

УДК 539.376:621.787

РЕЛАКСАЦИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЕННОМ ПРИЗМАТИЧЕСКОМ ОБРАЗЦЕ В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ ПРИ ДВУХОСНОМ НАГРУЖЕНИИ

В. П. Радченко, Т. И. Бербасова, Д. М. Шишкин

Самарский государственный технический университет, 443100 Самара, Россия
E-mails: radchenko.vp@samgtu.ru, t.i.ber@yandex.ru, shishkin.dim@yandex.ru

Разработана математическая модель для расчета релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненном призматическом образце в условиях ползучести при двухосном нагружении. Проведена проверка адекватности результатов расчета экспериментальным данным для поверхностно упрочненного образца из сплава ЭП742 после ультразвукового упрочнения в условиях ползучести при температуре 650 °С и длительности испытаний 100 ч. Выполнен детальный теоретический анализ влияния вида напряженного состояния на релаксацию остаточных напряжений при термоэкспозиции (температурная выдержка в отсутствие механических нагрузок) и в условиях двухосного нагружения при постоянной интенсивности внешних напряжений. Показано, что при всестороннем растяжении в условиях плоского напряженного состояния наблюдается замедление процесса релаксации остаточных напряжений, а при сжатии — увеличение скорости релаксации по сравнению со случаем термоэкспозиции.

Ключевые слова: призматический образец, поверхностное пластическое деформирование, остаточные напряжения, ползучесть, релаксация, двухосное нагружение.

DOI: 10.15372/PMTF20210518

Введение. Поверхностное пластическое деформирование является типичным технологическим процессом в авиадвигателестроении, энергетическом машиностроении и других отраслях промышленности. Применение поверхностного пластического деформирования способствует повышению таких показателей надежности упрочненных деталей, как предел сопротивления усталости, микротвердость и т. д., что отмечалось в большом количестве работ [1–7].

Однако условия эксплуатации элементов конструкций при повышенных температурах оказывают существенное влияние на состояние поверхностного упрочненного слоя, что приводит к релаксации остаточных напряжений (уменьшению их по модулю). Поскольку величина упрочнения зависит от величины сжимающих остаточных напряжений, возникает задача разработки методов расчета релаксации остаточных напряжений.

В настоящей работе в рамках механики сплошных сред релаксация остаточных напряжений рассматривается как явление, вызванное ползучестью материала при высоких температурах. Если задача восстановления полей остаточных напряжений и пластических деформаций после упрочнения решается с использованием расчетно-экспериментальных

методов [6, 8–11] или сводится к решению контактных динамических или квазистатических упругопластических задач [12, 13], то решение задачи о релаксации наведенных остаточных напряжений в условиях высокотемпературной ползучести пока не найдено. Можно указать лишь ряд работ, в которых построены математические модели релаксации остаточных напряжений в сплошных и полых цилиндрических изделиях [10, 14–16], при этом практически отсутствуют аналогичные модели для поверхностно упрочненных плоских деталей.

Целью данной работы является разработка метода расчета релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненном призматическом образце вследствие ползучести при двухосном нагружении, а также исследование влияния вида напряженного состояния, обусловленного внешними нагрузками, на процесс релаксации остаточных напряжений. Следует отметить, что в частном случае термоэкспозиции (температурное нагружение в отсутствие внешних сил) эта задача рассматривалась в работах [17, 18].

1. Решение задачи восстановления остаточного напряженно-деформированного состояния в призматическом образце после упрочнения. Рассматривается призматический образец, одна грань которого упрочнена с использованием метода поверхностного пластического деформирования. Введем декартову систему координат, в которой плоскость xOy совмещена с упрочненной поверхностью, а ось Oz направлена вглубь упрочненного слоя (рис. 1). В работе [9] показано, что компоненты тензора остаточных напряжений зависят только от координаты z , при этом отличны от нуля только компоненты $\sigma_x = \sigma_x(z)$ и $\sigma_y = \sigma_y(z)$. Далее для компонент тензоров остаточных пластических деформаций, упругих и полных деформаций используются обозначения $q_i = q_i(z)$, $e_i = e_i(z)$, $\varepsilon_i = \varepsilon_i(z)$ ($i = x, y, z$) соответственно. Так как на начальном этапе внешние напряжения σ_x^0, σ_y^0 (см. рис. 1), приложенные на гранях $DCKL$ и $ABCD$ соответственно, равны нулю, то в силу того, что толщина упрочненного слоя мала по сравнению с толщиной пластины H , можно принять гипотезу

$$\varepsilon_x(z) = \varepsilon_y(z) = 0. \quad (1.1)$$

Как и в работах [9, 17, 18], будем использовать гипотезу анизотропного упрочнения в виде

$$q_x(z) = \alpha q_y(z), \quad (1.2)$$

где $\alpha = \text{const}$ — феноменологический параметр анизотропии упрочнения.

