

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 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – № 1. – С. 93–112. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.1.07

Radchenko V.P., Saushkin M.N., Bochkova T.I. Mathematical modeling and experimental study of forming and relaxation of the residual stresses in plane samples made of EP742 alloy after the ultrasonic hardening under the high-temperature creep conditions. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2016. No. 1. Pp. 93-112. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.1.07



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 1, 2016

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI 10.15593/perm.mech/2016.1.07

УДК 539.3 + 539.376

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ И РЕЛАКСАЦИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЛОСКИХ ОБРАЗЦАХ ИЗ СПЛАВА ЭП742 ПОСЛЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО УПРОЧНЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

В.П. Радченко, М.Н. Саушкин, Т.И. Бочкова

Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 17 февраля 2016 г.  
Принята: 18 марта 2016 г.  
Опубликована: 30 марта 2016 г.

#### Ключевые слова:

ультразвуковое упрочнение, плоские образцы, остаточные напряжения, математическая модель, высокотемпературная ползучесть, релаксация остаточных напряжений, экспериментальные данные

### АННОТАЦИЯ

Выполнено комплексное расчетно-экспериментальное исследование остаточных напряжений в призматических образцах из сплава ЭП742 после ультразвукового упрочнения и температурной выдержки без нагрузки при температуре 650 °С в течение 100 часов. Выявлены закономерности распределения остаточных напряжений по толщине поверхностно-упрочненного слоя. Экспериментально установлено, что обработка ультразвуковым упрочнением образцов вызывает появление в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений, максимум которых наблюдается в подповерхностном слое, а спад – к поверхности. При температурной выдержке происходит релаксация наведенных сжимающих остаточных напряжений, уровень остаточных напряжений уменьшается в 1,4–1,6 раз и происходит смещение их максимума вглубь образца, однако толщина сжатого слоя сохраняется на уровне 200 мкм.

Разработана математическая модель формирования остаточных напряжений в призматических образцах после поверхностного пластического деформирования и их релаксации в условиях высокотемпературной ползучести материала. Поскольку упрочненный слой достаточно тонкий, то для призматического образца в качестве модельного объекта использовано упрочненное полупространство. Для решения задачи введена декартова система координат: плоскость  $xOy$  совмещена с упрочненной поверхностью полупространства, а ось  $Oz$  направлена по глубине упрочненного слоя. Введены гипотезы плоских сечений, параллельных плоскостям  $xOy$  и  $yOz$ . Теоретически показано, что релаксация остаточных напряжений может быть связана с ползучестью материала при температуре испытаний в условиях неоднородного напряженно-деформированного состояния. Задача ползучести

© Радченко Владимир Павлович – доктор физико-математических наук, профессор, e-mail: radch@samgtu.ru.  
Саушкин Михаил Николаевич – кандидат физико-математических наук, доцент, e-mail: saushkin.mn@samgtu.ru.  
Бочкова Татьяна Игоревна – магистрант, e-mail: tanechka.bochkova@mail.ru.

Vladimir P. Radchenko – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, e-mail: radch@samgtu.ru.  
Mikhail N. Saushkin – Ph.D. in Physical & Mathematical Sciences, Associate Professor, e-mail: saushkin.mn@samgtu.ru.  
Tat'iana I. Bochkova – Master Student, e-mail: tanechka.bochkova@mail.ru.

упрочненного полупространства решена численно. Выполнена обстоятельная экспериментальная проверка математической модели при нормальной температуре и в условиях высокотемпературной ползучести при четырех режимах ультразвукового упрочнения, отличающихся длительностью ультразвуковых колебаний в зоне обрабатываемой микрошариками поверхности детали. Наблюдается удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных.

© ПНИПУ

## A MATHEMATICAL MODELING AND EXPERIMENTAL STUDY OF FORMING AND RELAXATION OF THE RESIDUAL STRESSES IN PLANE SAMPLES MADE OF EP742 ALLOY AFTER THE ULTRASONIC HARDENING UNDER THE HIGH-TEMPERATURE CREEP CONDITIONS

V.P. Radchenko, M.N. Saushkin, T.I. Bochkova

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

### ARTICLE INFO

Received: 17 February 2016  
Accepted: 18 March 2016  
Published: 30 March 2016

#### Keywords:

ultrasonic hardening,  
flat samples, residual stresses,  
mathematical model,  
high-temperature creep,  
residual stresses relaxation,  
experimental data

### ABSTRACT

The authors carried out a complex (computational and experimental) research of residual stresses in prismatic samples made of EP742 alloy after ultrasonic hardening and the temperature of 650 °C for 100 hours unloaded. The laws of residual stresses distribution over the thickness of the surface-hardened layer were discovered. The experiments proved that the ultrasonic hardening of the sample caused compression residual stresses in the surface layer. The maximum stresses were observed in the subsurface layer and they decreased on reaching the surface. When the temperature was exposed, the induced compression residual stresses became relaxed, the level of residual stresses decreased by 1.4–1.6 times and its maximum was displaced deep into the sample, but the thickness of the compressed layer was kept to about 200 micron.

We developed the mathematical model of residual stresses forming in prismatic samples after surface plastic deformation and relaxation under high-temperature creep conditions. We used the hardened half-space as a model object for the prismatic sample, because the hardened layer was rather thin. We introduced Cartesian coordinate system, where  $xOy$  plane coincided with the half-space hardened surface, and  $Oz$  axis was directed into the depth of the hardened layer.

© PNRPU

## Введение

Повышение ресурса элементов конструкций и деталей осуществляется в инженерной практике по разным направлениям: создание новых сверхпрочных материалов, модификация и улучшение свойств уже существующих металлов и сплавов за счет различных легирующих добавок, конструкторские решения на стадии проектирования и др. Особое место в этом ряду занимают технологические методы повышения эксплуатационных характеристик деталей различного назначения, связанные с процедурой поверхностного пластического деформирования, не приводящей к увеличению материалоемкости уже изготовленных деталей. К типовым промышленным упрочняющим технологиям относятся гидро- и пневмодробеструйная обработка поверхности, упрочнение микрошариками, обкатка роликом, термопластическое упрочнение и ряд других. Положительное влияние упрочняющих технологий связывают с образованием сжимающих остаточных напряжений в тонком упрочненном слое, которые препятствуют выходу на поверхность различного рода вакансий, являющихся микроочагами разрушения материала поверхности детали. Эффективность этих методов для повышения сопротивления усталости, износостойкости

и микротвердости поверхностных слоев при нормальных температурах отмечалась во многих работах как отечественных [1–6], так и зарубежных [7–12] исследователей.

В настоящей же работе акцент сделан на теоретическом и экспериментальном исследовании ультразвукового упрочнения (УЗУ) свободными микрошариками плоских деталей, которое производится в специальной рабочей камере, где под действием вынуждающего (управляемого) ультразвукового поля с малой амплитудой и частотой до  $10^5$  Гц хаотично перемещаются микрошарики и взаимодействуют с упрочняемой поверхностью изделия.

Этот способ занял постоянное место в технологических операциях упрочнения деталей различного назначения [6, 13–17]. Однако все вышеперечисленные работы носят глубоко экспериментальный характер и направлены на определение влияния типа упрочнения на характеристики усталостной прочности, качества поверхностного слоя, изменения металлофизической структуры материала в упрочненном слое деталей, построение простейших аппроксимационных зависимостей для экспериментальных зависимостей остаточных напряжений.

Глубокая теоретическая проработка задачи для оценки напряженно-деформированного состояния в упрочненных цилиндрических деталях после процедуры упрочнения выполнена в работах [18, 19], а в последующих публикациях [20, 21] предложена математическая модель расчета остаточных напряжений с учетом эффектов деформационной анизотропии при поверхностном пластическом упрочнении. По всей видимости, отсутствие методов расчета начального напряженно-деформированного состояния в упрочненных конструкциях (после процедуры упрочнения) было основным сдерживающим фактором теоретического решения задачи релаксации наведенных остаточных напряжений в деталях в условиях высокотемпературной ползучести, хотя потребности, например, авиадвигателестроения и энергомашиностроения, стимулировали чисто экспериментальные исследования в этом направлении [22–28].

В публикации [29] впервые был представлен прямой численный метод решения краевой задачи кинетики остаточных напряжений в упрочненном цилиндрическом изделии в условиях ползучести, в работе [30] он был применен к задаче релаксации остаточных напряжений для упрочненного цилиндра при действии растягивающей нагрузки, а в [31] – при совместном действии растягивающей осевой нагрузки и крутящего момента. Однако теоретический подход решения задач такого рода для плоских образцов в настоящее время отсутствует. Это и является целью настоящей работы наряду с экспериментальной проверкой соответствующего метода решения краевой задачи для плоских образцов из сплава ЭП742, упрочненных УЗУ, в условиях высокотемпературной выдержки при температуре  $650\text{ }^\circ\text{C}$  и длительности 100 часов.

