

УДК 539.376:539.4.014.13

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСТЯГИВАЮЩЕЙ НАГРУЗКИ НА РЕЛАКСАЦИЮ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В УПРОЧНЕННОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ОБРАЗЦЕ В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ

В. П. Радченко, Е. П. Кочеров*, М. Н. Саушкин, В. А. Смыслов

Самарский государственный технический университет, 443100 Самара, Россия

* Открытое акционерное общество “Кузнецов”, 443009 Самара, Россия

E-mails: radch@samgtu.ru, kotcherov_ep@kuznetsov-motors.ru, saushkin.mn@samgtu.ru, smsvit@gmail.com

Выполнено экспериментальное и теоретическое исследование влияния растягивающей нагрузки на релаксацию остаточных напряжений в упрочненном цилиндрическом образце из сплава ЖС6КП в условиях ползучести при температуре 800 °С. Экспериментально исследовано распределение осевой компоненты тензора остаточных напряжений по толщине упрочненного слоя после упрочнения путем пневмодробеструйной обработки микрошариками и после процесса ползучести в течение 50 и 200 ч при действии растягивающей нагрузки, равной 150 и 250 МПа. Выполнен детальный теоретический анализ поставленной задачи. Установлено, что во всех режимах нагружения расчетные и экспериментальные значения остаточных напряжений хорошо согласуются. Показано, что при небольших значениях растягивающей нагрузки скорость релаксации уменьшается по сравнению со случаем термоэкспозиции при отсутствии растягивающей нагрузки, а при увеличении интенсивности нагрузки — увеличивается.

Ключевые слова: цилиндрический образец, поверхностное пластическое деформирование, остаточные напряжения, растягивающая нагрузка, ползучесть, релаксация.

Введение. Как известно, при нормальных и умеренных температурах поверхностное пластическое деформирование оказывает положительное влияние на долговечность деталей машин [1–6]. При этом повышение сопротивления усталости обусловлено, главным образом, наличием в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений. Более сложная ситуация возникает при выяснении целесообразности использования различных способов поверхностного пластического деформирования деталей, работающих при высоких температурах (например, деталей газотурбинных двигателей). Условия эксплуатации оказывают существенное влияние на состояние упрочненного слоя: под действием рабочих нагрузок и температур вследствие ползучести происходит изменение во времени остаточных напряжений при реологическом деформировании самой конструкции. Поскольку эффективность методов поверхностного пластического деформирования определяется устойчивостью остаточных напряжений к температурно-силовому нагружению, исследование

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания Самарского государственного технического университета (проект № 1151) и Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-01-00699).

© Радченко В. П., Кочеров Е. П., Саушкин М. Н., Смыслов В. А., 2015

релаксации остаточных напряжений является важной теоретической и прикладной задачей, при этом на практике скорость (время) полной релаксации может использоваться для диагностики исчерпания ресурса работы, например, лопаток газотурбинного двигателя [7].

В работах [6, 8] предложен приближенный метод решения краевой задачи о релаксации остаточных напряжений в растягиваемом упрочненном цилиндрическом образце, основанный на декомпозиции конструкции на тонкий упрочненный слой и ее “тело”. При этом предполагалось, что упрочненный слой “наклеен” на поверхность цилиндра и деформируется вместе с ним в режиме жесткого нагружения при заданных значениях деформации на поверхности цилиндра. В работе [9] предложен прямой численный метод решения этой задачи и выполнена его экспериментальная проверка для цилиндрических образцов из сплава ЭИ691 при температуре 400 °С в условиях термоэкспозиции без нагрузки. Экспериментальные исследования проведены в условиях термоэкспозиции [2, 9], изучения влияния растягивающих нагрузок на релаксацию остаточных напряжений в условиях ползучести практически не проводилось.

Целью настоящей работы является экспериментальное и теоретическое исследование влияния растягивающих нагрузок на релаксацию остаточных напряжений в цилиндрических образцах из сплава ЖС6КП в условиях высокотемпературной ползучести при температуре, равной 800 °С.

1. Методика экспериментального исследования. В данном пункте приводятся характеристики испытываемых образцов и методика эксперимента.

