



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2025. Т. 25, вып. 3. С. 391–405

Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics, 2025, vol. 25, iss. 3, pp. 391–405

<https://mmi.sgu.ru>

DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2025-25-3-391-405>

EDN: <https://elibrary.ru/MQEXGM>

Научная статья

УДК 539.376:621.787

Влияние геометрической формы надреза на релаксацию остаточных напряжений в поверхностно упрочненном цилиндре при термоэкспозиции

В. П. Радченко, В. Е. Глебов[✉]

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

Радченко Владимир Павлович, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой прикладной математики и информатики, radchenko.vp@samgtu.ru, ORCID: [0000-0003-4168-9660](https://orcid.org/0000-0003-4168-9660), SPIN: [1823-0796](https://spin.id.au/1823-0796), AuthorID: [113673](https://authorid.ru/113673)

Глебов Виктор Евгеньевич, аспирант, ассистент кафедры прикладной математики и информатики, glebov.ve@samgtu.ru, ORCID: [0000-0003-4841-9786](https://orcid.org/0000-0003-4841-9786), SPIN: [8660-9105](https://spin.id.au/8660-9105), AuthorID: [1142418](https://authorid.ru/1142418)

Аннотация. Предложен метод расчета релаксации остаточных напряжений при высокотемпературной ползучести после опережающего поверхностного пластического деформирования сплошного цилиндра с надрезами квадратного и V-образного профилей. Выполнена серия параметрических расчетов для цилиндрических образцов из сплава ЭИ698 длиной 20 мм и радиусом 3.76 мм при различных геометрических параметрах надрезов: глубине {0.1; 0.3} мм для квадратного надреза и глубине {0.1; 0.3} мм при углах раскрытия {1°, 5°, 15°} для V-образного надреза. Установлено, что расчет полей остаточных напряжений после нанесения надрезов на упрочненный цилиндрический образец требует применения упругопластической постановки задачи. При моделировании релаксации остаточных напряжений при температуре 700 °С в течение 100 ч. использовался закон установившейся ползучести. Проведен параметрический анализ влияния геометрических характеристик надрезов на процесс релаксации напряжений. Результаты показывают, что после полного цикла нагружения «упрочняющая обработка при 20 °С — температурная нагрузка (нагрев) до 700 °С — ползучесть в течение 100 ч. при 700 °С — температурная разгрузка (охлаждение) до 20 °С», несмотря на релаксацию, сохраняются значительные величины сжимающих остаточных напряжений, что подтверждает эффективность поверхностного пластического упрочнения для деталей с исследуемыми типами надрезов в условиях высокотемпературной ползучести.

Ключевые слова: сплошной цилиндр, поверхностное пластическое упрочнение, надрезы квадратной и V-образной геометрической формы, остаточные напряжения, термоэкспозиция, высокотемпературная ползучесть, релаксация напряжений

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-29-00434, <https://rscf.ru/project/23-29-00434/>).

Для цитирования: Радченко В. П., Глебов В. Е. Влияние геометрической формы надреза на релаксацию остаточных напряжений в поверхностно упрочненном цилиндре при термоэкспозиции // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2025. Т. 25, вып. 3. С. 391–405. DOI: [10.18500/1816-9791-2025-25-3-391-405](https://doi.org/10.18500/1816-9791-2025-25-3-391-405), EDN: [MQEXGM](https://elibrary.ru/MQEXGM)

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)



Article

The effect of the geometric shape of an incision on the relaxation of residual stresses in a surface-hardened cylinder during thermal exposure

V. P. Radchenko, V. E. Glebov✉

Samara State Technical University, 244 Molodogvardeyskaya St., Samara 443100, Russia

Vladimir P. Radchenko, radchenko.vp@samgtu.ru, ORCID: 0000-0003-4168-9660, SPIN: 1823-0796, AuthorID: 113673

Victor E. Glebov, glebov.ve@samgtu.ru, ORCID: 000-0003-4841-9786, SPIN: 8660-9105, AuthorID: 1142418

Abstract. A computational method is proposed for predicting residual stress relaxation during high-temperature creep following prior surface plastic deformation of solid cylinders with square and V-shaped notches. A series of parametric simulations was performed for cylindrical specimens made of EI698 alloy (20 mm length, 3.76 mm radius) with various notch geometries: depths of {0.1;0.3} mm for square notches, and depths of {0.1;0.3} mm with opening angles of {1°, 5°, 15°} for V-notches. The study demonstrates that residual stress field calculations after notching a strengthened cylindrical specimen require an elastoplastic formulation. The steady-state creep law was employed to simulate residual stress relaxation at 700 °C over 100 hours. A parametric analysis of notch geometry effects on stress relaxation was conducted. Results indicate that after the complete loading cycle “hardening treatment at 20 °C — thermal loading (heating) to 700 °C — 100-hour creep at 700 °C — thermal unloading (cooling) to 20 °C”, despite relaxation, significant compressive residual stresses remain. This confirms the effectiveness of surface plastic strengthening for components with the investigated notch types under high-temperature creep conditions.

Keywords: solid cylinder, surface plastic deformation hardening, square and V-profile notches, residual stresses, thermal exposure, high-temperature creep, stress relaxation

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 23-29-00434, <https://rscf.ru/project/23-29-00434/>).

