



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 1, 2019

PNRPU MECHANICS BULLETIN

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



DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.06

УДК 539.3 + 620.17

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ В УСЛОВИЯХ СОВМЕСТНОГО РАСТЯЖЕНИЯ И КРУЧЕНИЯ ПРИ НЕПРОПОРЦИОНАЛЬНОМ НАГРУЖЕНИИ

А.А. Крюков

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 10 февраля 2019 г.

Принята: 29 марта 2019 г.

Опубликована: 30 марта 2019 г.

Ключевые слова:

растяжение, кручение, совместное растяжение и кручение, двухосное деформирование, пластичность, остаточные напряжения, сложное напряженное состояние, сложное нагружение, диаграммы деформирования, эксперимент, прочность цилиндрических тел.

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена изучению поведения цилиндрических тел из конструкционных сталей в условиях совместного растяжения и кручения при сложном нагружении. Исследование направлено на изучение и последующую модернизацию методики повышения усталостной долговечности цилиндрических изделий. Она заключается в создании в приповерхностной области изделия благоприятных осевых сжимающих остаточных напряжений за счет последовательного упругопластического деформирования сначала растяжением, а затем, при фиксации полученной при растяжении продольной деформации, кручением. Построена математическая модель упругопластического деформирования совместным растяжением и кручением однородного цилиндрического тела, которая позволяет рассчитать распределение созданных в теле остаточных напряжений. Для проверки адекватности получаемого решения и определения необходимых материальных параметров модели проведены испытания на цилиндрических образцах из стали 15Х2ГМФ. Необходимые исследования выполнены в Центре экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета на универсальной двухосевой сервогидравлической испытательной системе Instron 8850, позволяющей проводить нагружение совместным растяжением и кручением. По результатам проведенных экспериментов получены графики зависимости продольной силы и крутящего момента от угла закручивания при исследуемых последовательностях деформирования. Путем сравнения экспериментальных и расчетных зависимостей подтверждена адекватность разработанной модели и установлена область режимов деформирования, в которой она с допустимой для практики точностью отражает поведение материала. Взамен существующей методики деформирования, включающей однократное кручение изделия, находящегося в состоянии растяжения, рассмотрена новая методика, заключающаяся в реверсивном (знакопеременном) кручении цилиндрического тела, находящегося в состоянии растяжения. Деформирование последовательным растяжением и реверсивным кручением позволяет обеспечить благоприятное (с позиции повышения усталостной долговечности) распределение остаточных осевых напряжений по поперечному сечению тела при минимальных значениях остаточных касательных напряжений.

© ПНИПУ

© Крюков Алексей Андреевич – к.т.н., доц., e-mail: andreevich-alex@mail.ru, iD: [0000-0003-3609-9092](https://orcid.org/0000-0003-3609-9092).

Aleksei A. Kryukov – CSc in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: andreevich-alex@mail.ru,

iD: [0000-0003-3609-9092](https://orcid.org/0000-0003-3609-9092).



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)

INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF CYLINDRICAL BODIES UNDER CONDITIONS OF JOINT TENSION AND TORSION UNDER DISPROPORTIONATE LOADING

A.A. Kryukov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 10 February 2019

Accepted: 29 March 2019

Published: 30 March 2019

Keywords:

tension, torsion, joint tension and torsion, biaxial deformation, plasticity, residual stresses, complex stress state, complex loading, deformation diagrams, experiment, strength of cylindrical bodies.

ABSTRACT

The work is devoted to studying the behavior of cylindrical bodies of structural steels in the conditions of joint tension and torsion under complex loading. The study is aimed at studying and subsequent modernization of the method of increasing the fatigue life of cylindrical products. It consists in creating the product favorable axial compressive residual stresses in the near-surface area due to the successive elastoplastic deformation, first by tension, and then, during fixation of the longitudinal deformation obtained by tension, by torsion. A mathematical model of elastoplastic deformation by joint tension and torsion of a homogeneous cylindrical body, which allows to calculate the distribution of residual stresses created in the body, is constructed. To check the adequacy of the obtained solution and determine the required material parameters of the model, tests were performed on cylindrical samples of steel 15Cr2MnMoV. The necessary studies were carried out at the Center for Experimental Mechanics of Perm National Research Polytechnic University using the Instron 8850 universal two-axis servo-hydraulic test system, which allows for loading by joint tension and torsion. According to the results of the experiments, graphs of the longitudinal force and torque versus the twist angle were obtained with the deformation sequences studied. By comparing the experimental and calculated dependencies, the adequacy of the developed model was confirmed and the range of deformation modes was established, in which it reflects the behavior of the material with an accuracy acceptable for practice. Instead of the existing method of deformation, which includes a single torsion of a product in a state of tension, a new method is considered, consisting in reversional (alternating) torsion of a cylindrical body in a state of tension. Deformation by sequential tension and reversional torsion allows to provide a favorable (from the standpoint of increasing fatigue life) distribution of residual axial stresses over the cross section of the body with minimum values of residual shear stresses.

© PNRPU

Введение

Основная часть изделий машиностроения длительное время работает при нестационарном, как правило циклическом характере нагружения, при этом усталостное разрушение является одной из наиболее распространенных причин выхода из строя ответственных деталей и изделий. Это определяет важность исследований в области усталостной прочности конструкционных материалов. К фундаментальным работам в данном направлении относятся [1–4].

Усталостное разрушение, как правило, начинается с поверхности [1–3], поэтому для повышения несущей способности изделия, работающего в условиях циклического нагружения, в первую очередь необходимо повысить сопротивление усталости приповерхностной области. Одним из наиболее эффективных механизмов упрочнения этой области является создание в ней осевых сжимающих остаточных напряжений [5–11]. Под упрочнением в данном случае понимается комплекс мер, направленных на повышение усталостной долговечности. К широко известным методам упрочнения относятся методы поверхностного пластического деформирования (дробеструйный наклеп, обкатка шариками, обкатка роликами и др.) [12, 13].

Автором представленной статьи исследуется методика, направленная на повышение усталостной долговечности цилиндрических изделий [14, 15] и отличающаяся от отмеченных выше способов. Суть методики в создании в приповерхностной области изделия осевых сжимающих остаточных напряжений за счет последовательного упругопластического деформирования сначала растяжением, а затем, при фиксации полученной при растяжении продольной деформации, кручением. В настоящее время способ используется для восстановления работоспособности бывших в эксплуатации, но еще не исчерпавших свой ресурс штанг нефтедобывающих насосов [16, 17]. При этом существующие режимы деформирования включают однократное кручение (кручение в одну сторону) предварительно растянутого изделия с зафиксированной продольной деформацией и последующую полную разгрузку. Автором исследуется вариант применения модернизированной методики, включающей реверсивное кручение (кручение со сменами направления закручивания) предварительно растянутого цилиндрического тела с зафиксированной продольной деформацией. Это, в свою очередь, требует проведения как теоретических, так и экспериментальных исследований поведения цилиндрических тел в условиях совместного растяжения и кручения при непропорциональном нагружении.

Изучению поведения материалов в условиях совместного растяжения и кручения посвящено достаточно много исследований. В работах [18, 19] проведено теоретическое исследование квазистатического растяжения с кручением цилиндрического полого изделия как при устойчивом состоянии, когда материал находится на стадии деформационного упрочнения, так и на стадии закритического деформирования. Рассматриваются пограничные состояния, в которых возможна потеря устойчивости процесса. Исследование поведения материалов в условиях растяжения, а также совместного растяжения и кручения на стадии закритического деформирования рассматривается также в [20–23]. В работах [24–27] приводятся данные экспериментального и численного исследования процессов упругопластического деформирования, потери устойчивости и закритического поведения цилиндрических стальных образцов, в том числе образцов переменной толщины, при монотонном кинематическом нагружении кручением, растяжением и комбинированным нагружением. Рассматривается область больших деформаций, оценивается взаимное влияние кручения и растяжения на процессы деформирования и предельные состояния. В работе [28] рассматривается кручение стержня круглого сечения и трубы в области больших пластических деформаций, дается объяснение эффекта появления осевых остаточных деформаций при кручении стержня и трубы (эффекта Пойнтинга).

Закономерности поведения материалов при совместном растяжении и кручении рассматриваются также в ряде исследований зарубежных авторов. В большинстве из них приводятся экспериментальные данные, но направленность этих работ несколько иная. Например, в [29] различные комбинации осевого и крутящего нагружения являются видом испытания на многоцикловую усталость. В работе [30] исследуется влияние перешедшего в пластическое состояние поверхностного слоя на напряжения в сплошном цилиндре при малоцикловом нагружении растяжением и кручением. Различные комбинации растяжения, кручения и внутреннего давления при мягком, жестком и смешанном малоцикловом нагружении рассматриваются в [31–39]. В основном в них исследуется область больших пластических деформаций.

В итоге в отмеченных выше работах деформирование совместным растяжением и кручением не рассматривается с позиции создания в изделии благоприятного поля остаточных напряжений, позволяющего повысить характеристики усталости. Поэтому если и приводятся экспериментальные данные, то реализуемые в них траектории деформирования в полной мере не отражают последовательность исследуемой в представленной работе методики повышения усталостной долговечности.