С учетом равенства $\varepsilon_i(z) = e_i(z) + q_i(z)$ ($i = x, y, z$), гипотезы пластической несжимаемости $q_x(z) + q_y(z) + q_z(z) = 0$, условий (1.1), (1.2) и закона Гука получаем соотношения

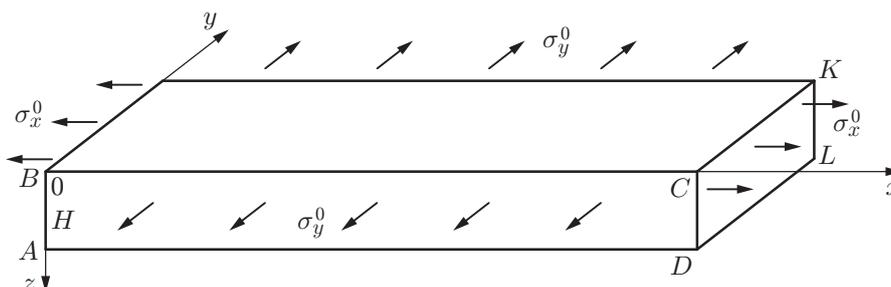


Рис. 1. Схема нагружения упрочненного призматического образца

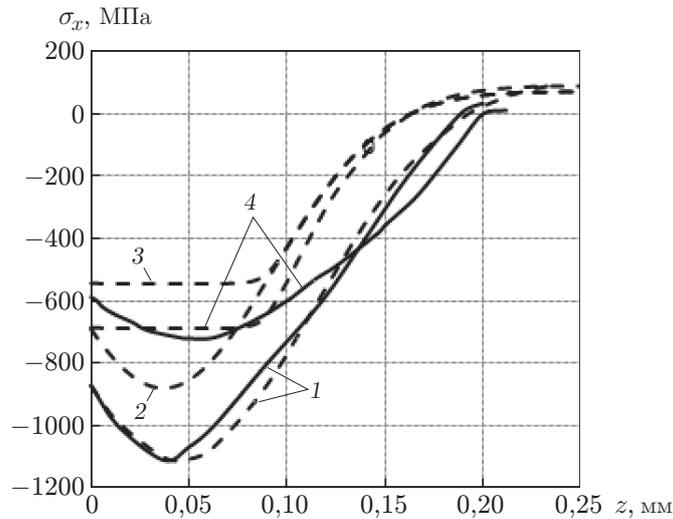


Рис. 2. Расчетные (штриховые линии) и экспериментальные (сплошные линии) зависимости $\sigma_x = \sigma_x(z, t)$ в процессе ползучести при термоэкспозиции: 1 — после упрочнения ($t = 0 - 0$), 2 — после температурного нагружения ($t = 0 + 0$), 3 — после процесса ползучести в течение 100 ч, 4 — после процесса ползучести и температурной разгрузки

$$\begin{aligned} \sigma_y &= \frac{1 + \alpha\nu}{\alpha + \nu} \sigma_x, & q_x &= -\frac{\alpha(1 - \nu^2)}{E(\alpha + \nu)} \sigma_x, \\ \sigma_y &= -\frac{1 - \nu^2}{E(\alpha + \nu)} \sigma_x, & q_z &= \frac{(1 + \alpha)(1 - \nu^2)}{E(\alpha + \nu)} \sigma_x, \end{aligned} \quad (1.3)$$

где E — модуль упругости; ν — коэффициент Пуассона. В частном случае изотропного упрочнения (гидро- и пневмодробеструйная обработка поверхности, азотирование и другие технологии) $\alpha = 1$ и соотношения (1.3) упрощаются:

$$\sigma_x = \sigma_y, \quad q_x = q_y = -\frac{1 - \nu}{E} \sigma_x, \quad q_z = -\frac{2(1 - \nu)}{E} \sigma_x. \quad (1.4)$$

Таким образом, если известны величины $\sigma_x = \sigma_x(z)$ и α , то остальные компоненты тензоров остаточных напряжений и пластических деформаций определяются из (1.3) или (1.4). Однако определить распределение компоненты $\sigma_x = \sigma_x(z)$ с использованием экспериментальных методов можно лишь в тонком приповерхностном слое. Для получения зависимостей для этой компоненты в полном объеме образца необходимо экстраполировать экспериментальные данные на всю область интегрирования $z \in [0; H]$. Для этого в [18] предложена следующая аппроксимация:

$$\sigma_x(z) = \sigma_0 - \sigma_1 e^{-(z-z^*)^2/b^2}. \quad (1.5)$$

Здесь $z = z^*$ — значение координаты, при котором достигается локальный минимум эпюры $\sigma_x = \sigma_x(z)$; σ_0, σ_1, b — параметры, методика определения которых описана в [18].

Для реализации изложенного метода восстановления остаточных напряжений и пластических деформаций используем экспериментальные данные работы [18], в которой приведены зависимости $\sigma_x = \sigma_x(z)$ для бруса размером $10 \times 10 \times 100$ мм, изготовленного из сплава ЭП742, после ультразвукового упрочнения (УЗУ) с длительностью обработки поверхности 20, 40, 60, 80 с (четыре режима УЗУ).

Ниже используются экспериментальные данные для первого режима упрочнения (длительность обработки 20 с), показанные на рис. 2 сплошной линией 1. С использованием

методики, предложенной в работе [18], определены параметры аппроксимации (1.5), значения которых равны $\sigma_0 = 119,2$ МПа, $\sigma_1 = 1230,7$ МПа, $b = 0,097$ мм, $z^* = 0,037$ мм. Расчетная зависимость $\sigma_x = \sigma_x(z)$ (см. (1.5)) показана на рис. 2 штриховой линией 1. С учетом того, что при УЗУ параметр анизотропии в (1.2) $\alpha = 1$, по формулам (1.4) определены остальные компоненты тензоров остаточного напряженно-деформированного состояния после упрочнения.

