta = 1,0$; 2 – $0,5$; 3 – $0,8$ (пунктир) [6]

Зависимость окружных напряжений $\hat{\sigma}_{\varphi\varphi}^{(\alpha)}$ от радиуса r представлена на рис. 3.

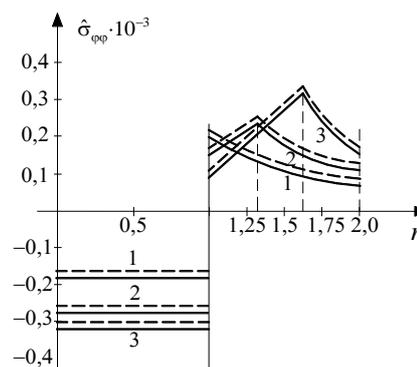


Рис. 3. Зависимость окружных напряжений $\hat{\sigma}_{\varphi\varphi}$ от радиуса r при: 1 – $\eta = 0$; 2 – $0,5$; 3 – $0,9$ (пунктир) [6]

Рассмотрим второй случай, когда внутренний цилиндр имеет коэффициенты жесткости в три раза и предел пластичности в семь раз меньше, чем внешний цилиндр, коэффициенты теплопроводности обоих цилиндров равны. Скачок температуры 600 °С. Радиусы внутреннего и внешнего цилиндров относятся как 1:2, значения параметра η брали те же, что и в первой модели. Распределение радиального напряжения в зависимости от радиуса r при различных значениях параметра η показано на рис. 4.

Зависимость окружных напряжений для второй модели при тех же значениях параметров η , что и для радиальных напряжений, изображена на рис. 5.

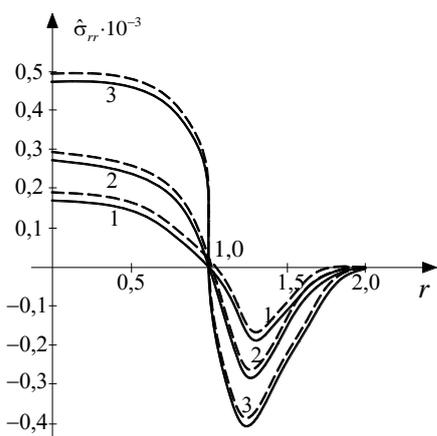


Рис. 4. Зависимость радиального напряжения $\hat{\sigma}_{rr}$ от радиуса r при: 1 – $\eta = 0$; 2 – 0,5; 3 – 0,9 (пунктир) [6]

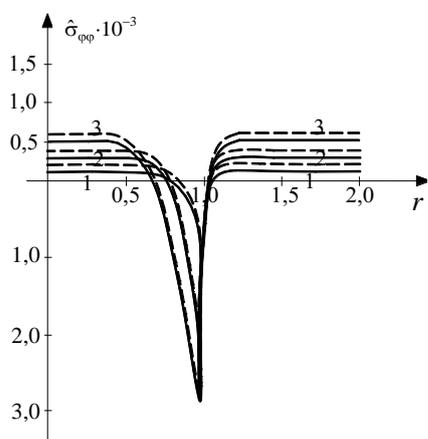


Рис. 5. Зависимость окружных напряжений от радиуса r при: 1 – $\eta = 0$; 2 – 0,5; 3 – 0,9 (пунктир) [6]

Из рассмотренного следует, что для модели двухслойного цилиндра, у которого модули упругости и предел пластичности внутреннего цилиндра больше, чем у внешнего, что соответствует композитам, упрочненным волокнами, упругопластическое состояние при резком изменении температуры наступает только во внешнем цилиндре, причем пластическая зона в случае, когда внешняя граница свободна от силовой нагрузки, примыкает к границе, по которой жестко связаны два цилиндра.

В случае, когда модули упругости и предел пластичности внешнего цилиндра не меньше, чем у внутреннего, пластическое состояние при резком изменении температуры возникает во внешнем и внутреннем цилиндрах в зонах, примыкающих к внутренней границе, по которой граничат цилиндры.

Решение задач получено в безразмерном виде при заданных соотношениях между жесткостями, пределами пластичности, коэффициентами теплопроводности внутреннего и внешнего цилиндров. Применительно к конкретным материалам эти результаты близки с композитами, у которых внешний цилиндр Al, а внутренний – в первом случае SiC, а во втором – графит [6].

ВЫВОДЫ

1. Получено распределение термоупругих напряжений в композите типа цилиндр в цилиндре в случае, когда среда, в которой находится композит, резко меняет температуру, после чего устанавливается стационарное состояние. Теплопроводность материала обладает цилиндрической анизотропией.

2. В случае когда жесткость, предел пластичности внутреннего цилиндра значительно больше, чем внешнего, а коэффициенты теплопроводности равны и для внешнего цилиндра выполняется условие пластичности, поля напряжений для стационарного состояния статически определены. Получено распределение остаточных напряжений после температурной разгрузки во внешнем цилиндре.

