

Механика деформируемого твёрдого тела



УДК 539.376:539.4.014.13

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В УПРОЧНЕННЫХ ПОЛЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦАХ ИЗ СПЛАВА Д16Т ПРИ ОСЕВОМ РАСТЯЖЕНИИ В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ

*В. П. Радченко*¹, *В. А. Кирпичев*²,
*В. В. Лунин*¹, *А. П. Филатов*², *А. П. Морозов*¹

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

² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Россия, 443086, Самара, Московское ш., 34.

Аннотация

Экспериментально исследовано влияние растягивающей осевой нагрузки на релаксацию остаточных напряжений в поверхностно упрочненных полых цилиндрических образцах из алюминиевого сплава Д16Т при температуре 125 °С. Упрочнение выполнено пневмодробеструйной обработкой поверхности дробью. Описаны установки для испытаний и методика эксперимента. Получены экспериментальные кривые ползучести упрочненных образцов при осевых нагрузках 353, 385, 406.2 и 420 МПа при длительности испытаний 100–160 часов. Методом колец и полосок определены поля осевых и окружных остаточных напряжений после процесса упрочнения и после ползучести при заданных температурно-силовых условиях нагружения. Установлено, что по сравнению со случаем термоэкспозиции (температурная выдержка без нагрузки) под действием растягивающей нагрузки $\bar{\sigma}$ происходит существенное качественное и количественное изменение остаточных напряжений. Термоэкспозиция практически не влияет на процесс релаксации остаточных напряже-

© 2016 Самарский государственный технический университет.

Образец для цитирования

Радченко В. П., Кирпичев В. А., Лунин В. В., Филатов А. П., Морозов А. П. Экспериментальное исследование кинетики остаточных напряжений в упрочненных полых цилиндрических образцах из сплава Д16Т при осевом растяжении в условиях ползучести // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2016. Т. 20, № 2. С. 290–305. doi: [10.14498/vsgtu1468](http://dx.doi.org/10.14498/vsgtu1468).

Сведения об авторах

Владимир Павлович Радченко (д.ф.-м.н., проф.; radch@samgtu.ru; автор, ведущий переписку), заведующий кафедрой, каф. прикладной математики и информатики.

Виктор Алексеевич Кирпичев (д.т.н., проф.; sopromat@ssau.ru), профессор, каф. сопротивления материалов.

Валентин Валериевич Лунин (luloon@mail.ru), каф. прикладной математики и информатики.

Анатолий Петрович Филатов (к.т.н., доц.), доцент, каф. сопротивления материалов.

Андрей Павлович Морозов (andre15@inbox.ru), аспирант, каф. прикладной математики и информатики.

ний, а приложение нагрузки привело к существенной релаксации остаточных напряжений и изменению их характера распределения: окружное и осевое остаточные напряжения эволюционируют от сжимающих до растягивающих при росте осевой растягивающей нагрузки. Происходит изменение глубины залегания остаточных напряжений с увеличением растягивающей нагрузки с величины 600 мкм в исходном состоянии после пневмодробеструйной обработки до величины 250–300 мкм после ползучести при заданных нагрузках. Отмечено, что с точки зрения инженерных приложений выявленные закономерности изменения остаточных напряжений в упрочненных образцах из сплава Д16Т необходимо учитывать при прогнозировании характеристик сопротивления усталости поверхностно упрочненных деталей из этого сплава, работающих при повышенных температурах.

Ключевые слова: полый цилиндр, поверхностное пластическое упрочнение, остаточные напряжения, ползучесть, осевая нагрузка, релаксация остаточных напряжений.

Введение. Одной из важных проблем механики упрочненных конструкций является исследование влияния температурно-силовых режимов нагружения на релаксацию остаточных напряжений в упрочненных деталях вследствие ползучести, в том числе для элементов конструкций в машиностроении и авиадвигателестроении, что подтверждается большим числом публикаций в этой области. Соответствующие экспериментальные исследования по влиянию температурно-силовых режимов нагружения на релаксацию остаточных напряжений можно найти, например, в работах отечественных ученых [1–12], при этом в большинстве работ экспериментальные исследования выполнены в области термоэкспозиции (температурная выдержка без нагрузки) для сплошных цилиндрических или плоских образцов, упрочненных дробью.

Большое внимание этой проблеме уделяется и зарубежными учеными. Например, в работе [13] анализируются эксперименты для упрочненных дробью образцов из сплава на никелевой основе при выдержке от 10 до 100 часов при температурах 600 и 650 °С и отмечается, что максимальная скорость релаксации остаточных напряжений наблюдается на поверхности. В работе [14] авторы исследовали релаксацию остаточных напряжений в образцах из жаропрочного никелевого сплава IN100 после упрочнения дробью в условиях длительной термоэкспозиции при температуре 600 °С; авторы отмечают снижение величины сжимающих напряжений при сохранении характера их распределения. Аналогичные исследования выполнены в работах [15–18].

К сожалению, во всех указанных работах не представлены теоретические методы, позволяющие описать релаксацию остаточных напряжений, за исключением публикации [4], в которой экспериментально и теоретически исследован процесс релаксации остаточных напряжений в упрочненных пневмодробеструйной обработкой сплошных цилиндрических образцах из сплава ЖС6КП при температуре 800 °С при различных значениях растягивающей осевой нагрузки.

Первые теоретические попытки оценки релаксации остаточных напряжений предприняты в работах [3, 8], однако авторы использовали простейшую одноосную модель ползучести, а цилиндрический образец представили в виде кольцевых (стержневых) элементов, что никак не отражает существа этой задачи. Строгое решение соответствующей краевой задачи было дано для

сплошного цилиндра в условиях одноосного растяжения в работах [4, 19], а в [20] представлена методика оценки релаксации остаточных напряжений в цилиндрических образцах для трех видов напряженного состояния: растяжения, кручения, растяжения и кручения. Однако обобщить методы работ [4, 19, 20] на другие конструктивные элементы в настоящее время не удастся. В связи с этим развиваются идеи работ [21, 22], где предложен приближенный метод решения задачи расчета остаточных напряжений на основании декомпозиции детали на «тело» и тонкий (порядка 200–400 мкм) упрочненный слой, который считается «наклеенным» на поверхность тела и деформирующимся вместе с ним в режиме «жесткого» нагружения. Такой подход позволил расчетным путем оценить релаксацию остаточных напряжений в условиях ползучести в упрочненном слое отверстия диска газотурбинного двигателя [23], вращающейся лопатки [24], в концентраторе напряжений типа круговой выточки в растягиваемом цилиндрическом образце [25], однако экспериментальной проверки этого подхода не было выполнено просто в силу отсутствия соответствующих экспериментов. Следует отметить, что такого рода экспериментальные исследования требуют больших материальных и временных затрат в связи с фактором времени в теориях ползучести и крайне сложной и трудоемкой методикой определения полей остаточных напряжений в упрочненном образце, например, методом колец и полосок для цилиндрических образцов [2, 26–28].

