

УДК 539.376:539.4.014.13

РЕЛАКСАЦИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЕННОМ ЦИЛИНДРЕ В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ ПРИ ЖЕСТКИХ ОГРАНИЧЕНИЯХ НА ЛИНЕЙНЫЕ И УГЛОВЫЕ ДЕФОРМАЦИИ

© 2021 г. Е. Е. Деревянка^а, В. П. Радченко^{а,*}, В. В. Цветков^{а,**}

^а Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

*e-mail: radchenko.vp@samgtu.ru

**e-mail: vi.v.tsvetkoff@gmail.com

Поступила в редакцию 28.05.2020 г.

После доработки 18.06.2020 г.

Принята к публикации 13.07.2020 г.

Разработан метод решения краевой задачи релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненном сплошном цилиндре в условиях ползучести при жестко зафиксированных первоначально заданных осевой деформации и угле закручивания, включающий феноменологическую методику реконструкции напряженно-деформированного состояния после упрочнения и его кинетику на фоне релаксации осевой нагрузки и крутящего момента вследствие ползучести. В качестве иллюстрации метода рассмотрен цилиндрический образец из сплава ЖС6КП после пневмодробеструйной обработки. Выполнено детальное исследование релаксации остаточных напряжений для различных комбинаций первоначально заданных и зафиксированных осевой и угловой деформаций при температуре 900°C. Приведены результаты сравнительного анализа полученных данных с данными по релаксации остаточных напряжений в условиях чисто температурного нагружения при отсутствии механических нагрузок.

Ключевые слова: остаточные напряжения, поверхностное пластическое упрочнение, сплошной цилиндрический образец, первоначальные осевые и угловые деформации, жесткое защемление, ползучесть, релаксация

DOI: 10.31857/S057232992103003X

Введение. Поверхностное упрочнение деталей, являющееся штатной технологией в авиадвигателестроении, энергетическом машиностроении, самолетостроении и других отраслях, является одним из методов повышения показателей надежности изделий (предела сопротивления усталости, износостойкости, микротвердости и других характеристик). Положительное влияние поверхностного пластического деформирования связывают с созданием в тонком приповерхностном слое сжимающих остаточных напряжений (ОН), с которыми и связывают повышение ресурса упрочненных деталей по сравнению с неупрочненными. Это показано в необозримом количестве публикаций отечественных и зарубежных исследователей, например, в [1–4] и многих других.

Одной из важных задач является реконструкция напряженно-деформированного состояния после процедуры упрочнения, поскольку эта информация является решающей при разработке методов решения краевых задач для упрочненных элементов конструкций в условиях ползучести. Различные экспериментальные методы применительно к цилиндрическим и призматическим деталям позволяют определить распре-

деление лишь одной или двух компонент тензора ОН по глубине упрочненного слоя [2], но не позволяют установить распределение компонент тензора остаточных пластических деформаций (ПД).

Развитие теоретических методов реконструкции полей ОН и ПД на основе непосредственного моделирования конкретного технологического процесса, в первую очередь, связано с появлением мощных вычислительных комплексов, что и стимулировало появление ряда работ, в которых рассмотрено решение контактных динамических и квазистатических упругопластических задач [5–7]. Однако учесть в полном объеме все параметры технологий упрочнения поверхности деталей практически невозможно. Поэтому полученные результаты носят преимущественно качественный характер.

Второй важной проблемой является оценка кинетики наведенных остаточных напряжений в поле температурно-силовых (эксплуатационных) нагрузок, поскольку вследствие деформации ползучести происходит релаксация ОН. Как следствие, возникает необходимость разработки методов решения краевых задач с начальным напряженно-деформированным состоянием в условиях ползучести. Анализ публикаций свидетельствует, что данная тематика находится в стадии становления и развивается в основном в научной школе Самарского государственного технического университета при участии авторов настоящей статьи. Выделим здесь работу [8], в которой реализован метод решения краевой задачи релаксации ОН в упрочненном цилиндре при действии растягивающей осевой нагрузки и крутящего момента. Однако в прикладных исследованиях возникают задачи и другого рода, когда поверхностно упрочненные стержни в начальный момент получают осевые и окружные деформации, которые в дальнейшем жестко фиксируются. Техническим примером такого режима эксплуатации являются бандажированные рабочие лопатки компрессора и турбины авиационного двигателя (разумеется, с более сложной геометрической конструкцией). В связи с вышеизложенным целью настоящей работы является обобщение метода, предложенного в [8], на случай релаксации ОН в сплошном поверхностно упрочненном цилиндрическом образце в условиях ползучести при жестких (зафиксированных) ограничениях на линейные и угловые деформации.