2. Математическая модель релаксации остаточных напряжений в призматическом брус при двухосном нагружении в условиях ползучести. Рассмотрим односторонне упрочненный призматический брус (пластину) в условиях двухосного нагружения равномерно распределенными напряжениями $\sigma_x^0 = \text{const}$ и $\sigma_y^0 = \text{const}$, действующими на гранях $DCKL$ и $ABCD$ (см. рис. 1). Примем гипотезу плоских сечений в виде

$$\varepsilon_x(z, t) = \varepsilon_x^0(t), \quad \varepsilon_y(z, t) = \varepsilon_y^0(t). \quad (2.1)$$

Иными словами, грани $DCKL$ и $ABCD$ (и параллельные им сечения) остаются плоскими в процессе деформирования, их смещения в направлениях осей Ox и Oy зависят только от времени. Тогда в любой момент времени справедливы следующие равенства:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x(z, t) &= e_x(z, t) + q_x(z) + p_x(z, t) = \varepsilon_x^0(t), \\ \varepsilon_y(z, t) &= e_y(z, t) + q_y(z) + p_y(z, t) = \varepsilon_y^0(t). \end{aligned} \quad (2.2)$$

Величины $\varepsilon_x^0(t)$ и $\varepsilon_y^0(t)$ имеют представления

$$\begin{aligned} \varepsilon_x^0(t) &= e_x^0(t) + p_x^0(t) = (\sigma_x^0 - \nu\sigma_y^0)/E_1 + p_x^0(t), \\ \varepsilon_y^0(t) &= e_y^0(t) + p_y^0(t) = (\sigma_y^0 - \nu\sigma_x^0)/E_1 + p_y^0(t), \end{aligned} \quad (2.3)$$

где E_1 — модуль Юнга при температуре, соответствующей процессу ползучести образца. Тогда (2.2) с учетом (2.3) преобразуется к виду

$$\begin{aligned} \frac{1}{E_1} [\sigma_x(z, t) - \nu\sigma_y(z, t)] + q_x(z) + p_x(z, t) &= \frac{\sigma_x^0 - \nu\sigma_y^0}{E_1} + p_x^0(t), \\ \frac{1}{E_1} [\sigma_y(z, t) - \nu\sigma_x(z, t)] + q_y(z) + p_y(z, t) &= \frac{\sigma_y^0 - \nu\sigma_x^0}{E_1} + p_y^0(t). \end{aligned} \quad (2.4)$$

Решая (2.4) относительно $\sigma_x(z, t)$ и $\sigma_y(z, t)$, получаем

$$\begin{aligned} \sigma_x(z, t) &= \sigma_x^0 + \frac{E_1}{1 - \nu^2} [(p_x^0(t) + \nu p_y^0(t)) - (q_x(z) + \nu q_y(z)) - (p_x(z, t) + \nu p_y(z, t))], \\ \sigma_y(z, t) &= \sigma_y^0 + \frac{E_1}{1 - \nu^2} [(p_y^0(t) + \nu p_x^0(t)) - (q_y(z) + \nu q_x(z)) - (p_y(z, t) + \nu p_x(z, t))]. \end{aligned} \quad (2.5)$$

При расчете напряжений $\sigma_x(z, t)$ и $\sigma_y(z, t)$ по формулам (2.5) необходимо знать величины $p_x^0(t)$ и $p_y^0(t)$. Для определения этих величин запишем условие равенства внутренних и внешних сил, действующих в любом сечении, параллельном координатным плоскостям xOz и yOz :

$$\int_0^H \sigma_x(z, t) dz = \int_0^H \sigma_x^0 dz, \quad \int_0^H \sigma_y(z, t) dz = \int_0^H \sigma_y^0 dz. \quad (2.6)$$

Подставляя (2.5) в (2.6), учитывая, что $\sigma_x^0 = \text{const}$, $\sigma_y^0 = \text{const}$, и интегрируя полученные соотношения по переменной $z \in [0, H]$, находим систему двух уравнений относительно $p_x^0(t)$ и $p_y^0(t)$, решение которой имеет вид

$$p_x^0(t) = \int_0^H [q_x(z) + p_x(z, t)] dz, \quad p_y^0(t) = \int_0^H [q_y(z) + p_y(z, t)] dz. \quad (2.7)$$

Объединяя (2.5) и (2.7), получаем систему для расчета кинетики остаточных напряжений $\sigma_x(z, t)$ и $\sigma_y(z, t)$ в процессе ползучести упрочненного образца. Начальные условия для этой системы имеют вид $p_x^0(0) = 0, p_y^0(0) = 0, p_x(z, 0) = 0, p_y(z, 0) = 0$.

Рассмотрим подробно алгоритм решения изложенной задачи определения релаксации остаточных напряжений в упрочненном призматическом образце. На первом этапе ($t = 0 - 0$) восстанавливаются остаточные напряжения после упрочнения: определяется величина $\sigma_x = \sigma_x(z)$ (формула (1.5)) и рассчитываются величины $q_x = q_x(z)$ и $q_y = q_y(z)$ по формулам (1.4) при $\alpha = 1$ (далее полагается, что при $\alpha = 1$ упрочнение, в том числе УЗУ, имеет изотропный характер) с модулем Юнга E_0 для материала при нормальной (комнатной) температуре. На втором этапе ($t = 0$) осуществляется температурное нагружение от температуры T_0 до температуры эксплуатации образца T_1 ($T_1 > T_0$) с модулем Юнга E_1 :

$$\sigma_y(z, 0) = \sigma_x(z, 0) = -\frac{E_1}{1 - \nu} q_x(z).$$

Здесь учтено, что при $\alpha = 1$ выполняется равенство $q_x(z) = q_y(z)$.