1.1. *Испытываемые образцы.* Образцы из сплава ЖС6КП имели форму и размеры, представленные на рис. 1 (М12 — типоразмер резьбы для крепления образца в испытательной машине). Выбранная форма позволяла определить остаточные напряжения после упрочнения, выдержки при повышенных температурах и проведения испытаний на ползучесть при растяжении. Заготовки для образцов, вырезанные из прутка, нагревались при температуре 1220 °С в течение 4 ч с последующим охлаждением на воздухе, старением при температуре 950 °С в течение 2 ч и охлаждением на воздухе. После этого проводилась начальная и окончательная токарная обработка рабочей части цилиндрического участка образца, припуск на шлифование составлял 0,4 мм, при этом шероховатость поверхности составляла $R_a = 0,32 \div 0,63$ мкм. Припуск на полировку равен 0,06 мм. При полировании для окончательной доводки было оставлено 0,03 мм. После полирования образцы подвергались нагреванию при температуре 950 °С в течение 4 ч, а затем охлаждались на воздухе. Последней операцией являлось финишное полирование, при котором поддерживалась шероховатость $R_a = 0,32$ мкм. При использовании такой технологии исключается возникновение остаточных напряжений.

1.2. *Упрочнение образцов.* Для наведения остаточных напряжений в поверхностном слое образцов использовалась процедура пневмодробеструйной обработки поверхности

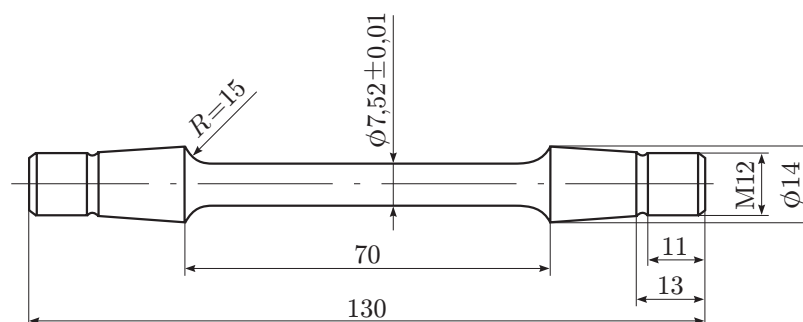


Рис. 1. Экспериментальный образец

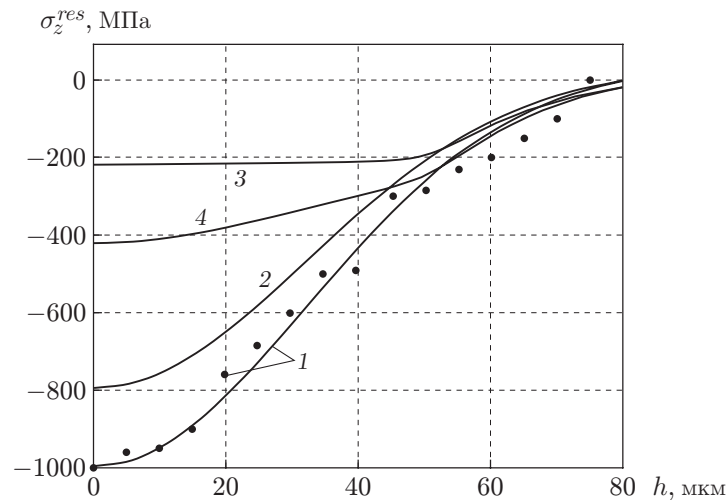


Рис. 2. Расчетные (линии) и экспериментальные (точки) эпюры остаточных напряжений $\sigma_z^{res}(h)$ в цилиндрическом образце радиусом $a = 3,76$ мм при термоэкспозиции ($T = 800$ °С, $N = 0$):

1 — после процедуры упрочнения в момент времени $t = 0 - 0$, 2 — после температурного нагружения в момент времени $t = 0 + 0$, 3 — после процесса ползучести при температурном нагружении в момент времени $t = 50 - 0$ ч, 4 — после температурной разгрузки в момент времени $t = 50 + 0$ ч

микрошариками диаметром $160 \div 200$ мкм, изготовленными из материала ШХ-15 при следующих значениях параметров: давление воздуха — 0,3 МПа, скорость полета микрошариков — 76 м/с, время упрочнения — 45 с.