1. Постановка задачи. Рассматривается сплошной цилиндрический образец радиуса R , в поверхностном слое которого методом поверхностного пластического деформирования наведены ОН и ПД при нормальной (“комнатной”) температуре $T = T_0$. На первом этапе решается обратная краевая задача реконструкции полей ОН и ПД по частично известной (экспериментальной) информации об одной или двух (в зависимости от технологии упрочнения) компонентах тензора ОН. Далее происходит изменение температуры до рабочей $T = T_1 (T_1 > T_0)$; прикладываются осевая растягивающая нагрузка F_0 и крутящий момент M_0 , приводящие к линейной однородной осевой и угловой деформациям (соответственно), которые в дальнейшем жестко фиксируются. Затем решается краевая задача о релаксации усилий $F = F(t)$ ($F(0) = F_0$) и $M = M(t)$ ($M(0) = M_0$), на фоне которой происходит релаксация ОН в приповерхностном слое цилиндра вследствие ползучести материала. Рассматривается осесимметричная постановка в цилиндрической системе координат (r, θ, z) , поэтому все компоненты тензоров напряжений и деформаций зависят лишь от координаты $r \in [0, R]$.

2. Реконструкция напряженно-деформированного состояния в сплошном цилиндре после процедуры упрочнения. Первый этап решения поставленной задачи состоит в реконструкции полей ОН и ПД после упрочнения. Обозначим через σ_r^{res} , $\sigma_\theta^{\text{res}}$, σ_z^{res} радиальную, окружную и осевую компоненты тензора ОН, а через q_r , q_θ , q_z соответствующие компоненты тензора ПД. Для определения ОН и ПД воспользуемся феноменологическим методом [9], исходной информацией для которого в зависимости

сти от технологии упрочнения являются одна ($\sigma_\theta^{\text{res}}$) или две ($\sigma_\theta^{\text{res}}$ и σ_z^{res}) экспериментально определенные эпюры ОН по глубине упрочненного слоя.

Как и для любой обратной краевой задачи, необходимо ввести ряд ограничений на компоненты тензоров ОН и ПД для получения единственного решения. В данном методе вводятся следующие гипотезы: 1) недиагональные компоненты тензоров ОН и ПД на порядок и более меньше (по модулю) нормальных компонент [10], поэтому ими можно пренебречь; 2) осевая и окружная компоненты тензора ПД пропорциональны: $q_z(r) = \alpha q_\theta(r)$, где α — феноменологический параметр анизотропии упрочнения [9]; 3) в области сжатия материала вторичные пластические деформации отсутствуют. Тогда для компонент тензоров ОН и ПД справедливы следующие соотношения [9]:

$$\sigma_r^{\text{res}}(r) = \frac{1}{r} \int_0^r \sigma_\theta^{\text{res}}(\xi) d\xi \quad (2.1)$$

$$q_\theta(r) = \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{E_0(1+\alpha\mu)^2} r^{-\nu} \int_0^r \xi^{\nu-1} [\sigma_r^{\text{res}}(\xi) + (1+\alpha)\sigma_\theta^{\text{res}}(\xi)] d\xi - \\ - \frac{1+\mu}{E_0(1+\alpha\mu)} [(1-\mu)\sigma_\theta^{\text{res}}(r) - \mu\sigma_r^{\text{res}}(r)], \quad \nu = \frac{2+\alpha}{1+\alpha\mu} \quad (2.2)$$

$$q_z(r) = \alpha q_\theta(r), \quad q_r(r) = -(1+\alpha)q_\theta(r) \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_z^0 = \frac{2}{R^2} \int_0^R r [q_z(r) - \frac{\mu}{E_0} [\sigma_r^{\text{res}}(r) + \sigma_\theta^{\text{res}}(r)]] dr \quad (2.4)$$

$$\sigma_z^{\text{res}}(r) = E_0[\varepsilon_z^0 - q_z(r)] + \mu[\sigma_r^{\text{res}}(r) + \sigma_\theta^{\text{res}}(r)] \quad (2.5)$$

где E_0 — модуль Юнга материала при температуре упрочнения T_0 , μ — коэффициент Пуассона.