1. Методика проведения расчетов

На начальном этапе было проведено исследование поведения тонкостенных трубчатых образцов в условиях совместного растяжения и кручения. Напряженное

состояние в рабочей части трубчатого образца, у которого отношение срединного диаметра к толщине стенки ≥ 10 , можно считать практически однородным. Исследование поведения тонкостенных трубчатых образцов позволило выявить качественные зависимости между напряжениями и деформациями, возникающими при характерном для процесса деформирования напряженном состоянии. Были проведены испытания на одноосное растяжение, чистый сдвиг, а также различные комбинации совместного растяжения и кручения при сложном нагружении [40, 41]. Также была построена модель упругопластического деформирования совместным растяжением и кручением тонкостенного трубчатого тела [42].

Исследование поведения цилиндрических тел сплошного круглого сечения в условиях совместного растяжения и кручения базируется на основе проведенных ранее исследований на тонкостенных трубчатых образцах. В частности, на основе модели деформирования совместным растяжением и кручением тонкостенного трубчатого тела строится модель деформирования стержня круглого сечения. Разрабатываемая модель позволяет рассчитать распределения по радиусу изделия остаточных напряжений, созданных в теле в процессе деформирования.

Основные положения модели деформирования однородного стержня круглого сечения совместным растяжением и кручением:

1. Стержень сплошного круглого сечения разбивается на n тонкостенных цилиндров со срединным радиусом R_i и толщиной стенки δ_i , где $\delta_i \ll R_i$. Для каждого цилиндра они определяются по формулам

$$R_i = \frac{Rv_i + Rv_{i+1}}{2}, \quad \delta_i = Rv_i - Rv_{i+1}, \quad (1)$$

где Rv_i – внешний радиус i -го цилиндра, который определяется по формуле

$$Rv_i = RN \prod_{j=1}^i \left(1 - \frac{1}{n}(j-1) \right), \quad (2)$$

где RN – наибольший внешний радиус, т.е. радиус самого стержня.

В соответствии с формулами (1) и (2) толщина стенки у цилиндров различная, она убывает от наружных цилиндров к внутренним (срединным). Этим обеспечивается выполнение условия, при котором все цилиндры будут тонкостенными (толщина стенки на порядок меньше среднего диаметра).

Деформирование каждого такого тонкостенного цилиндра в отдельности описывается моделью деформирования тонкостенного трубчатого изделия совместным растяжением и кручением, рассмотренной в [15, 42].

2. Считаются справедливыми гипотезы плоских сечений и прямых радиусов. Вследствие этого все тонкостенные цилиндры получают одинаковые общие продольные деформации (ϵ), а сдвиговые деформации (γ) связаны между собой линейной зависимостью:

$$\varepsilon_i = \text{const}, \quad \gamma_i = \frac{R_i}{R_{\max}} \gamma_{\max}, \quad (3)$$

где γ_{\max} – сдвиговая деформация наружного цилиндра; R_{\max} – срединный радиус наружного цилиндра.

3. Величины продольной силы (N) и крутящего момента (M) в процессе нагружения определяются соотношениями

$$\begin{aligned} N &= \sum_i (2\pi \cdot R_i \cdot \delta_i \cdot \sigma_i), \\ M &= \sum_i (2\pi (R_i)^2 \delta_i \cdot \tau_i), \end{aligned} \quad (4)$$

где σ_i – осевое (продольное) напряжение в i -м цилиндре; τ_i – касательное напряжение в i -м цилиндре. При этом связи между напряжениями и деформациями [42] определяются законом Гука при растяжении и при чистом сдвиге:

$$\begin{aligned} \sigma_i &= E(\varepsilon_i - \varepsilon_{pi}), \\ \tau_i &= G(\gamma_i - \gamma_{pi}), \end{aligned} \quad (5)$$

где E и G – модули Юнга и сдвига; ε_{pi} , γ_{pi} – пластические составляющие деформаций в i -м цилиндре, которые вычисляются при решении уравнений модели деформирования тонкостенного трубчатого цилиндра [42].

4. При снятии внешнего растягивающего усилия и момента кручения происходит упругая разгрузка, по окончании которой в изделии (в случае неупругого деформирования на стадии нагружения) сохраняются остаточные деформации и остаточные напряжения. Основная причина возникновения осевых остаточных напряжений при кручении предварительно растянутого стержня с зафиксированной продольной деформацией – это неравномерность распределения по сечению продольных пластических деформаций. При кручении полные продольные деформации по всему сечению одинаковы, но во внешних слоях касательные напряжения выше, что приводит к более ранней пластификации этих слоев, а соответственно, и к большим по сравнению с центральными слоями продольным пластическим деформациям. Это приводит к возникновению сжимающих упругих остаточных деформаций в поверхностных слоях и соответствующих им сжимающих напряжений.

В соответствии с теоремой о разгрузке [43] величины остаточных деформаций (ε_{os} , γ_{os}) определяются как разности между деформациями, возникающими при нагружении (ε , γ), и величинами сжимаемых деформаций при разгрузке (ε_{sn} , γ_{sn}), т.е. деформаций в предположении полностью упругого решения:

$$\varepsilon_{os} = \varepsilon - \varepsilon_{sn}, \quad \gamma_{os} = \gamma - \gamma_{sn}. \quad (6)$$

Приведение формул (6) к конечному виду рассмотрим на примере продольных деформаций. Согласно (3) $\varepsilon_i = \text{const}$, поэтому в соответствии с зависимостями (5) величина осевого напряжения в i -м цилиндре определяется выражением

$$\sigma_i = E \cdot (\varepsilon - \varepsilon_{pi}). \quad (7)$$

Подставляя (7) в выражение для продольной силы (4), получаем

$$N = 2\pi \sum_i (R_i \cdot \delta_i \cdot E(\varepsilon - \varepsilon_{pi})). \quad (8)$$

Считая разгрузку полностью упругой, величину снимаемой продольной деформации вычисляем в соответствии с законом Гука [43] по формуле

$$\varepsilon_{sn} = \frac{N}{A \cdot E}, \quad (9)$$

где A – площадь поперечного сечения стержня, $A = 2\pi \cdot \sum_i (R_i \cdot \delta_i)$. Подставляя (8) в (9), получаем

$$\varepsilon_{sn} = \frac{2\pi \sum_i (R_i \cdot \delta_i \cdot E(\varepsilon - \varepsilon_{pi}))}{2\pi \sum_i (R_i \cdot \delta_i) E} = \frac{\sum_i (R_i \cdot \delta_i (\varepsilon - \varepsilon_{pi}))}{\sum_i (R_i \cdot \delta_i)}. \quad (10)$$

Теперь, подставляя выраженную согласно (10) деформацию ε_{sn} в первую из формул (6), получаем итоговое выражение для вычисления остаточной продольной деформации

$$\varepsilon_{os} = \frac{\sum_i (R_i \cdot \delta_i \cdot \varepsilon_{pi})}{\sum_i (R_i \cdot \delta_i)}. \quad (11)$$

Делая подобные выкладки для сдвиговых деформаций, получаем итоговое выражение для вычисления остаточной сдвиговой деформации в наружном цилиндре

$$\gamma_{os} = \frac{\sum_i (R_i \cdot \delta_i \cdot \gamma_{pi})}{\sum_i \left(\frac{R_i^2}{R_{\max}} \cdot \delta_i \right)}. \quad (12)$$

5. По найденным значениям остаточных деформаций, а также по найденным значениям пластических деформаций в каждом i -м цилиндре вычисляются значения остаточных напряжений:

$$\begin{aligned} \sigma_{osi} &= E(\varepsilon_{os} - \varepsilon_{pi}), \\ \tau_{osi} &= G \left(\gamma_{os} \frac{R_i}{R_{\max}} - \gamma_{pi} \right), \end{aligned} \quad (13)$$

где σ_{osi} и τ_{osi} – остаточные осевые и остаточные касательные к поперечному сечению напряжения в i -м цилиндре.

При расчете рассматриваются только стадии совместного растяжения и кручения стержня, а для того чтобы учесть первые стадии растяжения и возможной частичной разгрузки после растяжения, вводится дополнительный входной параметр – начальное осевое напряжение, достигнутое на этих первых стадиях (σ_n). Таким образом, входные параметры модели: уровень

начального напряжения растяжения σ_n , а также величины сдвиговых деформаций наружного цилиндра (γ_{\max}), достигаемых на каждой стадии кручения. Величина относительной продольной деформации ϵ (аналогично абсолютное удлинение стержня u), которая фиксируется на постоянном уровне после стадии растяжения, вычисляется исходя из известного начального напряжения растяжения σ_n .

На выходе модели деформирования стержня круглого сечения:

а) зависимости продольной силы N , кН, и крутящего момента M , Н·м, от γ_{\max} или от угла закручивания φ , рад;

б) распределение остаточные осевых σ_{os} , МПа, и остаточных касательных напряжений τ_{os} , МПа, по радиусу поперечного сечения стержня.