На третьем этапе ($t = 0 + 0$) выполняется силовое нагружение напряжениями $\sigma_x^0 = \text{const}$ и $\sigma_y^0 = \text{const}$:

$$\sigma_x(z, 0 + 0) = \sigma_x^0 - \frac{E_1}{1 - \nu} q_x, \quad \sigma_y(z, 0 + 0) = \sigma_y^0 - \frac{E_1}{1 - \nu} q_x.$$

На четвертом этапе проводится расчет релаксации остаточных напряжений в процессе ползучести при $t \in [0, t^*]$, где t^* — время эксплуатации образца при температуре T_1 . На этом этапе расчет осуществляется по формулам (2.5), (2.7). Алгоритм может быть реализован только численно с использованием уравнений выбранной теории ползучести. Для этого используется метод шагов по времени. Осуществляется дискретизация временной координаты $t_i = t_0 + ih$ ($i = 0, 1, 2, \dots; t_0 = 0$); в предположении, что известны значения $\sigma_j(z, t_i), p_j^0(t_i), p_j(z, t_i)$ ($j = x, y$) в момент времени $t = t_i$, находятся приращения деформации ползучести $\Delta p_j(z, t_{i+1})$ на шаге $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$, а затем определяется деформация $p_j(z, t_{i+1}) = p_j(z, t_i) + \Delta p_j(z, t_{i+1})$. На следующем шаге с использованием (2.7) вычисляются значения $p_x^0(t_{i+1}), p_y^0(t_{i+1})$ и подставляются в (2.5) для вычисления $\sigma_x(z, t_{i+1}), \sigma_y(z, t_{i+1})$. В результате для момента времени $t = t^*$ получаем значения $\sigma_x(z, t^*), \sigma_y(z, t^*), p_x^0(t^*), p_y^0(t^*), p_x(z, t^*), p_y(z, t^*)$.

На пятом этапе при $t = t^*$ осуществляется силовая разгрузка, в результате которой находим следующие значения остаточных напряжений:

$$\begin{aligned} \sigma_x(z, t^*) &= \frac{E_1}{1 - \nu^2} \{ [p_x^0(t^*) + \nu p_y^0(t^*)] - (1 + \nu)q_x(z) - [p_x(z, t^*) + \nu p_y(z, t^*)] \}, \\ \sigma_y(z, t^*) &= \frac{E_1}{1 - \nu^2} \{ [p_y^0(t^*) + \nu p_x^0(t^*)] - (1 + \nu)q_x(z) - [p_y(z, t^*) + \nu p_x(z, t^*)] \}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

На последнем, шестом этапе выполняется температурная разгрузка от температуры T_1 до температуры T_0 и с использованием формул (2.8), в которых модуль Юнга E_1 заменяется на E_0 , окончательно определяются поля остаточных напряжений.

В частном случае чистой термоэкспозиции (температурное нагружение при $\sigma_x^0 = \sigma_y^0 = 0$) в алгоритме отсутствуют третий и пятый этапы.

3. Выбор реологической модели. Поскольку деформация ползучести высокопрочных жароустойчивых сплавов, к числу которых относится исследуемый в настоящей работе сплав ЭП742, практически необратима, в качестве основной модели ползучести используется следующий вариант определяющих соотношений, справедливый для плоского напряженного состояния [19]:

$$\begin{aligned}
p_x(t) &= v_x(t) + w_x(t), & v_x(t) &= (1 + \mu'')\beta_x(t) - \mu''(\beta_x(t) + \beta_y(t)), \\
\dot{\beta}_x(t) &= \begin{cases} \lambda B_x(t), & B_x(t)\sigma_x(t) > 0, \\ 0, & B_x(t)\sigma_x(t) \leq 0, \end{cases} & B_x(t) &= a\left(\frac{S(t)}{\sigma^{**}}\right)^{n-1} \frac{\sigma_x(t)}{\sigma^{**}} - \beta_x(t), \\
\dot{w}_x(t) &= c\left(\frac{S(t)}{\sigma^{**}}\right)^{m-1} \frac{\sigma_x(t) - \sigma_y(t)/2}{\sigma^{**}}.
\end{aligned} \tag{3.1}$$

Соотношения для компоненты $p_y(t)$ получаются из (3.1) в результате циклической перестановки индексов x и y ($x \rightleftharpoons y$), компонента $p_z(t)$ не оказывает влияния на перераспределение остаточных напряжений. В (3.1) $p_i(t)$ — полные деформации ползучести; $v_i(t)$ — вязкопластическая компонента (описывает первую стадию ползучести); $w_i(t)$ — компонента вязкого течения (описывает стадию установившейся ползучести); $i = x, y$; σ^{**} , λ , a , c , n , m — параметры модели, методика определения которых изложена в [19]; μ'' — аналог коэффициента Пуассона для компоненты v_i ($i = x, y$) (следуя [19], можно использовать значение $\mu'' = 0,42$); $S(t) = \sqrt{(\sigma_x(t))^2 + (\sigma_y(t))^2} - \sigma_x(t)\sigma_y(t)$ — интенсивность напряжений.

Начальные условия для уравнений (3.1) имеют следующий вид:

$$p_i(t) = v_i(t) = w_i(t) = \beta_i(t) = 0, \quad i = x, y.$$

С использованием изложенной выше методики величины приращения деформаций $\Delta p_i(z, t_{j+1}) = \Delta v_i(z, t_{j+1}) + \Delta w_i(z, t_{j+1})$ находятся численно путем интегрирования системы дифференциальных уравнений (3.1) на шаге $\Delta t_j = t_{j+1} - t_j$ методом Эйлера.