Искомые компоненты тензоров ОН и ПД в поверхностно упрочненном сплошном цилиндре определяются в следующей последовательности:

$$\sigma_\theta^{\text{res}}(r), \quad \alpha \xrightarrow{(2.1)} \sigma_r^{\text{res}}(r) \xrightarrow{(2.2)} q_\theta(r) \xrightarrow{(2.3)} q_r(r) \\ q_z(r) \xrightarrow{(2.4)} \varepsilon_z^0 \xrightarrow{(2.5)} \sigma_z^{\text{res}}(r) \quad (2.6)$$

здесь над стрелками указаны номера формул, по которым рассчитываются соответствующие величины.

Исходной информацией для применения схемы (2.6) являются зависимость для окружной компоненты тензора остаточных напряжений $\sigma_\theta^{\text{res}} = \sigma_\theta^{\text{res}}(r)$ и параметр анизотропии упрочнения α .

Экспериментальными методами распределение компоненты $\sigma_\theta^{\text{res}} = \sigma_\theta^{\text{res}}(r)$ можно определить лишь в тонком поверхностном слое. Для получения непрерывных полей ОН и ПД по схеме (2.6) эту информацию необходимо экстраполировать на всю область интегрирования $r \in [0, R]$. Для этого предлагается следующая аппроксимация:

$$\sigma_\theta^{\text{res}}(r) = \sigma_0 - \sigma_1 \exp\left(-\frac{(R-h^*-r)^2}{b^2}\right) \quad (2.7)$$

где σ_0 , σ_1 , h^* , b — параметры, подлежащие определению.

Методика идентификации параметра α также изложена в работе [9], причем для методов изотропного упрочнения поверхности (пневмодробеструйная обработка, ультразвуковое упрочнение и др.) величина $\alpha = 1$ и эпюры напряжений $\sigma_\theta^{\text{res}} = \sigma_\theta^{\text{res}}(r)$ и

$\sigma_z^{\text{res}} = \sigma_z^{\text{res}}(r)$ практически совпадают, а для методов анизотропного упрочнения (обкатка роликом, алмазное выглаживание и др.) параметр $\alpha \neq 1$ и наблюдается существенное различие эпюр осевой и окружной компонент тензора ОН в упрочненном слое [9].

3. Определение характеристик напряженно-деформированного состояния в поверхностно упрочненном сплошном цилиндре при температурно-силовом нагружении. Вначале рассмотрим режим температурного нагружения цилиндрического образца с температуры при упрочнении T_0 (как правило, “комнатная” температура), при которой модуль Юнга материала равен E_0 , до температуры “эксплуатации” T_1 ($T_1 > T_0$), при которой в материале развиваются деформации ползучести и которой соответствует значение модуля Юнга E_1 ($E_1 < E_0$).

Предполагая, что при температурном нагружении дополнительных пластических деформаций не возникает, а, следовательно, величина $q_\theta = q_\theta(r)$ не зависит от температуры, запишем соотношение (2.2) для момента полного прогрева образца до температуры T_1 в виде

$$q_\theta(r) = \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{E_1(1+\alpha\mu)^2} r^{-\nu} \int_0^r \xi^{\nu-1} \frac{E_1}{E_0} [\sigma_r^{\text{res}}(\xi) + (1+\alpha)\sigma_\theta^{\text{res}}(\xi)] d\xi - \frac{1+\mu}{E_1(1+\alpha\mu)} \frac{E_1}{E_0} [(1-\mu)\sigma_\theta^{\text{res}}(r) - \mu\sigma_r^{\text{res}}(r)] \quad (3.1)$$

Соотношение (3.1) по форме будет аналогично (2.2), если все эпюры ОН после процедуры упрочнения умножить на коэффициент E_1/E_0 . Таким образом, получаем распределения ОН при температуре T_1 . Отметим, что температурные деформации здесь не учитываются, поскольку мы условно считаем, что прогрев образца выполнен мгновенно, а однородное температурное поле приводит лишь к объемному изменению геометрии образца и не влияет на напряженное состояние.

