Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

М. Н. Саушкин, В. А. Кирпичёв, В. А. Смыслов, Феноменологический подход к моделированию напряжённо-деформированного состояния в поверхностно упрочнённом слое цилиндрического изделия, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2009, выпуск 1(), 159–168

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu683>

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: 35.173.137.237

26 апреля 2023 г., 03:55:23

УДК 539.376:539.4.014.13

ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЁННОМ СЛОЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ИЗДЕЛИЯ

М. Н. Саушкин¹, В. А. Кирпичёв², В. А. Смыслов¹

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, smsvit@gmail.com

Приводится расчётно-экспериментальный метод восстановления компонент тензоров остаточных напряжений и деформаций в поверхностном слое цилиндрического образца по одной из экспериментально замеренных компонент напряжений. Для решения поставленной задачи вводится ряд гипотез, одна из которых сводится к следующему: характер распределения пластических деформаций в упрочнённом слое цилиндрического изделия такой же, как и в полуплоскости. Приводятся соответствующие расчётные и экспериментальные данные, которые хорошо согласуются между собой.

Ключевые слова: остаточные напряжения, цилиндрический образец, методика, экспериментальные данные.

Введение. Хорошо известно, что потеря изделием своего служебного назначения и его разрушение в большинстве случаев начинаются с поверхностного слоя, например, из-за возникновения и развития усталостной трещины, коррозии, эрозии, износа и др. [1–3].

Одним из способов повышения долговечности многих изделий является наведение сжимающих остаточных напряжений (ОН) в поверхностном слое (упрочнение). При этом повышение, например, сопротивления усталости обусловлено главным образом наличием сжимающих напряжений в поверхностном слое [4, 5].

В настоящее время существует большое количество экспериментальных методов, позволяющих восстановить картину напряжённо-деформированного состояния (НДС) упрочнённого слоя после применения процедуры поверхностного пластического деформирования (ППД). Однако традиционные испытательные установки обеспечивают измерение только двухосных напряжённых состояний. Для получения трёхмерного распределения полей ОН приходится использовать различного рода экспериментально-аналитические методы, которые в основном основаны на математической обработке «частично известной» экспериментальной информации (одна или две компоненты полей перемещений, тензоров деформаций или напряжений).

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.

Смыслов Виталий Андреевич — студент специальности «Прикладная математика и информатика».

В настоящей работе развивается предложенный в работах [6–8] расчётно-феноменологический подход, позволяющий определить трёхмерное распределение полей остаточных напряжений и пластических деформаций в упрочнённом слое цилиндрического изделия по одной экспериментально измеренной компоненте остаточных напряжений.

1. Схема расчёта НДС в поверхностно упрочнённом слое цилиндрического изделия. В качестве гипотезы предполагается, что характер распределения пластических деформаций в упрочнённом слое цилиндрического изделия такой же, как в полуплоскости. Это предположение основано на том, что процесс наведения в материале остаточных деформаций может быть организован по-разному. К примеру, если бомбардировать поверхность изделия большим числом микрошариков по нормали к поверхности (радиус шарика значительно меньше радиуса цилиндрического образца), то деформации в упрочнённом слое, вероятно, будут наводиться так же, как в полупространстве. Кроме того, предположим, что касательные ОН либо отсутствуют, либо являются малыми по сравнению с нормальными напряжениями и что вторичные пластические деформации при сжатии не возникают.

Введём стандартную цилиндрическую систему координат — r, θ, z и обозначим через $\sigma_\theta^{\text{res}}, \sigma_r^{\text{res}}, \sigma_z^{\text{res}}$ окружное, радиальное, осевое остаточные напряжения соответственно.

В работах [6–8] предполагалось, что экспериментально известной является величина $\sigma_\theta^{\text{res}}$, и рассматривалась задача о вычислении напряжений $\sigma_r^{\text{res}}, \sigma_z^{\text{res}}$, а также соответствующих им пластических деформаций q_r, q_θ, q_z по известной компоненте $\sigma_\theta^{\text{res}}$. Однако зачастую экспериментально известной является величина σ_z^{res} [1–5]. В этом случае методику работ [6–8] необходимо модифицировать. Но и в этом случае на первом этапе необходимо получить расчётные формулы для компонент тензора напряжений $\sigma_r^{\text{res}}, \sigma_z^{\text{res}}$ и компонент q_r, q_θ, q_z через величину $\sigma_\theta^{\text{res}}$.