For citation: Radchenko V. P., Glebov V. E. The effect of the geometric shape of an incision on the relaxation of residual stresses in a surface-hardened cylinder during thermal exposure. *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*, 2025, vol. 25, iss. 3, pp. 391–405 (in Russian). DOI: 10.18500/1816-9791-2025-25-3-391-405, EDN: MQEXGM

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Актуальной проблемой современного машиностроения и аэрокосмической техники является повышение эксплуатационного ресурса и надежности конструктивных элементов. Одним из эффективных способов решения данной задачи в указанных отраслях промышленности выступает технология поверхностного пластического деформирования (ППД) [1–6]. Применение методов данного класса позволяет существенно улучшить прочностные характеристики, усталостную долговечность и трибологические свойства материалов, что в конечном итоге повышает надежность и срок службы конструкций [2, 3, 5, 7–20]. Наряду с традиционными методами ППД, в последние годы активно развиваются альтернативные технологии упрочнения, включая химико-термические методы [21, 22], кавитационную и лазерную обработку [14, 16], термопластическое упрочнение [23], а также комбинированные методики [16, 24, 25]. Физико-механическая сущность положительного эффекта ППД и родственных технологий заключается в формировании в поверхностном слое материала остаточных пластических деформаций, создающих поле сжимающих остаточных напряжений, которые препятствуют зарождению и развитию микроразрушений.



Многие конструкционные элементы, подвергнутые ППД, эксплуатируются в условиях повышенных температур, когда проявляются реологические свойства материала и развиваются процессы ползучести, приводящие к релаксации сжимающих остаточных напряжений. Данное явление подробно исследовано в работах [12, 20, 26–33], где решены задачи расчета релаксации напряжений для цилиндрических деталей при различных видах нагружения. Однако проблема релаксации напряжений в цилиндрических деталях с концентраторами напряжений (технологическими надрезами или эксплуатационными дефектами) остается недостаточно изученной, несмотря на ее существенное теоретическое и практическое значение. Исключение составляет исследование [34], в котором разработан метод расчета релаксации остаточных напряжений при ползучести для цилиндрической детали с надрезами полукруглого профиля после опережающего ППД, суть которого заключается в нанесении надрезов на уже упрочненный образец. Настоящая работа продолжает исследования в данном направлении и посвящена анализу релаксации остаточных напряжений при высокотемпературной экспозиции для цилиндров с надрезами квадратного и V-образного профиля.

1. Постановка задачи

Рассматривается цилиндрический образец, боковая поверхность которого подверглась процедуре опережающего поверхностного пластического деформирования (ОППД): сначала выполняется упрочняющая обработка, а затем на боковую поверхность цилиндра наносится круговой надрез (концентратор напряжений) квадратной или V-образной формы (рис. 1). Цель исследования — анализ релаксации полей остаточных напряжений при высокотемпературной ползучести в присутствии указанных концентраторов напряжений.

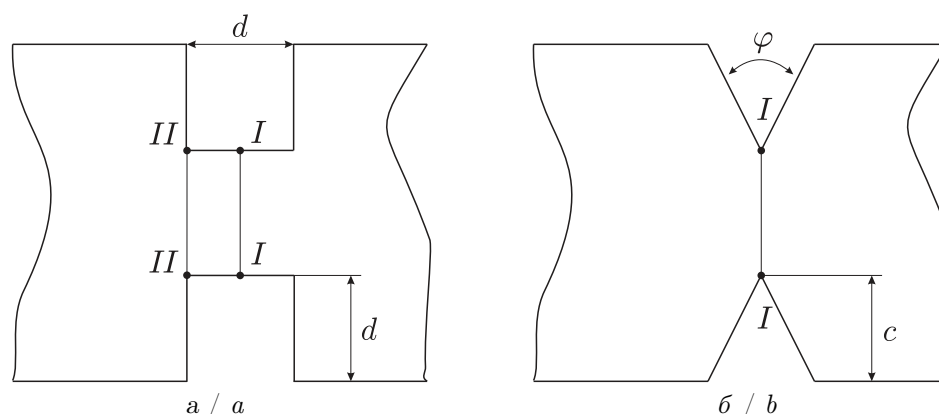


Рис. 1. Схематическое изображение профилей надрезов на поверхности цилиндра: а — квадратного; б — V-образного

Fig. 1. Schematic representation of the notch profiles on the cylinder surface: *a* is square; *b* is V-shaped

Вследствие физической нелинейности уравнений ползучести и геометрической нерегулярности задачи, обусловленной наличием концентраторов напряжений, решение осуществлялось численными методами. Исследование проводилось методом конечных элементов (МКЭ) для цилиндрического образца из сплава ЭИ698 со следующими параметрами.

Геометрические характеристики образца: длина $L = 20$ мм, радиус $a = 3.76$ мм.

Параметры надрезов квадратного профиля: глубина $d = \{0.1; 0.3\}$ мм.

Параметры надрезов V-образного профиля: глубина $c = \{0.1; 0.3\}$ мм, угол раскрытия $\varphi = \{1^\circ, 5^\circ, 15^\circ\}$, радиус скругления вершины 10 мкм.

Механические характеристики материала: модуль упругости $E_0 = 203$ ГПа при температуре $T_0 = 20^\circ\text{C}$, $E_1 = 152$ ГПа при $T_1 = 700^\circ\text{C}$; коэффициент Пуассона $\mu = 1/3$ (не зависит от температуры).