## **1. Методика расчета остаточных напряжений и пластических деформаций после процедуры упрочнения**

Рассматривается призматический образец (прямоугольный параллелепипед), одна сторона которого подверглась процедуре поверхностно-пластического деформирования. Как правило, толщина упрочненного слоя составляет 100–200 мкм. Будем считать, что величины трех измерений призматического образца на 2–3 порядка больше толщины упрочненного слоя. Тогда в качестве модельной можно взять задачу об упрочненном полу-

пространстве. Введем декартову систему координат, совместим плоскость  $xOy$  с упрочненной поверхностью, а ось  $Oz$  направим по глубине упрочненного слоя.

Обозначим через  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  и  $q_x, q_y, q_z$  диагональные компоненты тензоров остаточных напряжений и остаточных пластических деформаций после процедуры упрочнения. Недиagonalными компонентами тензоров напряжений и пластических деформаций пренебрегаем, поскольку их значения, как правило, на порядок меньше, чем у диагональных компонент, что действительно наблюдается для ряда технологий упрочнения (термопластическое упрочнение, гидро- и пневмодробеструйная обработка, азотирование и др.), в том числе и для ультразвукового упрочнения, которое в дальнейшем и будет рассматриваться. Будем также предполагать, что упрочнение выполнено равномерно по всей плоскости полупространства.

При введенных ограничениях остаточные сжимающие напряжения и пластические деформации не зависят от координат  $x$  и  $y$ , а зависят лишь от переменной  $z$ . Тогда  $\sigma_i = \sigma_i(z)$ ,  $q_i = q_i(z)$  ( $i = x, y, z$ ). В дальнейшем, где это возможно, для краткости будем опускать в записи переменную  $z$ , при этом всегда будем считать, что  $0 \leq z < +\infty$ .

Поскольку толщина упрочненного слоя составляет всего 100–200 мкм, его можно считать «наклеенным» на плоскость, ограничивающую полупространство. Тогда можно ввести гипотезу плоских сечений ( $xOz$  и  $yOz$ ) для полных деформаций, а поскольку  $0 \leq z \leq +\infty$ , математически это запишется следующим образом:

$$\varepsilon_x(z) = 0, \quad \varepsilon_y(z) = 0, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_x(z)$  и  $\varepsilon_y(z)$  – компоненты тензора полных деформаций.

Введем в рассмотрение гипотезу анизотропного упрочнения поверхности в виде

$$q_x = \alpha q_y, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – параметр анизотропии упрочнения (феноменологический параметр), методика определения которого в цилиндрическом упрочненном образце для широкого спектра упрочняющих технологий приведена в [20, 21] и практически без принципиальных изменений может быть перенесена на плоские образцы.

Из условия пластической несжимаемости  $q_x + q_y + q_z = 0$  и (2) получаем

$$q_z = -(1 + \alpha)q_y. \quad (3)$$

Учитывая, что  $\varepsilon_i(z) = e_i(z) + q_i(z)$  ( $i = x, y, z$ ), где  $e_i$  – компоненты тензора упругих деформаций, запишем соотношения (1) в развернутом виде:

$$\frac{1}{E}[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] + q_x = 0, \quad \frac{1}{E}[\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] + q_y = 0, \quad (4)$$

где  $E$  – модуль Юнга;  $\nu$  – коэффициент Пуассона. В этих соотношениях  $\sigma_z \equiv 0$ , что следует из условия равновесия

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0 \quad (\lim_{z \rightarrow +\infty} \sigma_z(z) = 0).$$

В силу этого из (2) и (4) имеем

$$\sigma_y = \frac{1 + \alpha \nu}{\alpha + \nu} \sigma_x. \quad (5)$$

Теперь из (2)–(5) нетрудно получить

$$q_x = -\frac{\alpha(1-\nu^2)}{E(\alpha+\nu)} \sigma_x, \quad q_y = -\frac{1-\nu^2}{E(\alpha+\nu)} \sigma_x, \quad q_z = \frac{(1+\alpha)(1-\nu^2)}{E(\alpha+\nu)} \sigma_x. \quad (6)$$

Таким образом, из формул (5), (6) следует, что если известна компонента тензора остаточных напряжений  $\sigma_x = \sigma_x(z)$ ,  $0 \leq z < +\infty$ , и коэффициент анизотропии  $\alpha$ , то все компоненты тензоров остаточных напряжений и пластических деформаций определяются через эти величины. Иными словами, чтобы определить напряженно-деформированное состояние в упрочненном полупространстве, достаточно знать экспериментальную диаграмму  $\sigma_x = \sigma_x(z)$  и величину  $\alpha$ . В частных случаях, например при термопластическом упрочнении, упрочнении дробью, ультразвуковом упрочнении поверхности, величина  $\alpha = 1$  [20, 21] и формулы (5), (6) упрощаются:

$$\sigma_y = \sigma_x, \quad q_x = q_y = -\frac{1-\nu}{E} \sigma_x, \quad q_z = \frac{2(1-\nu)}{E} \sigma_x. \quad (7)$$

Поскольку в дальнейшем рассматривается процедура ультразвукового упрочнения, из (7) следует, что величина  $\sigma_y(z)$  и значения остаточных пластических деформаций  $q_i(z)$  ( $i = x, y, z$ ) после УЗУ определяется через зависимость  $\sigma_x = \sigma_x(z)$ . Отсюда предлагается следующий феноменологический метод определения напряженно-деформированного состояния после упрочнения: величина  $\sigma_x = \sigma_x(z)$  определяется экспериментально (в настоящей работе на основе метода полосок [32]), а остальные компоненты находятся с использованием формул (7).

## 2. Методика идентификации параметров аппроксимации для компонент тензора остаточных напряжений $\sigma_x = \sigma_x(z)$

В соответствии с модельным представлением упрочненного призматического образца упрочненным полупространством диаграмма  $\sigma_x = \sigma_x(z)$  с учетом естественного условия  $\lim_{z \rightarrow +\infty} \sigma_x(z) = 0$  после процедуры поверхностного пластического упрочнения схематически должна иметь вид, представленный на рис. 1. При этом учитывается случай, когда максимум сжимающих остаточных напряжений находится как в подповерхностном слое ( $z^* \neq 0$ ), так и на упрочненной поверхности ( $z^* = 0$ ). Однако экспериментальный метод [32] позволяет определить значения  $\sigma_x = \sigma_x(z)$  лишь в тонком упрочненном слое  $0 \leq z \leq z_0$ , то есть в области сжатия материала (см. рис. 1). Но для решения задачи релаксации остаточных напряжений при ползучести необходимо иметь непрерывные поля остаточных напряжений и пластических деформаций во всей области интегрирования (во всем полупространстве). Поэтому первой задачей является аппроксимация экспериментальной эпюры  $\sigma_x = \sigma_x(z)$  для всех  $0 \leq z < +\infty$ . Другими словами, необходимо выполнить

экстраполяцию с области сжатия  $0 \leq z \leq z_0$ , где определяются экспериментальные значения, на область  $z_0 < z < +\infty$ , но таким образом, чтобы выполнялось условие самоуравновешенности остаточных напряжений

$$\int_0^{+\infty} \sigma_x(z) dz = 0, \quad (8)$$

поскольку к полупространству не приложены внешние силы.

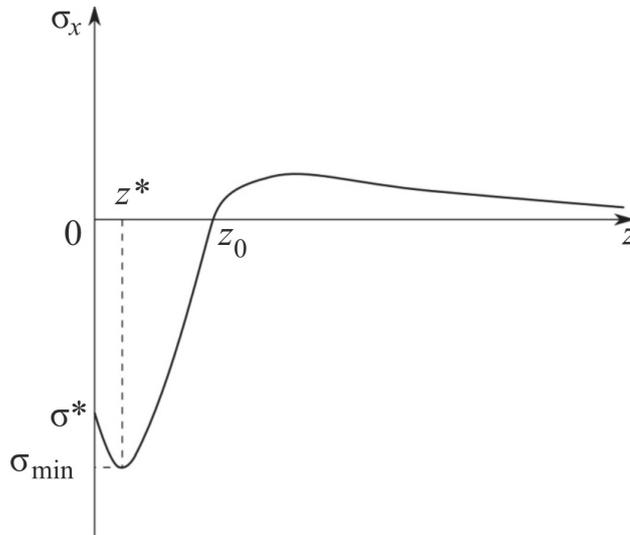


Рис. 1. Схематическая экспериментальная эпюра  $\sigma_x = \sigma_x(z)$

Выберем аппроксимацию  $\sigma_x = \sigma_x(z)$  в виде

$$\sigma_x(z) = \sigma_0 \exp\left(-\frac{(z-z^*)^2}{l^2}\right) - \sigma_1 \exp\left(-\frac{(z-z^*)^2}{b^2}\right), \quad (9)$$