Теперь рассмотрим нагружение упрочненного цилиндра в момент времени $t = 0 + 0$ осевой силой F_0 и крутящим моментом M_0 . Предполагается, что при повторной нагрузке цилиндрического образца (после упрочнения) его материал находится в упругой области. При этом происходит ступенчатое изменение осевого и касательного напряжений на величину “рабочих” напряжений, возникающих за счет внешних нагрузок, и напряженное состояние задается соотношениями:

$$\begin{aligned} \sigma_z(r, 0+0) &= \frac{E_1}{E_0} \sigma_z^{\text{res}}(r) + \frac{F_0}{\pi R^2}, & \sigma_\theta(r, 0+0) &= \frac{E_1}{E_0} \sigma_\theta^{\text{res}}(r) \\ \sigma_r(r, 0+0) &= \frac{E_1}{E_0} \sigma_r^{\text{res}}(r), & \tau(r, 0+0) &= \frac{M_0}{J} r \end{aligned} \quad (3.2)$$

а компоненты тензора полных деформаций будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon_i(r, 0+0) &= \frac{1}{E_1} [(1+\mu)\sigma_i(r, 0+0) - \mu\sigma^*] + q_i(r) \quad (i = r, \theta, z) \\ \gamma(r, 0+0) &= \frac{\tau(r, 0+0)}{G_1}, & G_1 &= \frac{E_1}{2(1+\mu)} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Здесь и далее через $\sigma_i = \sigma_i(r, t)$ и $\varepsilon_i = \varepsilon_i(r, t)$ ($i = r, \theta, z$) обозначены зависимости для компонент тензоров напряжений и полных деформаций от пространственной и временной координат; $\sigma^* = \sigma_z(r, 0+0) + \sigma_\theta(r, 0+0) + \sigma_r(r, 0+0)$; $\tau(r, t) = \sigma_{\theta z}(r, t)$ – касательное напряжение; $\gamma(r, t) = 2\varepsilon_{\theta z}(r, t)$ – деформация сдвига; $J = \pi R^4/2$ – момент

инерции сечения относительно оси цилиндра, G_1 — модуль сдвига материала при температуре T_1 .

Для описания процесса релаксации остаточных напряжений, осевой силы и крутящего момента необходимо решить краевую задачу ползучести поверхностно упрочненного цилиндра при температуре T_1 в режиме жесткого ограничения на осевую деформацию и угол поворота с начальным напряженно-деформированным состоянием, определяемым напряжениями (3.2) и деформациями (3.3).

4. Методика решения краевой задачи ползучести поверхностно упрочненного сплошного цилиндра, нагруженного осевой силой и крутящим моментом, в режиме жесткого ограничения на линейные и угловые деформации. Опишем процесс релаксации остаточных напряжений, осевой силы $F = F(t)$ и крутящего момента $M = M(t)$ в процессе ползучести поверхностно упрочненного сплошного цилиндра в режиме жесткого нагружения, когда заданы полная осевая деформация $\varepsilon_z(r, t) = \varepsilon_z(r, 0 + 0) = \varepsilon_z^* = \text{const}$ и относительный угол закручивания $\varphi(t) = \varphi(0 + 0) = \varphi^* = \text{const}$. Постановка соответствующей краевой задачи ползучести включает в себя следующие соотношения:

— уравнения равновесия:

$$r \frac{d\sigma_r(r, t)}{dr} + \sigma_r(r, t) = \sigma_\theta(r, t) \quad (4.1)$$

$$2\pi \int_0^R \sigma_z(r, t) r dr = F(t) \quad (4.2)$$

$$2\pi \int_0^R \tau(r, t) r^2 dr = M(t) \quad (4.3)$$

— уравнение совместности деформаций:

$$r \frac{d\varepsilon_\theta(r, t)}{dr} + \varepsilon_\theta(r, t) = \varepsilon_r(r, t) \quad (4.4)$$