1.3. *Определение остаточных напряжений после обработки микрошариками.* Остаточные напряжения определялись методом колец и полосок, предложенным в работах [1, 10, 11]. Дальнейшее развитие этот метод получил в работах [2, 12]. Суть метода состоит в том, что упрочненный образец рассверливается, из него изготавливаются втулки, из которых затем вдоль образующей вырезаются кольца и полоски. У вырезанных полосок измеряется прогиб, а у разрезанных колец — изменение диаметра. Далее путем электрохимического полирования удаляются (стравливаются) внешние слои колец и полосок, одновременно измеряются изменения диаметра колец и прогиба полосок. Измеренные величины используются для оценки окружных и осевых остаточных напряжений с помощью методики, изложенной в [2, 10, 12].

Результаты определения остаточных напряжений после обработки микрошариками, осредненные по данным для трех образцов, приведены на рис. 2 ($h = a - r$ — толщина упрочненного слоя; a — радиус образца; r — радиальная координата).

1.4. *Определение остаточных напряжений после процесса ползучести при повышенной температуре.* Для экспериментального исследования релаксации остаточных напряжений, возникающих вследствие процесса ползучести в упрочненных микрошариками образцах, при температуре 800 °С осуществлялась выдержка этих образцов без нагрузки ($N = 0$), а также при растягивающих осевых распределенных нагрузках $N = 150, 250$ МПа в течение 50 и 200 ч в высокотемпературной печи. По истечении 50 ч определялось распределение остаточных осевых напряжений по толщине упрочненного слоя, а в момент времени $t = 200$ ч — максимальные (по модулю) значения сжимающих напряжений на поверхности образца. Следует отметить, что определение остаточных напряжений после выдержки образцов при температуре 800 °С проводилось после температурной разгрузки