где  $\sigma_0$ ,  $\sigma_1$  и  $b$  – параметры, для определения которых (в первом приближении) можно использовать значения эпюры  $\sigma_x = \sigma_x(z)$  в характерных точках:  $\sigma_x(0) = \sigma^*$ ,  $\sigma_x(z^*) = \sigma_{\min}$ ,  $\sigma_x(z_0) = 0$  и условие (8); параметр  $l = 1$  и имеет размерность длины, как и  $z$ . В результате с учетом (9) получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} \sigma_0 \exp(-z^{*2}) - \sigma_1 \exp(-z^{*2}/b^2) &= \sigma^*, \\ \sigma_0 - \sigma_1 &= \sigma_{\min}, \\ \sigma_0 \exp(-(z_0 - z^*)^2) - \sigma_1 \exp(-(z_0 - z^*)^2/b^2) &= 0, \\ \int_0^{+\infty} \sigma_x(z) dz &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Система уравнений (10) является переопределенной (3 параметра и 4 уравнения). Для устранения переопределенности можно отказаться от строгого выполнения одного из условий для эпюры  $\sigma_x = \sigma_x(z)$ , например от ее прохождения через точку  $(z_0, 0)$ . Тогда, от-

брасывая третье соотношение в (10) и подставляя (9) в (8), получим систему трех уравнений относительно трех неизвестных  $\sigma_0$ ,  $\sigma_1$  и  $b$ :

$$\begin{aligned} \sigma_0 \exp(-z^{*2}) - \sigma_1 \exp(-z^{*2}/b^2) &= \sigma^*, \\ \sigma_0 - \sigma_1 &= \sigma_{\min}, \\ \sigma_0 \int_0^{+\infty} \exp(-(z-z^*)^2) dz - \sigma_1 \int_0^{+\infty} \exp(-(z-z^*)^2/b^2) dz &= 0, \end{aligned} \quad (11)$$

которая решается численно с использованием функции  $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt$ .

Уточнение значений параметров  $\sigma_0$ ,  $\sigma_1$  и  $b$  (второе приближение) производится в результате минимизации отклонения расчетных данных  $\sigma_x(z_i)$  от экспериментальных  $\sigma_x^3(z_i)$  в следующей норме:

$$\Delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\sigma_x(z_i) - \sigma_x^3(z_i)]^2}{\sum_{i=1}^n [\sigma_x^3(z_i)]^2}}, \quad (12)$$

где  $z_i$  – точки дискретизации;  $n$  – количество точек дискретизации зависимости  $\sigma_x = \sigma_x(z)$ . Для этой цели, начиная с первого приближения, варьируются величины  $\sigma_0$ ,  $\sigma_1$ , а величина  $b$  определяется из третьего уравнения (11) (тем самым сохраняется самоуравновешенность эпюры  $\sigma_x = \sigma_x(z)$ ) до достижения минимума функционалом (12). По этой же формуле вычисляется значение отклонения расчетных данных от экспериментальных (погрешность аппроксимации) в процентах.

Таким образом, после идентификации параметров аппроксимации (9) величина  $\sigma_x = \sigma_x(z)$  будет иметь аналитическое представление для всех  $0 \leq z \leq +\infty$ , а значит, будут иметь аналитические представления и остальные компоненты тензоров остаточных напряжений и пластических деформаций в соответствии с формулами (5), (6) при  $\alpha \neq 1$  или (7) при  $\alpha = 1$ .

### 3. Методика расчета кинетики напряжений в поверхностно-упрочненном полупространстве в условиях ползучести

Рассмотрим задачу расчета кинетики остаточных напряжений, наведенных в процессе поверхностного пластического деформирования полупространства, в условиях высокотемпературной ползучести материала при отсутствии внешних сил. Такой режим в дальнейшем будем называть термоэкспозицией (температурная выдержка без нагрузки). В качестве начальных условий краевой задачи используется напряженно-деформированное состояние, возникающее после процедуры упрочнения, которое сформировано в начальный момент времени  $t = 0-0$  при температуре  $T_1$  (как правило, комнатная температура). Пусть при  $t = 0$  происходит мгновенное прогревание полупространства с температуры  $T_1$  до температуры  $T_2$  ( $T_2 > T_1$ ), при которой возникает процесс ползучести материала. Через

$E_1$  обозначим модуль Юнга при температуре  $T_1$ , а через  $E_2$  – при температуре  $T_2$ . Предполагаем также, что новых пластических деформаций при температурном нагреве не возникает и они определяются равенствами (6) при  $E = E_1$ . Температурные деформации в дальнейшем не учитываются, поскольку они дают просто равномерное увеличение объема и не приводят к изменению остаточных напряжений в силу равномерного прогревания тела. В дальнейшем будем рассматривать общий случай анизотропного упрочнения  $\alpha \neq 1$ .

В момент времени  $t = 0 + 0$  при температуре  $T_2$  в силу сохранения гипотезы плоских сечений (1) и неизменности компонент тензора остаточных пластических деформаций имеем следующее распределение для напряжений:

$$\sigma_x(z) = -\frac{E_2(\alpha + \nu)}{1 - \nu^2} q_y(z), \quad \sigma_y(z) = \frac{1 + \nu\alpha}{\alpha + \nu} \sigma_x(z).$$

Пусть теперь в течение времени  $t \in [0, t^*]$  образец выдерживается при температуре  $T_2$ , при которой возникают деформации ползучести. Под действием самоуравновешенных напряжений в полупространстве будет накапливаться деформация ползучести, компоненты которой обозначим через  $p_j = p_j(z, t)$  ( $j = x, y, z$ ). Тогда имеем

$$\begin{aligned} \varepsilon_x(z, t) &= \frac{1}{E_2} [\sigma_x(z, t) - \nu\sigma_y(z, t)] + q_x(z) + p_x(z, t) = 0, \\ \varepsilon_y(z, t) &= \frac{1}{E_2} [\sigma_y(z, t) - \nu\sigma_x(z, t)] + q_y(z) + p_y(z, t) = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Компонента деформаций  $\varepsilon_z(z, t)$  является «пассивной» и с учетом несжимаемости деформации ползучести  $p_x + p_y + p_z = 0$  определяется из соотношения

$$\varepsilon_z(z, t) = -\frac{\nu}{E_2} [\sigma_x(z, t) + \sigma_y(z, t)] + q_z(z) - (p_x(z, t) + p_y(z, t)).$$

Решая систему уравнений (13) относительно  $\sigma_x(z, t)$  и  $\sigma_y(z, t)$ , получаем соотношения, описывающие кинетику этих напряжений во времени вследствие ползучести:

$$\begin{aligned} \sigma_x(z, t) &= \frac{E_2}{\nu^2 - 1} [q_x(z) + p_x(z, t) + \nu(q_y(z) + p_y(z, t))], \\ \sigma_y(z, t) &= \frac{E_2}{\nu^2 - 1} [q_y(z) + p_y(z, t) + \nu(q_x(z) + p_x(z, t))]. \end{aligned} \quad (14)$$

Таким образом, если известны значения компонент тензора деформаций ползучести  $p_x(z, t)$  и  $p_y(z, t)$ , то величины  $\sigma_x(z, t)$  и  $\sigma_y(z, t)$  определяются из (14).

Величины  $p_x(z, t)$  и  $p_y(z, t)$  вычисляются численно «шагами» по времени на основании выбранной теории ползучести, которая будет описана далее. Суть метода состоит в следующем. Пусть выполнена дискретизация по времени  $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_n = t^*$  с шагом  $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$  ( $i = 0, 1, \dots, n-1$ ) и нам известны значения  $p_j(z, t)$  ( $j = x, y, z$ ). Тогда на основании выбранной теории ползучести вычисляются приращения деформации ползучести

$\Delta p_j(z, t_i)$  за шаг времени  $\Delta t_i$  для всех  $z$ , и находятся значения  $p_j(z, t_{i+1}) = p_j(z, t_i) + \Delta p_j(z, t_i)$ . Далее с учетом  $\sigma_z(z) \equiv 0$  по формулам (14) определяются  $\sigma_j(z, t_{i+1})$  ( $j = x, y$ ).

Пусть в момент времени  $t = t^*$  происходит температурная разгрузка от  $T = T_2$  до  $T = T_1$ , при этом модуль Юнга мгновенно изменяется с  $E_2$  на  $E_1$ . Тогда формулы (14) при  $T = T_1$  принимают вид

$$\begin{aligned}\sigma_x(z, t^*+0) &= \frac{E_1}{\nu^2 - 1} \left[ q_x(z) + p_x(z, t^*+0) + \nu (q_y(z) + p_y(z, t^*+0)) \right], \\ \sigma_y(z, t^*+0) &= \frac{E_1}{\nu^2 - 1} \left[ q_y(z) + p_y(z, t^*+0) + \nu (q_x(z) + p_x(z, t^*+0)) \right].\end{aligned}\quad (15)$$

Соотношения (15) и задают окончательные выражения для напряжений после ползучести (термоэкспозиции) в момент времени  $t = t^* + 0$ .