— гипотеза плоских сечений:

$$\varepsilon_z(r, t) = \varepsilon_z^* \quad (4.5)$$

— гипотеза прямых радиусов:

$$\gamma(r, t) = r\varphi^*, \quad (4.6)$$

где $\varphi^* = \gamma(r, 0 + 0)/r = \text{const}$;

— краевые условия:

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{d\sigma_r(r, t)}{dr} = 0, \quad \sigma_r(R, t) = 0 \quad (4.7)$$

Поскольку время t входит в соотношения (4.1)–(4.7) параметрически, здесь и в дальнейшем для производных компонент тензоров напряжений и деформаций по r используется оператор полной производной.

Опишем процесс релаксации остаточных напряжений вследствие ползучести при температуре $T = T_1$. Запишем соотношения для компонент тензора полных деформаций в виде

$$\varepsilon_i(r, t) = e_i(r, t) + q_i(r) + p_i(r, t) \quad (i = r, \theta, z) \quad (4.8)$$

$$\gamma(r, t) = \gamma^e(r, t) + \gamma^p(r, t) \quad (4.9)$$

где $e_z, e_\theta, e_r, \gamma^e$ – компоненты тензора упругих деформаций; $p_z, p_\theta, p_r, \gamma^p$ – компоненты тензора деформаций ползучести. При этом в начальный момент времени компоненты тензора деформаций ползучести равны нулю для всех $r \in [0, R]$:

$$p_z(r, 0) = 0; \quad p_\theta(r, 0) = 0; \quad p_r(r, 0) = 0; \quad \gamma^p(r, 0) = 0$$

Задача сводится к разрешению системы (4.8), (4.9) относительно компонент тензора напряжений.

Запишем закон Гука для упругих деформаций:

$$e_i(r, t) = \frac{1}{E_1} [(1 + \mu) \sigma_i(r, t) - \mu \bar{\sigma}] \quad (i = r, \theta, z) \quad (4.10)$$

$$\gamma^e(r, t) = \frac{1}{G_1} \tau(r, t) \quad (4.11)$$

где $\bar{\sigma} = \sigma_z(r, t) + \sigma_\theta(r, t) + \sigma_r(r, t)$.

Подставляя (4.5) и (4.10) при $i = z$ в соотношение (4.8) при $i = z$, находим зависимость для осевой компоненты тензора напряжений:

$$\sigma_z(r, t) = E_1 [\varepsilon_z^* - q_z(r) - p_z(r, t)] + \mu [\sigma_\theta(r, t) + \sigma_r(r, t)] \quad (4.12)$$

Применяя далее методику работы [8], в которой реализован метод решения краевой задачи релаксации ОН в упрочненном цилиндре при действии растягивающей осевой нагрузки и крутящего момента, с использованием (4.1), (4.4), (4.5), (4.12) в системе уравнений (4.8), (4.9) последовательно исключаются компоненты тензора напряжений σ_θ и σ_z . В итоге получаем неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка относительно σ_r :

$$r^2 \frac{d^2 \sigma_r(r, t)}{dr^2} + 3r \frac{d \sigma_r(r, t)}{dr} = g(r, t) \quad (4.13)$$

с правой частью

$$g(r, t) = \frac{E_1}{1 - \mu^2} \left[\frac{2 + \alpha}{1 + \alpha} q_r(r) + p_r(r, t) - p_\theta(r, t) - \right. \\ \left. - r \left(\frac{dp_\theta(r, t)}{dr} + \mu \frac{dp_z(r, t)}{dr} \right) + \frac{r(1 + \alpha\mu)}{1 + \alpha} \frac{dq_r(r)}{dr} \right]$$

Решение уравнения (4.13) при граничных условиях (4.7) записывается следующим образом:

$$\sigma_r(r, t) = - \int_r^R \frac{1}{\xi^3} \int_0^\xi g(\eta, t) \eta d\eta d\xi$$

При известном σ_r из уравнения (4.1) находим зависимость для окружной компоненты тензора напряжений:

$$\sigma_\theta(r, t) = \frac{d}{dr} [r \sigma_r(r, t)]$$

Зная величины σ_r и σ_θ можно определить σ_z по формуле (4.12) и далее – значение $F(t)$ из уравнения (4.2).

