

Радченко В.П., Павлов В.Ф., Бербасова Т.И., Саушкин М.Н. Метод реконструкции остаточных напряжений и пластических деформаций в тонкостенных трубопроводах в состоянии поставки и после двухстороннего виброударного поверхностного упрочнения дробью // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2020. № 2. С. 123-133. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.2.10

Radchenko V.P., Pavlov V.Ph., Berbasova T.I., Saushkin M.N. The method of reconstruction of residual stresses and plastic deformations in thin-walled pipelines in the delivery state and after bilateral vibro-shock surface hardening with a shot. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2020, no. 2, pp. 123-133. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.2.10



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 2, 2020

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index>



DOI: 10.15593/perm.mech/2020.2.10

УДК 539.3:621.787

## МЕТОД РЕКОНСТРУКЦИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ В ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБОПРОВОДАХ В СОСТОЯНИИ ПОСТАВКИ И ПОСЛЕ ДВУХСТОРОННЕГО ВИБРОУДАРНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ ДРОБЬЮ

В.П. Радченко<sup>1</sup>, В.Ф. Павлов<sup>2</sup>, Т.И. Бербасова<sup>1</sup>, М.Н. Саушкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

<sup>2</sup>Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 28 апреля 2020 г.  
Принята: 15 июня 2020 г.  
Опубликована: 30 июня 2020 г.

### Ключевые слова:

тонкостенные трубы, состояние поставки, двухстороннее упрочнение дробью, остаточные напряжения и деформации, экспериментальные исследования, феноменологическая модель.

### АННОТАЦИЯ

Предложен феноменологический метод реконструкции полей остаточных напряжений и пластических деформаций в тонкостенных цилиндрических трубках из стали X18H10T в состоянии поставки и после одновременного двухстороннего поверхностного пластического упрочнения вибродробеструйной обработкой поверхности шариками на специальном вибростенде. К нему крепился цилиндрический контейнер, заполненный дробью диаметром 3 мм. Трубки заполнялись на 50 % объема шариками диаметром 1 мм и помещались внутрь контейнера. Оси трубки и контейнера совпадали. Пространство между трубкой и контейнером на 80 % было заполнено шариками. Частота колебаний стенда – 18,5 кГц, время упрочнения – 20 мин. Для обеспечения равномерного упрочнения трубка в контейнере вращалась. Методом копек и полосок с использованием процедуры послыпного электрохимического травления упрочненных слоев определены экспериментальные значения остаточных напряжений  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  в приповерхностных слоях. Для этой цели использовались экспериментально измеряемые величины прогиба балки-полоски и угловое раскрытие разрезанного кольца (изменение диаметра). В математическую модель введен параметр анизотропии упрочнения, связывающий осевую и окружную компоненты пластической деформации. При решении поставленных задач используются гипотезы пластической несжимаемости материала, отсутствия вторичных пластических деформаций материала в области сжатия приповерхностного слоя, плоских сечений. Изложена методика решения данного типа краевых задач реконструкции напряженно-деформированного состояния, позволяющая определить недостающую компоненту  $\sigma_z$  и все компоненты тензора остаточных пластических деформаций (недиагональные компоненты тензоров напряжений и деформаций не рассматривались). Методика реконструкции напряженно-деформированного состояния является универсальной, поскольку она показала свою работоспособность как при определении технологических полей остаточных напряжений и необратимых деформаций в образцах в состоянии поставки после механических операций, так и после двухстороннего поверхностного пластического деформирования. Выполнена проверка адекватности расчетных данных, полученных с использованием феноменологического метода реконструкции полей напряжений и деформаций, экспериментальных данных для образцов в состоянии поставки и после процедуры упрочнения. Наблюдается соответствие расчетных и экспериментальных данных. Приведены численные значения для параметра анизотропии, связывающего окружные и осевые необратимые деформации: для образцов в состоянии поставки его численное значение равно 0,1, а для упрочненных образцов – 4,2. Это свидетельствует о существенной анизотропии распределения осевых и окружных компонент тензора остаточных деформаций. Установлено, что в состоянии поставки в области, прилегающей к внутренней поверхности, наблюдаются сжимающие остаточные напряжения, а в слое на внешней поверхности – растягивающие напряжения. После упрочнения в обеих областях наблюдаются только сжимающие напряжения, по модулю существенно превосходящие аналогичные напряжения для образцов в состоянии поставки. Основные результаты работы иллюстрируются табличными данными и соответствующими эпюрами распределения остаточных напряжений по глубине упрочненного слоя.

© ПНИПУ

© Радченко Владимир Павлович – д.ф.-м.н., проф., e-mail: radchenko.vp@samgtu.ru, ID: 0000-0003-4168-9660.

Павлов Валентин Федорович – д.т.н., проф., e-mail: sopromat@ssau.ru, ID: 0000-0002-6549-5775.

Бербасова Татьяна Игоревна – асп., e-mail: t.i.ber@yandex.ru, ID: 0000-0002-8070-4846.

Саушкин Михаил Николаевич – к.ф.-м.н., доц., e-mail: saushkin.mn@samgtu.ru, ID: 0000-0002-8260-2069.

Vladimir P. Radchenko – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, e-mail: radchenko.vp@samgtu.ru, ID: 0000-0003-4168-9660.

Valentin Ph. Pavlov – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: sopromat@ssau.ru, ID: 0000-0002-6549-5775.

Tatiana I. Berbasova – PhD student, e-mail: t.i.ber@yandex.ru, ID: 0000-0002-8070-4846.

Mikhail N. Saushkin – CSc of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, e-mail: saushkin.mn@samgtu.ru, ID: 0000-0002-8260-2069.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)



# THE METHOD OF RECONSTRUCTION OF RESIDUAL STRESSES AND PLASTIC DEFORMATIONS IN THIN-WALLED PIPELINES IN THE DELIVERY STATE AND AFTER BILATERAL VIBRO-SHOCK SURFACE HARDENING WITH A SHOT

V.P. Radchenko<sup>1</sup>, V.Ph. Pavlov<sup>2</sup>, T.I. Berbasova<sup>1</sup>, M.N. Saushkin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

<sup>2</sup>Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov, Samara, Russian Federation

## ARTICLE INFO

Received: 28 April 2020  
Accepted: 15 June 2020  
Published: 30 June 2020

### Keywords:

thin-walled tubes, delivery state, bilateral hardening by beads, residual stresses and deformations, experimental research, phenomenological model.

## ABSTRACT

We suggest the phenomenological method of reconstructing the fields of residual stresses and plastic deformations in thin-walled cylindrical tubes made of X18N10T steel in the delivery state and after a simultaneous bilateral surface plastic hardening by the vibration-shot blasting of the surface with beads on a special vibrating stand. A cylindrical container filled with three-millimeter beads was attached to it. The tubes were 50 % filled with one-millimeter beads, and they were placed inside the container. The axis of the tube and the container coincided. The space between the tube and the container was 80 % filled with beads. The vibrational frequency of the stand was 18.5 KHz, the hardening time was 20 minutes. The tube in the container was rotated to ensure uniform hardening. We determined the experimental values of residual stresses  $\sigma_\theta$  and  $\sigma_z$  in the surface layers using the method of rings and strips with the procedure of the layer-by-layer electrochemical picking of the hardened layers. For this purpose, the experimentally measured values of the beam-strip deflection and the angular opening of the cut ring (changing the diameter) were used. The hardening anisotropy parameter which relates the axial and circumferential components of plastic deformation was introduced into the mathematical model. In solving the stated problems the hypotheses of plastic incompressibility of the material, the absence of secondary plastic deformations of the material in the compression region of the surface layer, as well as the hypothesis of flat sections and straight radii were used. We described the method aimed at solving this type of boundary value problems of reconstructing stress-strain states, which makes it possible to determine the missing component  $\sigma_r$  and all the components of the tensor of residual plastic deformations (off-diagonal components of the tensors of stresses and deformations were not considered). The method of reconstructing the stress-strain state is universal, because it has shown its operability both in determining the technological fields of residual stresses, as well as the irreversible strains in the samples in the delivered state after mechanical operations, and after bilateral surface plastic deformation. The adequacy of the calculated data was verified, which was obtained using the phenomenological method of reconstructing the stress and strain fields of the experimental data for the samples in the delivery state and after hardening. The correspondence of the calculated and experimental data was matched. The numerical values are given for the anisotropy parameter connecting the circumferential and axial irreversible strains, for samples, in the delivery state, its numerical value is 0.1, and, for the hardened samples, it is 4.2. This indicates a significant anisotropy of the distribution of the axial and circumferential components of the residual strain tensor. It has been established that the compressive residual stresses are observed in the delivery state in the region adjacent to the inner surface, and the tensile stresses are observed in the layer on the outer surface. Only compressive stresses are observed in both regions after hardening, which significantly exceed in module similar stresses for the samples in the delivery state. The main results are illustrated by the tabular data and the corresponding diagrams of the distribution of residual stresses along the depth of the hardened layer.