Пошаговый процесс определения всех параметров, в том числе включающий конечно-разностное решение уравнений модели деформирования тонкостенного трубчатого изделия, реализован в программе MathCAD. Материальными параметрами являются те же параметры, что и для модели деформирования тонкостенного трубчатого изделия: модуль Юнга – E , МПа, модуль сдвига – G , МПа, условный предел текучести материала – $\sigma_{0,2}$, МПа, безразмерные параметры определяющих функций материала: m , B и q .

2. Методика экспериментальных исследований

Для проверки адекватности рассмотренной математической модели проведен ряд испытаний на цилиндрических образцах круглого сечения. Необходимые исследования выполнены в Центре экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета на универсальной двухосевой сервогидравлической испытательной системе Instron 8850, позволяющей проводить осевое нагружение с усилием до 100 кН и нагружение кручением с моментом до 1000 Н·м.

При проведении всех испытаний использовался навесной двухосевой экстензометр (рис. 1). Двухосевой экстензометр позволяет одновременно отслеживать деформацию образца в осевом направлении и сдвиговую деформацию на заданной базе. Он устанавливается непосредственно на образец, тем самым исключая погрешности измерения, обусловленные податливостью нагружающей системы и несовершенством закрепления образца в захватах, поэтому обеспечивает получение более достоверных результатов. Регистрация деформаций осуществлялась на базе образца, равной 10 мм. Испытательная система и экстензометр обеспечивают точность измерения нагрузок, перемещений и деформаций с погрешностью не более 0,5 % от измеряемой величины.

Механические испытания выполнялись на образцах, которые были разработаны исходя из требований ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» и ГОСТ 3565-80 «Металлы. Метод испытаний

на кручение», геометрии захватов и размеров используемого двухосевого экстензометра. Эскиз исследуемых образцов приведен на рис. 2.

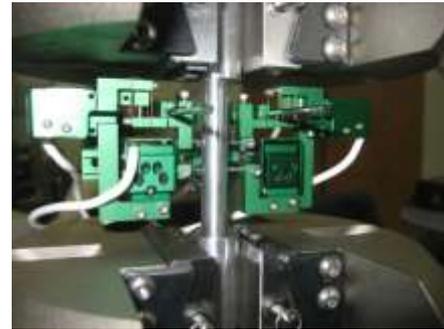


Рис. 1. Двухосевой экстензометр, установленный на образце

Fig. 1. Dual axis extensometer mounted on sample

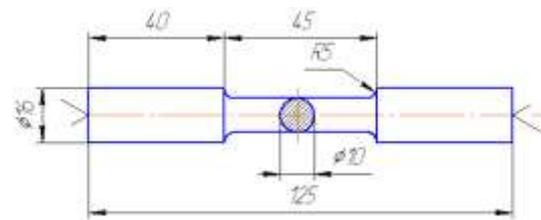


Рис. 2. Эскиз образца для испытаний на растяжение и кручение

Fig. 2. The sketch for tension and torsion test pieces

При обработке результатов экспериментов учитывались индивидуальные размеры каждого образца с учетом их отклонения от базовых. Все образцы были изготовлены из сердцевины цилиндрических частей новых нефтенасосных штанг, а именно из вырезанных из штанг прутков длиной 1–2 м. Материал прутков – сталь 15Х2ГМФ, анализ химического состава представлен в таблице.

Химический состав исследуемого материала (сталь 15Х2ГМФ), %

The chemical composition of the material studied (steel 15Cr2MnMoV), %

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Cu	Al
0,15	1,08	0,27	0,015	0,010	2,05	0,21	0,21	0,11	0,005	0,17	0,012

Основными параметрами каждого испытания были величины деформаций и соответствующих им нагрузок. Регистрация деформаций – продольной ϵ и сдвиговой по внешнему диаметру образца γ_{\max} – как было сказано выше, осуществлялась с помощью экстензометра на базе 10 мм. Частота регистрации деформаций 100 измерений в секунду. Через датчик силы синхронно проводилась регистрация нагрузок (осевого усилия F , Н, и момента кручения M' , Н·м) с той же частотой 100 измерений в секунду. В данном случае величины внешних прикладываемых нагрузок равняются соответствующим внутренним силовым факторам, возникающим в сече-

нии образца, т.е. продольная сила N равна осевой нагрузке F , а крутящий момент M равен внешнему моменту кручения M' . Таким образом, основные параметры испытания: N , Н; M , Н·м; ε и γ_{\max} . Управление испытанием осуществлялось по величинам деформаций. Кроме этого, велась запись времени испытания t , с, а по встроенному датчику захватов регистрировались величины абсолютных перемещений: продольного перемещения Δl , мм, и угла закручивания φ' , град. Скорость деформирования контролировалась также по встроенному датчику захватов. Деформирование растяжением осуществлялось при постоянной скорости удлинения образца 0,4 мм/мин, деформирование кручением при постоянной скорости изменения угла закручивания 10°/мин. Построенные по результатам испытаний графики зависимостей являются точечными, т.е. представляют собой последовательный ряд экспериментальных точек, не соединенных между собой прямыми линиями.

На рис. 3 представлен результат испытания одного из образцов в последовательности, включающей растяжение с фиксации достигнутой продольной деформации и последующее знакопеременное кручение. Наблюдаются основные закономерности поведения материала, отмеченные при исследовании трубчатых образцов [41]. Продольная сила (аналогия с напряжением σ в случае тонкостенных образцов) снижается на первых двух стадиях знакопеременного кручения, на третьей стадии снижение заканчивается и появляется незначительное повышение продольной силы в начале стадии кручения, названное «обратным эффектом», на последующих стадиях кручения снижения силы также практически не наблюдается. Петля $M - \gamma_{\max}$ замыкается после четвертой стадии кручения.

На рис. 4 представлен результат испытания образца, у которого амплитуда сдвиговой деформации в два раза больше, чем в предыдущем испытании.

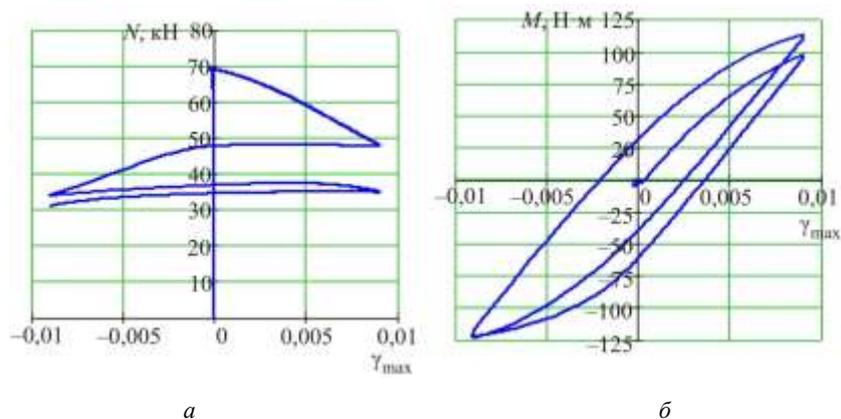


Рис. 3. Графики зависимостей продольной силы (а); крутящего момента (б) от сдвиговой деформации по внешнему диаметру образца из стали 15Х2ГМФ при его испытании в последовательности: растяжение до $\sigma_{0,2}$, фиксация достигнутой продольной деформации ε на постоянном уровне, 4 стадии знакопеременного кручения с амплитудой $\gamma_{\max} = 0,009$

Fig. 3. Graphs of dependences longitudinal force (а); torque from (б) shear strain along the outer diameter of a sample of steel 15Cr2MnMoV when tested in the sequence: tension to $\sigma_{0,2}$, fixing the achieved longitudinal strain ε at a constant level, four stages of alternating torsion with the amplitude $\gamma_{\max} = 0.009$

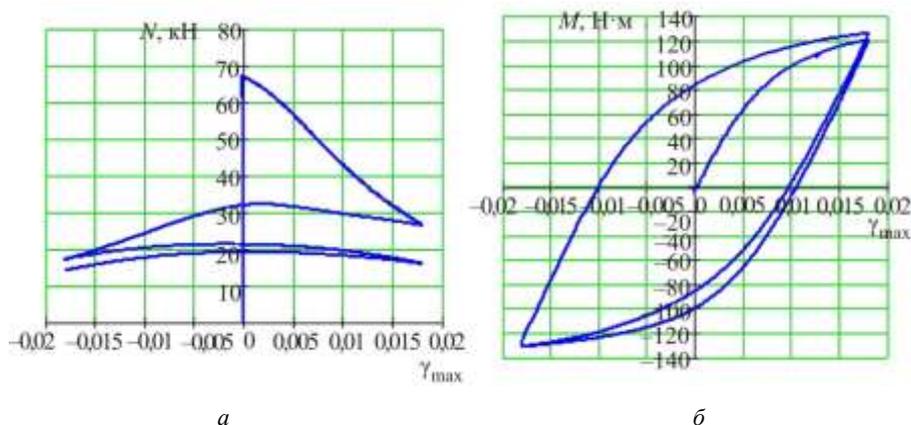


Рис. 4. Графики зависимостей продольной силы (а); крутящего момента (б) от сдвиговой деформации по внешнему диаметру образца из стали 15Х2ГМФ при его испытании в последовательности: растяжение до $\sigma_{0,2}$, фиксация достигнутой продольной деформации ε на постоянном уровне, 4 стадии знакопеременного кручения с амплитудой $\gamma_{\max} = 0,018$