Условия нагружения: температура выдержки $T_1 = 700^\circ\text{C}$, длительность выдержки 100 ч.

2. Восстановление полей остаточного напряжения и пластических деформаций в цилиндрах с концентраторами напряжений после ОППД

Вначале рассмотрим метод реконструкции напряженно-деформированного состояния (НДС) после ППД в гладком цилиндре (без надрезов) при температуре $T_0 = 20^\circ\text{C}$. Используется феноменологический подход, описанный в работе [28], основанный на следующих соотношениях:

$$\sigma_\theta(r) = \sigma_0 - \sigma_1 \exp\left(-\frac{(a-r)^2}{b^2}\right), \quad (1)$$

$$\sigma_r(r) = \sigma_0 - \sigma_1 \frac{b\sqrt{\pi}}{2r} \left[\operatorname{erf}(a/b) - \operatorname{erf}\left(\frac{a-r}{b}\right) \right], \quad (2)$$

$$q_\theta(r) = \frac{1-2\mu}{E_0(1+\mu)r^{\frac{3}{1+\mu}}} \int_0^r z^{\frac{2-\mu}{1+\mu}} [\sigma_r(z) + 2\sigma_\theta(z)] dz - \frac{1}{E} [(1-\mu)\sigma_\theta(r) - \mu\sigma_r(r)], \quad (3)$$

$$q_z = q_\theta, \quad q_r = -2q_\theta, \quad (4)$$

$$\varepsilon_z^0 = \frac{2}{a^2} \int_0^a r \left\{ q_z(r) - \frac{\mu}{E_0} [\sigma_r(r) + \sigma_\theta(r)] \right\}, \quad (5)$$

$$\sigma_z(r) = E_0(\varepsilon_z^0 - q_z(r)) + \mu(\sigma_r(r) + \sigma_\theta(r)), \quad r \in [0, a]. \quad (6)$$

В уравнениях (1)–(6) приняты следующие обозначения: $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ — диагональные (нормальные) компоненты тензора остаточного напряжения (ОН); q_r, q_θ, q_z — соответствующие им диагональные компоненты тензора пластических деформаций (ПД). Экспериментальные исследования [35] подтверждают, что недиагональные компоненты тензора ОН на порядок меньше нормальных компонент и их влиянием можно пренебречь.

Для цилиндрического образца из сплава ЭИ698 с заданными геометрическими параметрами экспериментальная зависимость $\sigma_\theta(h) = \sigma_\theta(a-r)$ и ее аппроксимация по формуле (1) с параметрами $\sigma_0 = 11.6$ МПа, $\sigma_1 = 611.6$ МПа, $b = 0.08$ мм представлены на рис. 2. Остальные компоненты тензоров ОН и ПД определяются по формулам (2)–(6).

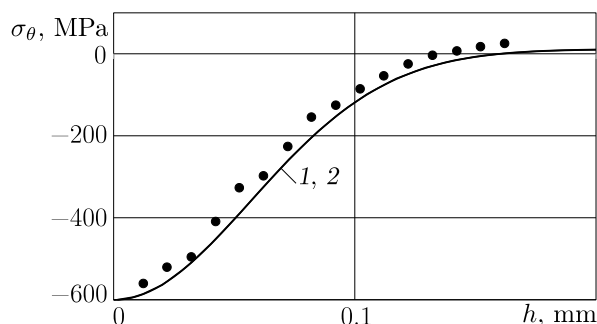


Рис. 2. Сравнение экспериментальных данных (точки-маркеры), аналитической аппроксимации по формуле (1) и результатов численного моделирования по МКЭ (сплошные линии 1, 2) для компоненты $\sigma_\theta(h)$ после процедуры упрочнения

Fig. 2. Comparison of experimental data (marker points), analytical approximation using formula (1) and results of numerical simulation using FEM (solid lines 1, 2) for the component $\sigma_\theta(h)$ after the hardening procedure

После реконструкции НДС по формулам (1)–(6) аналогичная задача решалась методом первоначальных деформаций, сводящим задачу реконструкции полей ОН и ПД к решению краевой задачи фиктивной термоупругости [36–38] или термоупругопластичности [39], численная реализация которых может быть выполнена методом конечных элементов в современных вычислительных пакетах (ANSYS, Abaqus, COMSOL и др.). Метод основан на аналогии между пластическими деформациями, определяемыми соотношениями (3) и (4), и температурными деформациями в заданном фиктивном температурном поле. Принимая равенство температурных и пластических деформаций, имеем

$$q_i(r) = \beta_i(T(r))(T(r) - T^*),$$

где $\beta_i(r)$ ($i = r, \theta, z$) — подлежащие определению коэффициенты температурного расширения, T^* — начальная температура, $T(r)$ — произвольно заданное температурное поле.



Данный подход позволяет свести обратную краевую задачу восстановления НДС по частично известным экспериментальным данным к корректной прямой задаче фиктивной термоупругости.