© PNRPU

## Введение

Ресурсные показатели надежности различных деталей во многом определяются качеством поверхностных слоев, с которых, как правило, начинаются, например, усталостные разрушения конструктивных элементов. К основным параметрам качества поверхностных слоев относятся микрогеометрия, трибологические характеристики (износостойкость), микротвердость и приповерхностные технологические остаточные напряжения.

После изготовления деталей используют широкий арсенал отделочных операций поверхности – шлифование, полирование, притирка, суперфиниширование и другие. В качестве заключительной операции часто

используют полирование под давлением, которое благоприятно воздействует на структуру поверхностного слоя. В частности, происходит смыкание кристаллитов, разобленных под действием предшествующей механической обработки, поверхностный слой уплотняется, острые кромки микронеровностей сглаживаются, а впадины и микротрещины затягиваются [1]. Но при любой отделочной технологии, во-первых, всегда остаются дефекты поверхности, во-вторых, в приповерхностном слое возникают технологические остаточные напряжения, которые в подавляющем числе случаев играют отрицательную роль и снижают ресурс деталей. Поэтому их нужно учитывать в расчетной практике, поскольку они «накладываются» на «рабочие» напряжения в про-

цессе эксплуатации, либо использовать «контртехнологии», которые нивелируют эти напряжения, например, методы поверхностного пластического деформирования (ППД).

При использовании ППД происходит сглаживание шероховатостей, смятие гребешков, уменьшение глубины и остроты входящих углов рисок, и самое существенное, в приповерхностном слое возникают сжимающие остаточные напряжения, которые повышают сопротивление усталости, что проиллюстрировано в огромном количестве работ за более чем семидесятилетнюю историю развития этого научного направления.

Особую роль упрочняющие обработки поверхности играют для авиационных элементов конструкции, где наряду с требованиями высокой надежности ключевым является требование снижения веса и материалоемкости. Одним из путей их выполнения (в совокупности с увеличением прочности) и являются методы поверхностного пластического деформирования.

Одним из важных элементов летательных аппаратов являются трубопроводы авиационных пневмогидросистем и другого технологического назначения. Надежность трубопроводов зависит не только от совокупности эксплуатационных нагрузок, но и от технологии их изготовления и последующих технологических операций «упрочнения» поверхностного слоя [2, 3]. Отметим, в частности, что опыт эксплуатации тонкостенных авиационных трубопроводов свидетельствует о том, что усталостные трещины образуются как на наружной, так и на внутренней поверхности [2, 3]. Отсюда следует, что в подобного рода деталях оправданным является поверхностное пластическое упрочнение обеих поверхностей, внутренней и внешней, на которых тем самым создаются «благоприятные» зоны со сжимающими остаточными напряжениями, препятствующие возникновению и развитию трещин.

На современном уровне развития механики упрочненных конструкций разработан широкий спектр соответствующих технологий, но чаще всего используется пневмо- и гидродробеструйная обработка [4, 5], а также дробеструйная обработка в сочетании с ультразвуком – ультразвуковое (механическое) упрочнение дробью с малой амплитудой и высокой частотой в специальных контейнерах [6–12].

В публикациях [13–17] представлены результаты исследований, позволяющие оценить распределение остаточных напряжений по толщине упрочненного слоя при единичном ударе шара (дробин) о плоскость в упругопластической постановке. Существенно возросшие возможности вычислительных технологий позволили в ряде работ реализовать прямое математическое моделирование технологических процессов обработки поверхности дробью с оценкой полей возникающих напряжений и деформаций на основе численного решения достаточно сложных динамических упругопластических задач [18–27]. Рассмотренные численные методы рассчитаны на «идеальные» (с математической точки

зрения) условия процесса упрочнения. Для реальных же промышленных технологий упрочнения дробью данные методы могут дать лишь качественную картину для полей напряжений и деформаций вследствие стохастического характера процесса упрочнения (многократные хаотические столкновения шариков с обрабатываемой поверхностью, угол их падения, скорость соударения и т.д.).

Одной из теоретических (и не решенных в полном объеме) проблем является реконструкция напряженно-деформированного состояния после упрочнения. Важность этой проблемы состоит в том, что без этой информации невозможно решать задачи прочности деталей в условиях эксплуатации, поскольку на начальные остаточные напряжения и деформации накладываются «рабочие» эксплуатационные напряжения.

Кроме отмеченных выше работ, базирующихся на решении динамических контактных краевых задач в упругопластической области, отметим еще одно направление теоретических исследований, основанное на волевом задании закона распределения пластической деформации в упрочненном слое. Истоки этого метода расчета по первоначальным деформациям восходят к работе [28], а в настоящее время он получил развитие в ряде работ [29–32]. Использование аналогии между остаточными пластическими деформациями и температурными деформациями в неоднородном температурном поле, которое задается волевым решением, позволяет свести исходную задачу к проблеме термоупругости, решение которой в современных вычислительных комплексах не вызывает никаких затруднений. Серьезный недостаток данного метода состоит в том, что экспериментально определить остаточные пластические деформации невозможно.

Поскольку теоретически решить данную задачу о реконструкции полей остаточных напряжений и деформаций практически невозможно, то необходим какой-то минимум экспериментальной информации о некоторых компонентах тензора остаточных напряжений. Поэтому в настоящей работе используется феноменологический подход, предложенный для цилиндрических изделий [33] и получивший дальнейшее развитие в работах [34–36]. При моделировании напряженно-деформированного состояния односторонне упрочненных с внешней поверхности полых цилиндрических образцов суть подхода заключается в том, что для определения нормальных компонент тензоров остаточных напряжений и необратимых деформаций необходимо иметь одну или две (в зависимости от технологии упрочнения) экспериментальные эпюры остаточных напряжений. Возможность определения приповерхностной остаточной пластической деформации позволяет оценить и остаточную микрогеометрию обработанной детали после упрочнения [37].

Отметим, что хотя вопросам упрочняющих технологий в отечественных и зарубежных исследованиях посвящена обширная литература, в ней можно найти единичные (в основном экспериментальные) работы, в которых содержатся сведения о двухстороннем уп-

рочнении ППД тонкостенных прямолинейных трубопроводов малого диаметра, а теоретические методы реконструкции остаточных напряжений для этого типа упрочнения просто отсутствуют.

В связи с вышеизложенным целью настоящей работы являются экспериментальные исследования и разработка на их основе методики расчета полей остаточных напряжений и пластических деформаций как при двухстороннем упрочнении дробью внешней и внутренней поверхности тонкостенных трубок  $\varnothing 12 \times 1$  мм из стали X18H10T, так и в состоянии их поставки.

### 1. Экспериментальное и теоретическое исследование распределения остаточных напряжений и деформаций в тонкостенных трубках из стали X18H10T в состоянии поставки

Все дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования выполнены для прямолинейных трубок  $\varnothing 12 \times 1$  мм, как наиболее широко применяемых (по крайней мере в авиадвигателестроении). Данный конструктивный элемент является частью трубопроводов авиационных пневмогидросистем. Как уже отмечалось выше, в большинстве случаев объемные деградиационные процессы разрушения материала, образование и развитие микротрещин наиболее интенсивно происходят в приповерхностных слоях деталей.