Fig. 4. Graphs of dependences longitudinal force (a); torque from (b) shear strain along the outer diameter of a sample of steel 15Cr2MnMoV when tested in the sequence: tension to $\sigma_{0,2}$, fixing the achieved longitudinal strain ϵ at a constant level, four stages of alternating torsion with the amplitude $\gamma_{\max} = 0.018$

Увеличение амплитуды кручения приводит к большим пластическим деформациям в образце. В этом случае уже на второй стадии кручения появляется «обратный эффект», причем достаточно яркий, что можно наблюдать на рис. 4. Итоговое снижение продольной силы на данной стадии получается незначительным, а на последующих стадиях кручения – третьей и четвертой, так же, как и при испытании, результаты которого представлены на рис. 3, снижение силы прекращается. На рис. 4, б можно видеть, что при большой амплитуде кручения петля $M - \gamma_{\max}$ становится более широкой и замыкается после третьей стадии кручения. Такое же поведение материала при большой амплитуде стадий кручения наблюдалось и на тонкостенных образцах [41].

3. Результаты теоретических и экспериментальных исследований

На рис. 5, 7 и 9 представлено сравнение экспериментальных и расчетных графиков зависимостей продольной силы и крутящего момента от угла закручивания при некоторых режимах деформирования. На рис. 6, 8 и 10 представлены расчетные (согласно модели) графики распределения остаточных напряжений по радиусу поперечного сечения образца при соответствующих режимах деформирования. Величина угла закручивания образца вычислялась исходя из показаний экстензометра по формуле $\varphi = \frac{\gamma_{\max} \cdot l}{RN}$, где l – длина рабочей части образца без галтелей, $l = 40$ мм, а RN – наружный радиус образца.

При проведении расчетов образец диаметром 10 мм разбивался на 100 тонкостенных цилиндров. Материальные параметры модели [15, 42] определены также по

результатам экспериментов: $\sigma_{0,2} = 858\text{--}870$ МПа; $E = 2,17 \cdot 10^5$ МПа; $G = 0,8 \cdot 10^5$ МПа; $m = 32$; $B = 3,5$; $q = 1$.

Достаточно точное соответствие теоретических и экспериментальных зависимостей при различных значениях предварительного осевого напряжения растяжения и амплитуды сдвиговой деформации подтверждает адекватность математической модели. При этом на первых двух стадиях кручения наблюдается практически полное соответствие, а на третьей частично оставленной стадии кручения (см. рис. 5 и 7) соответствие является приемлемым. И даже на полностью оставленной третьей стадии кручения (см. рис. 9) согласованность модели и эксперимента является удовлетворительной. Некоторое отклонение зависимостей $M - \varphi$ в конце третьей стадии кручения (см. рис. 9, б) является следствием эффекта Баушингера [43], который присутствует в действительности, но модель его не отражает. Но это и не требуется на стадиях, которые являются полезными с позиции дальнейшего повышения усталостной долговечности изделия. Полезными можно считать стадии, на которых продольная сила N снижается, т.е. первые две стадии знакопеременного кручения предварительно растянутого стержня с зафиксированной продольной деформацией. В этом случае за счет уменьшения продольной упругой деформации в поверхностных слоях цилиндрического тела увеличивается продольная пластическая деформация. В свою очередь, большие по сравнению с центральными слоями продольные пластические деформации порождают возникновение сжимающих упругих остаточных деформаций в поверхностных слоях и соответствующих им остаточных сжимающих напряжений. Если же продольная сила в процессе деформирования перестает снижаться, то и остаточные осевые сжимающие напряжения не возрастают по абсолютному значению в поверхностных слоях.

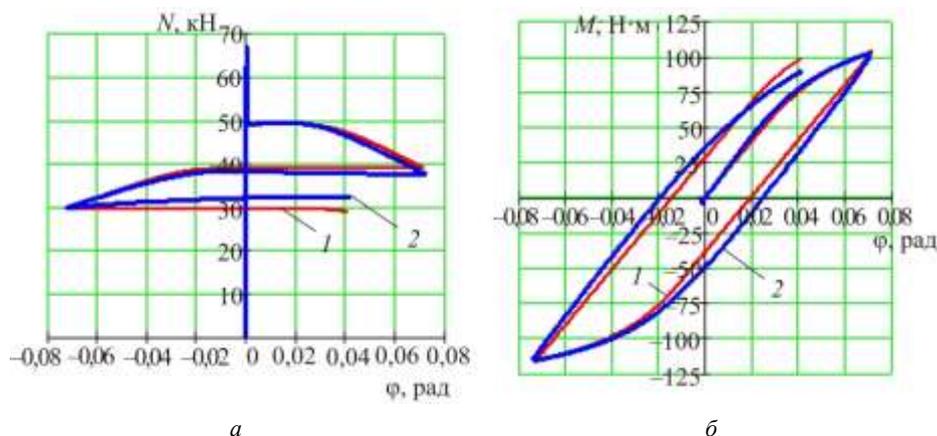


Рис. 5. Графики зависимостей продольной силы (а); крутящего момента (б) от угла закручивания при деформировании образца из стали 15Х2ГМФ в последовательности: растяжение до $\sigma_{0,2}$, разгрузка до $\sigma = 0,72\sigma_{0,2}$, фиксация достигнутой деформации ϵ на постоянном уровне, кручение до $\varphi = \varphi_a$ ($\varphi_a = 0,072$ рад, $\gamma_{\max} = 0,009$), кручение в противоположную сторону до $\varphi = -\varphi_a$, кручение в первоначальном направлении до $\varphi = 0,041$ рад ($\gamma_{\max} = 0,0051$); 1 – расчетные графики; 2 – экспериментальные графики

Fig. 5. Graphs of dependences longitudinal force (a); torque from (b) a twist angle when deforming a sample of steel 15Cr2MnMoV in the sequence: tension to $\sigma_{0,2}$, unloading to $\sigma = 0.72 \cdot \sigma_{0,2}$, fixing the achieved deformation ε at a constant level, torsion up to $\varphi = \varphi_a$ ($\varphi_a = 0.072$ rad, $\gamma_{\max} = 0.009$), torsion in the opposite direction to $\varphi = -\varphi_a$, torsion in the original direction to $\varphi = 0.041$ rad ($\gamma_{\max} = 0.0051$); 1 – calculated graphs; 2 – experimental graphs

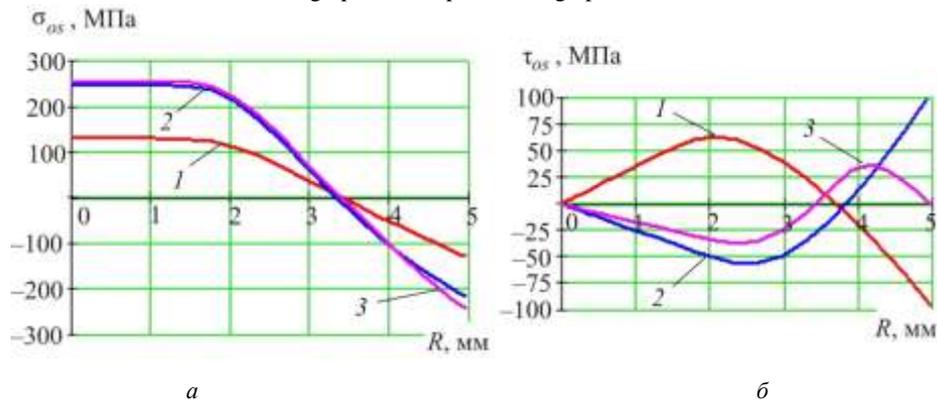


Рис. 6. Расчетные графики распределения остаточных осевых (a) и остаточных касательных (б) напряжений по радиусу поперечного сечения образца из стали 15Х2ГМФ в случае возможной разгрузки после: 1 – первой, 2 – второй и 3 – третьей стадий кручения при деформировании в последовательности: растяжение до $\sigma_{0,2}$, разгрузка до $\sigma = 0.72 \cdot \sigma_{0,2}$, фиксация достигнутой деформации ε на постоянном уровне, кручение до $\varphi = \varphi_a$ ($\varphi_a = 0,072$ рад, $\gamma_{\max} = 0,009$), кручение в противоположную сторону до $\varphi = -\varphi_a$, кручение в первоначальном направлении до $\varphi = 0,041$ рад ($\gamma_{\max} = 0,0051$)