С одной стороны, применение данного подхода для гладкого образца позволяет подтвердить, что аналитическое решение, получаемое по формулам (1)–(6), соответствует численному конечно-элементному решению. Так, на рис. 2 представлено сравнение экспериментальных данных (маркеры), аналитической аппроксимации по формуле (1) (кривая 1) и результатов численного моделирования методом конечных элементов (кривая 2) для компоненты $\sigma_\theta(h)$ тензора ОН. Отметим, что получены практически неотличимые расчетные значения для всех компонент тензоров ОН и ПД, что подтверждает эквивалентность расчетных методик.

С другой стороны, применение метода первоначальных деформаций для гладкого образца служит необходимым этапом для решения задачи реконструкции НДС в образцах с концентраторами напряжений, сформированными в процессе ОППД. В данном контексте процедуру ОППД можно интерпретировать как удаление части материала в области надреза. При этом задача реконструкции НДС для образцов с надрезами сводится к решению аналогичной задачи (как для гладкого образца), но с модифицированной конечно-элементной сеткой, где исключена область надреза.

Численное решение задачи выполнялось с использованием осесимметричного элемента PLANE183 (пакет ANSYS), позволяющего учитывать термические, упругие и реологические свойства материала, включая пластичность и ползучесть. Граничные условия моделировали шарнирное закрепление торцов цилиндра, допускающее только радиальные перемещения.

Особое внимание при применении метода начальных деформаций уделялось построению расчетных сеток. Для гладких образцов в зоне сжатия (глубиной ~ 200 мкм), где градиенты компонент тензора остаточных напряжений достигают трех порядков, использовались конечные элементы с линейным размером 5–7 мкм. Для образцов с надрезами дополнительные зоны высокой концентрации напряжений локализованы в областях, удаленных от границы надреза на характерное расстояние (d для квадратного и s для V-образного профиля, см. рис. 1). В этих областях размер конечных элементов составлял 1–5 мкм.

На рис. 3 представлены распределения компонент $\sigma_r(h)$ и $\sigma_\theta(h)$ тензора остаточных напряжений в сечении II–II цилиндра с квадратным надрезом глубиной $d = \{0.1; 0.3\}$ мм, полученные в рамках термоупругой постановки задачи.

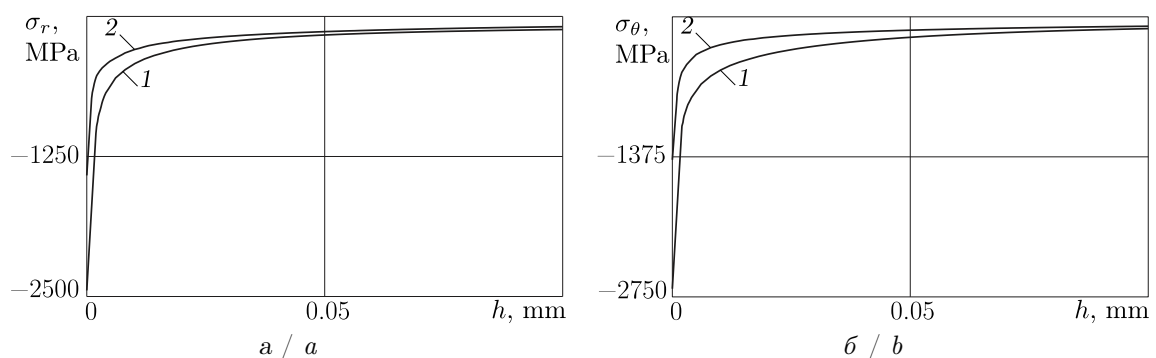


Рис. 3. Расчетные по МКЭ данные для компонент тензора ОН для цилиндра с квадратным надрезом в сечении II–II после упрочнения при $T = 20^\circ\text{C}$ в упругой постановке: a — для компоненты $\sigma_r(h)$; b — для компоненты $\sigma_\theta(h)$ (1 — $d = 0.1$ мм, 2 — $d = 0.3$ мм)

Fig. 3. FEM-calculated data for the components of the residual stress tensor for a cylinder with a square notch in section II–II after hardening at $T = 20^\circ\text{C}$ in the elastic formulation: a is for the component $\sigma_r(h)$; b is for the component $\sigma_\theta(h)$ (1 is for $d = 0.1$ mm, 2 is for $d = 0.3$ mm)

Аналогичные данные для компонент $\sigma_\theta(h)$ и $\sigma_z(h)$ в цилиндре с V-образным надрезом (глубина $c = 0.1$ мм при $\varphi = 1^\circ$ и $c = 0.3$ мм при $\varphi = 5^\circ$) приведены на рис. 4.