Арсенал отделочных операций поверхности (шлифование, полирование, притирка, суперфиниширование и другие) в определенной мере способствует, например, повышению сопротивления усталости, снижению шероховатости и т.д., но при этом возникают технологические остаточные напряжения, которые во многих случаях играют отрицательную роль и снижают ресурс деталей. Поэтому их нужно либо учитывать в расчетной практике, поскольку они «накладываются» на «рабочие» напряжения в процессе эксплуатации, либо выполнять дополнительные технологические мероприятия по снижению отрицательных последствий от их наличия. В связи с этим в работе и поставлена задача экспериментального и теоретического исследования остаточных напряжений в прямолинейных трубках в состоянии поставки. Задача рассматривается в цилиндрической системе координат.

Экспериментальное определение распределений  $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$  и  $\sigma_z = \sigma_z(r)$  выполнено на кафедре «Сопротивление материалов» Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева методом колец и полосок [28, 38, 39]. Из трубки вырезались достаточно широкое кольцо ( $b \geq 5H$ ) и полоска длиной  $L$  (рис. 1). Кольцо разрезалось вдоль образующей.

Сразу после вырезки у полосок измеряли прогиб  $f(0)$  (рис. 2, а), а у колец – изменение диаметра  $\delta(0)$  (рис. 3, а). Затем электрохимическим полированием (состав электролита: фосфорная кислота – 65 %, серная

кислота – 20 %, дистиллированная вода – 15 %) производилось удаление слоев со стороны упрочнения (остальные части поверхности защищались лаком). Последующее травление материала (5–10 мкм) приводило к изменению диаметра  $\delta(h)$  в кольцах (рис. 3, б) и прогибов полосок  $f(h)$ , где  $h$  – расстояние от упрочненной поверхности до слоя, в котором вычисляли остаточное напряжение.

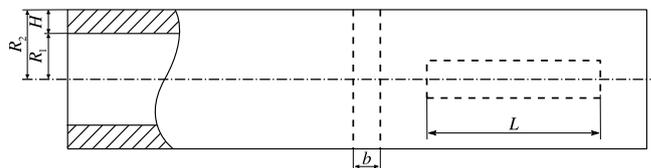


Рис. 1. Схема вырезки кольца и полоски

Fig. 1. The cutting scheme for preparation ring and axial strip specimens from a thin walled tube

Величины  $f(h)$  и  $D_r + \delta(h)$  отсчитывались от состояния полоски или кольца до вырезки из трубки (штриховые линии на рис. 2 и 3). Толщина удаленного слоя  $h$  измерялась в 10–15 точках, а результаты измерений усреднялись. В дальнейшем для глубины упрочненного слоя у внешней поверхности используется обозначение  $h = h_1$ , а для внутреннего упрочненного слоя –  $h = h_2$ .

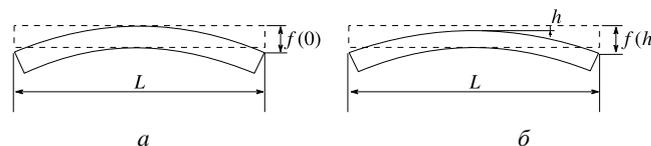


Рис. 2. Схема измерения прогиба полоски: а – после вырезки; б – после вырезки и удаления слоя толщиной  $h$

Fig. 2. The scheme of measuring the deflection of the strip: а is after cutting; b is after cutting and removing a layer of thickness  $h$

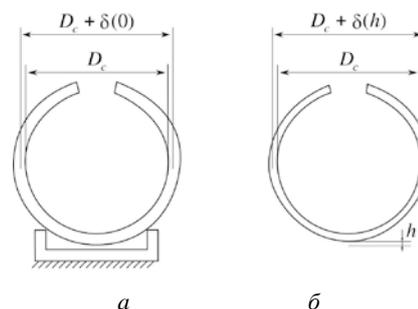


Рис. 3. Схема измерения перемещений кольца: а – изменение диаметра после вырезки; б – изменение диаметра после вырезки и удаления слоя толщиной  $h$

Fig. 3. The scheme of measuring the movements of the ring: а is changing the diameter after cutting; б is changing the diameter after cutting and removing a layer of thickness  $h$

Расчетно-экспериментальные зависимости для определения компонент тензора остаточных напряжений  $\sigma_\theta$  и  $\sigma_z$  приведены в работе [39] и имеют следующий вид:

- при снятии наружных слоев ( $h = h_1$ ):

$$\sigma_{\theta}(h_1) - \nu\sigma_z(h_1) = -\frac{EH}{12[R(0)]^2}\delta(0) - \frac{E(H-h_1)^2}{12[R(h_1)]^2}\frac{d\delta(h_1)}{dh_1} + \frac{E(H-h_1)}{12[R(h_1)]^3}(4R_2 - 3H - h_1)\delta(h_1) - \frac{E}{6}\int_0^{h_1}\frac{\delta(\xi)}{[R(\xi)]^2}d\xi, \quad (1)$$

$$\sigma_z(h_1) - \nu\sigma_{\theta}(h_1) = \frac{8E[R(0)]^2}{L^2\sin(\alpha/2)}\left(\frac{\alpha + \sin\alpha}{2} - \frac{4\sin^2(\alpha/2)}{\alpha}\right) \times \left[\frac{f(0)}{H} - \frac{2}{H-h_1}f(h_1) + \frac{df(h_1)}{dh_1} + 2\int_0^{h_1}\frac{f(\xi)d\xi}{(H-\xi)^2}\right], \quad (2)$$

где в формулах (1) и (2) обозначено  $H = R_2 - R_1$ ,  $R(h_1) = \frac{1}{2}(R_1 + R_2 - h_1)$ ;

- при снятии внутренних слоев ( $h = h_2$ ):

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta}(h_2) - \nu\sigma_z(h_2) &= \frac{EH}{12[R(0)]^2}\delta(0) - \frac{E(H-h_2)}{12[R(h_2)]^3}(4R_1 + 3H + h_2)\delta(h_2) + \frac{E(H-h_2)^2}{12[R(h_2)]^2}\frac{d\delta(h_2)}{dh_2} + \frac{E}{6}\int_0^{h_2}\frac{\delta(\xi)}{[R(\xi)]^2}d\xi, \quad (3) \\ \sigma_z(h_2) - \nu\sigma_{\theta}(h_2) &= -\frac{8E[R(0)]^2}{L^2\sin(\alpha/2)}\left(\frac{\alpha + \sin\alpha}{2} - \frac{4\sin^2(\alpha/2)}{\alpha}\right) \times \left[\frac{f(0)}{H} - \frac{2}{H-h_2}f(h_2) + \frac{df(h_2)}{dh_2} + 2\int_0^{h_2}\frac{f(\xi)d\xi}{(H-\xi)^2}\right], \quad (4) \end{aligned}$$

где в формулах (3) и (4) обозначено  $R(h_2) = \frac{1}{2}(R_1 + R_2 + h_2)$ . В формулах (1)–(4) величина  $\alpha$  – центральный угол в вырезанной полоске;  $E, \nu$  – модуль Юнга и коэффициент Пуассона;  $R_1$  и  $R_2$  – внутренний и внешний радиусы трубки;  $H$  – толщина стенки,  $H = R_2 - R_1$ ;  $\delta(h_i)$ ,  $f(h_i)$ ,  $i = 1, 2$  – экспериментально определяемые функции;  $L$  – длина полоски.

Таким образом, экспериментальные (а точнее, расчетно-экспериментальные) напряжения  $\sigma_{\theta}$  и  $\sigma_z$  определяются из систем уравнений (1) и (2) для внешнего слоя и из (3), (4) – для внутреннего слоя.

На рис. 4 маркерами приведены вычисленные в соответствии с изложенной методикой расчетно-экспериментальные значения остаточных напряжений  $\sigma_{\theta} = \sigma_{\theta}(r)$  (точки) и  $\sigma_z = \sigma_z(r)$  (треугольники),  $R_1 \leq r \leq R_2$ .

Анализ представленных экспериментальных данных свидетельствует о достаточно больших значениях остаточных напряжений в приповерхностных слоях

толщиной от 100 до 160 мкм в трубках, причем во внутреннем и внешнем слоях они противоположного знака. В частности, на внешнем контуре наблюдаются растягивающие остаточные напряжения, что приводит к «раскрытию» всех вакансий и способствует разрушению материала, а в конечном итоге вызывает ускоренное зарождение и раскрытие микротрещин, например в условиях многоциклового нагружения.