Подставляя (4.11) в соотношение (4.9) с учетом (4.6), получаем распределение касательной компоненты тензора напряжений:

$$\tau(r, t) = G_1 [r \varphi^* - \gamma^p(r, t)]$$

после чего определяем величину $M(t)$ из соотношения (4.3).

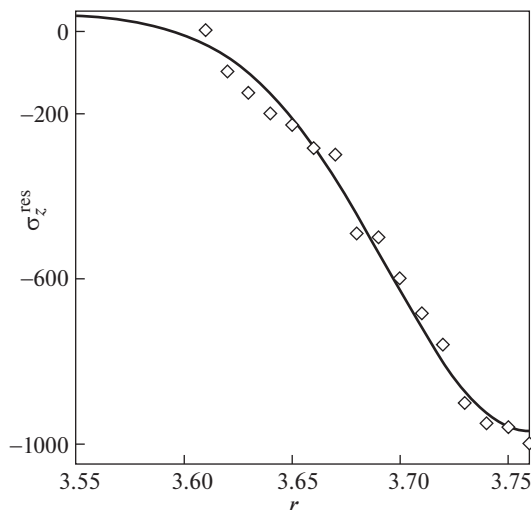


Рис. 1

5. Результаты расчетов и их анализ. В модельных расчетах использовались цилиндрические образцы из сплава ЖС6КП радиуса $R = 3.76$ мм ($r \in [0, 3.76]$ мм), упрочненные пневмодробеструйной обработкой поверхности, которая является штатной технологией упрочнения деталей из этого сплава, например, в двигателестроении.

В расчетах полагалось $T_0 = 20^\circ\text{C}$, $T_1 = 900^\circ\text{C}$, $E_0 = 2 \times 10^5$ МПа, $E_1 = 1.364 \times 10^5$ МПа, $\mu = 0.3$. В качестве исходной информации использовались экспериментальные данные для компоненты $\sigma_z^{\text{res}} = \sigma_z^{\text{res}}(r)$ в поверхностном слое, приведенные в работе [8]. При пневмодробеструйной обработке поверхности коэффициент анизотропии упрочнения $\alpha = 1$ и эпюры для окружных и осевых ОН близки. Поэтому для идентификации параметров аппроксимации (2.7) в первом приближении использовались экспериментальные данные для осевой компоненты тензора ОН (точки на рис. 1). Затем параметры σ_0 , σ_1 и b в (2.7) варьировались, и для каждого набора значений реализовывался алгоритм (2.6) до достижения минимума функционала среднеквадратического отклонения расчетных данных для σ_z^{res} от экспериментальных значений. В результате получены следующие значения параметров аппроксимации (2.7) для $\sigma_\theta^{\text{res}}$: $\sigma_0 = 22.554$ МПа, $\sigma_1 = 1027.454$ МПа и $b = 9.313 \times 10^{-2}$ мм. Величина $h^* = 0$ изначально, поскольку $h^* \neq 0$ только в случае, если экстремум зависимости $\sigma_\theta^{\text{res}} = \sigma_\theta^{\text{res}}(r)$ находится не на поверхности, а в подповерхностном слое [9]. На рис. 1 сплошной линией показана зависимость для $\sigma_z^{\text{res}} = \sigma_z^{\text{res}}(r)$ (МПа).

Для моделирования процесса релаксации ОН и усилий $F = F(t)$ и $M = M(t)$ использовалась теория установившейся ползучести:

$$\dot{\rho}_{ij} = \frac{3}{2} c S^{m-1} \left(\sigma_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \sigma_{kk} \right) \quad (i, j, k = 1, 2, 3) \quad (5.1)$$

где S – интенсивность напряжений; c , m – константы материала. Для сплава ЖС6КП при температуре $T_1 = 900^\circ\text{C}$ имеем [8]: $c = 1.5 \times 10^{-20}$ (МПа) $^{-m}$ ч $^{-1}$, $m = 6.62$.