Из уравнения равновесия

$$r \frac{d\sigma_r^{\text{res}}}{dr} + \sigma_r^{\text{res}} = \sigma_\theta^{\text{res}} \quad (1)$$

можно установить необходимые в дальнейшем свойства функции $\sigma_\theta^{\text{res}}(r)$ и $\sigma_r^{\text{res}}(r)$.

Умножив обе части уравнения (1) на dr и проинтегрировав их по r в пределах от 0 до a , где a — радиус цилиндрического образца, получим

$$\int_0^a \sigma_\theta^{\text{res}}(r) dr = \int_0^a d(r\sigma_r^{\text{res}}(r)) = r\sigma_r^{\text{res}}(r) \Big|_0^a,$$

откуда, воспользовавшись условием

$$\sigma_r^{\text{res}} \Big|_{r=a} = 0,$$

которое означает, что цилиндрический образец находится в естественном ненагруженном состоянии, получаем, что эпюра напряжений $\sigma_\theta^{\text{res}}$ должна быть самоуравновешенной:

$$\int_0^a \sigma_\theta^{\text{res}}(r) dr = 0. \quad (2)$$

С помощью уравнения (1) выразим σ_r^{res} через $\sigma_\theta^{\text{res}}$:

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

Используя условие (2), последнему выражению можно придать вид

$$\sigma_r^{\text{res}}(r) = \frac{1}{r} \int_0^r \sigma_\theta^{\text{res}}(\xi) d\xi. \quad (3)$$

Соотношение (3) позволяет вычислить $\sigma_r^{\text{res}}(r)$ по известным значениям функции $\sigma_\theta^{\text{res}}(r)$.

Отметим ещё одно свойство функций $\sigma_\theta^{\text{res}}(r)$ и $\sigma_r^{\text{res}}(r)$, а именно, если обозначить

$$\lim_{r \rightarrow 0} \sigma_\theta^{\text{res}}(r) = \tilde{\sigma}_0,$$

то из (3) имеем, что и

$$\lim_{r \rightarrow 0} \sigma_r^{\text{res}}(r) = \tilde{\sigma}_0.$$

Величина $\sigma_z^{\text{res}}(r)$ может быть вычислена лишь с учётом остаточных пластических деформаций.

Пусть полная деформация цилиндрического образца ε_i^0 , приобретённая в результате поверхностного упрочнения, представлена в виде

$$\varepsilon_i^0 = e_i^0 + q_i \quad (i = r, \theta, z), \quad (4)$$

где e_i^0 — тензор упругих деформаций, а q_i — тензор остаточных пластических деформаций.

Введённая гипотеза о характере распределения пластических деформаций в упрочнённом слое цилиндрического изделия как в полуплоскости, математически означает следующее:

$$q_z = q_\theta, \quad (5)$$

С помощью условия несжимаемости при пластическом деформировании

$$q_\theta + q_z + q_r = 0$$

и гипотезы (5) легко установить, что

$$q_\theta = q_z = -\frac{q_r}{2}. \quad (6)$$

Подставляя в уравнение совместности деформаций

$$r \frac{d\varepsilon_\theta^0}{dr} + \varepsilon_\theta^0 = \varepsilon_r^0$$

соотношение (4), получим

$$r \left(\frac{de_\theta^0}{dr} + \frac{dq_\theta^0}{dr} \right) + e_\theta^0 + q_\theta = e_r^0 + q_r,$$

откуда, исключая q_r с помощью (6), находим дифференциальное уравнение для окружной компоненты:

$$r \frac{dq_\theta^0}{dr} + 3q_\theta = e_r^0 - e_\theta^0 - r \frac{de_\theta^0}{dr}. \quad (7)$$