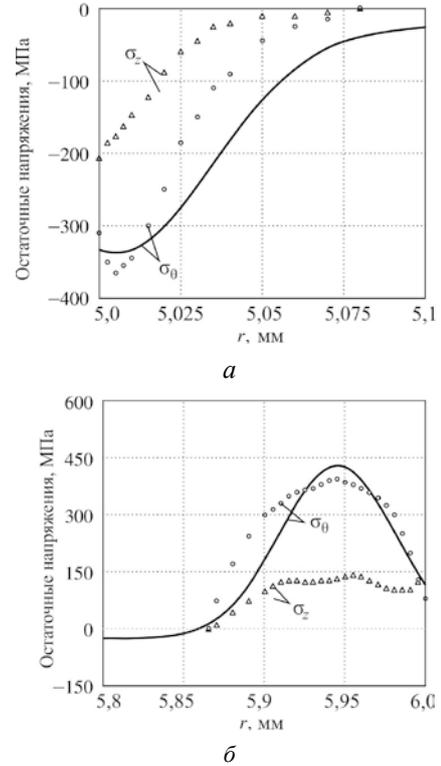


Рис. 4. Экспериментальные (маркеры) и расчетные зависимости  $\sigma_{\theta} = \sigma_{\theta}(r)$  (сплошные линии) и  $\sigma_z = \sigma_z(r)$  (штриховые линии) в областях, прилегающих к внутренней (а) и внешней (б) поверхности

Fig. 4. Experimental (markers) and calculated dependencies  $\sigma_{\theta} = \sigma_{\theta}(r)$  (solid lines) and  $\sigma_z = \sigma_z(r)$  (dashed lines) in the areas adjacent to the inner (a) and outer (b) surfaces

Кроме этого, если никаких «компенсирующих» технологических операций для трубок в состоянии поставки не проводится, то при оценке ресурса этого конструктивного элемента остаточные напряжения нужно учитывать в расчетной практике в совокупности с эксплуатационными нагрузками. Отсюда возникает потребность в разработке математических моделей реконструкции остаточных напряжений для образцов в состоянии поставки. Для этой цели в настоящей работе предложен феноменологический метод расчета остаточных напряжений и необратимых деформаций при одновременном моделировании напряженно-деформированного состояния во внутреннем и внешнем приповерхностных слоях тонкостенных образцов в состоянии поставки (ниже он будет обобщен и на двухстороннее поверхностно-пластическое упрочнение трубок). Этот метод базируется на обобщении исследований [34–36],

где предложен аналогичный подход к моделированию одностороннего упрочнения внешней поверхности полых цилиндрических образцов. Согласно [34–36] расчет ведется в цилиндрической системе координат. Краевая задача включает уравнения равновесия и совместности деформации, граничные условия, гипотезу несжимаемости материала, постулируемую связь между окружной  $q_\theta$  и осевой  $q_z$  компонентами тензора остаточных пластических деформаций вида  $q_z = \alpha q_\theta$  (здесь и далее  $\alpha = \text{const}$  – феноменологический параметр анизотропии упрочнения [34]). Кроме этого, использовались гипотезы плоских сечений и отсутствия вторичных пластических деформаций в области сжатия материала в упрочненном слое.

Основные расчетные формулы для определения остаточных напряжений и деформации в цилиндрической системе координат имеют следующий вид [34–36]:

$$\begin{aligned} \sigma_r(r) &= \frac{1}{r} \int_{R_1}^r \sigma_\theta(\xi) d\xi, \quad R_1 \leq r \leq R_2, \\ q_\theta(r) &= \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1+\alpha\nu)^2 E} r^{-\frac{2+\alpha}{1+\alpha\nu}} \int_{R_1}^r \xi^{\frac{1+\alpha-\alpha\nu}{1+\alpha\nu}} \times \\ &\quad \times (\sigma_r(\xi) + (1+\alpha)\sigma_\theta(\xi)) d\xi + \\ &\quad + \frac{1+\nu}{(1+\alpha\nu)E} (\nu\sigma_r(r) - (1-\nu)\sigma_\theta(r)), \\ q_z(r) &= \alpha q_\theta(r), \quad q_r(r) = -q_\theta(r)(1+\alpha), \\ \varepsilon_z^0 &= \frac{2}{R_2^2 - R_1^2} \int_{R_1}^{R_2} \xi \left[ q_z(\xi) - \frac{\nu}{E} (\sigma_r(\xi) + \sigma_\theta(\xi)) \right] d\xi, \\ \sigma_z(r) &= E (\varepsilon_z^0 - q_z(r)) + \nu (\sigma_r(r) + \sigma_\theta(r)), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $E$  – модуль Юнга;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $\alpha$  – феноменологический параметр,  $R_1 = 5$  мм,  $R_2 = 6$  мм. Величина  $\varepsilon_z^0 = \text{const}$  – это рассчитанная в соответствии с гипотезой плоских сечений осевая деформация, вызванная остаточными напряжениями. Из алгоритма (5) следует, что теоретические значения компонент тензора  $\sigma_z(r)$ ,  $\sigma_r(r)$  и пластических деформаций  $q_i(r)$ ,  $i = r, \theta, z$ , в конечном итоге выражаются через компоненту  $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$ , параметр  $\alpha$ , модуль Юнга и коэффициент Пуассона, где  $r$  – текущий радиус. Недиагональные компоненты тензоров остаточных напряжений и деформаций не рассматриваются, поскольку их величины (по модулю) почти на порядок меньше нормальных компонент [35]. В этой связи для реализации расчетной схемы (5) необходимо иметь аналитическую зависимость для компоненты  $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$  на всей области интегрирования  $R_1 \leq r \leq R_2$ , а экспериментальные данные для этой компоненты заданы лишь в тонких приповерхностных слоях толщиной 100–150 мкм (см. рис. 4).

Для этой цели использована следующая функциональная зависимость для аппроксимации экспериментальных данных:

$$\begin{aligned} \sigma_\theta(r) &= \sigma_0 - \sigma_1 \exp \left[ -\frac{(R_2 - r - h_2^*)^2}{b_2^2} \right] - \\ &\quad - \sigma_2 \exp \left[ -\frac{(r - R_1 - h_1^*)^2}{b_1^2} \right], \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2, b_1, b_2, h_1^*$  и  $h_2^*$  – параметры, подлежащие процедуре идентификации.

Численные значения параметров зависимости (6) определяются из решения системы уравнений, образованной функциональными уравнениями

$$\sigma_\theta(r_1^*) = \sigma_3^1, \quad \sigma_\theta(r_2^*) = \sigma_3^2, \quad \sigma_\theta(r_1^0) = 0, \quad \sigma_\theta(r_2^0) = 0 \quad (7)$$

и условием самоуравновешенности окружных остаточных напряжений

$$\int_{R_1}^{R_2} \sigma_\theta(r) dr = 0, \quad (8)$$

где  $r_1^* = R_1 + h_1^*$ ,  $r_2^* = R_2 - h_2^*$  – значения радиуса, в которых достигаются локальные экстремумы  $\sigma_3^1$  и  $\sigma_3^2$  экспериментальной зависимости  $\sigma_\theta(r)$  во внутреннем и внешнем приповерхностных слоях соответственно;  $r_1^0$  и  $r_2^0$  – значения радиусов, в которых экспериментальная эпюра остаточных напряжений принимает нулевые значения. Решение системы (7) и (8) осуществляется численно. После решения системы (7), (8) осуществлялась итерационная процедура уточнения параметров: найденные величины  $b_1$  и  $b_2$  были зафиксированы, а параметры  $\sigma_0, \sigma_1$  и  $\sigma_2$  варьировались до достижения минимума функционала среднеквадратического отклонения расчетных и экспериментальных данных для  $\sigma_\theta(r)$ . В результате получены следующие значения параметров аппроксимации (6):  $h_1^* = 0,005$  мм,  $h_2^* = 0,055$  мм,  $\sigma_0 = -25,33$  МПа,  $\sigma_1 = -456,2$  МПа,  $\sigma_2 = 312,2$  МПа,  $b_1 = 0,042$  мм и  $b_2 = 0,051$  мм. Расчетные значения для зависимости (6) приведены на рис. 4 сплошными линиями.

