Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

М. Н. Саушкин, В. А. Кирпичёв, О. С. Афанасьева, Д. В. Иванов,
Расчётно-экспериментальное исследование устойчивости остаточных напряже-
ний в упрочнённом слое цилиндрического изделия к температурным нагрузкам,
Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки, 2009, выпуск 1(), 101–113

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu686>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и
согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 3.93.64.190

26 апреля 2023 г., 14:55:48

УДК 539.376+621.787

РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В УПРОЧНЁННОМ СЛОЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ИЗДЕЛИЯ К ТЕМПЕРАТУРНЫМ НАГРУЗКАМ

М. Н. Саушкин¹, В. А. Кирпичёв², О. С. Афанасьева¹, Д. В. Иванов²

¹ Самарский государственный технический университет,
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

² Самарский государственный аэрокосмический университет им. ак. С. П. Королёва,
443086, г. Самара, Московское ш., 34.

E-mails: msaushkin@gmail.com, sopromat@ssau.ru, afa@samgtu.ru

Выполнен цикл экспериментальных и теоретических исследований по влиянию температурных нагрузок на релаксацию остаточных напряжений в гладких упрочнённых цилиндрических образцах и образцах с полукруглым надрезом из стали ЭИ 691 при $T = 400^\circ\text{C}$ и времени выдержки 100 ч. Показано, что релаксация обусловлена явлением ползучести. Приводится методика расчёта кинетики остаточных напряжений в условиях ползучести. Анализируются результаты экспериментальных и расчётных данных.

Ключевые слова: *поверхностное пластическое деформирование, гладкий цилиндрический образец, полукруговой концентратор напряжений, температурная выдержка, расчётно-экспериментальные исследования, ползучесть, релаксация остаточных напряжений.*

Введение. В инженерной практике для увеличения прочностных характеристик поверхностных слоёв деталей широко используются технологии поверхностного пластического деформирования (ППД). При ППД, наряду с деформационным упрочнением, возникают благоприятные остаточные напряжения сжатия. В частности, не вызывает сомнения связь между остаточными напряжениями и повышением предела выносливости [1–5]. Формируемое деформационное упрочнение при нормальных температурах отличается стабильностью. Однако с повышением рабочей температуры остаточные напряжения релаксируют (интегрально — вследствие ползучести), и их положительное влияние снижается. Поэтому целью настоящей работы является комплексное экспериментальное и теоретическое исследование высокотемпературных выдержек на процесс релаксации (устойчивости) остаточных напряжений в упрочнённом слое.

1. Экспериментальные исследования. Экспериментальные исследования влияния высокотемпературных выдержек на релаксацию остаточных напряжений в упрочнённом слое были выполнены для гладких цилиндрических образцов диаметром 7,5 мм и образцов того же диаметра с надрезами полукруглого профиля радиуса $\rho_0 = 0,3$ мм, изготовленных из стали ЭИ 961,

Саушкин Михаил Николаевич — доцент кафедры прикладной математики и информатики; к.ф.-м.н., доцент.

Кирпичёв Виктор Алексеевич — доцент кафедры сопротивления материалов; к.т.н., доцент.

Афанасьева Ольга Сергеевна — аспирант кафедры прикладной математики и информатики.

Иванов Денис Всеволодович — аспирант кафедры сопротивления материалов.

имеющей следующие механические характеристики: $\sigma_{\text{в}} = 1090$ МПа, $\sigma_{0,2} = 992$ МПа, $\delta = 11,3$ %, $\psi = 67,4$ %, $S_{\text{к}} = 2047$ МПа (обозначения стандартные). Образцы изготавливались точением с последующим шлифованием. Затем часть образцов подвергалась электрополированию, а часть поверхностно упрочнялась. В качестве упрочняющей обработки применялось алмазное выглаживание с усилием выглаживания $Q = 0,1$ кН, числом оборотов образца $n = 160$ об/мин., профильным радиусом ролика $R = 2$ мм, продольной подачей ролика $S = 0,05$ мм/об.

Остаточные напряжения в гладких цилиндрических образцах и в образцах с надрезами определялись при нормальной температуре и после высокотемпературной выдержки (термоэкспозиции) в течение $t = 100$ ч при температуре $T = 400$ °С.