Таким образом, из вышеизложенного анализа следует, что экспериментальные исследования по релаксации остаточных напряжений выполнены лишь для условий термоэкспозиции образцов, влияние силовых нагрузок на кинетику полей остаточных напряжений вследствие ползучести практически не исследовано (за исключением работы [4], в которой выполнены исследования по влиянию растягивающей нагрузки на процесс релаксации остаточных напряжений в упрочненных сплошных цилиндрических образцах). Поэтому целью данной работы является экспериментальное исследование влияния растягивающей нагрузки на релаксацию остаточных напряжений в полых цилиндрических образцах из алюминиевого сплава Д16Т при температуре 125 °С, при которой существенной является деформация ползучести.

1. Экспериментальное исследование ползучести поверхностно упрочненных образцов из сплава Д16Т при осевом растяжении. Учитывая техническую сложность и длительность испытаний на ползучесть, отдельно неупрочненные образцы для фиксации реологической деформации не испытывались, а исследования на ползучесть цилиндрических образцов производились в состоянии упрочнения, поскольку упрочненный слой является тонким и мало влияет на жесткость образца. Поэтому следует ожидать, что ползучесть упрочненного и неупрочненного образцов в осевом направлении будет практически одинакова. В связи с этим в одном эксперименте можно снять не только экспериментальные данные по ползучести материала, по которым можно построить соответствующую реологическую модель, но и определялись поля остаточных напряжений в упрочненном слое после проведения испытаний на ползучесть.

Для проведения испытаний на ползучесть при повышенной температуре ($T = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$) были изготовлены цилиндрические образцы из алюминиевого сплава Д16Т, размеры и геометрия которых представлены на рис. 1. Меха-

нические характеристики сплава Д16Т при нормальной (комнатной) температуре следующие:

$\sigma_{0.2}$ (технический предел текучести)	451 МПа;
σ_B (временной предел сопротивления)	618 МПа;
S_k (истинное напряжение разрыва)	684 МПа;
δ (относительное удлинение при разрыве)	11.9 %;
ψ (относительное сужение при разрыве)	13.3 %.

Образцы упрочнялись на пневмодробеструйной установке кафедры сопротивления материалов Самарского университета (см. фотографию на рис. 2). Упрочнение осуществлялось стальными шариками диаметром 1.5–2.5 мм в течение 10 мин при давлении воздуха 0.28 МПа.

Для проведения испытаний на ползучесть была изготовлена установка, принципиальная схема которой изображена на рис. 3. На станине 1 установлено коромысло 6 с соотношением плеч $l_1/l_2 = 41.486$. На конце большего плеча l_1 крепится расчетная нагрузка 5, на малом плече устанавливается исследуемый образец 2. Для обеспечения соосности прикладываемой к образцу нагрузки крепление нижнего конца образца к станине осуществляется через стальной шарик. Образец помещается внутри печи 3. Температура в рабочей зоне образца регистрируется термосопротивлением (терморезистром) и поддерживается с помощью блока терморегулирования 4.

Блок терморегулирования, электрическая схема которого изображена на рис. 4, изготовлен специально под задачи настоящего исследования. Его основу составляет двухканальный микропроцессорный измеритель-регулятор, предназначенный совместно с первичными преобразователями (датчиками) для измерения температуры, значения которой внешним датчиком преобразуется в сигналы постоянного тока. В качестве внешнего датчика используется терморезистор, подключенный по трехпроводной схеме. Такая схема позволяет компенсировать сопротивление соединительных проводов. Измеритель-регулятор запрограммирован на температуру $125 \pm 2^\circ\text{C}$.

Известно, что деформация ползучести имеет существенный разброс не только для различных испытываемых образцов в однотипных условиях, но и в пределах одного образца по пространственной координате. В методе колец и полосок, основы которого заложены в [26, 27], а детальное его описание — в [2, 28], используемого в дальнейшем авторами данной статьи для определения распределения полей остаточных напряжений, кольца вырезаются из втулок, получаемых расточкой соответствующего полого цилиндрического образца. Поэтому деформационные характеристики конкретного кольца будут зависеть от места вырезки. В силу неравномерности распределения деформации ползучести по длине образца при обработке экспериментальных данных по определению остаточных напряжений этот эффект приведет к разбросу экспериментальных эпюр остаточных напряжений. Чтобы количественно определить разброс деформации ползучести по длине образца, перед началом испытаний на рабочей части цилиндрического образца вдоль его образующей с помощью стальной иглы наносились метки (производилось кернение), по которым производили измерения длины участков перед испытаниями и в процессе испытаний через различные промежутки времени. Для измерения удлинений участков метки нумеровались цифрами 1, 2, ..., 10 и определялись длины участков 1–2, 1–3, ..., 1–10 между первой и второй,

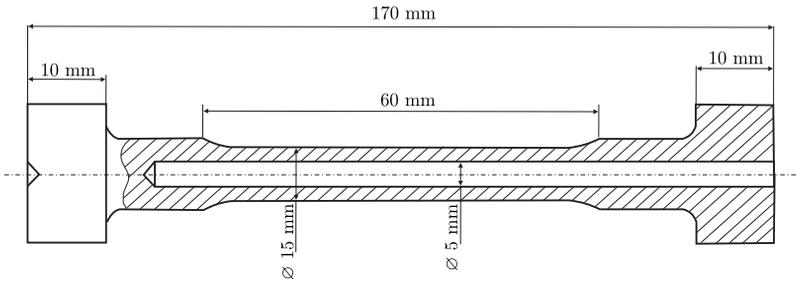


Рис. 1. Цилиндрические образцы для испытаний на ползучесть
 [Figure 1. Cylindrical specimens for creep testing]



Рис. 2. Установка для пневмодробеструйной обработки без крышки (фото из [29, с. 51])
 [Figure 2. A compressed air-shot peening machine without a cover (the picture from [29, p. 51])]

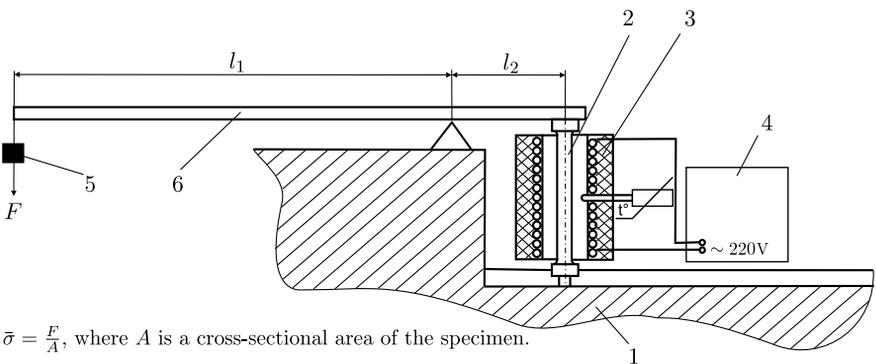


Рис. 3. Принципиальная схема установки для испытаний на ползучесть: 1 — основание, 2 — образец, 3 — печь, 4 — блок терморегулирования, 5 — нагрузка, 6 — коромысло
 [Figure 3. A schematic diagram of the installation for creep testing: 1 — bed; 2 — specimen; 3 — furnace (heaters); 4 — temperature controller; 5 — weights; 6 — crossbeam]