После построения аппроксимации для  $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$  остальные компоненты тензора остаточных напряжений и необратимых деформаций рассчитываются по алгоритму (5), в котором фигурирует параметр  $\alpha$ . Однако значение величины  $\alpha$  может быть получено лишь в результате апостериорного анализа задачи (в частном случае при  $\alpha = 1$  схема (5) сразу дает решение задачи, при этом зависимости  $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$  и  $\sigma_z = \sigma_z(r)$  практически совпадают [34, 35]), но для этого необходимо знать экспериментальную зависимость для  $\sigma_z = \sigma_z(r)$

в приповерхностном слое. Тогда при заданной зависимости (6) для  $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$  варьируется величина  $\alpha$ , при каждом ее значении реализуется схема (5) и рассчитывается теоретическая зависимость для  $\sigma_z = \sigma_z(r)$ . Расчет заканчивается при достижении функционалом среднеквадратического отклонения между теоретическими и экспериментальными значениями осевых остаточных напряжений минимума. Реализация данного подхода применительно к экспериментальным данным, представленным на рис. 4, позволила вычислить значение величины  $\alpha = 0,1$ . В расчетах было принято  $E = 1,98 \cdot 10^5$  МПа;  $\nu = 0,285$ . На рис. 4 штриховой линией приведена рассчитанная зависимость  $\sigma_z = \sigma_z(r)$ , соответствующая этому значению параметра. В целом наблюдается соответствие расчетных и экспериментальных данных для осевой и окружной компонент остаточных напряжений.

## 2. Реконструкция полей остаточных напряжений и пластических деформаций в тонкостенных трубках из стали X18H10T после ультразвукового упрочнения внешней и внутренней поверхности

Как следует из приведенных экспериментальных и теоретических исследований остаточных напряжений в трубках из стали X18H10T в состоянии поставки, они имеют достаточно большие значения, причем на внешней поверхности они имеют положительный знак, а это отрицательно влияет на многие показатели надежности. Поэтому нужны дополнительные технологические операции по устранению наблюдаемых остаточных напряжений. Одним из подходов является поверхностное пластическое деформирование образцов в состоянии поставки.

Поэтому дальнейшей целью работы являются анализ экспериментальных исследований и разработка на их основе феноменологического метода реконструкции полей остаточных напряжений и пластических деформаций при двухстороннем упрочнении виброударной обработкой внешней и внутренней поверхности тонкостенных трубок  $\varnothing 12 \times 1$  мм из стали X18H10T той же партии, что рассматривались в первом разделе данной статьи. Виброударная обработка дробью – это широко используемый технологический способ упрочнения тонкостенных деталей [6–12]. Отметим, что если рассматривать затронутую научную проблему применительно к цилиндрическим изделиям, то в подавляющем числе работ анализу и теоретической интерпретации подвергаются результаты одностороннего упрочнения внешней поверхности полых цилиндрических образцов, например [34–36].

Виброударная обработка дробью трубопровода проводилась на специальном вибростенде, принципиальная схема которого представлена на рис. 5. К столу

вибростенда 3 крепился цилиндрический контейнер 2, заполненный шариками диаметром 3 мм. Упрочняемая трубка из стали X18H10T (1) заполнялась на 50 % шариками диаметром 1 мм и помещалась внутрь контейнера. Оси трубки и контейнера совпадали. Пространство между трубкой и контейнером на 80 % было заполнено шариками. Внутрь трубки устанавливались пробки (4), ограничивающие упрочненную зону. Для обеспечения равномерного упрочнения трубка в контейнере вращалась. Длина контейнера и упрочняемой трубки выбиралась так, чтобы собственная частота участка была значительно выше частоты стенда. Частота колебаний стенда – 18,5 кГц, время упрочнения – 20 мин.

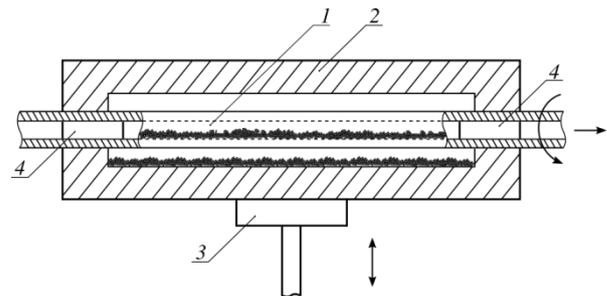


Рис. 5. Схема испытаний на вибростенде: 1 – упрочняемая трубка; 2 – контейнер; 3 – стол вибростенда; 4 – пробки

Fig. 5. The scheme of testing at the vibrating stand: 1 – is the hardenable tube; 2 – is the container; 3 – is the table of vibrating stand; 4 – are the plugs

Экспериментальное определение остаточных напряжений  $\sigma_\theta$  и  $\sigma_z$  после упрочнения выполнено методом колец и полосок – его технология и математическое обеспечение для его реализации подробно описаны в разделе 1 настоящей статьи. Расчетно-экспериментальные значения для окружной и осевой компонент тензора остаточных напряжений в областях, прилегающих к внутренней и внешней поверхностям трубок, полученные на основе (1)–(4), приведены маркерами на рис. 6.

Анализ полученных экспериментальных результатов, представленных на рис. 6, позволяет сделать вывод, что упрочнение виброударной обработкой дробью обеспечивает возможность создать у внутренней и внешней поверхности «благоприятные» сжимающие остаточные напряжения значительной величины и нивелировать тем самым отрицательные последствия механической отделочной обработки поверхности трубки.

Феноменологическая модель реконструкции напряженно-деформированного состояния после поверхностного пластического упрочнения повторяет изложенную в разделе 1 схему, базирующуюся на алгоритме (5) и аппроксимации (6) для окружной компоненты тензора остаточных напряжений, с сохранением методики идентификации параметров. В результате получены следующие значения параметров зависимости (6):  $h_1^* = 0,05$  мм,  $h_2^* = -0,04$  мм,  $\sigma_0 = 88,4$  МПа,  $\sigma_1 = 981,6$  МПа,  $\sigma_2 = 283,2$  МПа,  $b_1 = 0,105$  мм и  $b_2 = 0,087$  мм.

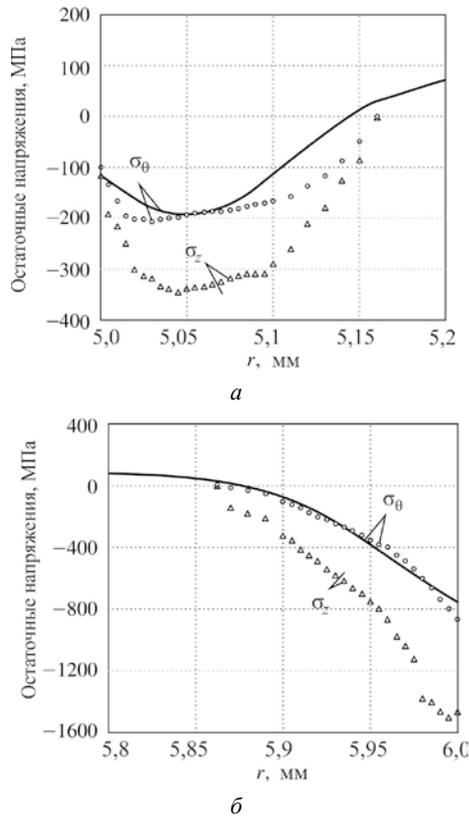


Рис. 6. Экспериментальные (маркеры) и расчетные зависимости  $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$  (сплошные линии) и  $\sigma_z = \sigma_z(r)$  (штриховые линии) в областях, прилегающих к внутренней (а) и внешней (б) поверхностям трубки

Fig. 6. Experimental (markers) and calculated dependences  $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$  (solid lines) and  $\sigma_z = \sigma_z(r)$  (dashed lines) in the areas which are adjoined to the inner (a) and outer (b) surface of the tube

Применение описанной в разделе 1 итерационной процедуры реализации алгоритма (5) до достижения минимума функционалом среднеквадратического отклонения расчетных и экспериментальных данных для  $\sigma_z = \sigma_z(r)$  позволило определить параметр анизотропии  $\alpha = 4,2$ . Расчетные зависимости для остаточных напряжений  $\sigma_\theta(r)$  и  $\sigma_z(r)$  в приповерхностных внутреннем и внешнем слоях трубки приведены на рис. 6 сплошными и штриховыми линиями соответственно. В целом наблюдается соответствие расчетных и экспериментальных данных. Отметим, что полученное значение  $\alpha = 4,2$  свидетельствует о существенной анизотропии распределения остаточных пластических деформаций  $q_\theta$  и  $q_z$  вдоль осей  $\theta$  и  $z$ , а это, в свою очередь, является причиной значительного отличия эпюр остаточных напряжений  $\sigma_\theta$  и  $\sigma_z$ . В качестве примера на рис. 7 приведена расчетная зависимость для радиальной компоненты тензора напряжений  $\sigma_r = \sigma_r(r)$ , значения которой по модулю на три порядка меньше значений компонент для  $|\sigma_\theta|$  и  $|\sigma_z|$  в зонах упрочнения материала с внешней и внутренней поверхности трубок. На рис. 8 представлено распределение осе-

вой остаточной пластической деформации  $q_z = q_z(r)$  по толщине трубки ( $r \in [5; 6]$  мм).