Остаточные напряжения в гладких цилиндрических образцах определялись методом колец и полосок [6–8]. При этом учитывались дополнительные осевые $\sigma_{z\text{д}}$ и окружные $\sigma_{\theta\text{д}}$ напряжения, вызванные рассверливанием образцов, которые определялись по формулам [1]

$$\sigma_{z\text{д}} = \frac{E}{1 - \mu^2}(\varepsilon_{z\text{д}} + \mu\varepsilon_{\theta\text{д}}), \quad \sigma_{\theta\text{д}} = \frac{E}{1 - \mu^2}(\varepsilon_{\theta\text{д}} + \mu\varepsilon_{z\text{д}}), \quad (1)$$

где $\varepsilon_{z\text{д}}$, $\varepsilon_{\theta\text{д}}$ — деформации цилиндра на внешней поверхности в осевом и окружном направлениях (соответственно) в результате расточки, измеренные тензорезисторами.

Из полученных втулок вырезались кольца и полоски (рис. 1), производилось измерение прогиба полосок $f(0)$ (рис. 2), затем измерялось расхождение концов колец после разрезки $\Delta(0)$ (рис. 3, а), по которому определялось изменение диаметра

$$\delta(0) = \frac{\Delta(0)}{\pi}. \quad (2)$$

Далее производилось удаление слоёв колец и измерение диаметра $\delta(a)$ (см. рис. 3, б). При удалении слоёв полосок измерялись их прогибы $f(a)$, которые отсчитывались, как и $\delta(a)$, от состояния до вырезки из втулки. Удаление слоёв полосок, колец и измерение возникающих при этом перемещений производилось с помощью специального приспособления.

Остаточные напряжения втулки определялись по формулам [1]

$$\sigma_{\theta}^{\text{в}} - \mu\sigma_z^{\text{в}} = 2\frac{E\delta(0)}{D^2} \left(\frac{h}{2} - a \right) - \frac{1}{3} \frac{E(h-a)^2}{D} \frac{d\delta(a)}{da} + \frac{4E(h-a)}{3D^2} \delta(a) - \frac{2E}{3D^2} \delta(a) \int_0^a \sigma(\xi) d\xi, \quad (3)$$

$$\sigma_z^{\text{в}}(a) - \mu\sigma_{\theta}^{\text{в}}(a) = \frac{8E}{l^2 R_{\text{н}} (2R_{\text{н}} \sin \frac{\alpha}{2} - R_{\text{с}} \alpha)} \left[f(a) \frac{dI(0)}{da} + I(0) \frac{df(a)}{da} \right], \quad (4)$$

где D — средний диаметр кольца, h — толщина стенки кольца, a — расстояние от наружной поверхности втулки до слоя, в котором вычисляли остаточное напряжение, ξ — расстояние от наружной поверхности до текущего

Рис. 1. Кольцо (а) и полоска (б), вырезанные из втулки

Рис. 2. Схема измерения прогиба полоски $f(0)$ после вырезки

слоя, $R_c = \frac{4 \sin \frac{\alpha}{2}}{3\alpha} \frac{R_n^3 - R_b^3}{R_n^2 - R_b^2}$ — радиус центра тяжести поперечного сечения полоски, $I(a) = \frac{\alpha + \sin \alpha}{8} [(R_n - a)^4 - R_b^4] - \frac{8 \sin \frac{\alpha}{2}}{\alpha} \frac{[(R_n - a)^3 - R_b^3]^2}{[(R_n - a)^2 - R_b^2]}$ — момент инерции поперечного сечения полоски относительно нейтральной оси.

Окончательные формулы для определения осевых $\sigma_z^{\text{res}}(a)$ и окружных $\sigma_\theta^{\text{res}}(a)$ остаточных напряжений в гладких цилиндрических деталях имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \sigma_z^{\text{res}}(a) &= \frac{1}{1 - \mu^2} [\sigma_{zn}^{\text{B}}(a) + \mu \sigma_{\theta n}^{\text{B}}(a)] - \sigma_{zd}, \\ \sigma_\theta^{\text{res}}(a) &= \frac{1}{1 - \mu^2} [\sigma_{\theta n}^{\text{B}}(a) + \mu \sigma_{zn}^{\text{B}}(a)] - \sigma_{\theta d}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\sigma_{zn}^{\text{B}}(a) = \sigma_z^{\text{B}}(a) - \mu \sigma_\theta^{\text{B}}(a)$, $\sigma_{\theta n}^{\text{B}}(a) = \sigma_\theta^{\text{B}}(a) - \mu \sigma_z^{\text{B}}(a)$ определяются по формулам (4) и (3), а σ_{zd} , $\sigma_{\theta d}$ — по формулам (1).