Fig. 6. Calculated graphs of the distribution of residual axial (a) and residual tangential (b) stresses along the radius of the cross section of a sample of steel 15Cr2MnMoV in the event of possible unloading after: 1 – the first, 2 – the second, and 3 – the third torsion stage during deformation in the sequence: tension to $\sigma_{0,2}$, unloading to $\sigma = 0.72 \cdot \sigma_{0,2}$, fixing the achieved deformation ε at a constant level, torsion up to $\varphi = \varphi_a$ ($\varphi_a = 0.072$ rad, $\gamma_{\max} = 0.009$), torsion in the opposite direction to $\varphi = -\varphi_a$, torsion in the original direction to $\varphi = 0.041$ rad ($\gamma_{\max} = 0.0051$)

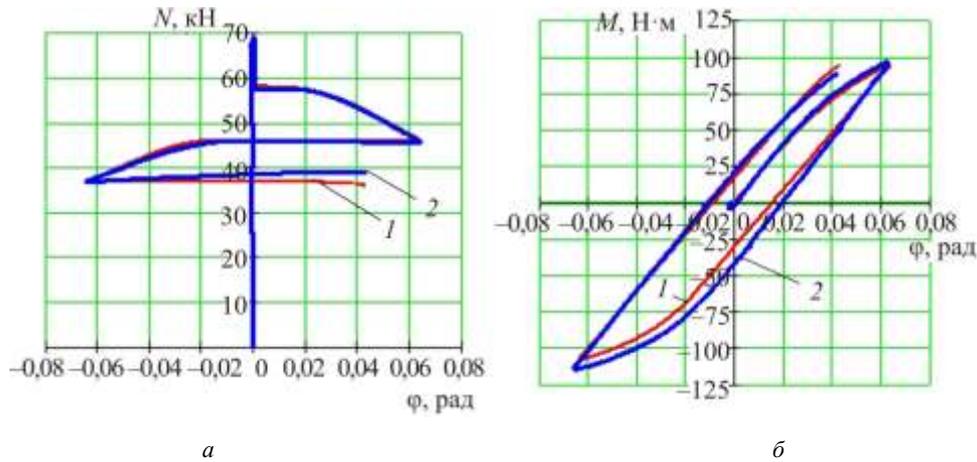


Рис. 7. Графики зависимостей (a) продольной силы; крутящего момента (б) от угла закручивания при деформировании образца из стали 15Х2ГМФ в последовательности: растяжение до $\sigma_{0,2}$, разгрузка до $\sigma = 0.85 \cdot \sigma_{0,2}$, фиксация достигнутой деформации ε на постоянном уровне, кручение до $\varphi = \varphi_a$ ($\varphi_a = 0,064$ рад, $\gamma_{\max} = 0,008$), кручение в противоположную сторону до $\varphi = -\varphi_a$, кручение в первоначальном направлении до $\varphi = 0,043$ рад ($\gamma_{\max} = 0,0054$); 1 – расчетные графики; 2 – экспериментальные графики

Fig. 7. Graphs of dependences longitudinal force (a); torque from (b) a twist angle when deforming a sample of steel 15Cr2MnMoV in the sequence: tension to $\sigma_{0,2}$, unloading to $\sigma = 0.85 \cdot \sigma_{0,2}$, fixing the achieved deformation ε at a constant level, torsion up to $\varphi = \varphi_a$ ($\varphi_a = 0.064$ rad, $\gamma_{\max} = 0.008$), torsion in the opposite direction to $\varphi = -\varphi_a$, torsion in the original direction to $\varphi = 0.043$ rad ($\gamma_{\max} = 0.0054$); 1 – calculated graphs, 2 – experimental graphs

На рис. 6, 8 и 10 под буквами (a) можно видеть, что после каждой из стадий кручения постепенно увеличивается по абсолютному значению величина остаточных сжимающих напряжений в приповерхностной области, в то же время возрастает и величина осевых остаточных растягивающих напряжений в середине сечения. Глубина проникновения остаточ-

ных сжимающих напряжений составляет около 1/3 радиуса от поверхности. Частичная третья стадия кручения оставлена специально для минимизации величины остаточных касательных напряжений, созданных в процессе деформирования. Это можно видеть на рис. 6 и 8 под буквами (б), где после третьей стадии кручения их величина много меньше, чем по-

сле первой и второй стадий. На рис. 10, б можно наблюдать, что в случае полностью оставленной третьей стадии кручения итоговая величина созданных остаточных касательных напряжений является значительной (в приповерхностной области их величина по абсолютному значению превышает 100 МПа).

Путем варьирования такими параметрами, как начальное напряжение растяжения σ_n и величина сдвиговой деформации наружного цилиндра, на стадиях кручения γ_{max} определяются режимы деформирования, обеспечивающие наилучшее распределение остаточных осевых напряжений по сечению: как можно большие по абсолютному значению сжимающие в приповерхностной области при как можно меньших растягивающих в сердцевине. Остаточные сжимающие напряжения в приповерхностной области положительно влияют на

повышение усталостной долговечности изделия, а остаточные растягивающие в сердцевине отрицательно сказываются, когда на них накладываются рабочие напряжения в изделии. Например, кручение с уровня $\sigma_n = \sigma_{0,2}$ хоть и позволяет создавать на поверхности достаточно высокие по абсолютному значению остаточные сжимающие напряжения, но при этом в сердцевине неизбежно появляются неприемлемо высокие величины остаточных растягивающих напряжений (см. рис. 10, а). К тому же кручение с уровня $\sigma_{0,2}$ не позволяет обеспечить в середине стержня упругое ядро как, например, на рис. 6, а по той причине, что в момент начала кручения сердцевина уже находится в пластическом состоянии. Близлежащие к $\sigma_{0,2}$ уровни начальных напряжений растяжения являются неэффективными по тем же причинам.

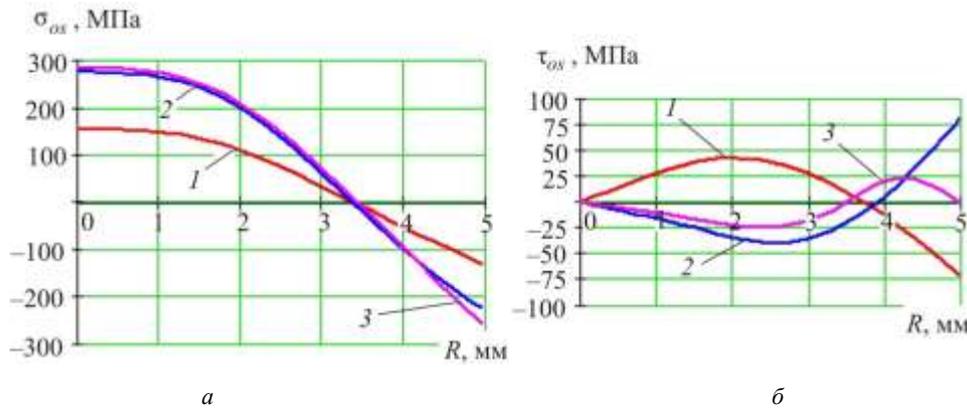


Рис. 8. Расчетные графики распределение остаточных осевых (а) и остаточных касательных (б) напряжений по радиусу поперечного сечения образца из стали 15Х2ГМФ в случае возможной разгрузки после: 1 – первой, 2 – второй и 3 – третьей стадий кручения при деформировании в последовательности: растяжение до $\sigma_{0,2}$, разгрузка до $\sigma = 0,85\sigma_{0,2}$, фиксация достигнутой деформации ϵ на постоянном уровне, кручение до $\varphi = \varphi_a$ ($\varphi_a = 0,064$ рад, $\gamma_{max} = 0,008$), кручение в противоположную сторону до $\varphi = -\varphi_a$, кручение в первоначальном направлении до $\varphi = 0,043$ рад ($\gamma_{max} = 0,0054$)

Fig. 8. Calculated graphs of the distribution of residual axial (a) and residual tangential (b) stresses along the radius of the cross section of a sample of steel 15Cr2MnMoV in the event of possible unloading after: 1 – the first, 2 – the second, and 3 – the third torsion stage during deformation in the sequence: tension to $\sigma_{0,2}$, unloading to $\sigma = 0,85 \cdot \sigma_{0,2}$, fixing the achieved deformation ϵ at a constant level, torsion up to $\varphi = \varphi_a$ ($\varphi_a = 0.064$ rad, $\gamma_{max} = 0.008$), torsion in the opposite direction to $\varphi = -\varphi_a$, torsion in the original direction to $\varphi = 0.043$ rad ($\gamma_{max} = 0.0054$)