Входящие в (7) упругие деформации нетрудно выразить через остаточные напряжения из закона Гука:

$$\begin{aligned} Ee_r^0 &= \sigma_r^{\text{res}} - \mu(\sigma_\theta^{\text{res}} + \sigma_z^{\text{res}}), \\ Ee_\theta^0 &= \sigma_\theta^{\text{res}} - \mu(\sigma_r^{\text{res}} + \sigma_z^{\text{res}}), \end{aligned} \quad (8)$$

где μ — коэффициент Пуассона, E — модуль Юнга для рассматриваемого материала. В соотношениях Гука с уже известными напряжениями $\sigma_\theta^{\text{res}}$ и σ_r^{res} фигурирует неизвестная величина σ_z^{res} . Для определения осевых напряжений введём гипотезу плоских сечений для цилиндрического образца, согласно которой плоские поперечные сечения цилиндрического образца до упрочнения остаются плоскими и после него, что характерно для не слишком коротких цилиндров. При этом очевидно $\varepsilon_z^0 = e_z^0 + q_z$ ($\varepsilon_z^0 = \text{const}$, $r \in [0; a]$). Гипотеза может нарушаться лишь вблизи свободных торцов цилиндра.

Выражая деформацию e_z через закон Гука и подставляя её в формулу для ε_z , найдём, что

$$\sigma_z^{\text{res}}(r) = E(\varepsilon_z^0 - q(r)) + \mu(\sigma_r^{\text{res}}(r) + \sigma_\theta^{\text{res}}(r)). \quad (9)$$

С помощью (9) из соотношений (8) можно исключить $\sigma_z^{\text{res}}(r)$:

$$\begin{aligned} Ee_r^0 &= (1 + \mu) \left[(1 - \mu)\sigma_r^{\text{res}} - \mu\sigma_\theta^{\text{res}} \right] - E\mu(\varepsilon_z^0 - q_z), \\ Ee_\theta^0 &= (1 + \mu) \left[(1 - \mu)\sigma_\theta^{\text{res}} - \mu\sigma_r^{\text{res}} \right] - E\mu(\varepsilon_z^0 - q_z). \end{aligned} \quad (10)$$

Обозначим правую часть дифференциального уравнения (7) через f и преобразуем её с учётом (5) и (10), тогда

$$f = \frac{1 + \mu}{E} [\sigma_r^{\text{res}} - \mu\sigma_\theta^{\text{res}}] - r \frac{1 + \mu}{E} \left[(1 - \mu) \frac{d\sigma_\theta^{\text{res}}}{dr} - \mu \frac{d\sigma_r^{\text{res}}}{dr} \right] - r\mu \frac{dq_\theta}{dr}. \quad (11)$$

С учётом (11) дифференциальное уравнение (7) запишется так:

$$r \frac{dq_\theta^0(r)}{dr} + \frac{3}{1 + \mu} q_\theta(r) = g(r), \quad (12)$$

где

$$g(r) = \frac{1}{E} [\sigma_r^{\text{res}}(r) - \mu\sigma_\theta^{\text{res}}(r)] - \frac{r}{E} \left[(1 - \mu) \frac{d\sigma_\theta^{\text{res}}(r)}{dr} - \mu \frac{d\sigma_r^{\text{res}}(r)}{dr} \right]. \quad (13)$$

Поскольку при поверхностном упрочнении пластические деформации наводятся лишь на небольшой глубине, то в окрестности точки $r = 0$ можно ввести следующую гипотезу:

$$\lim_{r \rightarrow 0} q_\theta(r) = 0. \quad (14)$$

Тогда решение задачи (12), (14) имеет вид [7]:

$$q_\theta(r) = r^{-\frac{3}{1+\mu}} \int_0^r \xi^{\frac{2-\mu}{1+\mu}} g(\xi) d\xi. \quad (15)$$

или после подстановки (13) в (15) —

$$q_\theta(r) = \frac{1-2\nu}{E(1+\mu)} r^{-\frac{3}{1+\mu}} \int_0^r \xi^{\frac{2-\mu}{1+\mu}} [\sigma_r^{\text{res}}(\xi) + 2\sigma_\theta^{\text{res}}(\xi)] d\xi - \frac{1}{E} [(1-\mu)\sigma_\theta^{\text{res}}(r) - \mu\sigma_r^{\text{res}}(r)]. \quad (16)$$

Теперь можно полностью восстановить поля остаточных пластических деформаций: согласно (16) вычисляется $q_\theta(r)$, а затем в соответствии с (5) и (6) — $q_z(r)$ и $q_r(r)$.