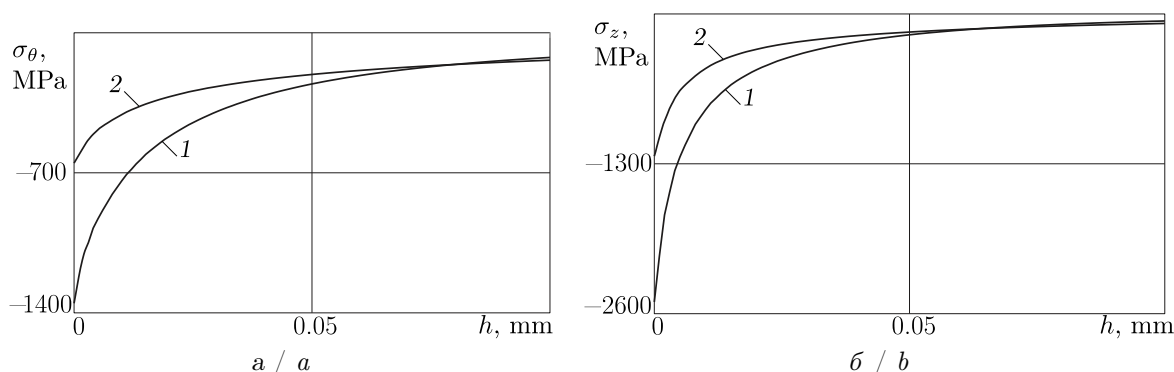


Рис. 4. Расчетные по МКЭ данные для компонент тензора ОН для цилиндра с V-образным надрезом в сечении $I-I$ после упрочнения при $T = 20^\circ\text{C}$ в упругой постановке: a — для компоненты $\sigma_r(h)$; b — для компоненты $\sigma_\theta(h)$ (1 — $c = 0.1$ мм, $\varphi = 1^\circ$; 2 — $c = 0.3$ мм, $\varphi = 5^\circ$)

Fig. 4. FEM-calculated data for the components of the residual stress tensor for a cylinder with a V-shaped notch in section $I-I$ after hardening at $T = 20^\circ\text{C}$ in the elastic formulation: a is for the component $\sigma_r(h)$; b is for the component $\sigma_\theta(h)$ (1 is for $c = 0.1$ mm, $\varphi = 1^\circ$; 2 is for $c = 0.3$ mm, $\varphi = 5^\circ$)

При этом для квадратного надреза принято $h = a - d - r$, а для V-образного — $h = a - c - r$. Анализ результатов показывает, что при значениях d и c , меньших толщины упрочненного слоя, в областях надрезов наблюдаются зоны аномально высокой концентрации напряжений (в углах для квадратного профиля и вершине для V-образного профиля).

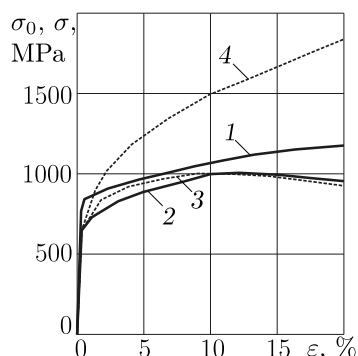


Рис. 5. Диаграммы упругопластического деформирования сплава ЭИ698: экспериментальные данные при $T = 20^\circ\text{C}$ (кривая 1) и $T = 700^\circ\text{C}$ (кривая 2); расчетные зависимости для номинального (кривая 3) и истинного (кривая 4) напряжений при $T = 700^\circ\text{C}$ [28]

Fig. 5. Elastoplastic deformation diagrams of EI698 alloy: experimental data at $T = 20^\circ\text{C}$ (curve 1) and $T = 700^\circ\text{C}$ (curve 2); calculated dependences for nominal (curve 3) and true (curve 4) stresses at $T = 700^\circ\text{C}$ [28]

Полученные значения напряжений (превышающие 1200 МПа — предел прочности сплава ЭИ698 при 20°C) являются физически нереализуемыми, что указывает на необходимость учета дополнительных пластических деформаций в зонах концентрации напряжений, возникающих при перераспределении НДС.

Анализ результатов, представленных на рис. 3 и 4, демонстрирует необходимость применения термоупругопластической постановки задачи. Для корректного моделирования использована диаграмма упругопластического деформирования сплава ЭИ698 при температуре 20°C из Справочника инженера¹, представленная на рис. 5.

На рис. 6 представлены распределения компонент $\sigma_\theta(h)$ и $\sigma_z(h)$ тензора ОН, полученные при реконструкции НДС после ОППД для цилиндра с квадратным надрезом ($d = 0.3$ мм, сечение $II-II$) и V-образным надрезом ($c = 0.1$ мм, $\varphi = 1^\circ$, сечение $I-I$) соответственно. Сравнение результатов упругой и упругопластической постановок задачи демонстрирует, что учет пластических деформаций приводит к физически обоснованным значениям остаточных напряжений.

Полученные данные использованы для сравнительного анализа эффективности поверхностного упрочнения в условиях температурной ползучести при следующем цикле термомеханического нагружения: «упрочняющая

¹Жаропрочные стали и сплавы // Справочник инженера — Inzhener-Info. URL: <https://inzhener-info.ru/razdely/materialy/zharoprochnye-stali-i-splavy.html> (дата обращения: 10.10.2024).



обработка при 20 °С — нагрев до 700 °С — релаксация напряжений в условиях ползучести в течение 100 ч. при 700 °С — охлаждение до 20 °С».