#### 4. Экспериментальное исследование влияния термоэкспозиции на остаточные напряжения призматических образцов из сплава ЭП742 при температуре 650 °С после ультразвукового упрочнения

С целью экспериментального подтверждения изложенных выше методик расчета остаточных напряжений после процедуры упрочнения и их релаксации вследствие ползучести выполнен цикл экспериментальных исследований по влиянию термоэкспозиции на остаточные напряжения плоских образцов (прямоугольных параллелепипедов – брусков) с квадратным сечением 10×10 мм и длиной 100 мм из сплава ЭП742 после двустороннего ультразвукового упрочнения (УЗУ). Обработка противоположных граней образца осуществляется в специальном контейнере, наполненном микрошариками, которому через акустический трансформатор скорости (концентратор упругих колебаний) сообщаются колебания с малой амплитудой и высокой частотой (16–30 кГц). В результате хаотических соударений шариков с обрабатываемой поверхностью происходит ее упрочнение. Режимы УЗУ: расстояние от образца до концентратора (наконечника установки) – 7 мм; диаметр шариков – 1 мм; материал шариков – сталь ШХ 15; масса шариков – 4,6 г; амплитуда колебаний – 50 мкм; частота – 20 кГц; диаметр плоского концентратора – 40 мм; длительность обработки – 20 с (режим № 1), 40 с (режим № 2), 60 с (режим № 3), 80 с (режим № 4). После УЗУ часть упрочненных образцов (для всех режимов) использовалась для определения остаточных напряжений, другая часть подвергалась термоэкспозиции (температурной выдержке) при температуре 650 °С в течение 100 часов, и после температурной разгрузки определялись остаточные напряжения.

Методика определения остаточных напряжений в упрочненных образцах базируется на расчетно-экспериментальном методе полосок [1, 32]. Все образцы разрезали на электроэрозионном станке на две полоски толщиной  $h$  вдоль срединной плоскости, параллельной обработанным граням образца. Согласно методу полосок дополнительные остаточные напряжения за счет разрезки бруска учитываются измерением прогиба  $f(0)$  каждой полоски по схеме, изображенной на рис. 2, на базовой длине  $l$ . После измерения прогиба  $f(0)$  в пределах базовой длины  $l$  электрохимическим травлением удаляются слои материала толщиной  $a$  со стороны исследуемой поверхности полоски и замеряются

возникающие при этом прогибы  $f(a)$  (рис. 3). Измеренные прогибы  $f(0)$  и  $f(a)$  используются при вычислении остаточных напряжений [1, 32]:

$$\sigma_y(a) - \nu\sigma_x(a) = -\frac{8E}{l^2}f(0)\left(\frac{h}{2} - a\right) + \frac{4E}{3l^2}\left[(h-a)^2\frac{df(a)}{da} - 4(h-a)f(a) + 2\int_0^a f(\xi)d\xi\right], \quad (16)$$

где  $E$  – модуль Юнга;  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $h$  – толщина полоски до травления,  $0 \leq \xi \leq a$ . Состав раствора для травления и технология травления приведены в работе [20].

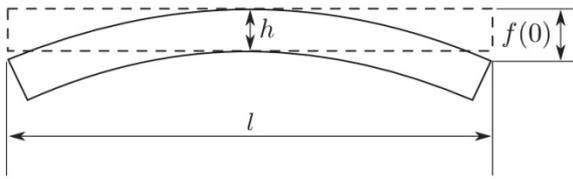


Рис. 2. Схема замера прогиба  $f(0)$

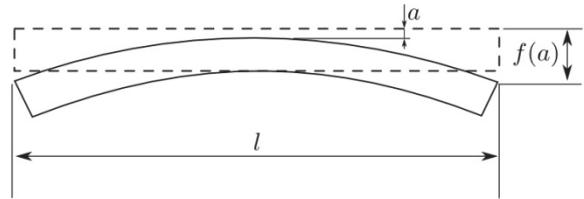


Рис. 3. Схема замера прогиба  $f(a)$

В случае УЗУ  $\sigma_y(a) = \sigma_x(a)$  и формула (16) принимает вид

$$\sigma_y(a) = \sigma_x(a) = \frac{1}{1-\nu}\left\{-\frac{8E}{l^2}f(0)\left(\frac{h}{2} - a\right) + \frac{4E}{3l^2}\left[(h-a)^2\frac{df(a)}{da} - 4(h-a)f(a) + 2\int_0^a f(\xi)d\xi\right]\right\}. \quad (17)$$

Для увеличения разрешающей способности описанного метода при удалении слоев полоски травлением использовалась схема замера перемещений, основанная на консольном креплении образца (рис. 4). Связь между измеренными перемещениями полоски с удлинителем  $f(a)_{\text{ИЗМ}}$  и прогибами  $f(a)$ , используемыми в формулах (16) и (17), записывается с помощью интеграла Мора [2] в следующем виде:

$$f(a) = \frac{f(a)_{\text{ИЗМ}}}{4(1+2c/l)},$$

где  $c$  – длина удлинителя;  $l$  – базовая длина полоски.

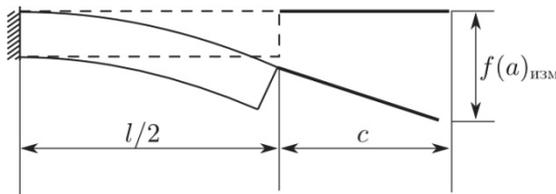


Рис. 4. Схема замера перемещений  $f(a)_{\text{ИЗМ}}$

На рис. 5 сплошными линиями приведены результаты экспериментального определения остаточных напряжений в образцах после процедуры УЗУ для всех четырех режимов обработки поверхности. Анализ этих данных свидетельствует, что сжимающие напряжения могут достигать величины минус 1100 МПа (режим № 1). Смена знака напряжений происходит на расстоянии  $a \approx 0,2$  мм от поверхности. При всех режимах УЗУ наблюдается спад остаточных напряжений к поверхности образца. Увеличение времени обработки от 20 до 80 с приводит к уменьшению максимума сжимающих остаточных напряжений с повышением глубины его залегания и незначительным увеличением толщины упрочненного слоя.

На рис. 7 (сплошная линия 4) и на рис. 8 (сплошные линии) представлены экспериментальные зависимости остаточных напряжений  $\sigma_x = \sigma_x(z)$  после УЗУ при температуре 20 °С, последующей термоэкспозиции при температуре 650 °С в течение 100 часов и температурной разгрузке до 20 °С. Анализ этих данных свидетельствует, что влияние термоэкспозиции существенно сказывается на величинах остаточных напряжений, в частности, приводит к падению максимальных сжимающих напряжений в 1,4–1,6 раз. Характер распределения напряжений не претерпевает существенных изменений. Спад остаточных напряжений к поверхности сохраняется, максимальные напряжения тем выше, чем меньше время упрочнения. Примерно на 0,02 мм увеличивается глубина залегания сжимающих остаточных напряжений, причем для образцов, обработанных с большим временем, она выше.

## 5. Экспериментальная проверка математической модели формирования остаточных напряжений после УЗУ и их релаксации в условиях высокотемпературной ползучести

Для экспериментальной проверки методики расчета напряженно-деформированного состояния в упрочненном плоском образце (модельное представление – упрочненное полупространство) после процедуры УЗУ воспользуемся экспериментальными данными для четырех режимов упрочнения, представленных на рис. 5. Как уже отмечалось выше, обработка УЗУ относится к изотропному процессу поверхностного пластического упрочнения, поэтому в данном случае в соотношении (2) коэффициент анизотропии  $\alpha = 1$  и в дальнейшем для оценки остаточных напряжений и пластических деформаций используются формулы (7). Поскольку упрочнение УЗУ происходит при нормальной температуре 20 °С, в (7) для сплава ЭП742 использовались справочные значения  $E = 2,21 \cdot 10^5$  МПа и  $\nu = 0,3$ . Используя экспериментальные данные для  $\sigma_x = \sigma_x(z)$  на рис. 5, по методике, изложенной в п. 2, определялись все параметры аппроксимации (9). Для оценки первого приближения величин  $\sigma_0$ ,  $\sigma_1$  и  $b$  в (9) использовались значения характерных точек для графиков  $z_0$ ,  $z^*$ ,  $\sigma^*$ ,  $\sigma_{\min}$ , приведенные в таблице. Расчетные значения зависимости  $\sigma_x = \sigma_x(z)$  для всех четырех режимов упрочнения приведены на рис. 5 штриховыми линиями. В последней строке таблицы приведены значения отклонения расчетных данных от экспериментальных, вычисленные на основании (12) в процентах. В целом согласование расчетных и экспериментальных данных удовлетворительное. В качестве примера на рис. 6 приведены расчетные зависимости для распределения компонент тензоров остаточных пластических деформаций для первого режима упрочнения.