Для определения последней неизвестной величины $\sigma_r^{\text{res}}(r)$ согласно (9) достаточно найти ε_z^0 . Это можно сделать исходя из условия нулевого суммарного осевого усилия, действующего на образец:

$$\int_0^a r \sigma_z^{\text{res}}(r) dr = 0. \quad (17)$$

Умножая равенство (9) на r , интегрируя обе его части в пределах от 0 до a и учитывая (17), получаем

$$\varepsilon_z^0 = \frac{2}{a^2} \int_0^a r \left\{ q_z(r) - \frac{\mu}{E} [\sigma_r^{\text{res}}(r) + \sigma_\theta^{\text{res}}(r)] \right\} dr. \quad (18)$$

Вычислив согласно (18) величину ε_z^0 , можно в соответствии с (9) однозначно определить функцию $\sigma_z^{\text{res}}(r)$.

2. Идентификация модели и расчёт остаточных напряжений в упрочнённом слое. Как следует из (3), (6), (16), (9) и (18), все характеристики НДС в упрочнённом слое выражаются через $\sigma_\theta^{\text{res}}(r)$. В работе [7] предложена методика, в которой в качестве базовой информации используется экспериментальная зависимость для $\sigma_\theta^{\text{res}}(r)$, как правило, имеющая дискретный характер. Но поскольку она известна лишь в тонком упрочнённом слое (в области сжатия), то данные для $\sigma_\theta^{\text{res}}$ необходимо экстраполировать в область растяжения. Поэтому целесообразно дискретные значения опытных данных для $\sigma_\theta^{\text{res}}$ аппроксимировать аналитической функцией, но так, чтобы не были нарушены основные свойства для напряжений, сформулированные в п. 1. В [7] использовались зависимости для $\sigma_\theta^{\text{res}}$ с единственной точкой экстремума (минимума) на поверхности цилиндрического образца. Однако ряд экспериментальных зависимостей как для величины $\sigma_\theta^{\text{res}}$, так и для σ_z^{res} , имеют экстремум под

поверхностью. Для учёта этого факта предлагается следующая аналитическая аппроксимация для величины $\sigma_\theta^{\text{res}}$:

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

где a — радиус цилиндрического образца; $h^* = a - r^*$ — глубина слоя, при котором функция $\sigma_\theta^{\text{res}}(r)$ имеет свой минимум; σ_0 , σ_1 и b — параметры, подлежащие определению.

Обозначим через σ^* экспериментальное значение минимума $\sigma_\theta^{\text{res}}(r^*)$ ($r^* = a - h^*$), а через $h_0 = a - r_0$ — значение глубины слоя, при котором экспериментальные значения $\sigma_\theta^{\text{res}}(r_0) = 0$. Другими словами, экспериментальная зависимость удовлетворяет условиям

$$\sigma_\theta^{\text{res}}|_{r=r^*} = \sigma^*, \quad (20)$$

$$\sigma_\theta^{\text{res}}|_{r=r_0} = 0. \quad (21)$$

Используя (19) и (20), получаем

$$\sigma_0 - \sigma_1 = \sigma^*, \quad (22)$$

а из (19) и (21) для отношения $\frac{\sigma_0}{\sigma_1}$ имеем:

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_1} = \exp\left(-\left(\frac{h_0 - h^*}{b}\right)^2\right). \quad (23)$$

Учитывая, что эпюра напряжений $\sigma_\theta^{\text{res}}(r)$ должна быть самоуравновешенной, подставляя (19) в (2) и вычисляя соответствующие интегралы, получим

$$a\sigma_0 - \sigma_1 \frac{b\sqrt{\pi}}{2} \left(\operatorname{erf}\left(\frac{a - h^*}{b}\right) - \operatorname{erf}\left(-\frac{h^*}{b}\right) \right) = 0,$$

откуда

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_1} = \frac{b\sqrt{\pi}}{2a} \left(\operatorname{erf}\left(\frac{a - h^*}{b}\right) - \operatorname{erf}\left(-\frac{h^*}{b}\right) \right), \quad (24)$$