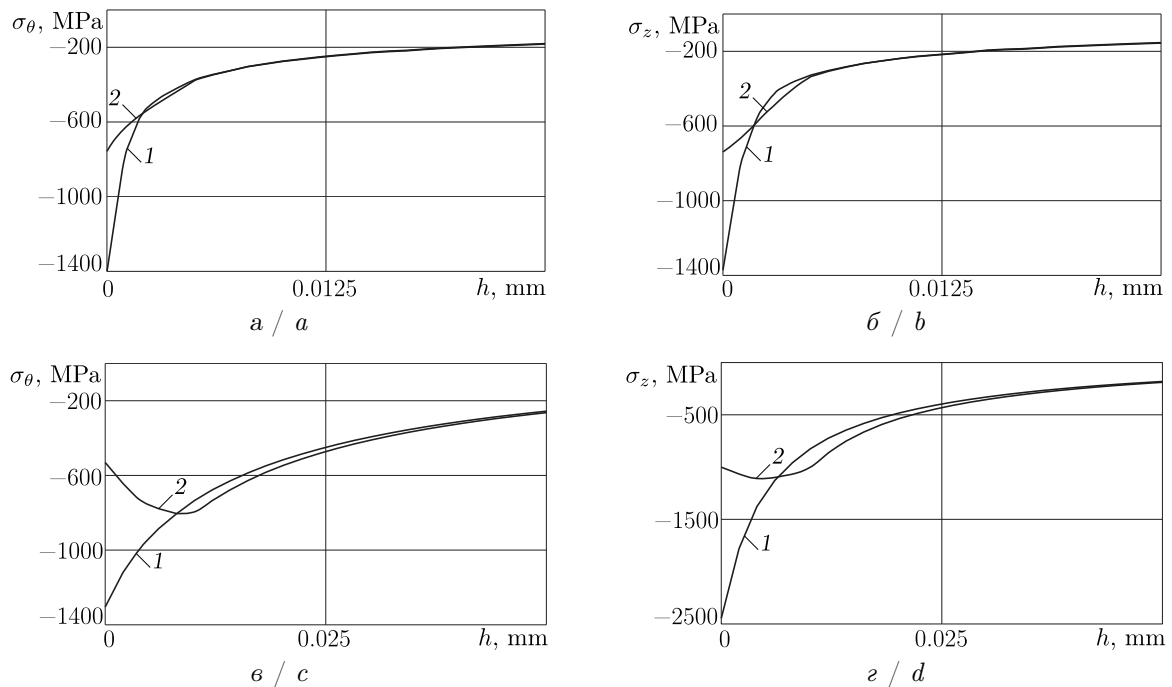


Рис. 6. Расчетные по МКЭ данные для компонент $\sigma_r(h)$ и $\sigma_\theta(h)$ тензора ОН: а, б — для цилиндра с квадратным надрезом при $d = 0.3$ мм в сечении II–II после упрочнения при $T = 20$ °С; в, г — для цилиндра с V-образным надрезом при $c = 0.1$ мм, $\varphi = 1^\circ$ в сечении I–I после упрочнения при $T = 20$ °С (1 — упругое решение, 2 — упругопластическое решение)

Fig. 6. FEM-calculated data for components $\sigma_r(h)$ and $\sigma_\theta(h)$ of the residual stress tensor: а and б are for a cylinder with square notch ($d = 0.3$ mm) at section II–II after hardening at $T = 20$ °С; в and г are for a cylinder with V-notch ($c = 0.1$ mm, $\varphi = 1^\circ$) at section I–I after hardening at $T = 20$ °С (1 represents the elastic solution, 2 represents the elastoplastic solution)

3. Метод решения задачи релаксации ОН в условиях ползучести при термоэкспозиции в цилиндрах с надрезами

При моделировании релаксации ОН в качестве начального НДС используются результаты решения задачи реконструкции полей ОН и ПД после упрочнения в упругопластической постановке при температуре 700 °С. Расчет выполняется в два этапа: сначала решается задача термоупругости для гладкого образца по формулам (1)–(6) с заменой модуля упругости E_0 на E_1 , соответствующий 700 °С, затем после нанесения надреза решается задача фиктивной термоупругопластичности для определения начального НДС в образце с концентратором напряжений.

Для корректного решения в ANSYS требуется использовать возрастающую диаграмму упругопластического деформирования при 700 °С. На рис. 5 представлены экспериментальная и расчетные диаграммы для сплава ЭИ698 [28, рис. 3.10] в координатах «номинальное напряжение σ_0 – деформация ε » и «истинное напряжение σ – деформация ε », при этом $\sigma = \sigma_0(1 + \omega)$, где ω — параметр поврежденности (работа истинного напряжения на пластической деформации). При решении задачи фиктивной термоупругопластичности применялась диаграмма для истинных напряжений (кривая 4 на рис. 5).

В качестве реологической модели используется теория установившейся ползучести (закон Нортон), что, исходя из анализа экспериментальных кривых ползучести при постоянных напряжениях для сплава ЭИ698 при 700 °С [28, рис. 3.11], для временного интервала до 100 часов вполне допустимо:

$$\dot{\sigma} = \beta \sigma^n.$$

Эта форма записи соответствует реализации закона Нортона в пакете ANSYS для решения задач ползучести методом конечных элементов. Здесь $p = p(t)$ — деформация ползучести, $\beta = 8.13 \cdot 10^{-35}$ и $n = 10.96$ — материальные константы ЭИ698. Указанные значения параметров для данного сплава при температуре 700°C приведены в [28].

Отметим некоторые неочевидные особенности при решении задачи релаксации ОН в условиях ползучести. Во-первых, заданное фиктивное температурное поле не оказывает влияния на процесс ползучести, поскольку параметры β и n не зависят от пространственных координат и температуры, а их значения соответствуют температуре 700°C . Во-вторых, задачи ползучести решены в предположении, что при изменении температуры наведенные после упрочнения пластические деформации не меняются, поскольку в процессе релаксации в упрочненном слое вследствие накопления деформации ползучести происходит упругая разгрузка, а в этом случае новых активных пластических деформаций не возникает. Следовательно, для определения конечного распределения компонент тензора остаточных напряжений при 20°C после температурно-временной выдержки необходимо масштабировать результаты, полученные для 700°C в момент времени 100 часов, на отношение модулей упругости E_0/E_1 .