4. Проверка адекватности методики расчета релаксации остаточных напряжений в призматическом образце в условиях термоэкспозиции. Для проверки адекватности расчетных данных о релаксации остаточных напряжений экспериментальным данным в условиях термоэкспозиции использовались экспериментальные данные для призматического образца размером $10 \times 10 \times 100$ мм из сплава ЭП742 при $T = 650$ °С, приведенные в работе [18].

Параметры реологической модели (3.1) для сплава ЭП742 при $T = 650$ °С приведены в [19] и имеют следующие значения: $\sigma^{**} = 500$ МПа, $\lambda = 0,022$ ч⁻¹, $a = 6,1 \cdot 10^{-3}$, $c = 0,722 \cdot 10^{-6}$ ч⁻¹, $n = 3,29$, $m = 14,3$.

Подробно проанализируем результаты расчетов для первого режима упрочнения. На рис. 2 экспериментальная и расчетная зависимости (кривые 1) соответствуют напряжению $\sigma_x = \sigma_x(z)$ после упрочнения при температуре 20 °С и модуле Юнга $E_0 = 2,21 \cdot 10^5$ МПа ($t = 0 - 0$); кривой 2 показана та же расчетная зависимость при ступенчатом изменении температуры с $T_0 = 20$ °С до $T_1 = 650$ °С и модуле Юнга $E_1 = 1,79 \cdot 10^5$ МПа ($t = 0 + 0$); кривая 3 соответствует расчетной зависимости $\sigma_x = \sigma_x(z, t^* - 0)$ после процесса ползучести под действием самоуравновешенных остаточных напряжений в течение $t^* = 100$ ч при температуре $T = 650$ °С; кривыми 4 показано распределение остаточных напряжений после температурной разгрузки с $T_1 = 650$ °С до $T_0 = 20$ °С в момент времени $t = t^* + 0$ (сплошная линия — экспериментальные данные [18], штриховая — расчетная эпюра). Предполагается, что температурная разгрузка также произошла мгновенно. В целом для окончательных эпюр остаточных напряжений после эксплуатации образца в условиях термоэкспозиции наблюдается соответствие расчетных и экспериментальных данных (кривые 4 на рис. 2). Из приведенных зависимостей следует, что в процессе ползучести остаточные напряжения $\sigma_x = \sigma_x(z, t^*)$ по модулю уменьшились в 1,54 раза по сравнению с начальными значениями, но их величина (по модулю) остается существенной в области сжатия ($0 \leq z \leq 0,1$ мм) и составляет более 600 МПа. Еще одна особенность состоит в том, что экспериментальная эпюра имеет минимум, а расчетная зависимость не имеет экстремума (ср. кривые 4 на рис. 2).

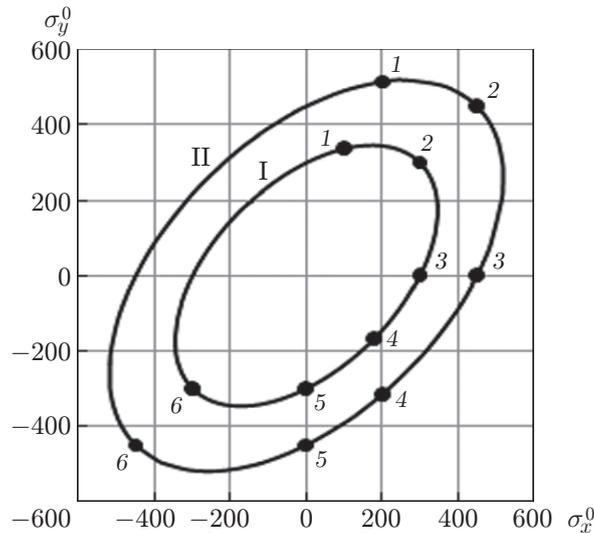


Рис. 3. Зависимость (5.1):

I — $S_* = 300$ МПа, II — $S_* = 450$ МПа; 1–6 — значения напряжений σ_x^0 , σ_y^0

5. Исследование влияния вида напряженного состояния на релаксацию остаточных напряжений в призматическом бруске при двухосном нагружении.

При исследовании влияния вида напряженного состояния на кинетику остаточных напряжений использована пластина толщиной $H = 10$ мм из сплава ЭП742 при $T = 650$ °С, к которой приложены внешние напряжения σ_x^0 , σ_y^0 (см. рис. 1). В качестве начально-напряженно-деформированного состояния после упрочнения (УЗУ) рассматривалось напряженно-деформированное состояние для упрочненного бруска (см. п. 1). При проведении детального анализа использовалась начальная эпюра остаточных напряжений для режима 1. Напряжения σ_x^0 и σ_y^0 варьировались таким образом, чтобы они удовлетворяли условию

$$(\sigma_x^0)^2 + (\sigma_y^0)^2 - \sigma_x^0 \sigma_y^0 = S_*^2, \quad (5.1)$$

где $S_*^2 = \text{const}$, т. е. пары точек (σ_x^0, σ_y^0) принадлежат эллипсу.

В расчетах использовались значения $S_* = 300$ МПа и $S_* = 450$ МПа для шести комбинаций напряжений σ_x^0 и σ_y^0 (точки 1–6 на рис. 3).