Надрез полукруглого профиля наносился безнаклёпным способом на упорочнённые образцы. В результате нанесения надреза в области образца, при-

Рис. 3. Схема измерения перемещений кольца: а — после разрезки, б — после разрезки и удаления слоя толщиной a

легающей к надрезу, происходит перераспределение остаточных усилий и возникают дополнительные остаточные напряжения.

Известное аналитическое решение по определению этих напряжений для мелкого надреза полуэллиптического профиля [8] даёт в нашем случае значительную погрешность. В связи с этим осесимметричная задача о перераспределении остаточных усилий гладкой детали после нанесения надреза полукруглого профиля конечных размеров решалась методом конечных элементов (МКЭ) с использованием эпюры остаточных напряжений гладкого образца.

Суммируя остаточные напряжения гладкой детали и дополнительные напряжения, полученные с помощью МКЭ, получим остаточные напряжения на дне надреза.

«Экспериментальные» эпюры остаточных напряжений в гладких и надрезанных образцах после процедуры упрочнения приведены на рис. 4. Здесь же показаны «экспериментальные» остаточные напряжения в образцах после их выдержки в печи при температуре 400°C в течение 100 часов.

Видно, что в результате термоэкспозиции остаточные напряжения уменьшились примерно на 30 %.

Выполненными расчётно-экспериментальными исследованиями можно определить только две компоненты напряжений: $\sigma_\theta^{\text{res}}$ и σ_z^{res} . Распределение компоненты σ_r^{res} и остаточных пластических деформаций по глубине слоя рас-

Рис. 4. «Экспериментальные» (сплошные линии) и расчётные (штриховые) эпюры остаточных напряжений по глубине слоя h в гладких образцах (а) и в образцах с надрезом (б) из стали ЭИ 961 после алмазного выглаживания: 1 — до термоэкспозиции ($t = 0$); 2 — после термоэкспозиции при $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 100 ч

смотренным методом найти не удаётся. Таким образом, полная информация о начальном напряжённо-деформированном состоянии (НДС) в слое, необходимая для последующего решения краевых задач ползучести, отсутствует. Её можно получить в результате дополнительных теоретических исследований.

2. Теоретические исследования. Для исследования процесса релаксации остаточных напряжений при высоких температурах вследствие ползучести используется методика, предложенная в [9, 10]. В силу громоздкости методики изложим её алгоритмически.

На первом этапе определяются поля остаточных напряжений и пластических деформаций в образце после процедуры упрочнения. В стандартной цилиндрической системе координат через q_{θ} , q_z , q_r обозначены окружная, осевая и радиальная компоненты тензора остаточных пластических дефор-

маций, возникающих в цилиндре после процедуры ППД, а через $\sigma_\theta^{\text{res}}$, σ_z^{res} , σ_r^{res} — соответствующие компоненты остаточных напряжений. Предполагается, что касательные компоненты у тензоров остаточных напряжений и деформаций малы и ими можно пренебречь, а для нормальных компонент вводится гипотеза, согласно которой

$$q_\theta(r) = q_z(r), \quad (6)$$

т. е. пластические деформации в слое бесконечно малого участка поверхности цилиндрического образца наводятся так же, как в слое полупространства. С учётом условия пластической несжимаемости материала $q_\theta + q_z + q_r = 0$ из (6) имеем

$$q_\theta(r) = q_z(r) = -\frac{q_r}{2}. \quad (7)$$

Для решения задачи используется уравнение равновесия

$$r \frac{d\sigma_r^{\text{res}}}{dr} + \sigma_r^{\text{res}} = \sigma_\theta^{\text{res}}, \quad (8)$$

из которого следует

$$\sigma_r^{\text{res}} = \frac{1}{r} \int_0^r \sigma_r^{\text{res}}(\xi) d\xi; \quad (9)$$

условие нулевого суммарного усилия, действующего на образец:

$$\int_0^{R_1} r \sigma_z^{\text{res}}(r) dr = 0, \quad (10)$$

где R_1 — радиус цилиндра, и уравнение совместности деформаций

$$r \frac{d\varepsilon_\theta}{dr} + \varepsilon_\theta = \varepsilon_r, \quad (11)$$

где $\varepsilon_i = e_i + q_i$ — полная деформация, e_i — упругая деформация ($i = r, \theta, z$).