4. Результаты решения краевых задач релаксации ОН

Моделирование охватывало 100-часовой интервал релаксации остаточных напряжений. Проведен детальный анализ эволюции НДС в процессе ползучести при 700°C для различных образцов геометрических конфигураций.

В качестве примера приведены типичные результаты расчета кинетики ОН для исследуемых образцов с надрезами. На рис. 7 для сечения II–II цилиндрического образца с надрезом квадратной формы приведены графики релаксации компонент σ_θ (а) и σ_z (б) при $d = 0.1$ мм и σ_r (в) и τ_{rz} (г) при $d = 0.3$ мм.

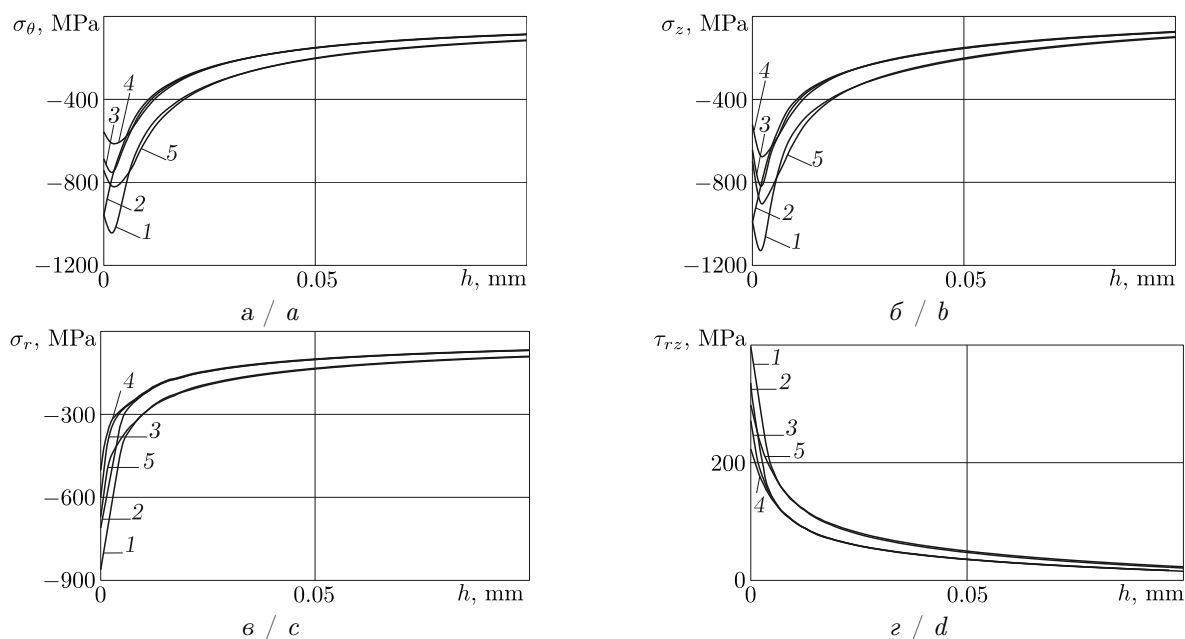


Рис. 7. Релаксация остаточных напряжений в сечении II–II цилиндрического образца с надрезом квадратной формы при $d = 0.1$ мм (а, б) и $d = 0.3$ мм (в, г): 1 — данные после упрочнения при $T = 20^\circ\text{C}$ ($t = 0 - 0$); 2 — температурная нагрузка до $T = 700^\circ\text{C}$ ($t = 0 + 0$); 3 — после ползучести при $T = 700^\circ\text{C}$ в момент времени $t = 10 - 0$ ч; 4 — после ползучести при $T = 700^\circ\text{C}$ в момент времени $t = 100 - 0$ ч; 5 — температурная разгрузка до $T = 20^\circ\text{C}$ ($t = 100 + 0$ ч)

Fig. 7. Relaxation of residual stresses in section II–II of cylindrical specimen with square-shaped notch at $d = 0.1$ mm (a, b) and $d = 0.3$ mm (c, d): curve 1 shows data after strengthening at $T = 20^\circ\text{C}$ ($t = 0 - 0$); curve 2 shows data for thermal loading up to $T = 700^\circ\text{C}$ ($t = 0 + 0$); curve 3 shows data after creep at $T = 700^\circ\text{C}$ at time $t = 10 - 0$ h; curve 4 shows data after creep at $T = 700^\circ\text{C}$ at time $t = 100 - 0$ h; curve 5 shows data for thermal unloading down to $T = 20^\circ\text{C}$ ($t = 100 + 0$ h)



Из анализа данных, представленных на рис. 7, следует, что если для гладкого образца недиагональные компоненты тензора ОН равны нулю, то для надреза квадратной формы в сечении $II-II$ возникают касательные напряжения значительной величины, сопоставимой со значениями нормальных компонент. Существенной становится также компонента $\sigma_r(h)$ в этом сечении, хотя для гладкого образца ее величина на два порядка (по модулю) меньше величины, приведенной на рис. 7, в. Аналогичная картина наблюдается и для надреза V-образной формы в сечениях, параллельных сечению $I-I$, не проходящих через вершину надреза.