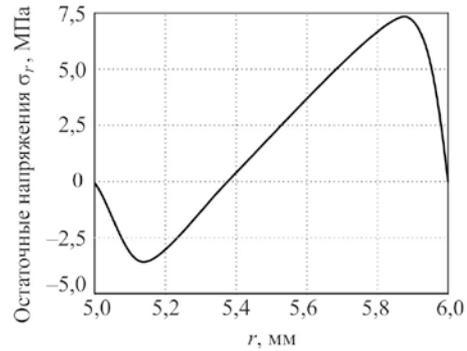


Рис. 7. Расчетная зависимость для  $\sigma_r = \sigma_r(r)$

Fig. 7. The calculated dependence for  $\sigma_r = \sigma_r(r)$

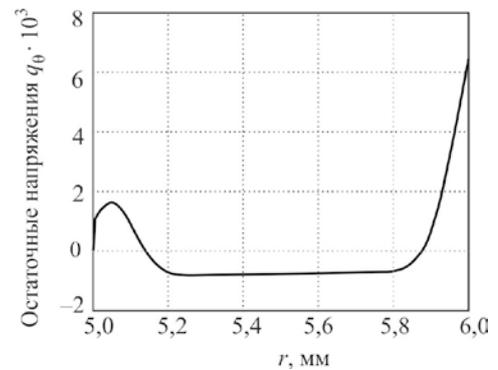


Рис. 8. Расчетная зависимость для  $q_0 = q_0(r)$

Fig. 8. The calculated

Таким образом, и в случае поверхностного пластического деформирования одним значением параметра анизотропии  $\alpha$  описано напряженно-деформированное состояние во внешнем и внутреннем упрочненных слоях тонкостенных трубок. Это является убедительным подтверждением принятой гипотезы  $q_z(r) = \alpha q_\theta(r)$  при построении феноменологической модели реконструкции полей остаточных напряжений и деформации в приповерхностных внешнем и внутреннем слоях как при технологических отделочных операциях поверхности трубок, так и после ППД.

### Заключение

Разработан феноменологический метод реконструкции остаточных напряжений и деформаций после отделочных операций (состояние поставки) и после ППД внешней и внутренней поверхностей тонкостенных трубок. Выполнена экспериментальная проверка метода в обоих случаях на тонкостенных трубках из стали X18H10T. Наблюдается соответствие расчетных (по феноменологической модели) и экспериментальных данных для окружной и осевой компонент тензора остаточных напряжений.

В результате выполненных экспериментальных и теоретических исследований установлено, что в состоянии поставки в области, прилегающей к внутренней поверхности, наблюдаются сжимающие остаточные напряжения, а в слое на внешней поверхности – растягивающие напряжения. После виброударного упрочнения шариками в обеих областях наблюдаются только сжимающие напряжения, по модулю существенно превосходящие аналогичные напряжения для образцов в состоянии поставки.

## Библиографический список

1. Орлов П.И. Основы конструирования. Справочно-методическое пособие. Книга 1 / под ред. П.Н. Учайева. – М.: Машиностроение, 1988. – 623 с.
2. Старцев Н.И. Трубопроводы газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1976. – 271 с.
3. Сапожников В.М. Монтаж и испытания гидравлических и пневматических систем на летательных аппаратах. – М.: Машиностроение, 1972. – 271 с.
4. Dounde A.A., Seemikeri C.Y., Tanpure P.R. Study of shot peening process and their effect on surface properties: A Review // *International Journal of Engineering, Business and Enterprise Applications (IJEBA)*. – 2015. – Vol. 2, no. 12. – P. 104–107.
5. Кузнецов Н.Д., Цейтлин В.И., Волков В.И. Технологические методы повышения надежности деталей машин. – М.: Машиностроение, 1993. – 304 с.
6. Simulation of shot dynamics for ultrasonic shot peening: Effects of process parameters / J. Badreddine, E. Rouhaud, M. Micoulaut, S. Remy // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2014. – Vol. 82. – P. 179–190. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2014.03.006
7. Liu Yu, Wang L., Wang D. Finite element modeling of ultrasonic surface rolling process // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2011. – Vol. 211, no. 12. – P. 2106–2113. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.07.009
8. Марков А.И. Ультразвуковая обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 237 с.
9. Ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование / В.Ф. Казанцев, Б.А. Кудряшов, Р.И. Нигметзянов, В.М. Приходько, Д.С. Фатюхин // *Вестн. Харьк. нац. автотодорож. ун-та*. – 2009. – № 46. – С. 7–9.
10. Гребенников М.А., Заличишие С.Д., Стебельков И.А. Физика и технология упрочнения деталей в поле ультразвука // *Вестник двигателестроения*. – 2013. – № 1. – С. 72–74.
11. Александров М.К., Папшева Н.Д., Акушская О.Н. Ультразвуковое упрочнение деталей ГТД // *Вестник Самар. гос. аэрокосм. ун-та*. – 2011. – № 3(27). – С. 271–276.
12. 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/pern.mech/2016.1.07
13. Analytical modeling for residual stresses produced by shot peening / A.S. Franchim, V.S. de Campos, D.N. Travessa, C. de Moura Neto // *Materials and Design*. – 2009. – Vol. 30, no. 5. – P. 1556–1560. DOI: 10.1016/j.matdes.2008.07.040

## Благодарности

Работа выполнена в поддержке Российского научного фонда (РНФ 19–19–00062, Самарский государственный технический университет).

## Acknowledgements

The work was supported by the Russian Science Foundation (RSF 19–19–00062, Samara State Technical University).

14. Sherafatnia K., Farrahi G.H., Mahmoudi A.H., Ghasemi A. Experimental measurement and analytical determination of shot peening residual stresses considering friction and real unloading behavior // *Materials Science and Engineering: A*. – 2016. – Vol. 657, no. 7. – P. 309–321. DOI: 10.1016/j.msea.2016.01.070
15. Davis J., Ramulu M. A study of the residual stress induced by shot peening for an isotropic material based on Prager's yield criterion for combined stresses // *Meccanica*. – 2015. – Vol. 50, no. 6. – P. 1593–1604. DOI: 10.1007/s11012-015-0109-0
16. Серебряков В.И. Формирование остаточных напряжений при единичном ударе // *Проблемы повышения качества, надежности и долговечности деталей машин и инструментов*. – Брянск: Брян. ин-т транспортного машиностроения, 1992. – С. 68–72.
17. Плихунов В.В. Численное моделирование осесимметричной задачи одиночного удара дробинки с учетом физико-механических свойств поведения металлов // *Авиационная промышленность*. – 2008. – №4. – С. 24–28.
18. Simulation of shot peening: From process parameters to residual stress fields in a structure / D. Gallitelli, V. Boyer, M. Gelineau, Y. Colaitis, E. Rouhaud, D. Retraint, R. Kubler, M. Desvignes, L. Barrallier // *Comptes Rendus Mechanique*. – 2016. – Vol. 344, no. 4–5. – P. 355–374. DOI: 10.1016/j.crme.2016.02.006
19. Zimmermann M., Klemenz M., Schulze V. Literature review on shot peening simulation // *International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering*. – 2010. – Vol. 3, no. 4. – P. 289–310. DOI: 10.1504/ijcmss.2010.036218
20. Simulation of shot peening process / R. Purohit, C.S. Verma, R.S. Rana [et al.] // *Material Today: Proceedings*. – 2017. – Vol. 4, no. 2. Part A. – P. 1244–1251. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.01.144
21. Numerical analysis and experimental validation on residual stress distribution of titanium matrix composite after shot peening treatment / L. Xie, Ch. Wang, L. Wang [et al.] // *Mech. Mat.* – 2016. – Vol. 99. – P. 2–8. DOI: 10.1016/j.mechmat.2016.05.005
22. Robust methodology to simulate real shot peening process using discrete-continuum coupling method / M. Jebahi, A. Gakwaya, J. Lévesque [et al.] // *Int. J. Mech. Sci.* – 2016. – Vol. 107. – P. 21–33. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2016.01.005
23. Бойцов В.Б., Скрипкин Д.Э., Чернявский А.О. Расчетный анализ образования остаточных напряжений при виброупрочнении // *Динамика, прочность и износостойкость машин*. – Челябинск: ИПМ АН СССР, 1985. – № 5. – С. 69–72.
24. Копылов Ю.П. Математическое моделирование процесса виброударного упрочнения деталей сложной формы // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2005. – № 11. – С. 3–8.