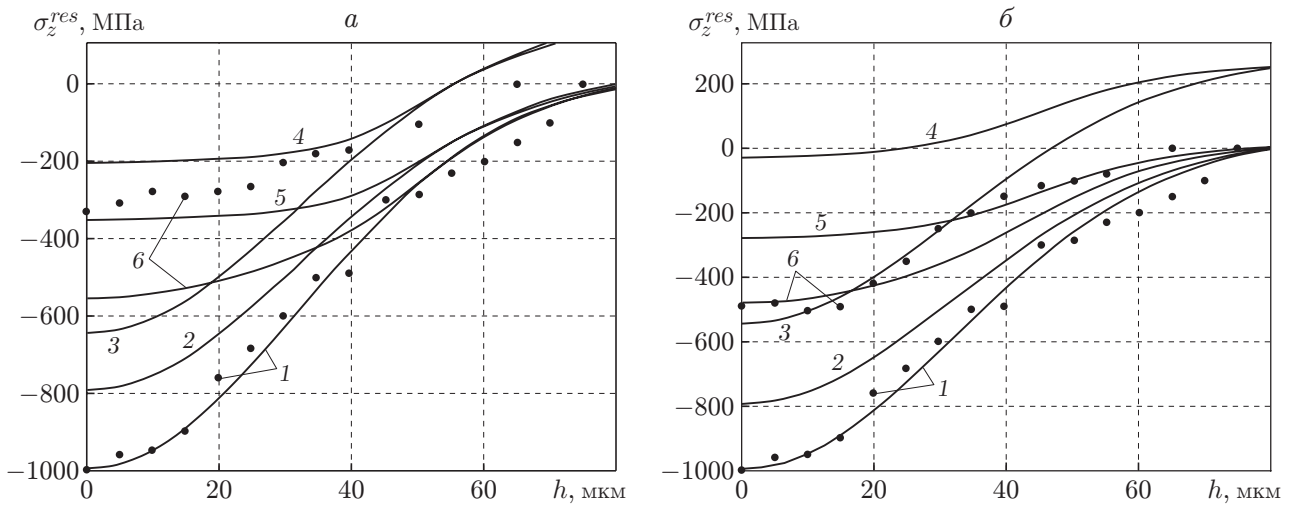


Рис. 3. Расчетные (линии) и экспериментальные (точки) эпюры остаточных напряжений $\sigma_z^{res}(h)$ при температурной ($T = 800 \text{ }^\circ\text{C}$) и силовой нагрузках: a — $N = 150 \text{ МПа}$, b — $N = 250 \text{ МПа}$; 1 — после процедуры упрочнения в момент времени $t = 0 - 0$, 2 — после температурного нагружения в момент времени $t = 0 + 0$, 3 — после температурно-силового нагружения в момент времени $t = 0 + 0$, 4 — после процесса ползучести при температурно-силовом нагружении в момент времени $t = 50 - 0 \text{ ч}$, 5 — после силовой разгрузки в момент времени $t = 50 + 0 \text{ ч}$, 6 — после температурно-силовой разгрузки в момент времени $t = 50 + 0 \text{ ч}$

(охлаждения до комнатной температуры). На рис. 3 точками показаны экспериментальные распределения осевой компоненты тензора напряжений σ_z по толщине упрочненного слоя после процесса ползучести в течение 50 ч при растягивающих нагрузках $N = 150, 250 \text{ МПа}$. Ниже приведены максимальные по модулю экспериментальные значения остаточных напряжений σ_z на поверхности цилиндрического образца радиусом $a = 3,76 \text{ мм}$:

- $\sigma_{z \text{ max}} = -370 \text{ МПа}$ при времени выдержки $t_{\text{в}} = 50 \text{ ч}$, $N = 150 \text{ МПа}$;
- $\sigma_{z \text{ max}} = -470 \text{ МПа}$ при $t_{\text{в}} = 50 \text{ ч}$, $N = 250 \text{ МПа}$;
- $\sigma_{z \text{ max}} = -280 \text{ МПа}$ при $t_{\text{в}} = 200 \text{ ч}$, $N = 150 \text{ МПа}$;
- $\sigma_{z \text{ max}} = -300 \text{ МПа}$ при $t_{\text{в}} = 200 \text{ ч}$, $N = 250 \text{ МПа}$.

Из анализа данных, приведенных на рис. 2, 3, следует, что при постоянной нагрузке релаксация остаточных напряжений замедляется. Этот результат, по-видимому, обусловлен тем, что после упрочнения на самоуравновешенное поле остаточных напряжений накладывается напряжение, вызванное приложенной нагрузкой. Однако однозначные выводы можно сделать лишь в результате всестороннего теоретического анализа. Целью работы является исследование рассматриваемого процесса релаксации с использованием разработанного в [9] метода решения данной краевой задачи.

2. Расчет начального напряженно-деформированного состояния после поверхностного пластического деформирования и температурного нагрева. Рассматривается сплошной цилиндрический образец радиусом a , в поверхностном слое которого путем пневмодробеструйной обработки наведены поля остаточных напряжений и пластических деформаций при нормальной температуре T_0 . Затем образец нагревается до температуры T_1 (рассматривается установившееся стационарное температурное поле в цилиндрическом образце). Задача решается в цилиндрической системе координат (r, θ, z) . Через σ_r^{res} , σ_θ^{res} , σ_z^{res} обозначим радиальное, окружное и осевое остаточные напряжения, а через q_r , q_θ , q_z — соответствующие компоненты тензора остаточных пластических дефор-

маций после упрочнения. Недиagonalными компонентами тензоров остаточных напряжений и пластических деформаций будем пренебрегать вследствие их малости по сравнению с диагональными компонентами. В предположении, что вторичные пластические деформации в области сжатия поверхностного слоя отсутствуют и на основе экспериментальных данных определена компонента $\sigma_\theta^{res}(r)$, в работах [6, 8, 12, 13] для остальных компонент тензоров остаточных напряжений и пластических деформаций получены зависимости

$$\sigma_r^{res}(r) = -\frac{1}{r} \int_r^a \sigma_\theta^{res}(\xi) d\xi; \quad (1)$$

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

$$q_z(r) = \alpha q_\theta(r), \quad q_r(r) = -(1+\alpha)q_\theta(r); \quad (3)$$

$$\varepsilon_z^0 = \frac{2}{a^2} \int_0^a r \left\{ q_z(r) - \frac{\nu}{E} [\sigma_r^{res}(r) + \sigma_\theta^{res}(r)] \right\} dr; \quad (4)$$

$$\sigma_z^{res}(r) = E(\varepsilon_z^0 - q_z(r)) + \nu(\sigma_r^{res}(r) + \sigma_\theta^{res}(r)), \quad (5)$$