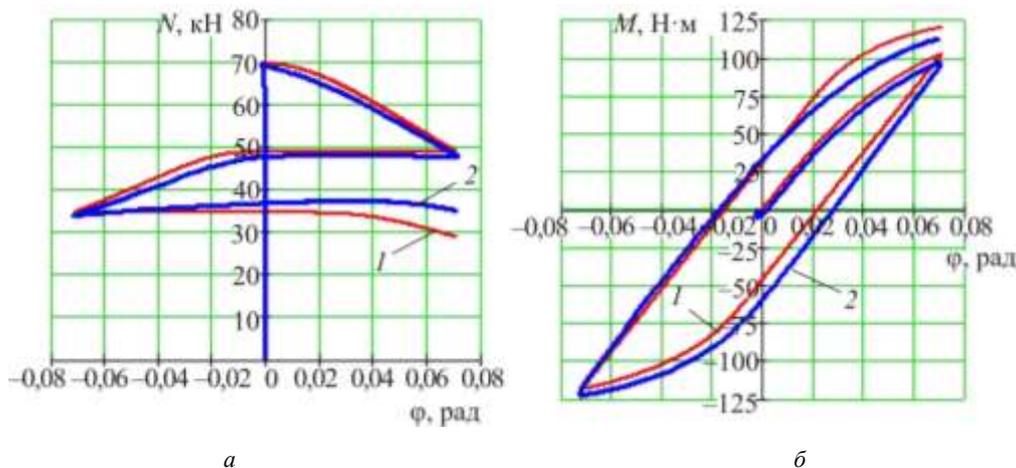


Рис. 9. Графики зависимостей продольной силы (а); крутящего момента (б) от угла закручивания при деформировании образца из стали 15Х2ГМФ в последовательности: растяжение до $\sigma_{0,2}$, фиксация достигнутой деформации ϵ на постоянном уровне, кручение до $\varphi = \varphi_a$ ($\varphi_a = 0,071$ рад, $\gamma_{max} = 0,009$), кручение в противоположную сторону до $\varphi = -\varphi_a$, кручение в первоначальном направлении до $\varphi = \varphi_a$; 1 – расчетные графики, 2 – экспериментальные графики

Fig. 9. Graphs of dependences longitudinal force (a); torque from (b) a twist angle when deforming a sample of steel 15Cr2MnMoV in the sequence: tension to $\sigma_{0,2}$, fixing the achieved deformation ε at a constant level, torsion up to $\varphi = \varphi_a$ ($\varphi_a = 0.071$ rad, $\gamma_{\max} = 0.009$), torsion in the opposite direction to $\varphi = -\varphi_a$, torsion in the original direction to $\varphi = \varphi_a$; 1 – calculated graphs, 2 – experimental graphs

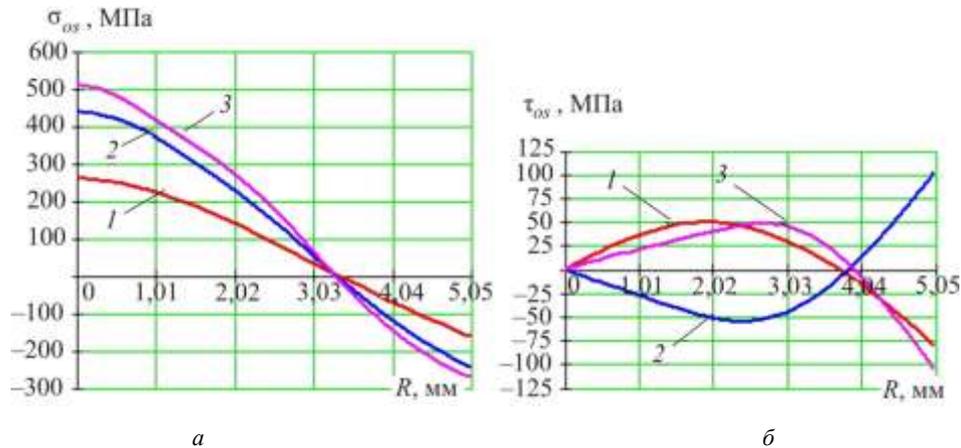


Рис. 10. Расчетные графики распределение остаточных осевых (a) и остаточных касательных (б) напряжений по радиусу поперечного сечения образца из стали 15Х2ГМФ в случае возможной разгрузки после: 1 – первой, 2 – второй и 3 – третьей стадии кручения при упрочнении в последовательности: растяжение до $\sigma_{0,2}$, фиксация достигнутой деформации ε на постоянном уровне, кручение до $\varphi = \varphi_a$ ($\varphi_a = 0,071$ рад, $\gamma_{\max} = 0,009$), кручение в противоположную сторону до $\varphi = -\varphi_a$, кручение в первоначальном направлении до $\varphi = \varphi_a$

Fig. 10. Calculated graphs of the distribution of residual axial (a) and residual tangential (b) stresses along the radius of the cross section of a sample of steel 15Cr2MnMoV in the event of possible unloading after: 1 – the first, 2 – the second, and 3 – the third torsion stage during deformation in the sequence: tension to $\sigma_{0,2}$, fixing the achieved deformation ε at a constant level, torsion up to $\varphi = \varphi_a$ ($\varphi_a = 0.071$ rad, $\gamma_{\max} = 0.009$), torsion in the opposite direction to $\varphi = -\varphi_a$, torsion in the original direction to $\varphi = \varphi_a$

Выводы

Таким образом, с позиции дальнейшего повышения усталостной долговечности цилиндрического изделия полезными можно считать стадии деформирования, включающие растяжение до уровня $\sigma_{0,2}$, частичную разгрузку ниже $\sigma_{0,2}$, фиксацию достигнутой продольной деформации на постоянном уровне и последующие две

полные и частичную третью стадии знакопеременного кручения. На соответствующих стадиях деформирования соответствие экспериментальных и расчетных зависимостей $N - \varphi$ и $M - \varphi$ является приемлемым, что позволяет использовать рассмотренную математическую модель для расчета распределения остаточных напряжений по сечению тела и для определения рациональных режимов деформирования.

Библиографический список

1. Терентьев В.Ф., Кораблева С.А. Усталость металлов. – М.: Наука, 2015. – 484 с.
2. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 456 с.
3. Серенсен С.В. Усталость материалов и элементов конструкций: избр. тр.: в 3 т. – Киев: Наук. думка, 1985. – Т.2. – 256 с.
4. Suresh S. Fatigue of materials. – Cambridge University Press: New York, 1998. – 679 p.
5. Павлов В.Ф., Кирпичев В.А., Вакулук В.С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочненных деталей по остаточным напряжениям / Самар. науч. центр РАН. – Самара, 2012. – 125 с.
6. Радченко В.П., Саушкин М.Н. Феноменологический метод расчета остаточных напряжений и пластических деформаций в полем поверхностно упрочненном цилиндрическом образце // Прикладная математика и механика. – 2013. – Т. 77, № 1. – С. 143–152.
7. Радченко В.П., Кирпичев В.А., Лунин В.В. Оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости деталей различного диаметра в условиях концентрации напря-

жений // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. – 2015. – № 1 (45). – С. 168 – 177.

8. Оценка влияния гидродробеструйной обработки на многоцикловую усталость цилиндрических деталей из сплава Д16Т по первоначальным деформациям образца-свидетеля / В.С. Вакулук, В.П. Сазанов, В.Ф. Павлов, В.К. Шадрин // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. – 2014. – № 2 (42). – С. 87–93.

9. Радченко В.П., Куров А.Ю. Влияние анизотропии поверхностного пластического упрочнения на формирование остаточных напряжений в цилиндрических деталях с надрезами полукруглого профиля // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. – 2016. – Т. 20, № 4. – С. 675–690. DOI: 10.14498/vsgtu1513

10. Круцило В.Г. Исследование влияния остаточных напряжений и деформационного упрочнения в поверхностном слое деталей на усталостную прочность // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. – 2006. – № 41. – С. 127–130.

11. Dai K., Shaw L. Analysis of fatigue resistance improvements via surface severe plastic deformation // International Jour-

nal of Fatigue. – 2008. – Vol. 30. – No. 8. – P. 1398–1408. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2007.10.010

12. Поляк М.С. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения: в 2 т. – М.: Машиностроение, 1995. – Т. 2. – 688 с.

13. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 2002. – 299 с.

14. Крюков А.А. Технология упрочнения длинномерных цилиндрических изделий совместным растяжением и реверсивным кручением // *Металлообработка*. – 2015. – № 3(87). – С. 11–17.

15. Increasing Corrosion-Fatigue Strength of Long Cylindrical Products as a Result of Preliminary Strengthening by Joint Stretching and Twisting / A.A. Kryukov, V.E. Kalugin, L.D. Sirotenko // *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. – 2016. – Vol. 7. – Iss. 3. – P. 2434–2447. – URL: [http://rjpbcs.com/pdf/2016_7\(3\)/\[298\].pdf](http://rjpbcs.com/pdf/2016_7(3)/[298].pdf) (accessed: 28 January 2019).

16. Технология восстановления прямолинейности и упрочнения насосных штанг / Н.Н. Вассерман, В.В. Семенов, В.Е. Калугин, Н.П. Надымов // *Наука производству*. – М., 2000. – № 5. – С. 49–50.

17. Надымов А.Н., Столбов В.Ю., Трусов П.В. Математическое моделирование процесса восстановления насосных штанг // *Сибирский журн. индустр. математики*. – 2002. – Т. 5, № 1 (9). – С. 120–126.