Приведем некоторые результаты расчетов при $S_* = 450$ МПа. На рис. 4 представлены распределения остаточных напряжений $\sigma_x = \sigma_x(z, t)$ и $\sigma_y = \sigma_y(z, t)$ на различных этапах решения задачи при одноосном растяжении упрочненного образца ($\sigma_x^0 = 450$ МПа, $\sigma_y^0 = 0$), на рис. 5 — аналогичные зависимости для компоненты $\sigma_x = \sigma_x(z, t)$ при всестороннем растяжении ($\sigma_x^0 = \sigma_y^0 = 450$ МПа) и всестороннем сжатии ($\sigma_x^0 = \sigma_y^0 = -450$ МПа). Следует отметить, что для обоих вариантов нагружения, представленных на рис. 5, $\sigma_x(z, t) = \sigma_y(z, t)$.

Проанализируем результаты выполненных расчетов, приведенные на рис. 2, 4, 5. Отметим главную особенность: процессы релаксации компонент остаточных напряжений $\sigma_x = \sigma_x(z)$ и $\sigma_y = \sigma_y(z)$ существенно зависят от вида напряженного состояния, определяемого приложенными внешними напряжениями σ_x^0 и σ_y^0 . При положительных значениях σ_x^0 и σ_y^0 наблюдается замедление процесса релаксации по сравнению со случаем чистой термоэкспозиции ($\sigma_x^0 = 0$, $\sigma_y^0 = 0$), что представляется нелогичным в рамках теории ползучести, согласно которой чем больше внешние нагрузки, тем быстрее происходит процесс ползучести, а следовательно, и перераспределение внутренних напряжений. Однако в случае

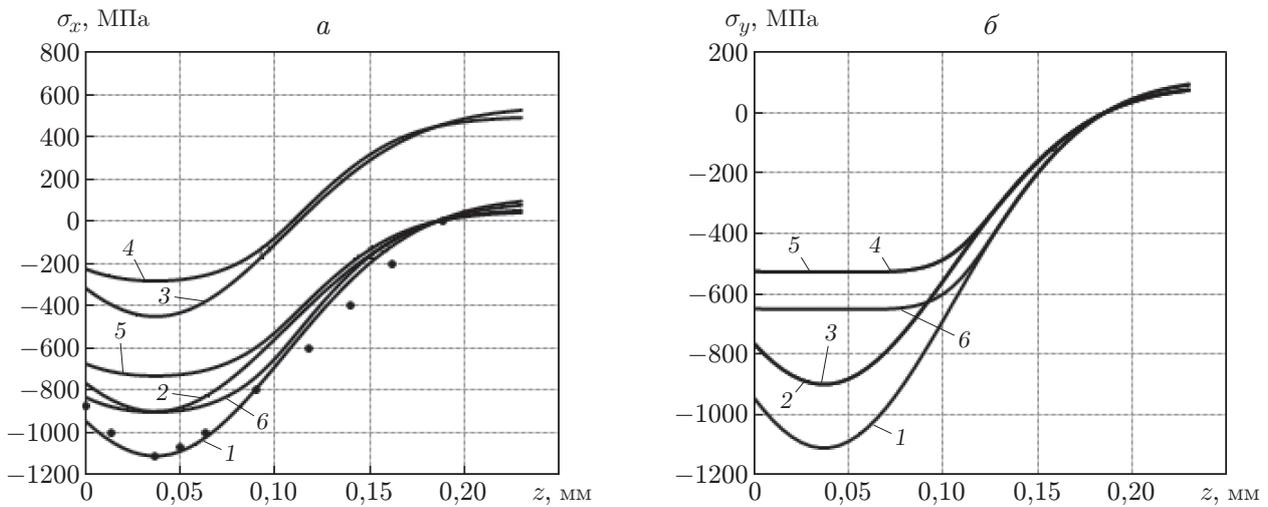


Рис. 4. Расчетные (линии) и экспериментальные (точки) зависимости остаточных напряжений в процессе ползучести при одноосном растяжении образца от координаты z ($\sigma_x^0 = 450$ МПа, $\sigma_y^0 = 0$):

a — $\sigma_x = \sigma_x(z, t)$, b — $\sigma_y = \sigma_y(z, t)$; 1 — после упрочнения ($T = 20$ °С), 2, 3 — после температурного ($T = 650$ °С) и силового нагружения соответственно, 4 — после ползучести в течение $t_* = 100$ ч при $T_1 = 650$ °С, 5, 6 — после силовой и температурной разгрузки с $T_1 = 650$ °С до $T_0 = 20$ °С соответственно

упрочненных конструкций ситуация другая. Далее будем сравнивать эпюры остаточных напряжений после упрочнения (кривые 1 на рис. 2, 4, 5) и окончательную эпюру после процесса ползучести и температурно-силовой разгрузки (кривые 6).

При $\sigma_x^0 > 0$, $\sigma_y^0 > 0$ релаксация происходит медленнее для той компоненты остаточных напряжений, для которой больше соответствующая внешняя нагрузка. В случае $\sigma_x^0 = \sigma_y^0 > 0$ процесс релаксации остаточных напряжений практически отсутствует (см. рис. 5, a). Это обусловлено тем, что при положительных значениях σ_x^0 и σ_y^0 процесс ползучести в упрочненном слое происходит при напряжениях $\sigma_x = \sigma_x(z, t)$ и $\sigma_y = \sigma_y(z, t)$, которым соответствуют кривые 3, а при термоэкспозиции — при напряжениях, которым соответствуют кривые 2. Из результатов сравнения кривых 2 и 3 следует, что остаточные напряжения при нагрузках σ_x^0 и σ_y^0 значительно меньше по модулю, чем в случае термоэкспозиции. Поэтому интенсивность остаточных напряжений при нагружении также значительно меньше, чем в его отсутствие, но ею нельзя пренебрегать в расчетах скорости ползучести (см. определяющие соотношения (3.1)), причем с учетом большого значения показателя нелинейности для сплава ЭП742 ($m = 14,3$) скорость ползучести по координате z в области сжатия материала для кривых 2 и 3 может различаться на несколько порядков. Это приводит к существенному уменьшению скорости релаксации остаточных напряжений в поле внешних сил при $\sigma_x^0 > 0$ и $\sigma_y^0 > 0$.