где E — модуль Юнга; ν — коэффициент Пуассона; α — феноменологический параметр анизотропии упрочнения, методика определения которого изложена в [12, 13] (в случае пневмодробеструйной обработки микрошариками $\alpha = 1$); эпюры напряжений $\sigma_\theta^{res}(r)$ и $\sigma_z^{res}(r)$ практически совпадают [6].

Таким образом, схема расчета полей остаточных напряжений и пластических деформаций в сплошном цилиндре после упрочнения его поверхности (в момент времени $t = 0-0$) имеет следующий вид:

$$\sigma_\theta^{res}(r) \xrightarrow{(1)} \sigma_r^{res}(r) \xrightarrow{(2)} q_\theta(r) \xrightarrow{(3)} q_z(r), q_r(r) \xrightarrow{(4)} \varepsilon_z^0 \xrightarrow{(5)} \sigma_z^{res}(r). \quad (6)$$

Здесь стрелками показана последовательность определения величин; цифры над стрелками означают номера формул, по которым определяются эти величины. Из схемы (6) следует, что в конечном счете компоненты σ_r^{res} , σ_z^{res} , q_θ , q_r , q_z определяются через величину σ_θ^{res} и параметр α .

Пусть температура T цилиндрического образца увеличивается от значения T_0 до значения T_1 , причем $T_1 \gg T_0$. Обозначим через E_0 , E_1 модули Юнга при температуре T_0 , T_1 соответственно; очевидно, что $E_1 < E_0$. Будем полагать, что при повышении температуры в поверхностно упрочненном слое цилиндрического образца не возникают дополнительные пластические деформации за счет температурного разупрочнения пластичного материала. При этом предположении компонента σ_θ^{res} при $T = T_1$ может быть определена из решения интегрального уравнения (2) с использованием (1) при $E = E_1$, поскольку величина $q_\theta(r)$ известна и не зависит от температуры. Поскольку решение этой задачи является сложным, используем следующий прием, позволяющий свести поставленную задачу к задаче о фиктивной ползучести. Предположим, что в процессе нагрева модуль Юнга изменяется по закону

$$E(\tau) = E_0 + (1 - e^{-\tau})(E_1 - E_0), \quad (7)$$

где τ — некоторое фиктивное время (параметр нагружения). При $\tau > 10$ величина $e^{-\tau} \approx 0$, значение $E(\tau) = E_1$ соответствует температуре T_1 , при $\tau = 0$ значение $E(0) = E_0$ соответствует температуре T_0 . Тогда с учетом обозначений

$$\begin{aligned}\sigma_0^{res}(r, \tau) &= \sigma_\theta^{res}(r, \tau) + \sigma_z^{res}(r, \tau) + \sigma_r^{res}(r, \tau), \\ e_i^0(r, \tau) &= ((1 + \nu)\sigma_i^{res}(r, \tau) - \nu\sigma_0^{res}(r, \tau))/E_0, \quad i = r, \theta, z, \\ E^* &= (E_0 - E_1)/E_0\end{aligned}$$

и соотношения (7) имеем

$$e_i(r, \tau) = \frac{(1 + \nu)\sigma_i^{res}(r, \tau) - \nu\sigma_0^{res}(r, \tau)}{E(\tau)} = \frac{e_i^0(r, \tau)}{1 - (1 - e^{-\tau})E^*}, \quad i = r, z, \theta.$$

Раскладывая второй множитель в последнем равенстве в ряд Тейлора и сохраняя члены первого порядка малости относительно величины E^* , получаем

$$e_i(r, \tau) = e_i^0(r, \tau) + e_i^0(r, \tau)(1 - e^{-\tau})E^*, \quad i = r, \theta, z. \quad (8)$$