где $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-\xi^2) d\xi$. Теперь из (23) и (24) получаем уравнение для определения b :

$$\exp\left(-\left(\frac{h_0 - h^*}{b}\right)^2\right) = \frac{b\sqrt{\pi}}{2a} \left(\operatorname{erf}\left(\frac{a - h^*}{b}\right) - \operatorname{erf}\left(-\frac{h^*}{b}\right) \right), \quad (25)$$

которое решается численно. Зная величину b и подставляя (22) в (23), находим величину σ_1 :

$$\sigma_1 = \frac{\sigma^*}{\exp\left(-\left(\frac{h_0 - h^*}{b}\right)^2\right) - 1}. \quad (26)$$

И, наконец, из (22) определяем

$$\sigma_0 = \sigma_1 + \sigma^*. \quad (27)$$

Таким образом, все параметры σ_0 , σ_1 и b в аппроксимации (19) определены. Имея представление $\sigma_\theta^{\text{res}}$ в виде (19), для σ_r^{res} из (3) получаем

$$\sigma_r^{\text{res}}(r) = \sigma_0 - \sigma_1 \frac{b\sqrt{\pi}}{2r} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{a-h^*}{b}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a-h^*-r}{b}\right) \right]. \quad (28)$$

Задача определения всех остаточных напряжений и пластических деформаций в поверхностно упрочнённом слое цилиндрического изделия решена полностью. Схема их определения имеет вид:

$$\begin{aligned} a, h_0, h^* &\xrightarrow{(25)} b \xrightarrow{(26)} \sigma_1 \xrightarrow{(27)} \sigma_0 \xrightarrow{(19)} \sigma_\theta^{\text{res}}(r) \xrightarrow{(28)} \sigma_r^{\text{res}}(r) \xrightarrow{(16)} \\ q_\theta(r) &\xrightarrow{(6)} q_z(r), q_r(r) \xrightarrow{(18)} \varepsilon_z^0 \xrightarrow{(9)} \sigma_z^{\text{res}}(r). \end{aligned} \quad (29)$$

Как уже отмечалось выше, на практике во многих случаях экспериментально известной является не окружная компонента $\sigma_\theta^{\text{res}}$, а осевая — σ_z^{res} . В этом случае выполнено обобщение результатов работы [7], заключающееся в том, что идентификация параметров σ_0 , σ_1 , b и h^* осуществляется путём среднеквадратической минимизации функционала разности расчётных $\sigma_{z\text{p}}^{\text{res}}$ и экспериментальных $\sigma_{z\text{э}}^{\text{res}}$ данных величины осевой компоненты ОН:

$$\frac{\sum_{i=1}^N [\sigma_{z\text{p}}^{\text{res}}(r_i) - \sigma_{z\text{э}}^{\text{res}}(r_i)]^2}{\sum_{i=1}^N [\sigma_{z\text{э}}^{\text{res}}(r_i)]^2} \rightarrow \min, \quad (30)$$

где N — число точек дискретизации (экспериментальных значений) по радиусу.

В работе [7] показано, что функции $\sigma_\theta^{\text{res}}(r)$ и $\sigma_z^{\text{res}}(r)$ различаются незначительно. Поэтому в качестве начального (нулевого) приближения параметров σ_0 , σ_1 , b и h^* в аппроксимации (19) для $\sigma_\theta^{\text{res}}(r)$ принимаются аналогичные значения графика $\sigma_z^{\text{res}}(r)$ и реализуется (численно) полная схема расчёта (29). Далее, с использованием релаксационного метода, осуществляется целенаправленное варьирование значений этих параметров до выполнения критерия (30).

3. Результаты расчётов. Для реализации вышеуказанной методики разработано программное обеспечение, позволяющее решать задачу восстановления НДС в упрочнённом слое в автоматическом режиме. Апробация метода выполнена для различных режимов поверхностного пластического упрочнения. На рис. 1–3 представлены соответствующие результаты расчётов. На рис. 1 представлены экспериментальные данные (точки) компоненты $\sigma_\theta^{\text{res}}$; сплошными линиями — расчётные осевая и окружная компоненты тензора напряжений, вычисленные по схеме (29).