3. Для модели композита, у которого жесткость и пластичность внутреннего цилиндра не превосходят соответствующих параметров внешнего, пластические зоны возникают в окрестности границы между цилиндрическими телами как во внутреннем, так и во внешнем цилиндрах. В узком приграничном слое во внутреннем и внешнем цилиндрах возникают пластические напряжения, знак которых изменяется в этой зоне.

4. Рассмотренная модель пластического деформирования композита типа цилиндр в цилиндрическом теле может быть использована при разработке топливных элементов для АЭС [8] с учетом того, что при аварийных ситуациях резкое охлаждение твэлов приводит к их растрескиванию и хрупкому разрушению. Создание элементов, пластически деформирующихся при резкой смене температуры, позволит избежать попадания фрагментов разрушенных твэлов в среду охлаждения и окружающую среду.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Christman, T.** An Experimental and Numerical Study of Deformation in Metal-Ceramic Composite / T. Christman, A. Needlemani, S. Suresh // *Acta Metall.* – 1989. – No 37. – P. 3029–3050.
2. **Паркус, Г.** Неустановившиеся температурные напряжения / Г. Паркус. – М.: Физматгиз, 1963. – 252 с.
3. **Прусов, А. И.** Термоупругие анизотропные пластинки / А. И. Прусов. – Минск: Изд-во БГУ, 1978. – 200 с.
4. **Подстригач, Я. С.** Термоупругость тел неоднородной структуры / Я. С. Подстригач, В. А. Ломакин, Ю. М. Коляно. – М.: Наука, 1984. – 368 с.
5. **Качанов, Л. М.** Основы теории пластичности / Л. М. Качанов. – М.: Наука, 1969. – 420 с.
6. **Agah-Tehrani, A.** Thermal Residual Stresses in Particulate Metal-Matrix Composites: an Elastic – Analysis / A. Agah-Tehrani // *Topics in Plasticity*, AMPress, preprinted in USA, 1994. – P. 137–150.
7. **Быковцев, Г. И.** Теория пластичности / Г. И. Быковцев, Д. Д. Ивлев. – Владивосток: Дальнаука, 1998. – 483 с.
8. **О возможности** создания высоконапряженного ядерного реактора на низкообогащенном топливе / А. П. Ахрамович [и др.] // Доклады НАН Беларуси. – 2012. – Т. 56, № 4. – С. 115–118.

REFERENCES

1. **Christman, T., Needlemani, A., & Suresh, S.** (1989) An Experimental and Numerical Study of Deformation in Metal-ceramic Composite. *Acta Metall*, 37, 3029–3050.
2. **Parkus, G.** (1963) *Transient Thermal Stresses*. Moscow: Fizmatgiz.
3. **Prusov, A. I.** (1978) *Thermoelastic Anisotropic Plates*. Minsk: BSU Publishing House.
4. **Podstrigach, Ya. S., Lomakin, V. A., & Kolianno, Yu. M.** (1984) *Thermoelasticity of Bodies Having Non-Uniform Structure*. Moscow: Nauka [Science].
5. **Kachanov, L. M.** (1969) *Fundamentals of Plasticity Theory*. Moscow: Nauka [Science].
6. **Agah-Tehrani, A.** (1994) Thermal Residual Stresses in Particulate Metal-Matrix Composites: an Elastic – Analysis. *Topics in Plasticity* (pp. 137–150). USA: AMPress. (Original work published 1994).
7. **Bykovtsev, G. I., & Ivlev, D. D.** (1998) *Plasticity Theory*. Vladivostok: Dalnauka [Far East Science].
8. **Akhramovich, A. P.** (2012) On Possibility to Create High-Stress Nuclear Reactor with Low-Enriched Fuel. *Doklady Natsionalnoy akademii nauk Belarusi [Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus]*, 56(4), 115–118.

Поступила 09.10.2013

УДК 621.891:621.793

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ Fe–Cr–B–Si

Канд. техн. наук ДЬЯЧЕНКО О. В.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: olg dyachenko@mail.ru

TECHNOLOGICAL MODES OF LASER PROCESSING AND THEIR INFLUENCE ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF Fe–Cr–B–Si COATINGS

DIACHENKO O. V.

Belarusian National Technical University

Исследовано влияние режимов лазерной обработки газотермических покрытий из порошков на железной основе после оплавления с модифицирующими обмазками на их микротвердость и микроструктуру и пористость. Выявлены условия получения покрытий с наиболее равномерным распределением легирующих веществ. Изучены характеристики изменения пористости покрытия системы Fe–Cr–B–Si от скорости движения, диаметра и температуры пятна лазерного луча.

Ключевые слова: лазерная обработка, покрытие, легирование, пористость.

Ил. 4. Табл. 1. Библиогр.: 4 назв.