25. Лебедев В.А., Чумак И.В. Кинетическая модель упрочнения поверхностного слоя деталей виброударными методами ППД // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – № 7. – С. 3–8.

26. Макаров В.Ф. Оценка напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя детали при ультразвуковой упрочняющей финишной обработке деталей ГТД // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – № 5. – С. 49–52.

27. Матлин М.М., Мосейко В.О., Мосейко В.В. Механика силового контактного взаимодействия дробы с поверхностью упрочняемой детали // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – № 10. – С. 45–52.

28. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.

29. Павлов В.Ф., Кирпичев В.А., Вакулюк В.С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочненных деталей по остаточным напряжениям / Самар. науч. центр РАН. – Самара, 2012. – 125 с.

30. Определение первоначальных деформаций в упрочненном слое цилиндрической детали методом конечно-элементного моделирования с использованием расчетного комплекса PATRAN/NASTRAN / В.П. Сазанов, В.А. Кирпичев, В.С. Вакулюк, В.Ф. Павлов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2015. – Т. 19, № 2. – С. 35–40.

31. Математическое моделирование первоначальных деформаций в поверхностно упрочненных деталях при выборе образца-свидетеля / В.П. Сазанов, О.Ю. Семенова, В.А. Кирпичев, В.С. Вакулюк // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2016. – Т. 20, № 3. – С. 31–37.

32. К вопросу о реконструкции остаточных напряжений и деформаций пластины после дробеструйной обработки / И.В. Виндокуров, А.В. Владыкин, И.Э. Келлер, Д.С. Петухов, В.В. Плюснин, В.Н. Трофимов // Вестн. Самар. гос. техн.

ун-та. Серия: Физ.-мат. науки. – 2018. – Т. 22, № 3. – С. 40–64. DOI: 10.14498/vsgtu1602

33. Радченко В.П., Саушкин М.Н. Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочненных конструкциях. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 226 с.

34. 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

35. Радченко В.П., Павлов В.Ф., Саушкин М.Н. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния в поверхностно упрочненных втулках с учетом остаточных касательных напряжений // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – № 1. – С. 138–150. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.12

36. Радченко В.П., Саушкин М.Н. Феноменологический метод расчета остаточных напряжений и пластических деформаций в полой поверхностно упрочненной цилиндрической образце // Прикладная математика и механика. – 2013. – Т. 77. – № 1. – С. 143–152.

37. Радченко В.П., Афанасьева О.С., Глебов В.Е. Исследование влияния остаточных напряжений на геометрические параметры поверхностно упрочненного бруса // Изв. Сарат. ун-та. нов. серия: Математика. Механика. Информатика. – 2019. – Т. 19, вып. 4. – С. 464–478. DOI: 10.18500/1816-9791-2019-19-4-464-478

38. Иванов С.И. Определение остаточных напряжений в поверхностном слое цилиндра // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций: сб. науч. тр. – Куйбышев: Изд-во КуАИ, 1971. – Вып. 48. – С. 153–168.

39. Иванов С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок // Остаточные напряжения: сб. науч. тр. – Куйбышев: Изд-во КуАИ, 1971. – Вып. 53. – С. 32–42.

## References

1. Orlov P.I. Osnovy konstruirovaniya. Spravochno-metodicheskoe posobie. Kniga 1. Pod redakciej P.N. Uchaeva [Design Basics. Reference manual. Book 1. Edited by P.N. Uchaeva]. Moscow, Mashinostroenie, 1988, 623 p.

2. Starcev N.I. Truboprovody gazoturbinyh dvigatelej [Pipelines of gas turbine engines]. Moscow, Mashinostroenie, 1976, 271 p.

3. Sapozhnikov V.M. Montazh i ispytaniya gidravlicheskih i pnevmaticheskikh sistem na letatel'nyh apparatah [Installation and testing of hydraulic and pneumatic systems on aircraft]. Moscow, Mashinostroenie, 1972, 271 p.

4. Dounde A.A., Seemikeri C.Y., Tanpure P.R. Study of shot peening process and their effect on surface properties: A Review. *International Journal of Engineering, Business and Enterprise Applications (IJEBA)*, 2015, vol. 2, no. 12, pp. 104–107.

5. Kuznecov N.D., Cejtin V.I., Volkov V.I. Tehnologicheskie metody povysheniya nadezhnosti detalej mashin [Technological methods to improve the reliability of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie, 1993, 304 p.

6. Badreddine J., Rouhaud E., Micoulaut M., Remy S. Simulation of shot dynamics for ultrasonic shot peening: Effects of process parameters. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2014, vol. 82, pp. 179–190. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2014.03.006

7. Liu Yu, Wang L., Wang D. Finite element modeling of ultrasonic surface rolling process. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, vol. 211, no. 12, pp. 2106–2113. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.07.009

8. Markov A.I. Ul'trazvukovaja obrabotka materialov [Ultrasonic processing of materials]. Moscow, Mashinostroenie, 1989, 237 p.

9. Ul'trazvukovoe poverhnostnoe plasticheskoe deformirovanie [Ultrasonic surface plastic deformation] / V.F. Kazancev, B.A. Kudrjashov, R.I. Nigmatzjanov, V.M. Prihod'ko, D.S. Fatjuhina. *Vestn. Har'k. nac. avtodorozh. un-ta*, 2009, no. 46, pp. 7–9.

10. Grebennikov M.A., Zalichihie S.D., Stebel'kov I.A. Fizika i tehnologija uprochneniya detalej v pole ul'trazvuka [Physics and technology of hardening of parts in the field of ultrasound]. *Vestn. dvigatelestroeniya*, 2013, no. 1, pp. 72–74.

11. Aleksandrov M.K., Papsheva N.D., Akushskaja O.N. Ul'trazvukovoe uprochnenie detalej GTD [Ultrasonic hardening of gas turbine engine parts]. *Vestn. Samar. gos. ajerokosm. un-ta*, 2011, no. 3(27), pp. 271–276.

12. 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 hightemperature creep conditions. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2016, no. 1, pp. 93–112. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.1.07

13. Franchim A.S., de Campos V.S., Travessa D.N., de Moura Neto C. Analytical modeling for residual stresses produced by shot peening. *Materials and Design*, 2009, vol. 30, no. 5, pp. 1556–1560. DOI: 10.1016/j.matdes.2008.07.040

14. Sherafatnia K., Farrahi G.H., Mahmoudi A.H., Ghasemi A. Experimental measurement and analytical determination of shot

peening residual stresses considering friction and real unloading behavior. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, vol. 657, no. 7, pp. 309-321. DOI: 10.1016/j.msea.2016.01.070

15. Davis J., Ramulu M. A study of the residual stress induced by shot peening for an isotropic material based on Prager's yield criterion for combined stresses. *Meccanica*, 2015, vol. 50, no. 6, pp. 1593-1604. DOI: 10.1007/s11012-015-0109-0

16. Serebrjakov V.I. Formirovanie ostatochnyh naprjazhenij pri edinichnom udare [The formation of residual stresses in a single impact]. *Problemy povyshenija kachestva, nadezhnosti i dolgovechnosti detalej mashin i instrumentov. Brjansk: Brjanskij institut transportnogo mashinostroenija*. 1992, pp. 68–72.