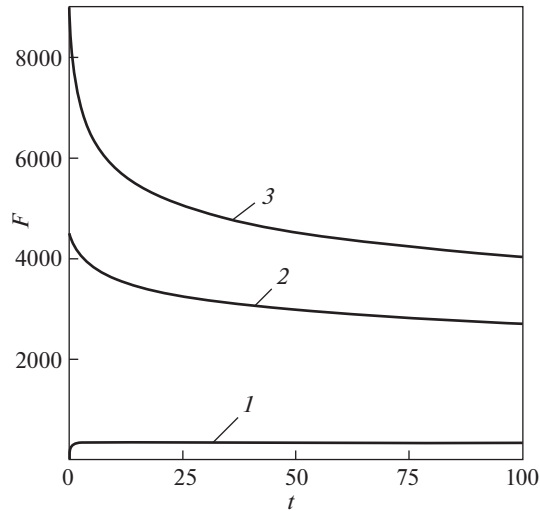


Рис. 2

Отметим, что задача ползучести решалась численно известным методом — “шагами по времени” [8], при этом соотношения (5.1) интегрировались по методу Эйлера.

Расчеты выполнены при различных комбинациях первоначальных растягивающей нагрузки F_0 и закручивающего момента M_0 . На рис. 2 приведена типичная картина релаксации осевого усилия $F = F(t)$ ($t \in [0, 100]$ ч) при фиксированном значении первоначального угла закручивания моментом $M_0 = 16700 \text{ Н} \cdot \text{мм}$. Сплошные линии 1, 2, 3 соответствуют значениям $F = F(t)$ при первоначальных значениях $F_0 = \{0, 4441.5, 8882.9\} \text{ Н}$ соответственно.

На рис. 3 в качестве иллюстрации результатов расчетов сплошными линиями приведено типичное распределение $\sigma_z = \sigma_z(r, t)$ (МПа) при $F_0 = 8882.9 \text{ Н}$, $M_0 = 16700 \text{ Н} \cdot \text{мм}$ в различные моменты времени. Цифра 1 соответствует исходному состоянию после упрочнения ($t = 0 - 0$), цифра 2 — температурному нагружению, цифра 3 — силовому нагружению ($t = 0 + 0$), цифры 4 и 5 — моментам времени $t = 20$ ч и $t = 100$ ч соответственно. Здесь же штриховыми линиями показано распределение этой же компоненты тензора ОН в условиях чистой термоэкспозиции при $T_1 = 900^\circ\text{C}$.

На рис. 4 сплошными линиями приведены зависимости для напряжения $\sigma_z = \sigma_z(R, t)$ (МПа) на поверхности цилиндра после температурно-силового нагружения при $t \in [0, 100]$ ч (цифры 1, 2, 3 соответствуют режимам нагружения на рис. 2). Здесь же для сравнения штриховой линией показана зависимость для этого же напряжения в условиях термоэкспозиции (чисто температурное нагружение при $F_0 = 0$, $M_0 = 0$ и $T_1 = 900^\circ\text{C}$). Отметим, что для окружной компоненты происходит ступенчатое изменение ее величины лишь вследствие изменения температуры, а при приложении внешних силовых возмущений ступенчатого изменения $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r, t)$ не происходит, в отличие от компоненты $\sigma_z = \sigma_z(r, t)$.

Детально выполненное параметрическое исследование задачи релаксации ОН σ_z , σ_θ , σ_r показало несущественное влияние первоначально заданных (и жестко зафиксиро-