В известной методике [9, 10] на основании (6)–(11) все параметры НДС после процедуры упрочнения выражены через $\sigma_\theta^{\text{res}}(r)$ по следующей схеме:

$$\sigma_\theta^{\text{res}}(r) \rightarrow \sigma_r^{\text{res}}(r) \rightarrow q_\theta(r) \rightarrow q_z(r), \sigma_r^{\text{res}}(r) \rightarrow \varepsilon_z^* \rightarrow \sigma_z^{\text{res}}(r), \quad (12)$$

где $\sigma_r^{\text{res}}(r)$ определяется из (9);

$$q_\theta(r) = \frac{1}{r^{\frac{3}{1+\mu}}} \int_0^r z^{\frac{2-\mu}{1+\mu}} g(z) dz, \\ g(r) = \frac{\sigma_r^{\text{res}}(r) - \sigma_\theta^{\text{res}}(r)}{E} - \frac{r}{E} \left[(1-\mu) \frac{d\sigma_\theta^{\text{res}}(r)}{dr} - \mu \frac{d\sigma_r^{\text{res}}(r)}{dr} \right],$$

E , μ — модуль Юнга и коэффициент Пуассона; q_z и q_r — из (7);

$$\varepsilon_z^* = \frac{2}{R_1^2} \int_0^{R_1} r \left(q_z(r) - \frac{\mu}{E} [\sigma_r^{\text{res}}(r) + \sigma_\theta^{\text{res}}(r)] \right) dr, \\ \sigma_z^{\text{res}}(r) = E(\varepsilon_z^* - q_z(r)) + \mu(\sigma_r^{\text{res}} + \sigma_\theta^{\text{res}}(r)).$$

Для оценки кинетики остаточных напряжений вследствие ползучести используется метод расчёта процесса релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом слое цилиндрического образца при продольном растягивающем усилии, разработанный в [9, 10].

Итак, пусть в поверхностном слое цилиндрического образца каким-либо технологическим приёмом наведены остаточные пластические деформации и соответствующие им остаточные напряжения, и к образцу приложено растягивающее усилие $F(t)$. При этом сжимающие осевые напряжения в поверхностном слое несколько уменьшаются по модулю. Однако при не слишком больших значениях $F(t)$ осевые сжимающие напряжения вблизи от поверхности остаются значительными и релаксируют во времени на фоне ползучести образца, который (в целом) удлиняется.

В силу того, что толщина поверхностного слоя мала по сравнению с радиусом цилиндрического образца, он (упрочнённый слой) не оказывает существенного влияния на жёсткость и деформируемость самого цилиндра. Поэтому тонкий упрочнённый поверхностный слой можно представить себе «наклеенным» на цилиндр и деформирующимся с ним в режиме «жёсткого» нагружения под действием силы $F(t)$.

Для построения модели релаксации остаточных напряжений введём в рассмотрение следующие гипотезы.

1. Поскольку напряжения $\sigma_\theta^{\text{res}}$, σ_z^{res} , σ_r^{res} за пределом тонкого поверхностного слоя малы, можно считать, что деформирование образца внешней осевой силой $F(t)$ происходит в целом так же, как если бы упрочнённого слоя не было. Это означает, что полную осевую деформацию цилиндрического образца $\varepsilon_z(t)$ можно рассчитывать по напряжению $\sigma^0(t) = \frac{F(t)}{\pi R_1^2}$ в соответствии со схемой одноосного напряжённого состояния.

2. Наведённые в процессе упрочнения пластические деформации не оказывают влияния на процесс развития деформации ползучести в слое. Кроме этого, не возникает дополнительных пластических деформаций по объёму образца от силы $F(t)$.

Тогда для вычисления осевых компонент деформации имеем

$$\begin{aligned}\varepsilon_z(t) &= e_z(t) + p_z, \\ p_z(t) &= u_z(t) + v_z(t) + w_z(t),\end{aligned}\tag{13}$$

где $e_z(t) = \frac{f(t)}{E\pi R_1^2}$ — упругая деформация, p_z — деформация ползучести, u_z , v_z , w_z — вязко-упругая, вязко-пластическая и вязкая компоненты p_z , уравнения состояния для которых приведены в [9].