Второе слагаемое в правой части (8) будем называть деформацией фиктивной ползучести (псевдоползучести) и обозначим $h_i(r, \tau)$:

$$h_i(r, \tau) = \frac{E^*}{E_0} ((1 + \nu)\sigma_i^{res}(r, \tau) - \nu\sigma_0^{res}(r, \tau))(1 - e^{-\tau}), \quad i = r, \theta, z.$$

Дифференцируя по времени это равенство, получаем

$$\dot{h}_i(r, \tau) = \frac{E^*}{E_0} ((1 + \nu)\dot{\sigma}_i^{res}(r, \tau) - \nu\dot{\sigma}_0^{res}(r, \tau)) - h_i(r, \tau), \quad i = r, \theta, z, \quad (9)$$

где точка — производная по параметру нагружения τ .

Соотношения (9) по форме соответствуют соотношениям наследственной теории вязкоупругости с экспоненциальным ядром ползучести и начальными данными $h_i(r, 0) = 0$, $i = r, \theta, z$ [14].

Представляя выражение для полной деформации $\varepsilon_i(r, \tau)$ в виде

$$\varepsilon_i(r, \tau) = e_i^0(r, \tau) + q_i(r) + h_i(r, \tau), \quad i = r, \theta, z, \quad (10)$$

для расчета напряженно-деформированного состояния в процессе нагревания цилиндрического изделия до температуры T_1 можно применить разработанный в [9] прямой метод решения краевой задачи ползучести упрочненного цилиндрического образца, а в качестве окончательного решения использовать асимптотическое решение при $\tau \rightarrow +\infty$ (на практике данное решение соответствует значениям $\tau > 10$, поскольку при этом $e^{-\tau} \approx 0$). Следует отметить, что температурные деформации в (10) не учитываются, так как они не влияют на напряженное состояние в силу однородности распределения температурного поля по объему цилиндрического образца.

Реализация численного метода [9] при решении задачи о фиктивной ползучести позволяет найти компоненты тензора остаточных напряжений σ_i^{res} , $i = r, z, \theta$ в момент времени $t = 0 + 0$ при температуре T_1 (будем считать, что прогрев цилиндрического образца произошел мгновенно).

3. Численное решение задачи и анализ результатов. В данном пункте приводится численное решение задачи о релаксации остаточных напряжений в упрочненном слое сплошного цилиндрического образца из сплава ЖС6КП при температуре 800 °С в условиях ползучести при осевом растяжении. При проведении теоретического анализа результатов экспериментальных исследований (см. п. 1) выполнен численный расчет кинетики остаточных напряжений в упрочненном цилиндрическом образце из сплава ЖС6КП при

температуре, равной $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, в процессе ползучести при действии растягивающих распределенных нагрузок $N = 150, 250\text{ МПа}$, а также в условиях термоэкспозиции ($N = 0$). Методика решения этой задачи изложена в [9]. В качестве реологической модели использовался следующий вариант установившейся ползучести:

$$\dot{p}_{ij} = \frac{3}{2} c S^{m-1} \left(\sigma_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \sigma_{kk} \right). \quad (11)$$

Здесь p_{ij}, σ_{ij} — компоненты тензоров напряжений и деформаций ползучести соответственно; S — интенсивность напряжений; c, m — параметры. Для определения параметров модели (11) и реализации численной процедуры решения задачи ползучести упрочненного образца необходимо иметь экспериментальные данные о ползучести сплава ЖС6КП при температуре $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, однако такие сведения имеются лишь для температур $900, 950$ и $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ [15, 16]. На основе этих данных в [17] построена стохастическая модель неизотермической ползучести для указанного материала. В пренебрежении первой стадией ползучести (в силу ее кратковременности) с учетом того, что третья стадия в интервале времени от 0 до 50 ч отсутствует, с использованием экстраполяции соответствующих температурных зависимостей для математических ожиданий параметров c, m модели (11) определены их значения при $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$: $c = 5,454 \cdot 10^{-29}\text{ МПа}^{-m}$, $m = 9,815$.

Заметим, что согласно схеме (6) исходной информацией для расчета полей остаточных напряжений и пластических деформаций в цилиндрическом образце радиусом a является окружная компонента $\sigma_{\theta}^{res}(r)$, для которой согласно [6, 8] может быть использована аппроксимация

$$\sigma_{\theta}^{res}(r) = \sigma_0 + \sigma_1 \exp\left(-\frac{(a-r)^2}{b^2}\right),$$

где σ_0, σ_1, b — параметры аппроксимации.