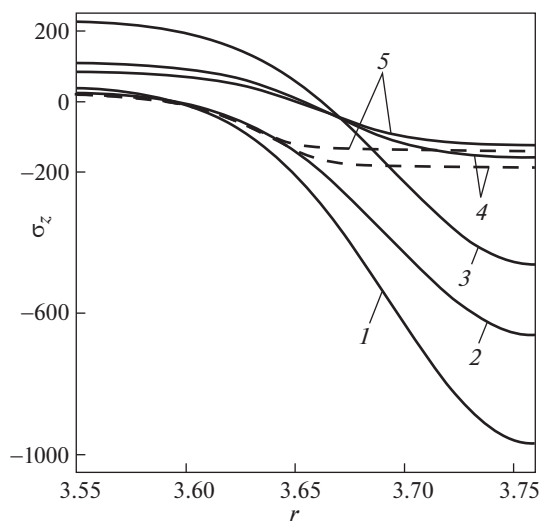


Рис. 3

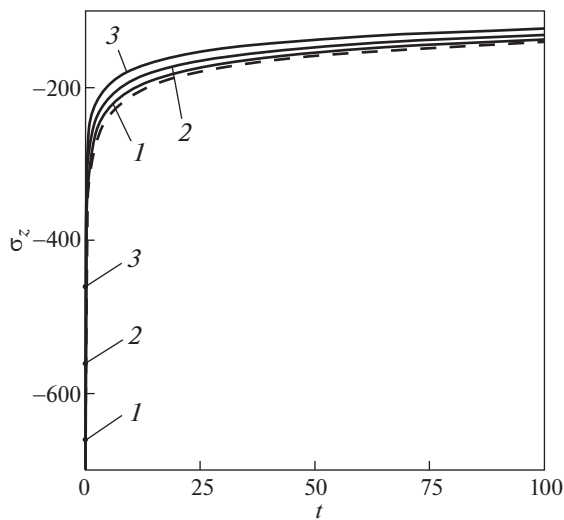


Рис. 4

рованных) упругих осевой и угловой деформаций на кинетику всех компонент тензора ОН.

Выводы. Разработана методика решения краевых задач релаксации ОН в поверхностно упрочненных сплошных цилиндрах в условиях ползучести с начальным напряженно-деформированным состоянием (НДС), вызванным заданными (и жестко зафиксированными) осевой и угловой деформациями. Анализ модельных расчетов для упрочненных образцов из сплава ЖС6КП при $T = 900^\circ\text{C}$ показал незначительное влияние первоначального НДС на процесс релаксации ОН по отношению к случаю

чистой термоэкспозиции, что является позитивным фактором в прикладном плане с точки зрения инженерной практики, например, в авиадвигателестроении, где поверхностное пластическое упрочнение является штатной технологической операцией.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00062).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. М.: Машиностроение, 1988. 240 с.
2. Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Вакулюк В.С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочненных деталей по остаточным напряжениям. Самара: СНЦ РАН, 2012. 125 с.
3. Altenberger I., Nalla R.K., Sano Y., Wagner L., Ritchie R. O. On the effect of deep-rolling and laser-peening on the stress-controlled low- and high-cycle fatigue behavior of Ti–6Al–4V at elevated temperatures up to 550°C // *Int. J. Fatigue*. 2012. V. 44. P. 292–302.
4. Terres M.A., Laalai N., Sidhom H. Effect of nitriding and shot-peening on the fatigue behavior of 42CrMo4 steel: Experimental analysis and predictive approach // *Mater. Des.* 2012. V. 35. P. 741–748.
5. Келлер И.Э., Трофимов В.Н., Владыкин А.В., Плюснин В.В., Петухов Д.С., Виндокуров И.В. К вопросу о реконструкции остаточных напряжений и деформаций пластины после дробеструйной обработки // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*. 2018. Т. 22. № 1. С. 40–64.
6. Jebahi M., Gakwaya A., Lévesque J., Mechri O., Ba K. Robust methodology to simulate real shot peening process using discrete-continuum coupling method // *Int. J. Mech. Sci.* 2016. V. 107. P. 21–33.
7. Gallitelli D., Boyer V., Gelineau M., Colaitis Y., Rouhaud E., Retraint D., Kubler R., Desvignes M., Barrallier L. Simulation of shot peening: From process parameters to residual stress fields in a structure // *Comptes Rendus Mécanique*. 2016. V. 344. № 4–5. P. 355–374.
8. Радченко В.П., Цветков В.В. Кинетика напряженно-деформированного состояния в поверхностно упрочненном цилиндрическом образце при сложном напряженном состоянии в условиях ползучести // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки*. 2014. № 1. С. 93–108.
9. Радченко В.П., Павлов В.Ф., Саушкин М.Н. Исследование влияния анизотропии поверхностного пластического упрочнения на распределение остаточных напряжений в полых и сплошных цилиндрических образцах // *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2015. № 1. С. 130–147.
10. Радченко В.П., Павлов В.Ф., Саушкин М.Н. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния в поверхностно упрочненных втулках с учетом остаточных касательных напряжений // *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2019. № 1. С. 138–150.