18. Стружанов В.В., Просвириков Е.Ю. Растяжение с кручением. Сообщ. 1. Свойства материала // *Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*. – 2008. – № 1 (16). – С. 36–44. DOI: 10.14498/vsgtu570

19. Стружанов В.В., Привалова В.В. Численный расчет предельных значений параметров управления в задаче о растяжении с кручением специального образца в одной стержневой системе // *Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*. – 2011. – № 2 (23). – С. 46–52. DOI: 10.14498/vsgtu908

20. Вильдеман В.Э., Третьяков М.П. Испытания материалов с построением полных диаграмм деформирования // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. – 2013. – № 2. – С. 93–98.

21. Tretyakov M.P., Vildeman V.E. Tests in tension-torsion conditions with descending sections of strain curve construction // *Fratatura ed Integrita Strutturale*. – 2013. – Vol. 24. – P. 96–101.

22. Закономерности развития неоднородных полей при закритическом деформировании стальных образцов в условиях растяжения / В.Э. Вильдеман, Е.В. Ломакин, Т.В. Третьякова, М.П. Третьяков // *Изв. РАН. Механика твердого тела*. – 2016. – № 5. – С. 132–139.

23. Закритическое деформирование и разрушение тел с концентраторами в условиях плоского напряженного состояния / В.Э. Вильдеман, Е.В. Ломакин, Т.В. Третьякова, М.П. Третьяков // *Известия РАН. Механика твердого тела*. – 2017. – № 5. – С. 22–29.

24. Моделирование процессов деформирования и локализации пластических деформаций при кручении-растяжении тел вращения / В.Г. Баженов [и др.] // *Прикладная математика и механика*. – 2008 – № 2 (72) – С. 342–350.

25. Баженов В.Г., Жегалов Д.В., Павленкова Е.В. Численное и экспериментальное исследование упругопластических процессов растяжения-кручения осесимметричных тел при больших деформациях // *Изв. РАН. Механика твердого тела*. – 2011. – № 2. – С. 57–66.

26. Численное и экспериментальное исследование упругопластических процессов растяжения-кручения цилиндрических

образцов из стали 09Г2С при больших деформациях / В.Г. Баженов [и др.] // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2017. – № 4–2 (324). – С. 76–82.

27. Экспериментальное и теоретическое исследование больших деформаций цилиндрических образцов из стали 09Г2С с концентраторами напряжений при нагружении растяжением-кручением до разрушения / В.Г. Баженов [и др.] // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2018. – № 4. – С. 69–81. DOI: 10.15593/per.mech/2018.4.06

28. Коновалов А.В. Кручение цилиндрического стержня и трубы из упругопластического материала с большими пластическими деформациями // *Изв. РАН. Механика твердого тела*. – 2001. – № 3. – С. 102–111.

29. A new multiaxial fatigue damage model for various metallic materials under the combination of tension and torsion loadings / Jing Li [et al.] // *International Journal of Fatigue*. – 2009. – No. 31. – P. 776–781.

30. Starzynski Grzegorz. Modeling and experimental verification of simultaneous tension and torsion in a cylindrical element with a surface layer // *International Journal of Fatigue*. – 2010. – No. 32. – P. 1255–1264.

31. Akhtar S. Khan, Xu Chen, Mohammad Abdel-Karim. Cyclic multiaxial and shear finite deformation response of OFHC: Part I, experimental results // *International Journal of Plasticity*. – 2007. – No. 23. – P. 1285–1306.

32. Chen X., Jiao R. Modified kinematic hardening rule for multiaxial ratcheting prediction // *International Journal of Plasticity*. – 2004. – No. 20. – P. 871–898.

33. Nouailhas Dominique, Cailletaud Georges. Tension-torsion behavior of single-crystal superalloys: experiment and finite element analysis // *International Journal of Plasticity*. – 1995. – Vol. 11. – No. 4. – P. 451–470.

34. Mechanical and microstructural investigations of an austenitic stainless steel under non-proportional loadings in tension-torsion-internal and external pressure / L. Bocher et al. // *International Journal of Plasticity*. – 2001. – No. 17. – P. 1491–1530.

35. On the performance of kinematic hardening rules in prediction a class of biaxial ratcheting histories / E. Corona [et al.] // *International Journal of Plasticity*. – 1996. – Vol. 12. – No. 1. – P. 117–145.

36. Ratcheting under tension-torsion loadings: experiments and modeling / L. Portier et al. // *International Journal of Plasticity*. – 2000. – No. 16. – P. 303–335.

37. Takahashi H., Fujiwara K., Nakagawa T. Multiple-slip work-hardening model in crystals with application to torsion-tension behaviors of aluminium tubes // *International Journal of Plasticity*. – 1998. – Vol. 14. – No. 6. – P. 489–509.

38. The influence of constant axial compression pre-stress on the fatigue failure of torsion loaded tube springs / Vinko Močilnik [et al.] // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2010. – No. 77. – P. 3132–3142.

39. Xu Chen, Rong Jiao, Kwang Soo Kim. On the Ohno-Wang kinematic hardening rules for multiaxial ratcheting modeling of medium carbon steel // *International Journal of Plasticity*. – 2005. – No. 21. – P. 161–184.

40. Исследование закономерностей упругопластического деформирования стали 15Х2ГМФ при сложном напряженном состоянии / Н.Н. Вассерман, В.Э. Вильдеман, А.А. Крюков, М.П. Третьяков // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2010. – № 2. – С. 34–47.

41. Исследование поведения конструкционной стали при простых видах нагружения / Н.Н. Вассерман, В.Е. Калугин,

А.А. Крюков, М.П. Третьяков // Вестник ПНИПУ. Машиностроение и материаловедение. – 2012. – Т. 14, № 1. – С. 41–50.

42. Крюков А.А., Калугин В.Е., Вассерман Н.Н. Моделирование упругопластического деформирования конструкционной стали при сложном напряженном состоянии // Вестн.

References

1. Terent`ev V.F., Korableva S.A. Uсталost` metallo [Metal fatigue]. *Moscow, Nauka*, 2015, 484 p.

2. Ivanova V.S., Terent`ev V.F. Priroda ustalosti metallo [The nature of metal fatigue]. *Moscow, Metallurgiya*, 1975, 456 p.

3. Serensen S.V. Uсталost` materialov i e`lementov konstrukcij [Fatigue of materials and structural elements]. *Kiev, Naukova dumka*, 1985, 256 p.

4. Suresh S. Fatigue of materials // *Cambridge University Press: New York*, 1998, 679 p.

5. Pavlov V.F., Kirpichev V.A., Vakuliuk V.S. Prognozirovanie soprotivleniia ustalosti poverkhnostno uprochnennykh detalei po ostatochnym napriazheniiam [Predicting the Fatigue Resistance of Surface-Hardened Parts From Residual Stresses]. *Samarskii nauchnyi tsentr RAN*, 2012, 125 p.

6. Radchenko V.P., Saushkin M.N. A phenomenological method of calculating the residual stresses and plastic deformations in a hollow surface-hardened cylindrical sample. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 2013, vol. 77, no. 1, pp. 102-108. DOI: 10.1016/j.jappmathmech.2013.04.013

7. Radchenko V.P., Kirpichev V.A., Lunin V.V. Otsenka vliyaniya poverkhnostnogo uprochneniya na predel vynoslivosti detaley razlichnogo diametra v usloviyakh kontsentratsii napryazheniy [The estimation of surface hardening influence on the endurance limit of cylindrical parts of various diameters under stress concentration conditions]. *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*, 2015, no. 1 (45), pp. 168-177.

8. Vakulyuk V.S., Sazanov V.P., Pavlov V.F., Shadrin V.K. Otsenka vliyaniya gidrodobestruynoy obrabotki na mnogotsiklovuyu ustalost' tsilindricheskikh detaley iz splava D16T po pervonachal'nym deformatsiyam obraztsa-svidetelya [Hydroblasting influence on polycyclic fatigue of cylindrical parts made of D16T alloy using reference specimen initial deformations evaluation]. *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*, 2014, no. 2 (42), pp. 87-93.

9. Radchenko V.P., Kurov A.Yu. Vliyaniye anizotropii poverkhnostnogo plasticheskogo uprochneniya na formirovaniye ostatochnykh napryazheniy v tsilindricheskikh detalyakh s nadrezami polukruglogo profilya [Effect of anisotropy of surface plastic hardening on formation of residual stresses in cylindrical samples with semicircular notch]. *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ. Ser. Fiz.-Mat. Nauki = J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. & Math. Sci.*, 2016, vol. 20, no. 4, pp. 675-690. DOI: 10.14498/vsgtu1513.

10. Krutsilo V.G. Issledovaniye vliyaniya ostatochnykh napryazheniy i deformatsionnogo uprochneniya v poverkhnostnom sloye detaley na ustalostnyuyu prochnost' [Investigation of the effect of residual stresses and strain hardening in the surface layer of parts on fatigue strength]. *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*, 2006, no. 41, pp. 127-130.

11. 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.