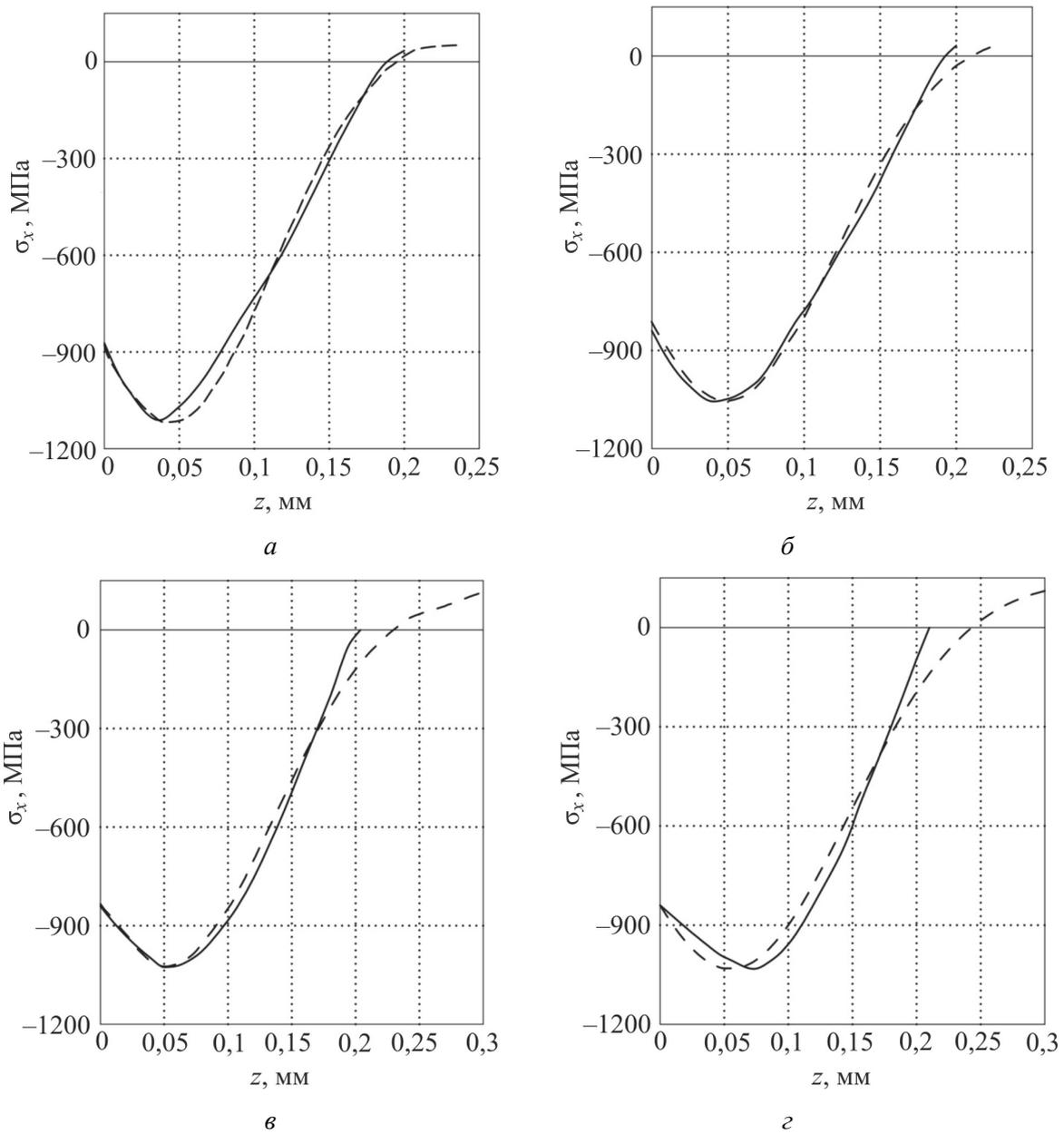


Рис. 5. Экспериментальные (сплошные линии) и расчетные штриховые линии эпюры остаточных напряжений  $\sigma_x = \sigma_x(z)$  в поверхностном слое (сплав ЭП742) при различных режимах УЗУ (см. таблицу): а – режим 1; б – режим 2; в – режим 3; з – режим 4

Рассмотрим теперь результаты численной реализации методики расчета релаксации остаточных напряжений в образцах после температурной выдержки при температуре 650 °С в течение времени 100 часов. Одним из основных этапов решения данной задачи является выбор теории ползучести. В работе [33] приведены экспериментальные данные по ползучести сплава ЭП742 при температуре 650 °С, из анализа которых следует, что при данной температуре существенной является деформация ползучести для тех уровней остаточных напряжений, которые возникают после процедуры упрочнения, вследствие чего и происходит релаксация остаточных напряжений.

В соответствии с [33] в качестве модели ползучести используется следующий вариант для одноосного напряженного состояния:

$$\begin{aligned}
 p(t) &= \sum_{k=1}^s v_k(t) + w(t); \\
 \dot{v}_k(t) &= \begin{cases} \lambda_k V_k(t), & V_k(t)\sigma(t) > 0, \\ 0, & V_k(t)\sigma(t) \leq 0; \end{cases} \\
 V_k(t) &= a_k (\sigma(t) / \sigma^{**})^n - v_k(t); \\
 \dot{w}(t) &= (\sigma(t) / \sigma^{**})^m,
 \end{aligned} \tag{18}$$

где  $v(t) = \sum_{k=1}^s v_k(s)$  – вязкопластическая компонента деформации ползучести  $p(t)$  (описывает первую стадию ползучести);  $w(t)$  – деформация вязкого течения (описывает вторую стадию ползучести);  $s, \lambda_k, a_k, n, c, m$  – параметры модели, методика идентификации которых приведена в [33]. Здесь  $\sigma^{**}$  – обезразмеривающий коэффициент, который может выбираться произвольно исходя из соображений удобства.

Значения характерных точек эпюры  $\sigma_x = \sigma_x(z)$ , параметров аппроксимации (9) и погрешностей аппроксимации для образцов из сплава ЭП742 в зависимости от режимов УЗУ

	Время обработки, с (режим УЗУ)			
	20 (1)	40 (2)	60 (3)	80 (4)
Значения характерных точек эпюры $\sigma_x = \sigma_x(z)$				
$z_0$ , мм	0,189	0,193	0,204	0,210
$z^*$ , мм	0,037	0,040	0,058	0,073
$\sigma^*$ , МПа	-872,0	-848,5	-840,4	-840,0
$\sigma_{\min}$ , МПа	-1111,5	-1058,6	-1024,3	-1032,3
Значения параметров аппроксимации (9)				
$\sigma_0$ , МПа	119,2	103,1	140,9	155,2
$\sigma_1$ , МПа	1230,7	1159,1	1167,3	1187,5
$b$	0,097	0,101	0,121	0,131
Значения погрешностей аппроксимации, вычисленные на основании (12)				
$\Delta, \%$	4,93	4,02	6,47	7,73

Модель (18) описывает деформацию ползучести в пределах первой и второй стадии, причем вся деформация является необратимой. В монографии [33] для модели (18) приведены следующие параметры для сплава ЭП742 при температуре 650 °С:  $s=1, \sigma^{**}=500$  МПа,  $\lambda_1 = \lambda = 0,022, a_1 = a = 6,1 \cdot 10^{-3}, n = 3,29, c = 0,722 \cdot 10^{-6}, m = 14,3$ .