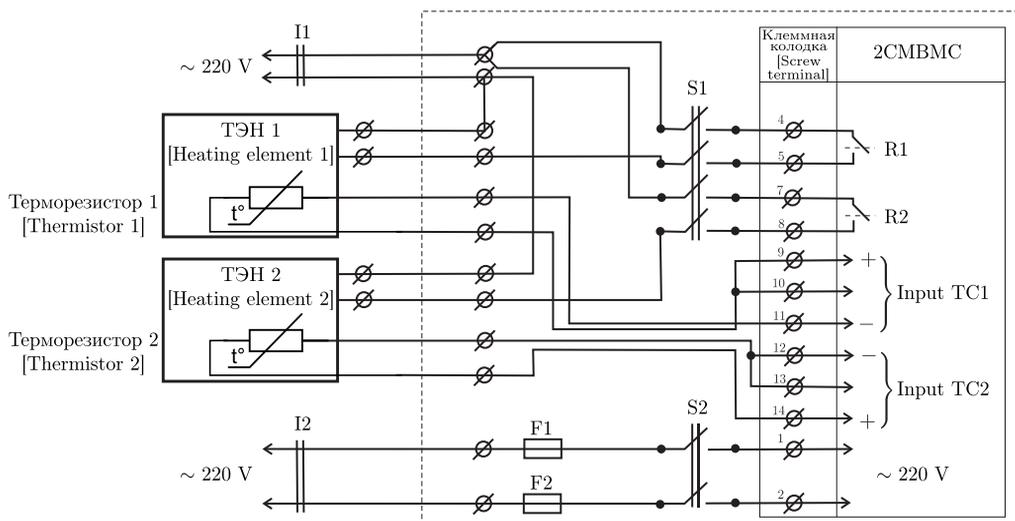


Рис. 4. Электрическая схема блока терморегулирования: ТЭН1, ТЭН2 — печь для нагревания образца; I1 — сетевой ввод для тэнов; I2 — сетевой ввод общий; F1, F2 — предохранители; S1 — включатель сетевой тэнов; S2 — включатель сетевой общий; R1, R2 — контакты реле включения тэнов; TC1, TC2 — контакты подключения термопар; 2СМВМС — двухканальный микропроцессорный измеритель-регулятор

[Figure 4. An electrical scheme of the temperature controller: I1 — power input for heaters; I2 — general power input; F1, F2 — fuses (electrical); S1 — power switch for heaters; S2 — general power switch; R1, R2 — power relay for heaters; TC1, TC2 — thermocouple contacts; 2СМВМС — dual-channel microprocessor-based meter/controller]

первой и третьей, ..., первой и десятой метками в определенные моменты времени. В эти моменты времени снималась нагрузка, образец охлаждался и производились измерения длины каждого из участков на инструментальном микроскопе УИМ-23. Затем образец вновь помещался в испытательную машину, нагревался до температуры 125 °С, к нему прикладывалась нагрузка и процесс ползучести продолжался. Такая схема испытаний не приводит к погрешностям, поскольку деформация ползучести сплава Д16Т полностью необратима и при разгрузках наблюдается только упругая деформация (обратная ползучесть отсутствует). Всего было испытано 4 образца при различных значениях осевых растягивающих напряжений $\bar{\sigma}$ при температуре 125 °С. Рабочая часть первых трех образцов разбивалась метками на девять участков (10 меток), а четвертого образца — на семь участков (8 меток).

Образец № 1 испытывался на ползучесть при растягивающем напряжении 353 МПа, образец № 2 — при 385 МПа, образец № 3 — при 406.2 МПа, образец № 4 — при 420 МПа.

Длительность испытаний: образец № 1 — 100 часов, образец № 2 — 162 часа, образец № 3 — 166 часов, образец № 4 — 83 часа.

По результатам измерения длин локальных участков каждого из образцов вычислялась деформация ползучести p_i каждого участка по формуле

$$p_i = \Delta l_i / l_{0i},$$

где Δl_i — абсолютное изменение i -того участка образца в процессе ползучести, l_{0i} — первоначальная длина этого же участка, полученная перед испы-

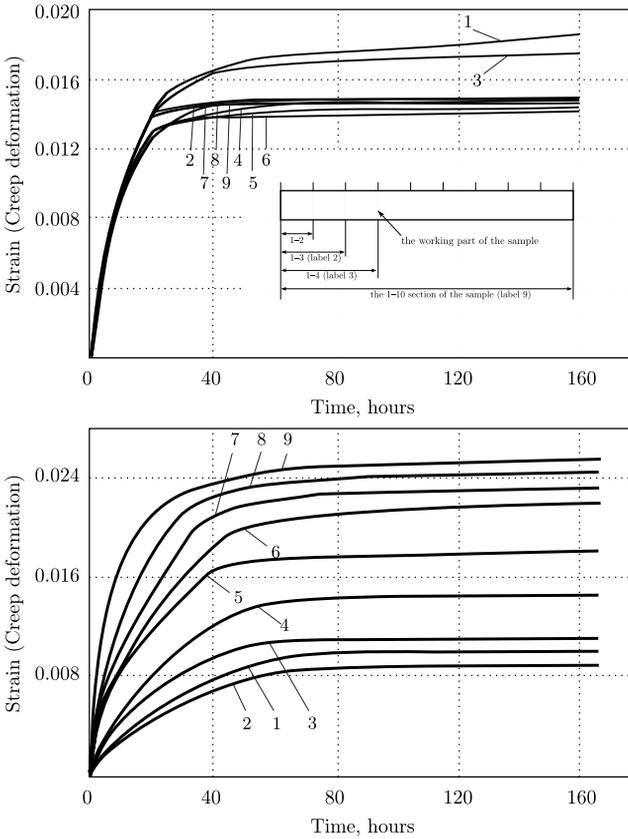


Рис. 5. Кривые ползучести участков образцов № 2 (сверху) и № 3 (снизу) из сплава Д16Т при температуре 125 °С: 1 — участок 1–2; 2 — участок 1–3; 3 — участок 1–4; 4 — участок 1–5; 5 — участок 1–6; 6 — участок 1–7; 7 — участок 1–8; 8 — участок 1–9; 9 — участок 1–10

[Figure 5. Creep curves of sections of the samples number 2 (top) and number 3 (bottom) (made by the D16T alloy) at a temperature of 125 °C: 1 — the 1–2 section, 2 — the 1–3 section, 3 — the 1–4 section, 4 — the 1–5 section, 5 — the 1–6 section, 6 — the 1–7 section, 7 — the 1–8 section, 8 — the 1–9 section, 9 — the 1–10 section of the sample]

таниями на ползучесть при $t = 0$. По этим данным построены экспериментальные кривые ползучести локальных участков образцов из сплава Д16Т при температуре 125 °С. На рис. 5 в качестве примера приведены кривые ползучести для различных участков образцов № 2 (растягивающая нагрузка 385 МПа) и № 3 (растягивающая нагрузка 406.2 МПа). На рис. 6 представлены среднеинтегральные (по всей рабочей части образца) экспериментальные значения деформации ползучести всех четырех образцов при действии соответствующих осевых напряжений.