Поперечные деформации цилиндрического образца $\varepsilon_r(t)$, $\varepsilon_\theta(t)$, возникающие за счёт пуассоновского сужения материала, рассчитываются на основании формул

$$\varepsilon_i(t) = -\mu \frac{\sigma^0(t)}{E} - \mu' u_z(t) - \mu'' v_z(t) - \frac{1}{2} w_z(t), \quad i = r, \theta, \tag{14}$$

где μ — коэффициент Пуассона в упругой области; μ' и μ'' — коэффициенты Пуассона для обратимой u_z и необратимой v_z компонент деформации ползучести (соответственно).

Для анализа НДС в поверхностно упрочнённом слое воспользуемся введённой гипотезой, согласно которой его можно считать «наклеенным» на цилиндрический образец и деформирующимся вместе с ним. Другими словами, кинетику напряжённо-деформированного состояния в поверхностном слое можно считать независимо, считая что он (упрочнённый слой) деформируется в режиме «жёсткого» нагружения при заданных значениях $\varepsilon_r(t)$, $\varepsilon_z(t)$, $\varepsilon_\theta(t)$, определяемых по соотношениям (13), (14).

На основании изложенного осевую компоненту полной деформации в поверхностно упрочнённом слое можно представить в виде

$$\varepsilon_z(t) + \varepsilon_z^0 = q_z(r) + e_z^{\text{res}}(r, t) + p_z^{\text{res}}(r, t). \quad (15)$$

Здесь $\varepsilon_z(t)$ — полная осевая деформация цилиндрического образца, рассчитываемая с помощью соотношений (13), (14); ε_z^0 — величина полных остаточных осевых деформаций после процедуры ППД; $q_z(r)$ — компонента остаточных пластических деформаций; $e_z^{\text{res}}(r, t)$ — компонента упругих деформаций; $p_z^{\text{res}}(r, t)$ — компонента деформации ползучести. При этом величины $e_z^{\text{res}}(r, t)$, $p_z^{\text{res}}(r, t)$ рассчитываются через напряжения $\sigma_z^{\text{res}}(r, t)$, $\sigma_\theta^{\text{res}}(r, t)$, $\sigma_r^{\text{res}}(r, t)$ в поверхностном слое.

Аналогично (14) радиальную и окружную компоненты деформаций в поверхностном слое можно представить в виде

$$\varepsilon_i(t) + \varepsilon_i^0 = q_i(r) + e_i^{\text{res}}(r, t) + p_i^{\text{res}}(r, t) \quad (i = r, \theta). \quad (16)$$

Для обоснования процедуры вычисления напряжений при релаксации перепишем равенства (15), (16) в следующем виде:

$$e_i^{\text{res}}(r, t) = g_i(r, t), \quad i = r, z, \theta, \quad (17)$$

где введены функции

$$g_i(r, t) = \varepsilon_i(t) + \varepsilon_i^0 - q_i(r) - p_i^{\text{res}}(r, t);$$

Выражая e_r^{res} , e_z^{res} , e_θ^{res} через напряжения σ_r^{res} , σ_z^{res} , $\sigma_\theta^{\text{res}}$ в поверхностном слое по закону Гука, из (17) получаем

$$\begin{cases} \sigma_r^{\text{res}}(r, t) - \mu\sigma_z^{\text{res}}(r, t) - \mu\sigma_\theta^{\text{res}}(r, t) = E g_r(r, t), \\ -\mu\sigma_r^{\text{res}}(r, t) + \sigma_z^{\text{res}}(r, t) - \mu\sigma_\theta^{\text{res}}(r, t) = E g_z(r, t), \\ -\mu\sigma_r^{\text{res}}(r, t) - \mu\sigma_z^{\text{res}}(r, t) + \sigma_\theta^{\text{res}}(r, t) = E g_\theta(r, t), \end{cases}$$

откуда

$$\sigma_i^{\text{res}}(r, t) = \frac{E}{1 + \mu} g_i(r, t) + \frac{E\mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} (g_r(r, t) + g_z(r, t) + g_\theta(r, t)), \quad (18)$$

при $i = r, z, \theta$.

Соотношения (18) позволяют следить за процессом релаксации остаточных напряжений в упрочнённом слое при неупругом растяжении цилиндрического образца.