Для сложного напряженного состояния с учетом  $s = 1$  модель (18) обобщается следующим образом [33]:

$$\begin{aligned}
 p_{ij}(t) &= u_{ij}(t) + w_{ij}(t); \\
 \left[ \begin{aligned}
 v_{\omega\omega}(t) &= (1 + \mu'')\beta_{\omega\omega}(t) - \mu''(\beta_{11}(t) + \beta_{22}(t) + \beta_{33}(t)); \\
 \dot{\beta}_{\omega\omega}(t) &= \begin{cases} \lambda B_{\omega\omega}(t), & B_{\omega\omega}(t)\sigma_{\omega\omega}(t) > 0, \\ 0, & B_{\omega\omega}(t)\sigma_{\omega\omega}(t) \leq 0; \end{cases} \\
 B_{\omega\omega}(t) &= a(S(t)/\sigma^{**})^{n-1}\sigma_{\omega\omega}(t)/\sigma^{**} - \beta_{\omega\omega}(t); \\
 \dot{w}_{ij}(t) &= \frac{3c}{2\sigma^{**}} \left( \frac{S(t)}{\sigma^{**}} \right)^{m-1} \left( \sigma_{ij}(t) - \frac{1}{3}\delta_{ij}\sigma_0(t) \right); \\
 \sigma_0(t) &= \sigma_{11}(t) + \sigma_{22}(t) + \sigma_{33}(t),
 \end{aligned} \right. \quad (19)
 \end{aligned}$$

где  $p_{ij}(t)$  – тензор деформации ползучести;  $v_{ij}(t)$  и  $w_{ij}(t)$  – тензоры вязкопластической (необратимой) компоненты деформаций и деформации вязкого течения;  $S(t)$  – интенсивность напряжений;  $\mu''$  – коэффициент Пуассона для компоненты  $v_{\omega\omega}$  (по рекомендации [33] можно использовать  $\mu'' = 0,42$ );  $\sigma^{**}$ ,  $s$ ,  $\lambda$ ,  $a$ ,  $n$ ,  $c$ ,  $m$  – параметры, имеющие тот же смысл, что и в соотношениях (18) при  $s = 1$ . Обозначим в (19):  $p_{11} = p_x$ ,  $p_{22} = p_y$ ,  $p_{33} = p_z$ ,  $\sigma_{11} = \sigma_x$ ,  $\sigma_{22} = \sigma_y$ ,  $\sigma_{33} = \sigma_z = 0$ ,  $v_{11} = v_x$ ,  $v_{22} = v_y$ ,  $v_{33} = v_z$ ,  $\beta_{11} = \beta_x$ ,  $\beta_{22} = \beta_y$ ,  $\beta_{33} = \beta_z = 0$ ; по повторяющемуся индексу  $\omega$  суммирование в (19) не производится. При численной реализации приращения всех компонент деформации ползучести в соотношениях (19) вычислялись по методу Эйлера. В расчетах использовались следующие значения: при температуре  $T_1 = 20$  °C  $E_1 = 2,21 \cdot 10^5$  МПа, при  $T_2 = 650$  °C  $E_2 = 1,79 \cdot 10^5$  МПа,  $\nu = 0,3$ .

Подробно проанализируем результаты расчетов для первого режима упрочнения. На рис. 7 экспериментальная (сплошная линия) и расчетная (штриховая линия) зависимости, обозначенные цифрой 1, соответствуют  $\sigma_x = \sigma_x(z)$  после упрочнения при температуре 20 °C ( $t = 0 - 0$ ); цифрой 2 отмечена эта же расчетная зависимость при ступенчатом изменении температуры с 20 °C до 650 °C ( $t = 0 + 0$ ); цифрой 3 – расчетная зависимость  $\sigma_x = \sigma_x(z, t^* - 0)$  после ползучести в течение  $t^* = 100$  часов при температуре 650 °C; цифрой 4 – распределение остаточных напряжений после температурной разгрузки с  $T_2 = 650$  °C до  $T_1 = 20$  °C в момент времени  $t = t^* + 0$  (сплошная линия – эксперимент, штриховая – расчет). Отклонение расчетных данных от экспериментальных в норме (12) для финишных зависимостей ( $t^* = 100$  часов) составляет  $\Delta = 27$  %.

На рис. 8 приведены финишные расчетные (штриховые линии) и экспериментальные (сплошные линии) зависимости  $\sigma_x = \sigma_x(z, t^* + 0)$  после ползучести в течение 100 часов при температуре 650 °C и последующей температурной разгрузки для режимов УЗУ 2–4. Отклонения расчетных данных от экспериментальных, рассчитанные по (12), составляют 27,4 % для режима № 2, 20,9 % – для режима № 3 и 37 % – для режима № 4.

Следует отметить, что «разница в 20 % по деформациям между кривыми ползучести, снятыми при одном и том же напряжении для данной температуры на образцах из материала одной плавки, не считается чрезмерно большой» [34, § 44, стр. 172–173], а в нашей работе специальные эксперименты на ползучесть сплава ЭП742 для исследуемых образцов не проводились, а использовались справочные данные для модели ползучести (18),

(19) из монографии [33]. Поэтому, несмотря на полученные отклонения расчетных данных от экспериментальных, результаты расчета релаксации остаточных напряжений следует признать удовлетворительными.

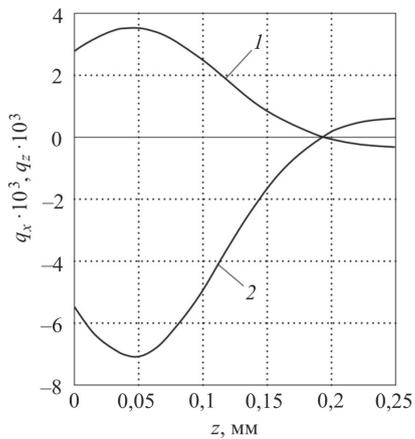


Рис. 6. Графики зависимостей  $q_x = q_x(z)$  (линия 1) и  $q_z = q_z(z)$  (линия 2) для 1-го режима УЗУ (сплав ЭП742)

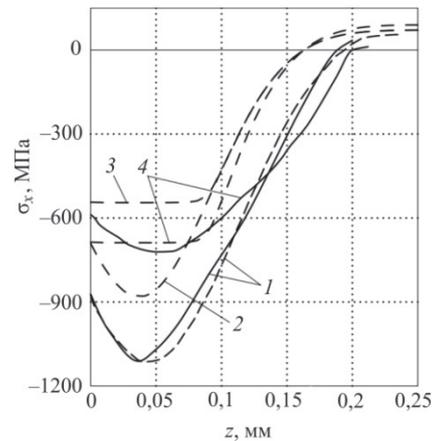


Рис. 7. Кинетика зависимости  $\sigma_x = \sigma_x(z, t)$  в процессе ползучести (режим 1, сплав ЭП742)

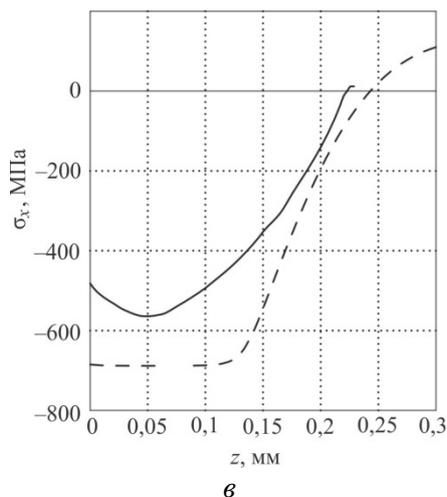
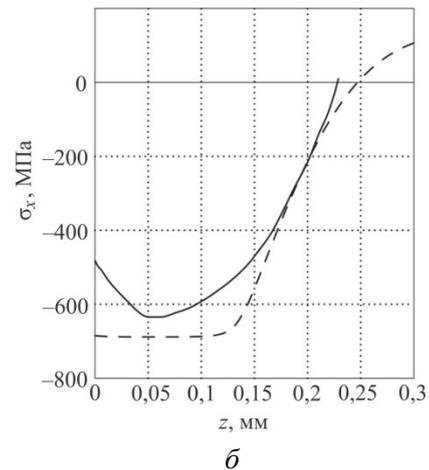
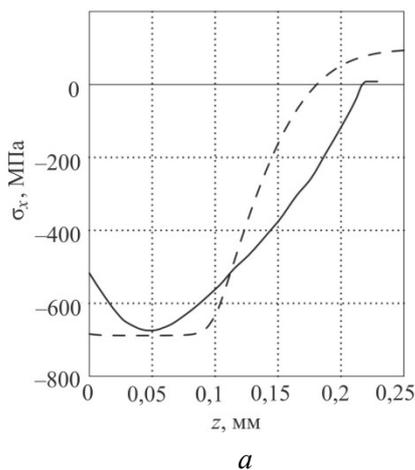


Рис. 8. Экспериментальные (сплошные линии) и расчетные (штриховые линии) зависимости  $\sigma_x = \sigma_x(z, t)$  в момент времени  $t = 100$  ч после ползучести и температурной разгрузки:

*a* – режим 2; *б* – режим 3; *в* – режим 4

## Выводы

Выполнены экспериментальные исследования по формированию остаточных напряжений после процедуры ультразвукового упрочнения призматических образцов из сплава ЭП742 и оценке степени их релаксации в условиях термоэкспозиции при температуре 650 °С в течение 100 часов. Выявлены закономерности распределения остаточных напряжений по толщине поверхностно упрочненного слоя. Показано, что термоэкспозиция в 1,4–1,6 раз уменьшает уровень сжимающих остаточных напряжений и вызывает смещение их максимума вглубь образца. Полученные экспериментальные данные играют важную самостоятельную роль в прикладных задачах, поскольку сплав ЭП742 используется для изготовления дисков турбины авиационных двигателей, эксплуатирующихся в том числе и при температуре 650 °С, а поверхностное упрочнение – штатная технология в авиадвигателестроении.