Анализ кривых ползучести локальных участков образцов показал, что по длине образцов наблюдается крайне неравномерное распределение деформации ползучести. Разброс значений деформации ползучести на исследуемых участках в пределах одного образца составляет от 16% (образец № 4) до 100% (образец № 3, рис. 5, внизу). У образца № 2 кривые ползучести на участках 1–2 и 1–4 (рис. 5, вверху) примерно на 25% выше, чем на других участках, большое рассеяние значений деформации ползучести по длине наблюдалось

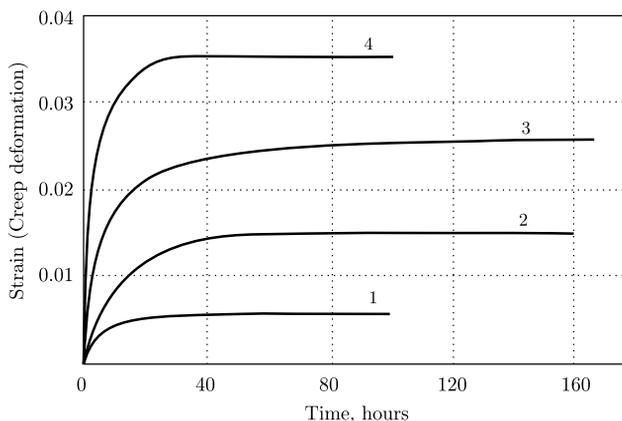


Рис. 6. Среднеинтегральные экспериментальные кривые ползучести образцов сплава Д16Т при температуре 125 °С: образец № 1 ($\bar{\sigma} = 353$ МПа); образец № 2 ($\bar{\sigma} = 385$ МПа); образец № 3 ($\bar{\sigma} = 406.2$ МПа); образец № 4 ($\bar{\sigma} = 420$ МПа)

[Figure 6. Mean experimental creep curves (throughout the working part of the sample) of the samples (made by the D16T alloy) at a temperature of 125 °C: 1 — the sample number 1 ($\bar{\sigma} = 353$ MPa); 2 — the sample number 2 ($\bar{\sigma} = 385$ MPa); 3 — the sample number 3 ($\bar{\sigma} = 406.2$ MPa); 4 — the sample number 4 ($\bar{\sigma} = 420$ MPa)]

и у образца № 1.

Отмеченный разброс данных по ползучести в пределах одного образца является источником разброса экспериментальных данных остаточных напряжений в указанных образцах, так как в методе колец и полосок [2, 26–28] результаты существенно зависят от деформации кольца, которая, в свою очередь, зависит от места вырезки кольца из соответствующей втулки.

Отметим также, что распределение деформации ползучести по пространственной координате на локальных участках образца (см. рис. 5) свидетельствует о том, что деформация ползучести может быть локализована лишь в нескольких локальных зонах, например на участках 0–1 и 2–3 для образца № 2 (рис. 5, вверху), в то время как на остальных участках деформация ползучести практически не наблюдается. Поэтому нужно очень осторожно относиться к процедуре осреднения деформации ползучести по пространственной координате при построении моделей микродеформирования материалов.

2. Результаты исследования остаточных напряжений в упрочненных полых цилиндрических образцах после испытаний на ползучесть. Остаточные напряжения в упрочненных пневмодробеструйной обработкой (ПДО) образцах из алюминиевого сплава Д16Т диаметром 15 мм с отверстием 5 мм (рис. 1) после испытаний на ползучесть под действием растягивающей нагрузки $\bar{\sigma}$ при температуре 125 °С определялись методом колец и полосок, описанным подробно в [2, 26–28]. Распределения осевых σ_z и окружных σ_θ остаточных напряжений по толщине a упрочненного поверхностного слоя всех образцов представлены на рис. 7. Для сравнения на рис. 8 представлены исходные эпюры осевых остаточных напряжений σ_z после процедуры упрочнения и после термоэкспозиции (температурной выдержки без нагрузки при температуре 125 °С в течение 100 часов), которые приведены (для образцов той же геометрии) в работе [2, с. 98, рис. 6.8, 6.9].