При $\sigma_x^0 < 0$, $\sigma_y^0 < 0$ скорость процесса релаксации обеих компонент тензора остаточных напряжений максимальна (см. рис. 5, b). В этом случае произошла практически полная релаксация остаточных напряжений, ее скорость значительно больше, чем в условиях термоэкспозиции. Из рис. 5, b следует, что в начальный момент времени $t = 0+0$ после температурно-силового нагружения эпюра остаточных напряжений для обеих компонент (кривая 3) расположена ниже, чем после процедуры упрочнения (кривая 1), т. е. интенсивность напряжений, вычисленная для компонент $\sigma_x = \sigma_x(z, t)$ и $\sigma_y = \sigma_y(z, t)$ в области сжатия, в этом случае существенно больше, чем в случае термоэкспозиции и варианта

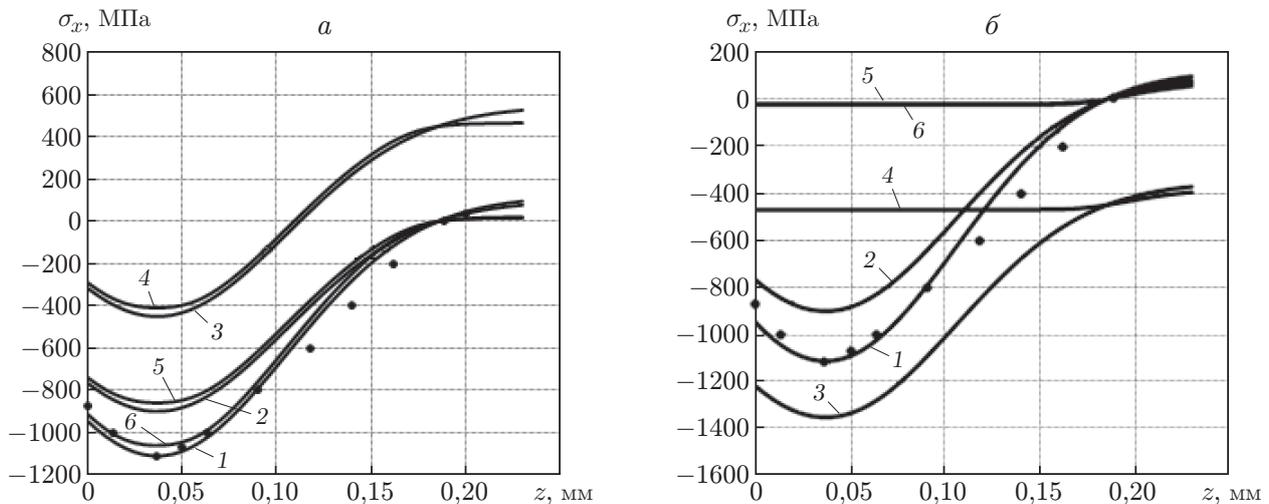


Рис. 5. Зависимости остаточных напряжений $\sigma_x = \sigma_x(z, t)$ в процессе ползучести:

a — $\sigma_x^0 = 450$ МПа, $\sigma_y^0 = 450$ МПа, b — $\sigma_x^0 = -450$ МПа, $\sigma_y^0 = -450$ МПа; точки — экспериментальные данные, полученные после упрочнения, линии — результаты расчета; остальные обозначения те же, что на рис. 4

нагружения $\sigma_x^0 > 0$, $\sigma_y^0 > 0$. Поэтому в случае $\sigma_x^0 < 0$, $\sigma_y^0 < 0$ скорость ползучести (с учетом большого значения $m = 14,3$) на несколько порядков больше, чем, например, при термоэкспозиции.

Таким образом, при растягивающих нагрузках в упрочненном плоском образце наблюдается существенное замедление процесса релаксации остаточных напряжений вплоть до его прекращения (при $\sigma_x^0 = \sigma_y^0 > 0$), а при сжимающих нагрузках — увеличение скорости процесса релаксации вплоть до практически полной релаксации остаточных напряжений (при $\sigma_x^0 < 0$, $\sigma_y^0 < 0$) по сравнению со случаем чистой термоэкспозиции за одно и то же время (100 ч).

Следует отметить, что сплав ЭП742 широко используется в авиадвигателестроении, например при изготовлении дисков газотурбинных двигателей. В процессе эксплуатации вследствие появления массовых сил в результате вращения в материале диска возникают в основном растягивающие напряжения. Полученные выше результаты играют важную роль в решении технических задач, поскольку в процессе эксплуатации скорость релаксации остаточных напряжений в нагруженном состоянии существенно меньше, чем в ненагруженном, т. е. остаточные напряжения сохраняются в материале упрочненного диска в течение более длительного времени. Как известно, положительное воздействие упрочнения на увеличение ресурса деталей обусловлено именно наличием отрицательных остаточных напряжений.

Заключение. В работе предложена не имеющая аналогов методика расчета релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненном призматическом образце в условиях ползучести при двухосном нагружении.