Поскольку в рассматриваемом случае имеются экспериментальные данные для компоненты $\sigma_z^{res}(r)$, а для компоненты $\sigma_{\theta}^{res}(r)$ они отсутствуют, параметры σ_0, σ_1, b варьировались, и для каждой совокупности их значений выполнялся численный расчет по схеме (6), до тех пор пока не был достигнут минимум функционала среднеквадратичного отклонения расчетных значений σ_z^{res} от экспериментальных (точки на рис. 2). В результате получены следующие значения параметров: $\sigma_0 = 19,3\text{ МПа}$, $\sigma_1 = 1019,3\text{ МПа}$, $b = 0,08\text{ мм}$.

На рис. 2 приведены результаты расчета величины $\sigma_z^{res}(h)$ по схеме (6) в момент времени $t = 0 - 0$ после упрочнения (кривая 1), а также результаты расчета в момент времени $t = 0 + 0$ после температурного нагружения (кривая 2), в момент времени $t = 50 - 0$ ч после процесса ползучести при температуре $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ в условиях термоэкспозиции ($N = 0$) (кривая 3) и в момент времени $t = 50 + 0$ ч после разгрузки до нормальной температуры ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$) (кривая 4). В расчетах использовались следующие значения модуля Юнга: $E_0 = 2 \cdot 10^5\text{ МПа}$ при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $E_1 = 1,492 \cdot 10^5\text{ МПа}$ при температуре $800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Коэффициент Пуассона выбирался равным $\nu = 0,3$.

Аналогичная информация для растягиваемых осевыми распределенными нагрузками $N = 150, 250\text{ МПа}$ цилиндрических образцов представлена на рис. 3. Сравнивая окончательные расчетные эпюры напряжения $\sigma_z^{res}(h)$ на рис. 2 (кривая 4) и на рис. 3 (кривая б), можно отметить, что и в рамках предложенной математической модели приложение осевой растягивающей нагрузки замедляет процесс релаксации остаточных напряжений в условиях ползучести (по крайней мере в исследованных временных интервалах и при заданных значениях растягивающей нагрузки.) Следует отметить также удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных об остаточных напряжениях после процесса ползучести в течение 50 ч (с учетом температурной аппроксимации для параметров c, m в соотношениях (11)).

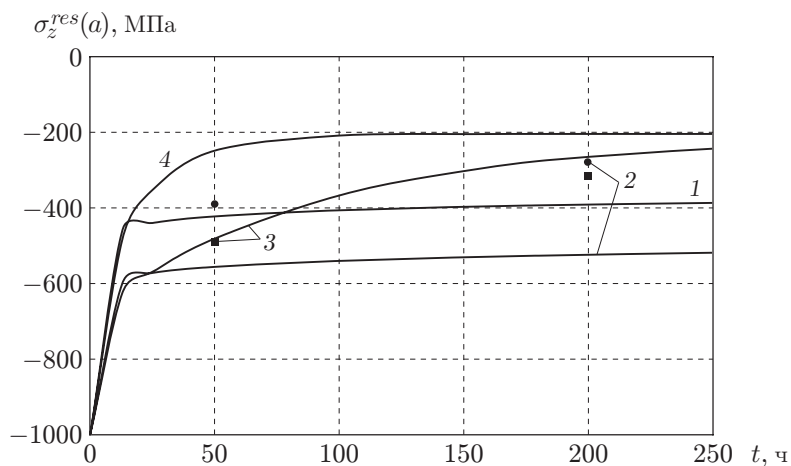


Рис. 4. Релаксация остаточных напряжений σ_z^{res} на поверхности цилиндрического образца вследствие ползучести при различных значениях распределенной растягивающей нагрузки N :

точки — экспериментальные данные, линии — результаты расчета; 1 — $N = 0$, 2 — $N = 150$ МПа, 3 — $N = 250$ МПа, 4 — $N = 300$ МПа

Более полное представление об указанном выше явлении позволяют получить расчетные данные для максимального (по модулю) значения σ_z^{res} на поверхности цилиндрического образца после процесса ползучести, представленные на рис. 4. В рассматриваемом случае при относительно небольших значениях растягивающей нагрузки ($100 \div 200$ МПа) происходит уменьшение скорости релаксации напряжений по сравнению с вариантом термоэкспозиции при отсутствии растягивающей нагрузки ($N = 0$), а при нагрузках большей интенсивности ($250 \div 300$ МПа) скорость релаксации уменьшается лишь на начальных участках временного интервала. При больших значениях времени скорость релаксации напряжений становится большей по сравнению со случаем термоэкспозиции.