Из представленных на рис. 7 распределений осевых σ_z и окружных σ_θ

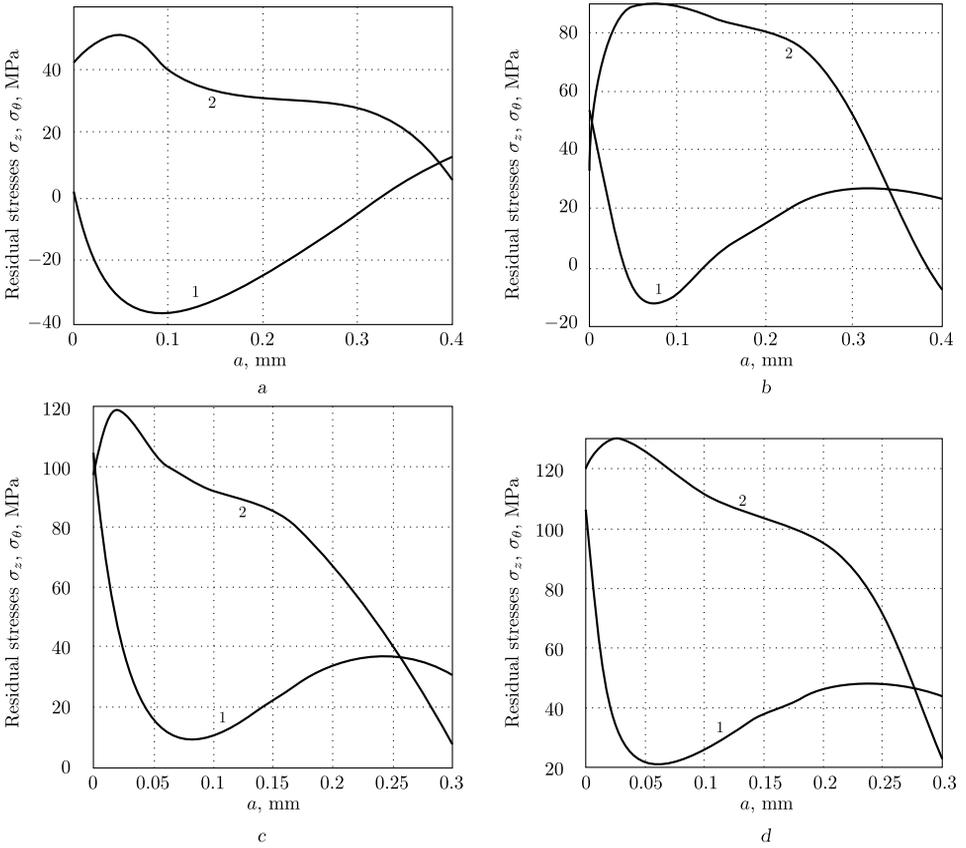


Рис. 7. Экспериментальные значения осевых σ_z (1) и окружных σ_θ (2) остаточных напряжений в цилиндрических образцах из сплава Д16Т после испытаний на ползучесть: а – образец № 1 ($\bar{\sigma} = 353$ МПа); б – образец № 2 ($\bar{\sigma} = 385$ МПа); в – образец № 3 ($\bar{\sigma} = 406.2$ МПа); д – образец № 4 ($\bar{\sigma} = 420$ МПа)

[Figure 7. The axial residual stress diagrams (1), and the circumferential residual stress (2) for the smooth cylindrical sample made by the D16T after creep tests: а – the sample number 1 ($\bar{\sigma} = 353$ МПа); б – the sample number 2 ($\bar{\sigma} = 385$ МПа); в – the sample number 3 ($\bar{\sigma} = 406.2$ МПа); д – the sample number 4 ($\bar{\sigma} = 420$ МПа)]

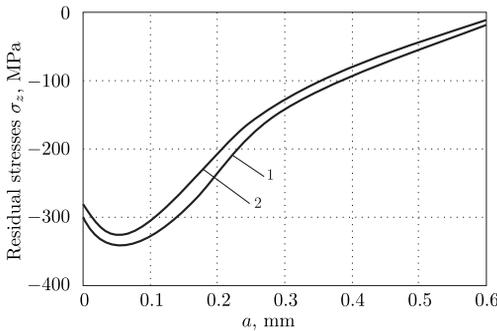


Рис. 8. Экспериментальные значения осевых остаточных напряжений в гладком цилиндрическом образце [2] из сплава Д16Т после ПДО (1), ПДО и термоэкспозиции при температуре 125 °С (2)

[Figure 8. The axial residual stress diagrams for the smooth cylindrical sample made by the D16T alloy after air shot-peening (1), and after shot-peening and thermal exposure at a temperature of 125 °С (2). Data from the book [2]]

остаточных напряжений после ползучести под действием растягивающей осевой нагрузки следует, что по сравнению с исходным распределением после ПДО (кривая 1 на рис. 8) и после ПДО и термоэкспозиции (кривая 2 на рис. 8) происходит существенное качественное и количественное изменение остаточных напряжений. Если термоэкспозиция практически не повлияла на процесс релаксации остаточных напряжений, что следует из сравнения кривых 1 и 2 на рис. 8, то приложение нагрузки привело к существенной релаксации остаточных напряжений и изменению характера их распределения. Максимальная величина сжимающих осевых σ_z остаточных напряжений при действующем на образец растягивающем напряжении $\bar{\sigma} = 353$ МПа уменьшается до -37 МПа. При увеличении действующего на образец напряжения до 420 МПа осевые σ_z остаточные напряжения становятся растягивающими, достигая на поверхности 107 МПа.

Максимальные окружные σ_θ остаточные напряжения при $\bar{\sigma} = 353$ МПа уже становятся растягивающими ($\sigma_\theta = 52$ МПа), а с увеличением напряжения до 420 МПа растягивающие окружные σ_θ напряжения увеличиваются в подповерхностном слое до 130 МПа.

Глубина залегания остаточных напряжений с увеличением растягивающего усилия в образце от 353 МПа до 420 МПа уменьшается с $a \approx 0.6$ мм после ПДО до $a \approx 0.25-0.3$ мм после ползучести.

Анализ зависимостей остаточных напряжений в упрочненном слое образцов после ползучести под нагрузкой свидетельствует, что их величина отличается почти на порядок от соответствующих величин сразу после процедуры упрочнения дробью. Поэтому с учетом разброса данных деформации ползучести по длине образцов, который естественным образом влияет и на определение остаточных напряжений, можно считать (в первом приближении), что приложенная осевая нагрузка в диапазоне от 353 до 420 МПа приводит к практически полной релаксации остаточных напряжений в полых упрочненных цилиндрических образцах из сплава Д16Т при температуре 125°C в течение 100–160 часов.

Полученные экспериментальные результаты являются важными с прикладной точки зрения. Во-первых, они характеризуют степень устойчивости наведенных остаточных напряжений в цилиндрических полых изделиях из сплава Д16Т к температурным и осевым силовым нагрузкам, а, например, трубы из этого сплава широко применяются в нефтяной промышленности. Во-вторых, в существующих теориях прогнозирования характеристик сопротивления усталости поверхностно упрочненных деталей основополагающей концепцией является факт прямого влияния наведенных остаточных напряжений на приращение предела сопротивления усталости элементов конструкций [2], поэтому учет кинетики остаточных напряжений в условиях высокотемпературной ползучести является одним из инструментов уточнения соответствующих расчетных методик.

3. Выводы. Результаты выполненных исследований позволяют сформулировать следующие выводы.

1. Проведены экспериментальные исследования ползучести упрочненных ПДО полых цилиндрических образцов из сплава Д16Т под действием растягивающих нагрузок при температуре 125°C для определения устойчивости остаточных напряжений к высокотемпературным дефор-

- мациям и оценки их кинетики во времени.
2. Установлено, что в результате ползучести при температуре 125 °С под действием осевой растягивающей нагрузки $\bar{\sigma}$ в диапазоне от 353 до 420 МПа распределение экспериментальных осевых σ_z и окружных σ_θ остаточных напряжений в упрочненных ПДО образцах из сплава Д16Т претерпевает значительное изменение, перераспределяясь от сжимающих к растягивающим остаточным напряжениям.
 3. Анализ экспериментальных зависимостей остаточных напряжений с точки зрения инженерных приложений позволяет сделать вывод о практически полной релаксации остаточных напряжений в упрочненных цилиндрических образцах из сплава Д16Т в условиях одноосного растяжения вследствие ползучести при заданных температурно-силовых условиях нагружения.
 4. Выявленные закономерности изменения остаточных напряжений в упрочненных ПДО образцах из сплава Д16Т необходимо учитывать, в частности, при прогнозировании характеристик сопротивления усталости поверхностно упрочненных деталей из этого сплава, работающих при повышенных температурах.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках базовой части государственного задания ФГБОУ ВПО «СамГТУ» (код проекта 1151) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-01-00699-а).