Разработана математическая модель формирования остаточных напряжений в призматических образцах после поверхностно пластического деформирования и их релаксации в условиях высокотемпературной выдержки. Показано, что релаксация остаточных напряжений может быть связана с ползучестью материала в условиях неоднородного напряженно-деформированного состояния.

Выполнена обстоятельная экспериментальная проверка математической модели при нормальной температуре и в условиях высокотемпературной ползучести, при этом наблюдается удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16–01–00249–а) и при поддержке Минобрнауки России в рамках базовой части государственного задания ФГБОУ ВО «СамГТУ» (код проекта: 1151).

## Библиографический список

1. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 262 с.
2. Павлов В.Ф., Кирпичев В.А., Иванов В.Б. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочненных деталей с концентраторами напряжений; Самар. науч. центр РАН. – Самара, 2008. – 64 с.
3. Остаточные напряжения и сопротивление усталости высоконагруженных резьбовых деталей / С.И. Иванов, В.Ф. Павлов, Б.В. Минин, В.А. Кирпичев, Е.П. Кочеров, В.В. Головкин; Самар. науч. центр РАН. – Самара, 2015. – 170 с.
4. Кравченко Б.А., Круцило В.Г., Гутман Г.Н. Термопластическое упрочнение – резерв повышения прочности и надежности деталей машин. – Самара: Изд-во Самар. гос. техн. ун-та, 2000. – 216 с.
5. Сулима Г.Н., Шувалов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
6. Марков А.И. Ультразвуковая обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 237 с.
7. Prediction and characterization of residual stresses from laser shock peening / R.A. Brockman, W.R. Braisted, S.E. Olson, R.D. Tenaglia, A.H. Clauer, K. Langer, M.J. Shepard // International Journal of Fatigue. – 2012. – Vol. 36. – No. 1. – P. 96–108. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2011.08.011
8. Dai K., Shaw L. Analysis of fatigue resistance improvements via surface severe plastic deformation // International Journal of Fatigue. – 2008. – Vol. 30. – No. 8. – P. 1398–1408. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2007.10.010

9. Residual stresses and fatigue performance / M.N. James, D.J. Hughes, Z. Chen, H. Lombard, D.G. Hattingh, D. Asquith, J.R. Yates, P.J. Webster // *Engineering Failure Analysis*. – 2007. – Vol. 14. – No. 2. – P. 384–395. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2006.02.011
10. Majzooobi G.H., Azadikhah K., Nemati J. The effects of deep rolling and shot peening on fretting fatigue resistance of Aluminum-7075-T6 // *Materials Science and Engineering A*. – 2009. – Vol. 516. – No. 1–2. – P. 235–247. DOI: 10.1016/j.msea.2009.03.020
11. Soady K.A. Life assessment methodologies incorporating shot peening process effects: Mechanistic consideration of residual stresses and strain hardening: Part 1 – Effect of shot peening on fatigue resistance // *Materials Science and Technology (United Kingdom)*. – 2013. – Vol. 29. – No. 6. – P. 637–651. DOI: 10.1179/1743284713Y.0000000222
12. 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 and Design*. – 2012. – Vol. 35. – P. 741–748. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.09.055
13. Применение ультразвука и взрыва при обработке и сборке / М.Ф. Вологин, В.В. Калашников, М.С. Нерубай, Б.Л. Штриков. – М.: Машиностроение, 2002. – 264 с.
14. Технологическое применение ультразвука в транспортном машиностроении / В.М. Приходько [и др.]. – М.: Технополиграф центр, 2007. – 112 с.
15. Ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование / В.Ф. Казанцев, Б.А. Кудряшов, Р.И. Нигметзянов, В.М. Приходько, Д.С. Фатюхин // *Вестн. Харьк. нац. авт.-дорож. ун-та*. – 2009. – № 46. – С. 7–9.
16. Гребенников М.А., Заличихие С.Д., Стебельков И.А. Физика и технология упрочнения деталей в поле ультразвука // *Вестн. двигателестроения*. – 2013. – № 1. – С. 72–74.
17. Александров М.К., Папшева Н.Д., Акушская О.Н. Ультразвуковое упрочнение деталей ГТД // *Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та*. – 2011. – № 3(27). – С. 271–276.
18. 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.
19. Радченко В.П., Саушкин М.Н. Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочненных конструкциях. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 226 с.
20. Радченко В.П., Саушкин М.Н., Павлов В.Ф. Метод расчета остаточных напряжений и пластических деформаций в цилиндрических образцах с учетом анизотропии процесса поверхностного упрочнения // *ПМТФ*. – 2011. – Т. 52, № 2. – С. 173–182.
21. Радченко В.П., Павлов В.Ф., Саушкин М.Н. Исследование влияния анизотропии поверхностного пластического упрочнения на распределение остаточных напряжений в полых и сплошных цилиндрических образцах // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2015. – № 1. – С. 130–147. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.1.09
22. On the effect of deeprolling and laser-peening on the stress-controlled low- and high-cycle fatigue behavior of Ti-6-Al-4V at elevated temperatures up to 550°C / I. Altenberber, R.K. Nalla, Y. Sano, L. Wagner, R.O. Ritchie // *International Journal of Fatigue*. – 2002. – Vol. 44. – P. 292–302. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2012.03.008
23. Колотникова О.В. Эффективность упрочнения методами поверхностного пластического деформирования деталей, работающих при повышенных температурах // *Проблемы прочности*. – 1983. – № 2. – С. 112–114.
24. Цейтлин В.И., Колотникова О.В. Релаксация остаточных напряжений в деталях турбин ГТД в процессе эксплуатации // *Проблемы прочности*. – 1980. – № 3. – С. 6–11.
25. Радченко В.П., Кирпичёв В.А., Лунин В.А. Влияние термоэкспозиции на остаточные напряжения образцов из сплава ЭП742 после ультразвукового упрочнения // *Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Техн. науки*. – 2012. – № 3(35). – С. 147–154.
26. Buchanan D.J., John R. Relaxation of shot-peened residual stresses under creep loading // *Scripta Materialia*. – 2008. – No. 3. – P. 286–289. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2008.03.021

27. Khadraoui M., Cao W., Castex L. Experimental investigations and modeling of relaxation behavior of shot peening residual stresses at high temperature for nickel base superalloys // *Materials Science and Technology*. – 1997. – Vol. 13. – No. 4. – P. 360–367. DOI: 10.1179/026708397790302359
28. Xie L., Jiang C., Ji V. Thermal relaxation of residual stresses in shot peened surface layer of (TiB + TiC)/Ti-6Al-4V composite at elevated temperatures // *Materials Science and Engineering: A*. – 2011. – Vol. 528. – No. 21. – P. 6478–6489. DOI: 10.1016/j.msea.2011.04.075
29. 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.
30. 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 // *ПМТФ* – 2015. – Т. 56, № 2. – С. 169–177. DOI: 10.15372/PMTF20150217
31. Радченко В.П., Цветков В.В. Кинетика напряженно-деформированного состояния в поверхностно упрочненном цилиндрическом образце при сложном напряженном состоянии в условиях ползучести // *Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*. – 2014. – № 1(34). – С. 93–108. DOI:10.14498/vsgtu1313
32. Иванов С.И. Определение остаточных напряжений в пластинках методом полосок // *Вопросы прочности элементов авиационных конструкций; Куйб. авиац. ин-т. – Куйбышев, 1971. – С. 139–152.*
33. Радченко В.П., Еремин Ю.А. Реологическое деформирование и разрушение материалов и элементов конструкций. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 264 с.
34. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. – М.: Наука, 1966. – 752 с.