Выполнена проверка адекватности результатов расчета релаксации остаточных напряжений с использованием разработанной методики экспериментальным данным для призматического образца из сплава ЭП742 после ультразвукового поверхностного упрочнения при $T = 650$ °С в частном случае термоэкспозиции.

Исследовано влияние двухосного нагружения поверхностно упрочненного призматического образца на релаксацию остаточных напряжений в условиях ползучести для различ-

ных видов напряженного состояния при постоянной интенсивности напряжений. В расчетах для образцов из сплава ЭП742 при $T = 650$ °С и величине интенсивности напряжений (для внешних нагрузок), составляющей 30–50 % максимальной (по модулю) величины остаточных напряжений после упрочнения, установлено, что при растяжении происходит существенное уменьшение скорости релаксации остаточных напряжений в процессе ползучести в течение 100 ч по сравнению со случаем чистой термоэкспозиции, а в частном случае всестороннего растяжения процесс релаксации остаточных напряжений практически отсутствует. При сжимающих нагрузках, наоборот, процесс релаксации интенсифицируется по сравнению со случаем термоэкспозиции, и в частном случае всестороннего сжатия происходит практически полная релаксация остаточных напряжений в течение 100 ч.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Биргер И. А.** Остаточные напряжения. М.: Машиностроение, 1963.
2. **Сулима А. М.** Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А. М. Сулима, В. А. Шулов, Ю. Д. Ягодкин. М.: Машиностроение, 1988.
3. **Кудрявцев И. В.** Поверхностный наклеп для повышения прочности и долговечности деталей машин поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1969.
4. **Soady K. A.** Life assessment methodologies incorporating shot peening process effects: mechanistic consideration of residual stresses and strain hardening. Pt 1. Effect of shot peening on fatigue resistance // *Materials Sci. Technol.* 2013. V. 29, N 6. P. 637–651.
5. **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 // *Materials Design.* 2012. V. 35. P. 741–748.
6. **Павлов В. Ф.** Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочненных деталей по остаточным напряжениям / В. Ф. Павлов, В. А. Кирпичев, В. С. Вакулюк. Самара: Сам. науч. центр РАН, 2012.
7. **Павлов В. Ф., Букатый А. С., Семенова О. Ю.** Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочненных деталей с концентраторами напряжений // *Вестн. машиностроения.* 2019. № 1. С. 3–7.
8. **Сазанов В. П., Кирпичев В. А., Вакулюк В. С., Павлов В. Ф.** Определение первоначальных деформаций в упрочненном слое цилиндрической детали методом конечно-элементного моделирования с использованием расчетного комплекса PATRAN/NASTRAN // *Вестн. Уфим. гос. авиац. техн. ун-та.* 2015. Т. 19, № 2. С. 35–40.
9. **Радченко В. П., Афанасьева О. С., Глебов В. Е.** Исследование влияния остаточных напряжений на геометрические параметры поверхностно упрочненного бруса // *Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер.: Математика. Механика. Информатика.* 2019. Т. 19, № 4. С. 464–478.
10. **Радченко В. П.** Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочненных конструкциях / В. П. Радченко, М. Н. Саушкин. М.: Машиностроение-1, 2005.
11. **Радченко В. П., Павлов В. Ф., Саушкин М. Н.** Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния в поверхностно упрочненных втулках с учетом остаточных касательных напряжений // *Вестн. Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Механика.* 2019. № 1. С. 138–150.
12. **Jebahi M., Gakwaya A., Lévesque J., et al.** Robust methodology to simulate real shot peening process using discrete-continuum coupling method // *Intern. J. Mech. Sci.* 2016. V. 107. P. 21–33.
13. **Gallitelli D., Boyer V., Gelineau M., et al.** Simulation of shot peening: From process parameters to residual stress fields in a structure // *Comptes Rendus Mécanique.* 2016. V. 344, N 4/5. P. 355–374.

14. Радченко В. П., Саушкин М. Н. Прямой метод решения краевой задачи релаксации остаточных напряжений в упрочненном изделии цилиндрической формы при ползучести // ПМТФ. 2009. Т. 50, № 6. С. 90–99.
15. Радченко В. П., Кочеров Е. П., Саушкин М. Н., Смыслов В. А. Экспериментальное и теоретическое исследование влияния растягивающей нагрузки на релаксацию остаточных напряжений в упрочненном цилиндрическом образце в условиях ползучести // ПМТФ. 2015. Т. 56, № 2. С. 169–177.
16. Radchenko V. P., Tsvetkov V. V., Derevyanka E. E. Relaxation of residual stresses in a surface-hardened cylinder under creep conditions and rigid restrictions on linear and angular deformations // Mech. Solids. 2020. V. 55, N 6. P. 898–906.
17. Радченко В. П., Бочкова Т. И., Цветков В. В. Релаксация остаточных напряжений в поверхностно упрочненном полупространстве в условиях ползучести // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. 2015. Т. 19, № 3. С. 504–522.
18. Радченко В. П., Саушкин М. Н., Бочкова Т. И. Математическое моделирование формирования и релаксации остаточных напряжений в плоских образцах из сплава ЭП742 после ультразвукового упрочнения в условиях высокотемпературной ползучести // Вестн. Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Механика. 2016. № 1. С. 93–112.
19. Радченко В. П. Реологическое деформирование и разрушение материалов и элементов конструкций / В. П. Радченко, Ю. А. Еремин. М.: Машиностроение-1, 2004.

*Поступила в редакцию 29/VI 2021 г.,
после доработки — 13/VII 2021 г.
Принята к публикации 26/VII 2021 г.*