12. Polyak M.S. Tekhnologiya uprochneniya. Tekhnologicheskiye metody uprochneniya. V 2-kh tomakh [Hardening

Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. – 2011. – № 3 (31). – С. 122–128.

43. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.

technology. Technological hardening methods. In 2 volumes]. *Moscow, Mashinostroyeniye*, 1995, vol. 2, 688 p.

13. Smelyanskiy V.M. Mekhanika uprochneniya detaley poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniyem [Mechanics of hardening of parts by surface plastic deformation]. *Moscow, Mashinostroyeniye*, 2002, 299 p.

14. Kryukov A.A. Tekhnologiya uprochneniya dlinnoymernykh tsilindricheskikh izdeliy sovmestnym rastyazheniyem i reversivnym krucheniyem [Technology of hardening of long cylindrical products by joint tension and reversing torsion]. *Metallrobrabotka*, 2015, no. 3 (87), pp. 11-17.

15. Kryukov A.A., Kalugin V.E., Sirotenko L.D. Increasing Corrosion-Fatigue Strength of Long Cylindrical Products as a Result of Preliminary Strengthening by Joint Stretching and Twisting. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences* [Electronic resource], 2016, Vol.7, Iss.3, pp. 2434-2447. – Mode of access: [http://rjpbcs.com/pdf/2016_7\(3\)/\[298\].pdf](http://rjpbcs.com/pdf/2016_7(3)/[298].pdf).

16. Wasserman N.N., Semenov V.V., Kalugin V.E., Nadymov N.P. Tekhnologiya vosstanovleniya pryamolineynosti i uprochneniya nasosnykh shtang [Technology to restore straightness and hardening of pump rods]. *Nauka proizvodstvu, Moscow*, 2000, no. 5, pp. 49-50.

17. Nadymov A.N., Stolbov V.Yu., Trusov P.V. Matematicheskoye modelirovaniye protsessa vosstanovleniya nasosnykh shtang [Mathematical modeling of the recovery process of pump rods]. *Sibirskiy zhurnal industrial'noy matematiki – Journal of Applied and Industrial Mathematics*, 2002, vol. 5, no. 1(9), pp. 120-126.

18. Struzhanov V.V., Prosviryakov E.Yu. Rastyazheniye s krucheniyem. Soobshcheniye 1. Svoystva materiala [Tension with torsion. Part 1. Material properties]. *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ. Ser. Fiz.-Mat. Nauki = J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. & Math. Sci.*, 2008, vol. 16, no. 1, pp. 36-44. DOI: 10.14498/vsgtu570.

19. Struzhanov V.V., Privalova V.V. Chislennyi raschot predel'nykh znacheniy parametrov upravleniya v zadache o rastyazhenii s krucheniyem spetsial'nogo obraztsa v odnoy sterzhnevoy sisteme [Numerical calculation for limit values of control parameters in the problem about extension with torsion for special sample in the framed structure]. *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ. Ser. Fiz.-Mat. Nauki = J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. & Math. Sci.*, 2011, vol. 23, no. 2, pp. 46-52. DOI: 10.14498/vsgtu908.

20. Vildeman V.E., Tretyakov M.P. Material Testing by Plotting Total Deformation Curves. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2013, vol. 42, no. 2, pp. 166-170.

21. Tretyakov M.P., Vildeman V.E. Tests in tension-torsion conditions with descending sections of strain curve construction. *Frattura ed Integrita Strutturale*, 2013, Vol. 24. – pp. 96-101.

22. Vildeman V.E., Lomakin E.V., Tretyakova T.V., Tretyakov M.P. Development of Inhomogeneous Fields under Post-critical Deformation of Steel Specimens in Extension. *Mechanics of Solids*, 2016, vol. 51, no. 5, pp. 612-618.

23. Supercritical Deformation and Fracture of Bodies with Concentrators under Plane Stress State Conditions. *Mechanics of Solids*, 2017, vol. 52, no. 5, pp. 488-494.

24. Bazhenov V.G., Zefirov S.V., Kramarev L.N., Pavlenkova Ye.V. Modelling of the deformation processes and the localization of plastic deformations in the torsion-tension of solids of revolution. *Journal Of Applied Mathematics And Mechanics*, 2008, vol. 72, iss. 2, pp. 226–232. DOI: 10.1016/j.jappmathmech.2008.04.001
25. Bazhenov V.G., Zhegalov D.V., Pavlenkova Ye.V. Numerical and experimental study of elastoplastic tension-torsion processes in axisymmetric bodies under large deformations. *Mechanics Of Solids*, 2011, vol.46, no.2, pp. 204-212. DOI: 10.3103/S0025654411020087
26. Bazhenov V.G., Kazakov D.A. et al. Chislennoye i eksperimental'noye issledovaniye uprugoplasticheskikh protsessov rastyazheniya-krucheniya tsilindricheskikh obraztsov iz stali 09G2S pri bol'shikh deformatsiyakh [Numerical and experimental study of elastoplastic tension–torsion processes of cylindrical specimens from steel 09G2S under large deformation]. *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*, 2017, vol. 4-2 (324), pp. 76-82.
27. Bazhenov V.G., Kazakov D.A., Nagornykh E.V., Osetrov D.L., Ryabov A.A. Experimental and theoretical study of large deformations of cylindrical samples from steel 09G2S with stress concentrators under tension-torsion loading to failure. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2018, no. 4, pp. 69-81. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.4.06
28. Konovalov A. V. Torsion of cylindrical rods and pipes with large plastic strains, *Mechanics of Solids*, 2001, vol. 36, no.3, pp. 86-94.
29. Li Jing et al. A new multiaxial fatigue damage model for various metallic materials under the combination of tension and torsion loadings. *International Journal of Fatigue*, 2009, vol. 31, pp. 776–781.
30. Starzynski Grzegorz. Modeling and experimental verification of simultaneous tension and torsion in a cylindrical element with a surface layer. *International Journal of Fatigue*, 2010, vol. 32, pp. 1255–1264.
31. Akhtar S. Khan, Xu Chen, Mohammad Abdel-Karim. Cyclic multiaxial and shear finite deformation response of OFHC: Part I, experimental results. *International Journal of Plasticity*, 2007, vol. 23, pp. 1285–1306.
32. Chen X., Jiao R. Modified kinematic hardening rule for multiaxial ratcheting prediction. *International Journal of Plasticity*, 2004, vol. 20, pp. 871–898.
33. Nouailhas Dominique, Cailletaud Georges. Tension-torsion behavior of single-crystal superalloys: experiment and finite element analysis. *International Journal of Plasticity*, 1995, vol. 11 (4), pp. 451–470.
34. Bocher L. et al. Mechanical and microstructural investigations of an austenitic stainless steel under non-proportional loadings in tension–torsion–internal and external pressure. *International Journal of Plasticity*, 2001, vol. 17, pp. 1491–1530.
35. Corona E. et al. On the performance of kinematic hardening rules in prediction a class of biaxial ratcheting histories. *International Journal of Plasticity*, 1996, vol. 12 (1), pp. 117–145.
36. Portier L. et al. Ratcheting under tension-torsion loadings: experiments and modeling. *International Journal of Plasticity*, 2000, vol. 16, pp. 303–335.
37. Takahashi H., Fujiwara K., Nakagawa T. Multiple-slip work-hardening model in crystals with application to torsion-tension behaviors of aluminium tubes. *International Journal of Plasticity*, 1998, vol. 14 (6), pp. 489–509.
38. Močilnik V. et al. The influence of constant axial compression pre-stress on the fatigue failure of torsion loaded tube springs. *Engineering Fracture Mechanics*, 2010, vol. 77, pp. 3132–3142.
39. Xu Chen, Rong Jiao, Kwang Soo Kim. On the Ohno–Wang kinematic hardening rules for multiaxial ratcheting modeling of medium carbon steel. *International Journal of Plasticity*, 2005, vol. 21, pp. 161–184.
40. Wasserman N.N., Wildemann V.E., Kryukov A.A., Tretyakov M.P. Issledovaniye zakonomernostey uprugoplasticheskogo deformirovaniya stali 15KH2GMF pri slozhnom napryazhennom sostoyanii [Investigation of the elastoplastic deformation laws of steel 15Cr2MnMoV on a complex stress state]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2010, no. 2, pp. 34-47.
41. Wasserman N.N., Kalugin V.E., Kryukov A.A., Tretyakov M.P. Issledovaniye povedeniya konstruktsionnoy stali pri prostykh vidakh nagruzheniya [Investigation of the behavior of structural steel with simple types of loading]. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2012, no. 1 (14), pp. 41-50.
42. Kryukov A.A., Kalugin V.E., Wasserman N.N. Modelirovaniye uprugoplasticheskogo deformirovaniya konstruktsionnoy stali pri slozhnom napryazhennom sostoyanii [Modeling of elastoplastic deformation of structural steel under complex stress state]. *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*, 2011, no. 3 (31), pp. 122-128.
43. Malinin N.N. Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti [Applied theory of plasticity and creep]. *Moscow, Mashinostroyeniye*, 1975, 400 p.