17. Plihunov V.V. Chislennoe modelirovanie osesimmetrichnoj zadachi odinochnogo udara drobinki s uchetom fiziko-mehaničeskikh svojstv povedenija metallov [Numerical modeling of the axisymmetric problem of a single impact of a pellet taking into account the physicomaterial properties of the behavior of metals]. *Aviacionnaja promyshlennost'*, 2008, no. 4, pp. 24-28.

18. Gallitelli D., Boyer V., Gelineau M., Colaitis Y., Rouhaud E., Retraint D., Kubler R., Desvignes M., Barrallier L. Simulation of shot peening: From process parameters to residual stress fields in a structure. *Comptes Rendus Mécanique*, 2016, vol. 344, no. 4-5, pp. 355-374. DOI: 10.1016/j.crme.2016.02.006

19. Zimmermann M., Klemenz M., Schulze V. Literature review on shot peening simulation. *International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering*, 2010, vol. 3, no. 4, pp. 289-310. DOI: 10.1504/ijcmss.2010.036218

20. Purohit R., Verma C.S., Rana R.S., etc. Simulation of shot peening process. *Material Today: Proceedings*, 2017, vol. 4, no. 2, Part A, pp. 1244–1251. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.01.144

21. Xie L., Wang Ch., Wang L., etc. Numerical analysis and experimental validation on residual stress distribution of titanium matrix composite after shot peening treatment. *Mech. Mat.*, 2016, vol. 99, pp. 2–8. DOI: 10.1016/j.mechmat.2016.05.005

22. Jebahi M., Gakwaya A., Lévesque J., etc. Robust methodology to simulate real shot peening process using discrete-continuum coupling method. *Int. J. Mech. Sci.*, 2016, vol. 107, pp. 21–33. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2016.01.005

23. Bojcov V.B., Skripkin D.Je., Chernjavskij A.O. Raschetnyj analiz obrazovaniya ostatochnyh naprjazhenij pri vibrouprochnenii [Calculation analysis of the formation of residual stresses during vibration hardening]. *Dinamika, prochnost' i iznosostojkost' mashin. Cheljabinsk: IPM ANSSSR*, № 5, 1985, s. 69-72.

24. Kopylov Ju.R. Matematicheskoe modelirovanie processa vibroudarnogo uprochnenija detalej slozhnoj formy [Mathematical modeling of the process of vibration-hardening of parts of complex shape]. *Uprochnjajushhie tehnologii i pokrytija*, 2005, no. 11, pp. 3-8.

25. Lebedev V.A., Chumak I.V. Kineticheskaja model' uprochnenija poverhnostnogo sloja detalej vibroudarnymi metodami PPD [Kinetic model of hardening of the surface layer of parts by vibro-impact PPD methods]. *Uprochnjajushhie tehnologii i pokrytija*, 2008, № 7, pp. 3-8.

26. Makarov V.F. Ocenka naprjazhenno-deformirovannogo sostojaniya poverhnostnogo sloja detali pri ul'trazvukovoj uprochnjajushhej finishnoj obrabotke detalej GTD [Assessment of the stress-strain state of the surface layer of a part during ultrasonic hardening finishing processing of GTE parts]. *Uprochnjajushhie tehnologii i pokrytija*, 2008, no. 5, pp. 49-52.

27. Matlin M.M., Mosejko V.O., Mosejko V.V. Mehanika silovogo kontaktного vzaimodejstviya drobi s poverhnost'ju uprochnjaemoj detali [The mechanics of the force contact interaction of a fraction with the surface of a hardened part]. *Uprochnjajushhie tehnologii i pokrytija*, 2006, no. 10, pp. 45-52.

28. Birger I.A. Ostatochnye naprjazhenija [Residual stresses]. *Moscow, Mashgiz*, 1963, 232 p.

29. Pavlov V.F., Kirpichev V.A., Vakuljuk V.S. Prognozirovaniye soprotivlenija ustalosti poverhnostno uprochnennyh detalej po ostatochnym naprjazhenijam [Prediction of fatigue resistance of surface hardened parts by residual stresses]. *Samar. nauch. centr RAN, Samara*, 2012, 125 p.

30. Sazanov V.P., Kirpichev V.A., Vakuljuk V.S., Pavlov V.F. Opredelenie pervonachal'nyh deformacij v uprochnennom sloe cilindricheskoj detali metodom konečno-jelementnogo modelirovaniya s ispol'zovaniem raschetnogo kompleksa PATRAN/NASTRAN [Determination of initial deformations in the hardened layer of a cylindrical part by finite element modeling using the PATRAN / NASTRAN calculation complex]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo tehničeskogo universiteta*, 2015, vol. 19, no 2, pp. 35–40.

31. Sazanov V.P., Semenova O.Ju., Kirpichev V.A., Vakuljuk V.S. Matematicheskoe modelirovanie pervonachal'nyh deformacij v poverhnostno uprochnennyh detaljah pri vybore obrazca-svidetelja [Mathematical modeling of initial deformations in surface hardened parts when choosing a test specimen]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo tehničeskogo universiteta*, 2016, vol. 20, no. 3, pp. 31-37.

32. Vindokurov I.V., Vladykin A.V., Keller I.Je., Petuhov D.S., Pljusnin V.V., Trofimov V.N. K voprosu o rekonstrukcii ostatochnyh naprjazhenij i deformacij plastiny posle drobestrujnoj obrabotki [On the issue of reconstruction of residual stresses and deformations of a plate after shot peening]. *Vestn. Samar. gos. tehn. un-ta. Ser. Fiz.-mat. nauki = J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. Math. Sci.*, 2018, vol. 22, no. 3, pp. 40-64. DOI: 10.14498/vsgtu1602

33. Radchenko V.P., Saushkin M.N. Polzuchest' i relaksacija ostatochnyh naprjazhenij v uprochnennyh konstrukcijah [Creep and relaxation of residual stresses in hardened structures]. *Moscow, Mashinostroenie-1*, 2005, 226 p.

34. Radchenko V.P., Pavlov V.Ph., Saushkin M.N. 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

35. Radchenko V.P., Pavlov V.Ph., Saushkin M.N. Mathematical modeling of the stress-strain state in surface hardened thin-walled tubes with regard to the residual shear stresses. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2019, no. 1, pp. 138-150. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.12

36. Radchenko V.P., Saushkin M.N. Fenomenologičeskij metod rasčeta ostatochnyh naprjazhenij i plasticheskikh deformacij v polom poverhnostno uprochnennom cilindricheskom obrazce [Phenomenological method for calculating residual stresses and plastic deformations in a hollow surface hardened cylindrical specimen]. *Prikladnaja matematika i mehanika*, 2013, vol. 77, no. 1, pp. 143-152.

37. Radchenko V.P., Afanas'eva O.S., Glebov V.E. Issledovanie vlijaniya ostatochnyh naprjazhenij na geometričeskie parametry poverhnostno uprochnenno bруса [Investigation of the effect of residual stresses on the geometric parameters of a surface hardened beam]. *Izv. Sarat. Un-ta. nov. Ser. Matematika. Mehanika. Informatika*, 2019, vol. 19, iss. 4, S. 464-478. DOI: 10.18500/1816-9791-2019-19-4-464-478

38. Ivanov S.I. Opredelenie ostatochnyh naprjazhenij v poverhnostnom sloe cilindra [Determination of residual stresses in the surface layer of the cylinder]. *Voprosy prochnosti jelementov aviacionnyh konstrukcij: sb. nauch. tr. Kujbyshev: Izd-vo KuAI*, 1971, iss. 48, pp. 153-168.

39. Ivanov S.I. K opredeleniju ostatochnyh naprjazhenij v cilindre metodom kolec i polosok [To the determination of residual stresses in the cylinder by the method of rings and strips]. *Ostatochnye naprjazhenija: sb. nauch. tr. Kujbyshev: Izd-vo KuAI*, 1971, iss. 53, pp. 32–42.