Таким образом, релаксация остаточных напряжений в поверхностно упрочненном слое цилиндрического образца при действии растягивающей нагрузки в условиях ползучести определяется начальным напряженно-деформированным состоянием, возникающим после процедуры упрочнения, а ее характер зависит от величины приложенной растягивающей нагрузки и длительности ее действия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Биргер И. А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963.
2. Павлов В. Ф. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочненных деталей с концентраторами напряжений / В. Ф. Павлов, В. А. Кирпичев, В. Б. Иванов. Самара: Сам. науч. центр РАН, 2008.
3. Гринченко И. Г. Упрочнение деталей из жаропрочных и титановых сплавов. М.: Машиностроение, 1971.
4. Кравченко Б. А. Термопластическое упрочнение — резерв повышения прочности и надежности деталей машин / Б. А. Кравченко, В. Г. Круцило, Г. Н. Гутман. Самара: Сам. гос. техн. ун-т, 2000.
5. Сулима А. М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства ГТД / А. М. Сулима, В. А. Шувалов, Ю. Д. Ягодкин. М.: Машиностроение, 1988.

6. **Радченко В. П.** Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочненных конструкциях / В. П. Радченко, М. Н. Саушкин. М.: Машиностроение-1, 2005.
7. **Колотникова О. В.** Эффективность упрочнения методами поверхностного пластического деформирования деталей, работающих при повышенных температурах // Пробл. прочности. 1983. № 2. С. 112–114.
8. **Радченко В. П., Саушкин М. Н.** Математические модели восстановления и релаксации остаточных напряжений в поверхностно-упрочненном слое цилиндрических элементов конструкций при ползучести // Изв. вузов. Машиностроение. 2004. № 11. С. 3–17.
9. **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.
10. **Иванов С. И.** К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок // Остаточные напряжения. Куйбышев: Куйбышев. авиац. ин-т, 1974. Вып. 53. С. 32–42.
11. **Иванов С. И.** Определение остаточных напряжений в поверхностном слое цилиндра // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. Куйбышев: Куйбышев. авиац. ин-т, 1971. Вып. 48. С. 153–168.
12. **Радченко В. П., Павлов В. Ф., Саушкин М. Н.** Определение параметра анизотропии упрочнения и остаточных напряжений в цилиндрическом образце из стали после обкатки роликом // Пробл. машиностроения и надежности машин. 2011. № 4. С. 93–100.
13. **Радченко В. П., Саушкин М. Н., Павлов В. Ф.** Метод расчета полей остаточных напряжений и пластических деформаций в цилиндрических образцах с учетом анизотропии процесса поверхностного упрочнения // ПМТФ. 2011. Т. 52, № 2. С. 173–182.
14. **Самарин Ю. П.** Уравнение состояния материалов со сложными реологическими свойствами. Куйбышев: Куйбышев. гос. ун-т, 1979.
15. **Бадаев А. Н.** К вопросу об определении функции распределения параметров уравнения состояния ползучести // Пробл. прочности. 1984. № 12. С. 22–26.
16. **Ковпак В. И., Бадаев А. Н.** Унифицированный подход к прогнозированию ползучести. Вопросы жаропрочных материалов в статистическом аспекте // Унифицированные методы определения ползучести и длительной прочности. М.: Изд-во стандартов, 1986. С. 51–62.
17. **Радченко В. П., Саушкин М. Н., Голудин Е. П.** Стохастическая модель неизотермической ползучести и длительной прочности материалов // ПМТФ. 2012. Т. 53, № 2. С. 167–174.

Поступила в редакцию 4/III 2014 г.