ORCID

Владимир Павлович Радченко: <http://orcid.org/0000-0003-4168-9660>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кравченко Б. А., Круцило В. Г., Гутман Г. Н. *Термопластическое упрочнение — резерв повышения прочности и надежности деталей машин*. Самара: СамГТУ, 2000. 216 с.
2. Павлов В. Ф., Кирпичев В. А., Вакулюк В. С. *Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочненных деталей по остаточным напряжениям*. Самара: СНИЦ РАН, 2012. 125 с.
3. Колотникова О. В. Эффективность упрочнения методами поверхностного пластического деформирования деталей, работающих при повышенных температурах // *Проблемы прочности*, 1983. № 2. С. 112–114.
4. Радченко В. П., Кочеров Е. П., Саушкин М. Н., Смыслов В. А. Экспериментальное и теоретическое исследование влияния растягивающей нагрузки на релаксацию остаточных напряжений в упрочненном цилиндрическом образце в условиях ползучести // *ПМТФ*, 2015. Т. 56, № 2. С. 169–177. doi: [10.15372/PMTF20150217](https://doi.org/10.15372/PMTF20150217).
5. Биргер И. А. *Остаточные напряжения*. М.: Машгиз, 1963. 262 с.
6. Егоров В. И., Митряев К. Ф., Крамаровский Б. И. Релаксация остаточных напряжений в жаропрочных сталях и сплавах / *Исследования обрабатываемости жаропрочных и титановых сплавов*, Вып. 5. Куйбышев: Куйбышев. авиац. ин-т, 1978. С. 90–96.
7. Папшева Н. Д. Влияние температуры на устойчивость эффекта упрочнения / *Поверхностное упрочнение деталей машин и инструментов*. Куйбышев: КПТИ, 1976. С. 68–71.
8. Цейтлин В. И., Колотникова О. В. Релаксация остаточных напряжений в деталях ГТД в процессе эксплуатации // *Проблемы прочности*, 1980. № 8. С. 46–48.
9. Маталин Л. А. *Технологические методы повышения долговечности деталей машин*. Киев: Техника, 1971. 144 с.
10. Гецов Л. Б. *Детали газовых турбин (материал и прочность)*. Л.: Машиностроение, 1982. 296 с.

11. Гринченко И. Г. *Упрочнение деталей из жаропрочных и титановых сплавов*. М.: Машиностроение, 1971. 120 с.
12. Радченко В. П., Кирпичев В. А., Лунин В. А. Влияние термоэкспозиции на остаточные напряжения образцов из сплава ЭП742 после ультразвукового упрочнения // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Техн. науки*, 2012. № 3(35). С. 147–154.
13. Khadraoui M., Cao W., Castex L. Experimental investigations and modelling of relaxation behaviour of shot peening residual stresses at high temperature for nickel base superalloys // *Materials Science and Technology*, 1997. vol. 13, no. 4. pp. 360–367. doi: [10.1179/mst.1997.13.4.360](https://doi.org/10.1179/mst.1997.13.4.360).
14. Buchanan D. J., John R. Relaxation of shot-peened residual stresses under creep loading // *Scripta Materialia*, 2008. vol. 59, no. 3. pp. 286–289. doi: [10.1016/j.scriptamat.2008.03.021](https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2008.03.021).
15. Xie L., Jiang C., Ji V. Thermal relaxation of residual stresses in shot peened surface layer of (TiB + TiC)/Ti-6Al-4V composite at elevated temperatures // *Materials Science and Engineering: A*, 2011. vol. 528, no. 21. pp. 6478–6489. doi: [10.1016/j.msea.2011.04.075](https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.04.075).
16. Foss B. J., Gray S., Hardy M. C., Stekovic S., McPhail D. S., Shollock B. A. Analysis of shot-peening and residual stress relaxation in the nickel-based superalloy RR1000 // *Acta Materialia*, 2013. vol. 61, no. 7. pp. 2548–2559. doi: [10.1016/j.actamat.2013.01.031](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.01.031).
17. Prev y P., Hornbach D., Mason P. Thermal residual stress relaxation and distortion in surface enhanced gas turbine engine components / *Proceedings of the 17th Heat Treating Society Conference and Exposition and the 1st International Induction Heat Treating Symposium*; D. L. Milam et.al. ASM, Materials Park, OH, 1998. pp. 3–12, <http://www.lambdatechs.com/documents/219.pdf>.
18. Hoffmann J., Scholtes B., V hringer O., Macherauch E. Thermal Relaxation of Shot Peening Residual Stresses in the Differently Heat Treated Plain Carbon Steel Ck 45 / *Proceedings of the International Conference Shot Peening*. vol. 3; eds. H. Wohlfahrt, R. Kopp, O. V hringer. Oberursel: DGM Informationsgesellschaft, 1987. pp. 239–246, <http://www.shotpeener.com/library/pdf/1987102.pdf>.
19. Радченко В. П., Саушкин М. Н. Прямой метод решения краевой задачи релаксации остаточных напряжений в упрочненном изделии цилиндрической формы при ползучести // *ПМТФ*, 2009. Т. 50, № 6. С. 90–99.
20. Радченко В. П., Цветков В. В. Кинетика напряженно-деформированного состояния в поверхностно упрочненном цилиндрическом образце при сложном напряженном состоянии в условиях ползучести // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2014. № 1(34). С. 93–108. doi: [10.14498/vsgtu1313](https://doi.org/10.14498/vsgtu1313).
21. Радченко В. П., Саушкин М. Н. *Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочненных конструкциях*. М.: Машиностроение-1, 2005. 226 с.
22. Радченко В. П., Саушкин М. Н. Математические модели восстановления и релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненном слое цилиндрических элементов конструкций при ползучести // *Изв. вузов. Машиностроение*, 2004. № 11. С. 3–17.
23. Саушкин М. Н., Афанасьева О. С. Исследование процесса релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненном слое отверстия диска газотурбинного двигателя // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2007. № 2(15). С. 51–59. doi: [10.14498/vsgtu530](https://doi.org/10.14498/vsgtu530).
24. Саушкин М. Н., Афанасьева О. С., Просвиркина Е. А. Оценка релаксации остаточных напряжений в упрочненной вращающейся лопатке при ползучести // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2007. № 1(14). С. 62–70. doi: [10.14498/vsgtu489](https://doi.org/10.14498/vsgtu489).
25. Кирпичев В. А., Саушкин М. Н., Афанасьева О. С., Смыслов В. А. Прогнозирование предела выносливости упрочненных деталей при повышенной температуре // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2010. № 1(20). С. 218–221. doi: [10.14498/vsgtu789](https://doi.org/10.14498/vsgtu789).
26. Иванов С. И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок / *Остаточные напряжения*, Вып. 53. Куйбышев: Куйбышев. авиац. ин-т, 1974. С. 32–42.