3. Результаты расчёта и анализ. Численная реализация предложенного метода и проверка адекватности расчётных значений экспериментальным данным проводилась на основании представленных в п. 1 данных для цилиндрического круглого образца радиуса $R_1 = 3,75$ мм и образца с надрезом радиуса $\rho_0 = 0,3$ мм из стали ЭИ 691, упрочнённых алмазным выглаживанием, а затем подвергшихся термоэкспозиции (выдержка при температуре без нагрузки, величина растягивающей нагрузки в модели $F(t) = 0$) в течение 100 ч при $T = 400^\circ\text{C}$.

Экспериментальные значения для компоненты $\sigma_z^{\text{res}}(r)$ в образцах после упрочнения и после термоэкспозиции (вследствие ползучести) представлены на рис. 4 сплошными линиями.

Следует отметить, что в дальнейших теоретических исследованиях для образцов с концентратором исследовалась модель для гладкого цилиндрического образца, применённая к сечению образца с концентратором с минимальным радиусом.

Исходной информацией для расчёта полей остаточных напряжений после процедуры упрочнения является компонента $\sigma_\theta^{\text{res}}(r)$ (см. схему (12)), для которой в настоящей работе использована следующая аппроксимация:

$$\sigma_\theta^{\text{res}}(r) = \sigma_0 + \sigma_1 \exp\left(-\frac{(R_1 - h^* - r)^2}{b^2}\right), \quad (19)$$

где σ_0 , σ_1 , b , h^* — параметры аппроксимации.

Из-за отсутствия экспериментальных данных для компоненты $\sigma_\theta^{\text{res}}(r)$ варьировались параметры σ_0 , σ_1 , b , h^* и каждый раз осуществлялся численный расчёт по схеме (12) до достижения минимума функционала среднеквадратического отклонения между расчётными и экспериментальными значениями $\sigma_z^{\text{res}}(r)$. В итоге получены следующие значения параметров:

— для гладкого образца: $\sigma_0 = 57,47$ МПа, $\sigma_1 = 1033,47$ МПа, $b = 0,2353$ мм, $h^* = 0$;

— для образца с концентратором: $\sigma_0 = 31,58$ МПа, $\sigma_1 = 1422,45$ МПа, $b = 0,205$ мм, $h^* = -0,116$ мм.

Для расчёта процесса релаксации остаточных напряжений во время термоэкспозиции при $T = 400^\circ\text{C}$ необходимо иметь теорию ползучести при этой температуре. Однако экспериментальных данных по ползучести при $T = 400^\circ\text{C}$ в справочной литературе не имеется. Но имеются данные для $T = 500^\circ\text{C}$ и $T = 550^\circ\text{C}$, они представлены на рис. 5 и 6. В силу того, что на этой временной базе отсутствует третья стадия ползучести, в качестве расчётной модели использовался частный случай реологической модели вида [9]:

$$p_{ij}(t) = v_{ij}(t) + w_{ij}(t); \quad (20)$$

$$\dot{w}_{ij} = \frac{3}{2}cS^{m-1}\left(\sigma_{ij} - \frac{1}{3}\sigma_1\delta_{ij}\right); \quad (21)$$

$$v_{\omega\omega}(t) = \sum_{k=1}^N v_{\omega\omega}^k(t);$$

$$v_{\omega\omega}^k(t) = (1 + \mu')\beta_{\omega\omega}^k(t) - \mu'(\beta_{11}^k(t) + \beta_{22}^k(t) + \beta_{33}^k(t)); \quad (22)$$

$$\dot{\beta}_{\omega\omega}^k = \begin{cases} \lambda_k [b_k S^{n-1} \sigma_{\omega\omega} - \beta_{\omega\omega}^k], & \text{если } [\dots] \cdot \sigma_{\omega\omega} > 0; \\ 0, & \text{если } [\dots] \cdot \sigma_{\omega\omega} \leq 0, \end{cases}$$

где w_{ij} , v_{ij} — вязкая и вязкопластическая составляющие деформации ползучести p_{ij} ; λ_k , c , b_k , n , N — константы модели, при помощи которых описываются первая и вторая стадии ползучести; μ' — коэффициент Пуассона для вязкопластической компоненты; $\sigma_1 = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}$; S — интенсивность напряжений, причём расчёт для компоненты v_{ij} ведётся в главных осях.