## References

1. Birger I.A. *Ostatochnye napriazheniia* [Residual Stresses]. Moscow: Mashgiz, 1963. 232 p.
2. Pavlov V.F., Kirpichev V.A., Ivanov V.B. *Ostatochnye napriazheniia i soprotivlenie ustalosti uprochnennykh detalei s kontsentratorami napriazhenii* [Residual Stresses and Fatigue Resistance of Hardened Parts with Stress Concentrators]. *Samarskii nauchnyi tsentr Rossiiskoi akademii nauk*, 2008. 64 p.
3. Ivanov S.I., Pavlov V.F., Minin B.V., Kirpichev V.A., Kocherov E.P., Golovkin V.V. *Ostatochnye napriazheniia i soprotivlenie ustalosti vysokonagruzhennykh rez'bovykh detalei* [Residual stresses and fatigue resistance of highly loaded threaded parts]. *Samarskii nauchnyi tsentr Rossiiskoi akademii nauk*, 2015. 170 p.
4. Kravchenko B.A., Krutsilo V.P., Gutman G.N. *Termoplasticheskoe uprochnenie – rezerv povysheniia prochnosti i nadezhnosti mashin* [Thermoplastic Hardening as a Reserve Increase of Strength and Reliability of Machine Parts]. *Samarskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet*, 2000. 216 p.
5. Sulima G.N., Shuvalov V.A., Yagodka Yu.D. *Poverkhnostnyi sloi i ekspluatatsionnye svoistva detalei mashin* [Surface Layer and Performance of Machine Parts]. Moscow: Mashinostroenie, 1988. 240 p.
6. Markov A.I. *Ul'trazvukovaia obrabotka materialov* [Ultrasonic Processing of Materials]. Moscow: Mashinostroenie, 1989. 237 p.
7. Brockman R.A., Braisted W.R., Olson S.E., Tenaglia R.D., Clauer A.H., Langer K., Shepard M.J. Prediction and characterization of residual stresses from laser shock peening. *International Journal of Fatigue*, 2012, vol. 36, no. 1, pp. 96–108. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2011.08.011
8. Dai K., Shaw L. Analysis of fatigue resistance improvements via surface severe plastic deformation. *International Journal of Fatigue*, 2008, vol. 30, no. 8. pp. 1398–1408. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2007.10.010
9. James M.N., Hughes D.J., Chen Z., Lombard H., Hattingh D.G., Asquith D., Yates J.R., Webster P.J. Residual stresses and fatigue performance. *Engineering Failure Analysis*, 2007, vol. 14, no. 2, pp. 384–395. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2006.02.011

10. Majzoobi G.H., Azadikhah K., Nemati J. The effects of deep rolling and shot peening on fretting fatigue resistance of Aluminum-7075-T6. *Materials Science and Engineering A*, 2009, vol. 516, no. 1-2, pp. 235-247. DOI: 10.1016/j.msea.2009.03.020

11. Soady K.A. Life assessment methodologies incorporating shot peening process effects: Mechanistic consideration of residual stresses and strain hardening: Part 1 – Effect of shot peening on fatigue resistance. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, 2013, vol. 29, no. 6, pp. 637-651. DOI: 10.1179/1743284713Y.0000000222

12. 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 and Design*, 2012, vol. 35, pp. 741-748. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.09.055

13. Vologin M.F., Kalashnikov V.V., Nerubai M.S., Shtrikov B.L. Primenenie ul'trazvuka i vzryva pri obrabotke i sborke [Application of ultrasound or explosion during processing and assembly]. Moscow: Mashinostroenie, 2002. 264 p.

14. Prikhod'ko V.M. [et al.] Tekhnologicheskoe primeneniye ul'trazvuka v transportnom mashinostroenii [The technological application of ultrasound for the transport engineering]. *Moscow: Tekhnopoligraf tsentr*, 2007. 112 p.

15. Kazantsev V.F., Kudriashov B.A., Nigmatzianov R.I., Prikhod'ko V.M., Fatiukhin D.S. Ul'trazvukovoe poverkhnostnoye plasticheskoye deformirovaniye [The ultrasonic surface plastic deformation]. *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*, 2009, no. 46, pp. 7-9.

16. Grebennikov M.A., Zalichikhiye S.D., Stebel'kov I.A. Fizika i tekhnologiya uprochneniya detalei v pole ul'trazvuka [The physics and technology of details hardening in the ultrasound field]. *Vestnik dvigatelestroeniya*, 2013, no. 1, pp. 72-74.

17. Aleksandrov M.K., Papsheva N.D., Akushskaia O.N. Ul'trazvukovoye uprochneniye detalei GTD [The ultrasonic hardening of the turboshaft engine parts]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2011, no. 3(27), pp. 271-276.

18. Radchenko V.P., Saushkin M. N. Matematicheskiye modeli vosstanovleniya i relaksatsii ostatochnykh napriazheniy v poverkhnostno uprochnennom sloe tsilindricheskikh elementov konstruktсии pri polzuchestii [Mathematical models of recovery and relaxation of residual stresses in a surface-hardened layer of cylindrical specimens under creep conditions]. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, 2004, no. 11, pp. 3-17.

19. Radchenko V.P., Saushkin M.N. Polzuchest' i relaksatsiya ostatochnykh napriazheniy v uprochnennykh konstruktсииakh [Creep and Relaxation of Residual Stresses in Hardened Structures]. Moscow: Mashinostroenie-1, 2005. 226 p.

20. Saushkin M.N., Radchenko V.P., Pavlov V.F. Method of calculating the fields of residual stresses and plastic strains in cylindrical specimens with allowance for surface hardening anisotropy. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2011, vol. 52, no. 2, pp. 303-310. DOI: 10.1134/S0021894411020180

21. Radchenko V.P., Pavlov V.Ph., Saushkin M.N. Issledovaniye vliyaniya anizotropii poverkhnostnogo plasticheskogo uprochneniya na raspredeleniye ostatochnykh napriazheniy v polykh i sploshnykh tsilindricheskikh obraztsakh [Investigation of surface plastic hardening anisotropy influence on residual stresses distribution in hollow and solid cylindrical specimens]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2015, no. 1, pp. 130-147. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.1.09

22. Altenberber I., Nalla R.K., Sano Y., Wagner L., Ritchie R.O. On the effect of deeprolling and laser-peening on the stress-controlled low- and high-cycle fatigue behavior of Ti-6-Al-4V at elevated temperatures up to 550 °C. *International Journal of Fatigue*, 2002, vol. 44, pp. 292-302. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2012.03.008

23. Kolotnikova O.V. Effectiveness of hardening by methods of plastic surface deformation of components operating at high temperatures. *Strength of Materials*, 1983, vol. 15, no. 2, pp. 292-295. DOI: 10.1007/BF01523487

24. Tseitlin V.I., Kolotnikova O.V. Relaxation of residual stresses in gas-turbine engine parts. *Strength of Materials*, 1980, vol. 12, no. 8, pp. 982-984. DOI: 10.1007/BF00770521
25. Radchenko V.P., Kirpichev V.A., Lunin V.A. Vliianie termoekspozitsii na ostatochnye napriazheniia obratstov iz splava EP742 posle ul'trazvukovogo uprochneniia [Influence of thermoexposure on residual stresses of specimens from EP742 alloy after the ultrasonic hardening]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2012, no. 3(35), pp. 147-154.
26. Buchanan D.J., John R. Relaxation of shot-peened residual stresses under creep loading. *Scripta Materialia*, 2008, no. 3, pp. 286-289. DOI:10.1016/j.scriptamat.2008.03.021
27. Khadraoui M., Cao W., Castex L. Experimental investigations and modeling of relaxation behavior of shot peening residual stresses at high temperature for nickel base superalloys. *Materials Science and Technology*, 1997, vol. 13, no. 4, pp. 360-367. DOI: 10.1179/026708397790302359
28. Xie L., Jiang C., Ji V. Thermal relaxation of residual stresses in shot peened surface layer of (TiB + TiC)/Ti-6Al-4V composite at elevated temperatures. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, vol. 528, no. 21, pp. 6478-6489. DOI: 10.1016/j.msea.2011.04.075
29. Radchenko V.P., Saushkin M.N. Direct method of solving the boundary-value problem of relaxation of residual stresses in a hardened cylindrical specimen under creep conditions. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2009, vol. 50, no. 6, pp. 989-997. doi: 10.1007/s10808-009-0133-8
30. Radchenko V.P., Kocherov E.P., Saushkin M.N., Smyslov V.A. Experimental and theoretical studies of the influence of a tensile load on the relaxation of residual stresses in a hardened cylindrical specimen under creep conditions. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2015, vol. 56, no. 2, pp. 313-320. DOI: 10.1134/S0021894415020170
31. Radchenko V.P., Tsvetkov V.V. Kinetika napriazhenno-deformirovannogo sostoianii v po-verkhnostno uprochnennom tsilindricheskom obratse pri slozhnom napriazhenom sostoianii v uslo-viiakh polzuchesti [Kinetics of the stress-strain state of surface hardened cylindrical specimen under complex stress state of creep]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya Fiziko-matematicheskie nauki*, 2014, no. 1(34), pp. 93-108. DOI: 10.14498/vsgtu1313
32. Ivanov S.I. Opredelenie ostatochnykh napriazhenii v plastinkakh metodom polosok [Determination of residual stresses in the plates using the bent strip method]. *Voprosy prochnosti elementov aviatsionnykh konstruksii*. Kuibyshevskii aviatsionnyi institut, 1971. pp. 139-152.
33. Radchenko V.P., Eremin Yu.A. Reologicheskoe deformirovanie i razrushenie materialov i elementov konstruksii [Rheological deformation and fracture of materials and structural elements]. Moscow: Mashinostroenie-1, 2004. 264 p.
34. Rabotnov Yu.N. Creep problems in structural members. Amsterdam, London, North-Holland Publ. Co., 1969, XIV+822 p.