27. Иванов С. И. Определение остаточных напряжений в поверхностном слое цилиндра / *Вопросы прочности элементов авиационных конструкций*, Вып. 48. Куйбышев: Куйбышев. авиац. ин-т, 1971. С. 153–168.
28. 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 // *Вестн. ПНИПУ. Механика*, 2015. № 1. С. 130–147. doi: [10.15593/perm.mech/2015.1.09](https://doi.org/10.15593/perm.mech/2015.1.09).
29. Лунин В. В. *Методы расчета напряженно-деформированного состояния и предела выносливости упрочненных цилиндрических деталей с концентраторами напряжений при ползучести*: Диссертация ... кандидата технических наук: 01.02.04 / [Место защиты: Пермский национальный исследовательский политехнический университет]. Пермь, 2015. 173 с.

Поступила в редакцию 18/I/2016;
в окончательном варианте — 12/IV/2016;
принята в печать — 27/V/2016.

Vestn. Samar. Gos. Techn. Un-ta. Ser. Fiz.-mat. nauki
[J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. & Math. Sci.], 2016, vol. 20, no. 2, pp. 290–305

ISSN: 2310-7081 (online), 1991-8615 (print) doi: <http://dx.doi.org/10.14498/vsgtu1468>

MSC: 74A10

EXPERIMENTAL RESEARCH OF RESIDUAL STRESSES KINETICS IN THE HARDENED HOLLOW CYLINDRICAL SPECIMENS OF D16T ALLOY AT THE AXIAL TENSION UNDER THE CREEP CONDITIONS

V. P. Radchenko¹, V. A. Kirpichev²,
V. V. Lunin¹, A. P. Filatov², A. P. Morozov¹

¹ Samara State Technical University,
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation.

² Samara National Research University,
34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russian Federation.

Abstract

We study experimentally the effect of the axial tension load on the residual stresses relaxation in the surface-hardened hollow cylindrical specimens of D16T aluminium alloy at a temperature of 125 °C. The surface is hardened

© 2016 Samara State Technical University.

Please cite this article in press as:

Radchenko V. P., Kirpichev V. A., Lunin V. V., Filatov A. P., Morozov A. P. Experimental research of residual stresses kinetics in the hardened hollow cylindrical specimens of D16T alloy at the axial tension under the creep conditions, *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ., Ser. Fiz.-Mat. Nauki* [J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. & Math. Sci.], 2016, vol. 20, no. 2, pp. 290–305. doi: [10.14498/vsgtu1468](https://doi.org/10.14498/vsgtu1468). (In Russian)

Authors Details:

Vladimir P. Radchenko (Dr. Phys. & Math. Sci.; radch@samgtu.ru), Corresponding Author, Head of Dept., Dept. of Applied Mathematics & Computer Science.

Viktor A. Kirpichev (Dr. Techn. Sci.; sopromat@ssau.ru), Professor, Dept. of Strength of Materials.

Valentin V. Lunin (luloon@mail.ru), Dept. of Applied Mathematics & Computer Science.

Anatoly P. Filatov (Cand. Techn. Sci.), Associate Professor, Dept. of Strength of Materials.

Andrey P. Morozov (andre15@inbox.ru), Postgraduate Student, Dept. of Applied Mathematics & Computer Science.

by the air shot-peening. We describe the testing machine and the routine of experiment. The experimental curves of hardened specimens creep under the axial loads 353, 385, 406.2, 420 MPa and test duration of 100–160 hours are obtained. The axial and circumferential residual stresses after the hardening and the creep at the given temperature and load conditions are constructed by the method of circles and strips. The significant qualitative and quantitative changes of residual stresses take place under the tension load $\bar{\sigma}$ in comparison with the thermal exposure (heat exposure with no load). The relaxation of residual stresses is essentially independent of the thermal exposure. In contrast, the loading leads to the significant residual stresses relaxation and to the changes in the distribution type. The axial and circumferential residual stresses evolve from the compressive to the tension with the increase of the axial tension load. Also the depth of residual stresses location changes with the increase of the axial tension load from the 600 microns in the original state after the air shot-peening to the 250–300 microns after the creep under the given loading. It is very important for the engineering applications to take into account the described behaviours of the residual stresses in the hardened specimens of D16T alloy when predicting the characteristics of endurance of the surface-hardened details operate under the elevated temperatures.

Keywords: hollow cylinder, surface plastic hardening, residual stresses, creep, axial loading, relaxation of residual stresses.

Acknowledgments. This work was supported by the Russian Ministry of Education and Science within the base portion of the state task to Samara State Technical University (project no. 1151) and supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 13–01–00699-a).

ORCID

Vladimir P. Radchenko: <http://orcid.org/0000-0003-4168-9660>

REFERENCES

1. Kravchenko B. A., Krut'silo V. G., Gutman G. N. *Termoplasticheskoe uprochnenie — rezerv povysheniya prochnosti i nadezhnosti detaley mashin* [A Thermoplastic Hardening as a Reserve of the Increase of Strength and Reliability of Machine Parts]. Samara, Samara State Technical University, 2000, 216 pp. (In Russian)
2. Pavlov V. F., Kirpichev V. A., Ivanov V. B. *Ostatochnyye napryazheniya i soprotivlenie ustalosti uprochnennykh detaley s kontsentratorami napryazheniy* [Residual Stresses and Fatigue Resistance of Hardened Parts with Stress Concentrators]. Samara, Samara Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 2008, 64 pp. (In Russian)
3. Kolotnikova O. V. Effectiveness of hardening by methods of plastic surface deformation of components operating at high temperatures, *Strength of Material*, 1983, vol. 15, no. 2, pp. 292–295. doi: [10.1007/BF01523487](https://doi.org/10.1007/BF01523487).
4. Radchenko V. P., Kocherov E. P., Saushkin M. N., Smyslov V. A. Experimental and theoretical investigation of the effect of tensile load on relaxation of residual stresses in a hardened cylindrical specimen under creep conditions, *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2015, vol. 56, no. 2, pp. 169–177. doi: [10.1134/S0021894415020170](https://doi.org/10.1134/S0021894415020170).
5. Birger I. A. *Ostatochnyye napryazheniya* [Residual stresses]. Moscow, Mashgiz, 1963, 262 pp. (In Russian)
6. Egorov V. I., Mitriaev K. F., Kramarovskii B. I. Relaxation of residual stresses in heat-resistant steels and alloys, *Issledovaniia obrabatyvaemosti zharoprochnykh i titanovykh spлавov* [Researchs of the machinability of heat-resistant and titanium alloys], Issue 5. Kuibyshev, Kuibyshev Aviation Institute, 1978, pp. 90–96 (In Russian).
7. Papsheva N. D. The influence of temperature on the hardening effect stability, *Poverkhnostnoe uprochnenie detalei mashin i instrumentov* [Surface hardening of machine parts and tools]. Kuibyshev, Kuibyshev Polytechnic Institute, 1976, pp. 68–71 (In Russian).