В одноосном случае при $\sigma = \text{const}$ решение (20)–(22) даёт следующую зависимость:

$$p(t) = \sum_{k=1}^N b_k (1 - e^{-\lambda_k t}) \sigma^m + c \sigma^n t. \quad (23)$$

С использованием (23) по методике работ [11, 12], были получены аппроксимации кривых ползучести при $T = 500^\circ\text{C}$ и $T = 550^\circ\text{C}$, а затем температурная аппроксимация в виде

$$p(t, \sigma, T) = [0,9 \cdot 10^{-12}(1 - e^{-0,6t}) + 2,1 \cdot 10^{-12}(1 - e^{-0,08t})] \times \\ \times e^{0,0242T} \sigma^{2,37} + 5,55 \cdot 10^{-34} e^{0,107T} \sigma^{\frac{644-0,95T}{50}} t, \quad T \in [500, 550]^\circ\text{C}. \quad (24)$$

На рис. 5 и 6 сплошными линиями показаны расчётные кривые ползучести по зависимости (24).

На основании использованной далее экстраполяции из (24) получена зависимость при $T = 400^\circ\text{C}$:

$$p_z(t, \sigma) = [1,44 \cdot 10^{-8}(1 - e^{-0,6t}) + 3,36 \cdot 10^{-8}(1 - e^{-0,08t})] \sigma^{2,37} + \\ + 2,148 \cdot 10^{-15} \sigma^{5,28} t. \quad (25)$$

Таким образом, соотношение (25) позволяют установить все параметры модели (20)–(22) при $T = 400^\circ\text{C}$: $\lambda_1 = 0,6$; $\lambda_2 = 0,08$; $m = 2,37$; $b_1 = 1,44 \times 10^{-8}$; $b_2 = 3,36 \cdot 10^{-8}$; $c = 2,148 \cdot 10^{-15}$; $n = 5,28$; величина μ' полагалась равной 0,42. Кроме этого, $E = 161\,700$ МПа, $\mu = 0,3$.

Изложенная выше методика релаксации остаточных самоуравновешенных напряжений ($F(t) = 0$) в упрочнённом слое при $T = 400^\circ\text{C}$ реализована численно. Для этого вводилась дискретизация области $0 \leq r \leq R_1$, а промежуток времени наблюдения за деформацией ползучести разбивался точками $t_0 = 0, t_1, t_2, \dots$ на интервалы $[t_j, t_{j+1}]$ в каждом из которых система дифференциальных уравнений ползучести решалась численно, производные от напряжений аппроксимировались конечно-разностными соотношениями.

Расчёты выполнены на временной базе до 2 000 ч, при этом как для гладких образцов, так и для образцов с концентраторами экспериментальные данные при $t = 100$ ч являлись реперными для проверки адекватности расчётных значений, которые приведены штриховыми линиями на рис. 4. В целом наблюдается удовлетворительное соответствие расчётных и экспериментальных данных. На рис. 7 в качестве примера приведены расчётные значения кинетики напряжений $\sigma_\theta^{\text{res}}(R_1, t)$ $\sigma_z^{\text{res}}(R_1, t)$ на поверхности главного образца во

Рис. 5. Экспериментальные (точки) и расчётные (сплошные линии) зависимости неупругого реологического деформирования при $T = 500$ °C: 1 — $\sigma = 240$ МПа, 2 — $\sigma = 260$ МПа, 3 — $\sigma = 300$ МПа

Рис. 6. Экспериментальные (точки) и расчётные (сплошные линии) зависимости реологического деформирования при $T = 550$ °C: 1 — $\sigma = 120$ МПа, 2 — $\sigma = 150$ МПа, 3 — $\sigma = 180$ МПа

Рис. 7. Кривые релаксации остаточных напряжений на поверхности упрочнённого гладкого образца при термоэкспозиции: 1 — $\sigma_{\theta}^{\text{res}}(R_1, t)$, 2 — $\sigma_z^{\text{res}}(R_1, t)$

времени, из анализа которых следует, что вначале наблюдается существенное падение (по модулю) величины остаточных напряжений, однако затем этот процесс стабилизируется и становится близким к асимптотическому. Это связано с тем, что при этих значениях остаточных напряжений ползучесть практически затухает (см. формулу (25)). Аналогичная картина наблюдается и при релаксации остаточных напряжений для образца с концентратором в его минимальном сечении.