На рис. 2 и 3 представлены экспериментальные данные (точки) компоненты σ_z^{res} ; сплошными линиями — расчётные осевая и окружная компоненты тензора напряжений, вычисленные по изложенной методике. Здесь осуществлялась минимизация функционала (30).

Вычисленные значения параметров аппроксимации (19) для каждого представленного на рисунках случая приведены в таблице.

Рис. 1. Компоненты остаточных напряжений в цилиндрическом образце радиуса 3,76 мм из сплава ЖС6 КП после дробеструйного упрочнения: точки — экспериментальные значения $\sigma_{\theta}^{\text{res}}$; 1 — расчётные значения $\sigma_{\theta}^{\text{res}}$; 2 — расчётные значения σ_z^{res}

Рис. 2. Компоненты остаточных напряжений в цилиндрическом образце радиуса 2,385 мм из стали ЭИ 696 после обкатки роликом: точки — экспериментальные значения σ_z^{res} ; 1 — расчётные значения σ_z^{res} ; 2 — расчётные значения $\sigma_{\theta}^{\text{res}}$

Рис. 3. Компоненты остаточных напряжений в цилиндрическом образце радиуса 7,5 мм из стали ЭИ 961 после алмазного выглаживания: точки — экспериментальные значения σ_z^{res} ; 1 — расчётные значения σ_z^{res} ; 2 — расчётные значения $\sigma_{\theta}^{\text{res}}$

№ рисунка	a , мм	h^* , мм	σ_0 , МПа	σ_1 , МПа	b , мм
1	3,76	0	11,58	611,58	0,08
2	2,385	0,07	76,05	1506,06	0,076
3	7,5	0	57,43	1026,65	0,237

Как видно из представленных на рис. 1–3 зависимостей, наблюдается хорошее соответствие расчётных и экспериментальных данных.

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. Сулима А. М., Евстигнеев Н. И. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных титановых сплавов. — М.: Машиностроение, 1974. — 256 с.
2. Сулима А. М., Шувалов В. А., Ягодкин Ю. Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. — М.: Машиностроение, 1988. — 240 с.
3. Биргер И. А. Остаточные напряжения. — М.: Машгизполуплоскость, 1963. — 232 с.
4. 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.
5. Павлов В. Ф. Влияние характера распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя детали на сопротивление усталости // *Извест. вузов. Машиностроение*, 1987. — № 7. — С. 3–6.
6. Радченко В. П., Саушкин М. Н. Математические модели восстановления и релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом слое цилиндрических элементов конструкций при ползучести // *Извест. вузов. Машиностроение*, 2004. — № 11. — С. 3–17.
7. Радченко В. П., Саушкин М. Н. Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочнённых конструкциях. — М.: Машиностроение-1, 2005. — 226 с.
8. Саушкин М. Н., Афанасьева О. С., Дубовова Е. В., Просвиркина Е. А. Схема расчёта полей остаточных напряжений в цилиндрическом образце с учётом организации процесса поверхностного пластического деформирования // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2008. — № 1(16). — С. 85–89.

Поступила в редакцию 15/ХП/2008;
в окончательном варианте — 11/П/2009.

MSC: 74A10, 74C05, 74S30

A PHENOMENOLOGICAL APPROACH FOR MODELING THE STRESS-STRAIN STATE OF CYLINDER SURFACE HARDENING LAYER

*M. N. Saushkin*¹, *V. A. Kirpichyov*², *V. A. Smyslov*¹

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

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

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

Calculation-experimental method was applied for restoration of components of residual stress tensors and deformations in the surface layer of a cylindrical sample according to experimentally measured tension components. In order to solve this problem a number of hypotheses were introduced, including that claimed that distribution of plastic strain state in a hardening layer of a cylindrical sample is equal to that in a half-plane. Well correlating calculated and experimental data are demonstrated.

Key words: residual stresses, cylindrical sample, methodology, experimental data.

Original article submitted 15/XII/2008;
revision submitted 11/III/2009.

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

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

Smyslov Vitaliy Andreevich, Student, Dept. of Applied Mathematics and Computer Science.