8. Tseitlin V. I., Kolotnikova O. V. Relaxation of residual stresses in gas-turbine engine parts, *Strength of Materials*, 1980, vol. 12, no. 8, pp. 982–984. doi: [10.1007/bf00770521](https://doi.org/10.1007/bf00770521).
9. Matalin L. A. *Tekhnologicheskie metody povysheniia dolgovechnosti detalei mashin* [Technological methods to improve the durability of machine parts]. Kiev, Tekhnika, 1971, 144 pp. (In Russian)
10. Getsov L. B. *Detali gazovykh turbin (material i prochnost')* [Details of gas turbines (material and strength)]. Leningrad, Mashinostroenie, 1982, 296 pp. (In Russian)
11. Grinchenko I. G. *Uprochnenie detalei iz zharoprochnykh i titanovykh splavov* [The hardening of parts of heat-resistant and titanium alloys]. Moscow, Mashinostroenie, 1971, 120 pp. (In Russian)
12. Radchenko V. P., Kirpichev V. A., Lunin V. A. Influence of thermoexposition on residual stresses of specimens from EP742 alloy after the ultrasonic hardening, *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ. Ser. Tech. Nauki*, 2012, no. 3(35), pp. 147–154 (In Russian).
13. Khadraoui M., Cao W., Castex L. Experimental investigations and modelling of relaxation behaviour of shot peening residual stresses at high temperature for nickel base superalloys, *Materials Science and Technology*, 1997, vol. 13, no. 4, pp. 360–367. doi: [10.1179/mst.1997.13.4.360](https://doi.org/10.1179/mst.1997.13.4.360).
14. Buchanan D. J., John R. Relaxation of shot-peened residual stresses under creep loading, *Scripta Materialia*, 2008, vol. 59, no. 3, pp. 286–289. doi: [10.1016/j.scriptamat.2008.03.021](https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2008.03.021).
15. Xie L., Jiang C., Ji V. Thermal relaxation of residual stresses in shot peened surface layer of (TiB + TiC)/Ti-6Al-4V composite at elevated temperatures, *Materials Science and Engineering: A*, 2011, vol. 528, no. 21, pp. 6478–6489. doi: [10.1016/j.msea.2011.04.075](https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.04.075).
16. Foss B. J., Gray S., Hardy M. C., Stekovic S., McPhail D. S., Shollock B. A. Analysis of shot-peening and residual stress relaxation in the nickel-based superalloy RR1000, *Acta Materialia*, 2013, vol. 61, no. 7, pp. 2548–2559. doi: [10.1016/j.actamat.2013.01.031](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.01.031).
17. Prev y P., Hornbach D., Mason P. Thermal residual stress relaxation and distortion in surface enhanced gas turbine engine components, *Proceedings of the 17th Heat Treating Society Conference and Exposition and the 1st International Induction Heat Treating Symposium*; D. L. Milam et.al. ASM, Materials Park, OH, 1998, pp. 3–12, <http://www.lambdatechs.com/documents/219.pdf>.
18. Hoffmann J., Scholtes B., V hringer O., Macherauch E. Thermal Relaxation of Shot Peening Residual Stresses in the Differently Heat Treated Plain Carbon Steel Ck 45, *Proceedings of the International Conference Shot Peening*, vol. 3; eds. H. Wohlfahrt, R. Kopp, O. V hringer. Oberursel, DGM Informationsgesellschaft, 1987, pp. 239–246, <http://www.shotpeener.com/library/pdf/1987102.pdf>.
19. Radchenko V. P., Saushkin M. N. Direct method of solving the boundary-value problem of relaxation of residual stresses in a hardened cylindrical specimen under creep conditions, *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2009, vol. 50, no. 6, pp. 989–997. doi: [10.1007/s10808-009-0133-8](https://doi.org/10.1007/s10808-009-0133-8).
20. Radchenko V. P., Tsvetkov V. V. Kinetics of the stress-strain state of surface hardened cylindrical specimen under complex stress state of creep, *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ. Ser. Fiz.-Mat. Nauki* [J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. & Math. Sci.], 2014, no. 1(32), pp. 93–108 (In Russian). doi: [10.14498/vsgtu1313](https://doi.org/10.14498/vsgtu1313).
21. Radchenko V. P., Saushkin M. N. *Polzuchest' i relaksatsiya ostatochnykh napryazheniy v uprochnonnykh konstruktsiyakh* [Creep and Relaxation of Residual Stresses in Hardened Structures]. Moscow, Mashinostroenie-1, 2005, 226 pp. (In Russian)
22. Radchenko V. P., Saushkin M. N. Mathematical models of recovery and relaxation of residual stresses in the surface-hardened of cylindrical structural elements under creeping, *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Mashinostr.*, 2004, no. 11, pp. 3–17 (In Russian).
23. Saushkin M. N., Afanas'eva O. S. Investigation of relaxation of residual stresses in the surface-hardened disk hole of gas-turbine, *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ. Ser. Fiz.-Mat. Nauki* [J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. & Math. Sci.], 2007, no. 2(15), pp. 51–59 (In Russian). doi: [10.14498/vsgtu530](https://doi.org/10.14498/vsgtu530).

24. Saushkin M. N., Afanas'eva O. S., Prosvirkina E. A. Assessment of relaxation of residual stresses in hardened spinning blade under creep conditions, *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ. Ser. Fiz.-Mat. Nauki* [J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. & Math. Sci.], 2007, no. 1(14), pp. 62–70 (In Russian). doi: [10.14498/vsgtu489](https://doi.org/10.14498/vsgtu489).
25. Kirpichev V. A., Saushkin M. N., Afanas'eva O. S., Smyslov V. A. Prediction of fatigue point for hardened parts under high temperature, *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ. Ser. Fiz.-Mat. Nauki* [J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. & Math. Sci.], 2010, no. 1(20), pp. 218–221 (In Russian). doi: [10.14498/vsgtu789](https://doi.org/10.14498/vsgtu789).
26. Ivanov S. I. On determination of residual stresses in a cylinder by the method of rings and strips, *Ostatochnye napriazheniia* [Residual Stresses], Issue 53. Kuibyshev, Kuibyshev Aviation Institute, 1974, pp. 32–42 (In Russian).
27. Ivanov S. I. Determination of residual stresses in the surface layer of the cylinder, *Voprosy prochnosti elementov aviatsionnykh konstruktsii* [Issues of strength of aircraft structural elements], Issue 48. Kuibyshev, Kuibyshev Aviation Institute, 1971, pp. 153–168 (In Russian).
28. Radchenko V. P., Pavlov V. P., 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 (In Russian). doi: [10.15593/perm.mech/2015.1.09](https://doi.org/10.15593/perm.mech/2015.1.09).
29. Lunin V. V. *Methods for calculating the stress-strain state and the fatigue limit for hardened cylindrical parts with stress concentrators during creep*, The thesis for the Candidate Degree of Technical Sciences, Specialty 01.02.04. Perm, 2015, 173 pp. (In Russian)

Received 18/I/2016;
 received in revised form 12/IV/2016;
 accepted 27/V/2016.