Таким образом, при термоэкспозиции происходит релаксация остаточных напряжений, которая за время $t = 100$ часов составляет около 30 %, а, например, за 1000 часов — около 40 %, и далее процесс релаксации стабилизируется, т. е. и при повышенных температурах для стали ЭИ 691 сохраняется значительный «запас мощности» наведённых остаточных напряжений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 07-01-00478-а) и Федерального агентства по образованию (проект РНП. 2.1.1/3397).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Биргер И. А. Остаточные напряжения. — М: Машгиз, 1963. — 232 с.
2. Одинг И. А. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов. — М: Машгиз, 1962. — 260 с.
3. Кудрявцев И. В. Поверхностный наклёп для повышения прочности и долговечности деталей машин поверхностным пластическим деформированием. — М: Машиностроение, 1969. — 214 с.
4. Кравченко Б. А., Круцило В. Г., Гутман Г. Н. Термопластическое упрочнение — резерв повышения прочности и надёжности деталей машин. — Самара: СамГТУ, 2000. — 216 с.
5. Павлов В. Ф., Кирпичёв В. А., Иванов В. Б. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений. — Самара: СНЦ РАН, 2008. — 64 с.
6. Иванов С. И. Определение остаточных напряжений в поверхностном слое цилиндра / В сб.: *Вопросы прочности элементов авиационных конструкций*. — № 48. — Куйбышев: КуАИ, 1971. — С. 139–152.
7. Иванов С. И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок / В сб.: *Остаточные напряжения*. — № 53. — Куйбышев: КуАИ, 1971. — С. 32–42.
8. Иванов С. И., Шатунов М. П., Павлов В. Ф. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом / В сб.: *Вопросы прочности элементов авиационных конструкций*. — Куйбышев: КуАИ, 1974. — С. 88–96.
9. Радченко В. П., Саушкин М. Н. Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочнённых конструкциях. — М: Машиностроение, 2005. — 226 С.
10. Радченко В. П., Саушкин М. Н. Математические модели восстановления и релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом слое цилиндрических элементов конструкций при ползучести // *Известия вузов. Машиностроение*, 2004. — № 11. — С. 3–17.
11. Самарин Ю. П. Уравнения состояния материалов со сложными реологическими свойствами. — Куйбышев: КуГУ, 1979. — 84 с.
12. Самарин Ю. П. Построение экспоненциальных аппроксимаций для кривых ползучести методом последовательного выделения экспоненциальных слагаемых // *Пробл. прочности*, 1974. — № 9. — С. 24–27.

Поступила в редакцию 15/ХП/2008;
в окончательном варианте — 13/П/2009.

MSC: 74A10, 74C05, 74S30, 74F05, 74-05

CALCULATION-EXPERIMENTAL RESEARCH OF RESIDUAL STRESSES STABILITY IN HARDENED LAYER OF THE CYLINDRICAL SAMPLE TO THERMAL LOADS

*M. N. Saushkin*¹, *V. A. Kirpichyov*², *O. S. Afanasieva*¹, *D. V. Ivanov*²

¹ Samara State Technical University,
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100.

² S. P. Korolyov Samara State Aerospace University,
34, Moskovskoe sh., Samara, 443086.

E-mails: msaushkin@gmail.com, sopromat@ssau.ru, afa@samgtu.ru

The cycle of experimental and theoretical researches on influence of thermal loads on a relaxation of residual stresses in hardened layer of the cylindrical and vee-notched specimens from steel EI 691 is executed. It is shown that the residual stress relaxation is caused by the creep. The design procedure of residual stress relaxation in the conditions of creep phenomenon is resulted. Results of the experimental and calculated data are analysed.

Key words: surface plastic deformation, cylindrical specimen, half-circle stress raiser, temperature exposure, calculation and experimental researches, creep, relaxation of residual stresses.

Original article submitted 15/XII/2008;
revision submitted 13/II/2009.

Saushkin Mikhail Nikolaevich, Ph. D. (Phis. & Math.) Ass. Prof., Dept. of Applied Mathematics and Computer Science.

Kirpichyov Viktor Alexeevich, Ph. D. (Techn.) Ass. Prof., Dept. of Materials Strength.

Afanasieva Olga Sergeevna, Postgraduate Student, Dept. of Applied Mathematics and Computer Science.

Ivanov Denis Vsevolodovich, Postgraduate Student, Dept. of Materials Strength.