На рис. 8 представлены данные по релаксации компонент σ_θ и σ_z в цилиндрах с V-образным надрезом в сечении $I-I$: при $c = 0.1$ мм и $\varphi = 1^\circ$ (а, б); при $c = 0.1$ мм и $\varphi = 5^\circ$ (в, г); при $c = 0.3$ мм и $\varphi = 15^\circ$ (д, е).

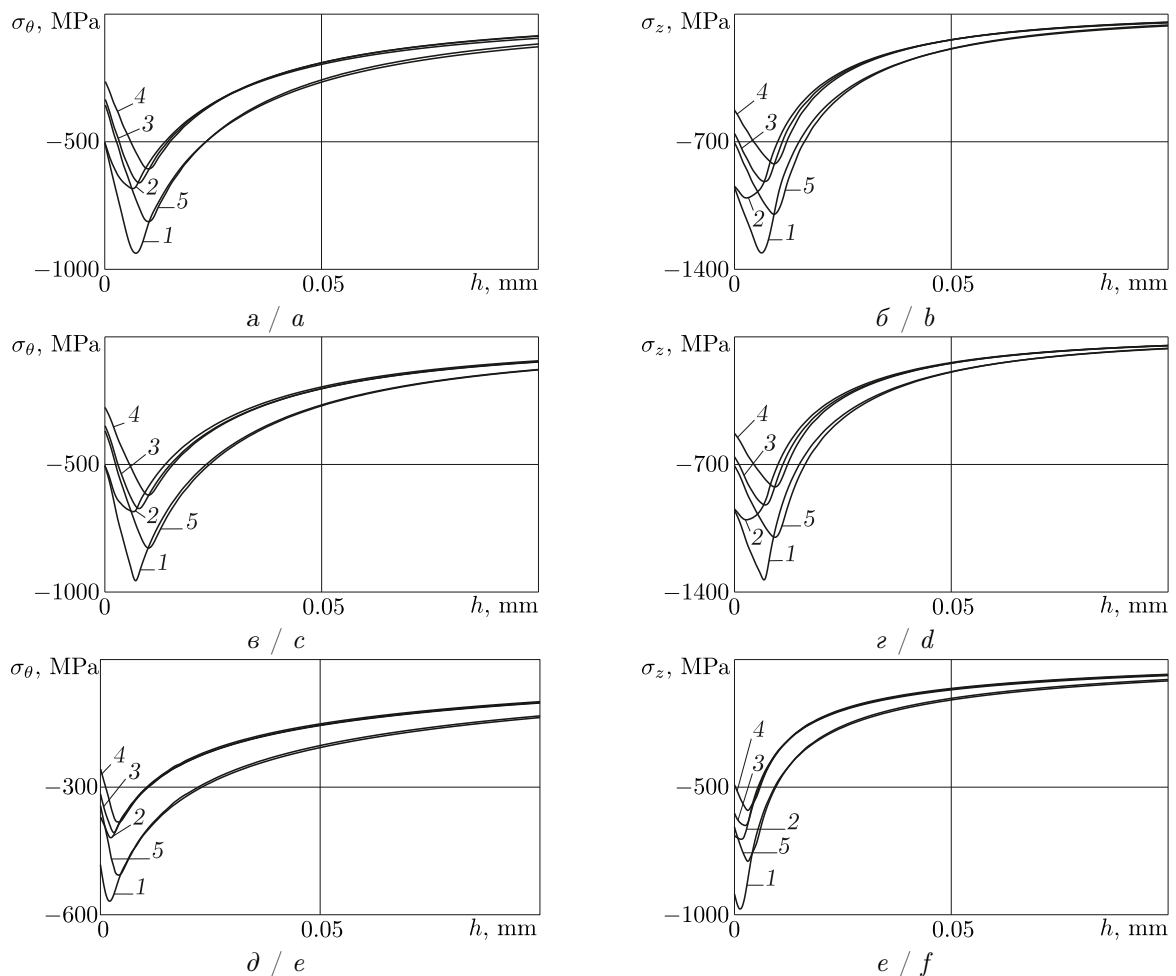


Рис. 8. Релаксация остаточных напряжений $\sigma_\theta(h)$ (а, в, д) и $\sigma_z(h)$ (б, г, е) в сечении $I-I$ цилиндрического образца с надрезом V-образной формы при $c = 0.1$ мм, $\varphi = 1^\circ$ (а, б), $\varphi = 5^\circ$ (в, г); $c = 0.3$ мм, $\varphi = 15^\circ$ (д, е): 1 — данные после упрочнения при $T = 20^\circ\text{C}$ ($t = 0 - 0$); 2 — температурная нагрузка до $T = 700^\circ\text{C}$ ($t = 0 + 0$); 3 — после ползучести при $T = 700^\circ\text{C}$ в момент времени $t = 10 - 0$ ч; 4 — после ползучести при $T = 700^\circ\text{C}$ в момент времени $t = 100 - 0$ ч; 5 — температурная разгрузка до $T = 20^\circ\text{C}$ ($t = 100 + 0$ ч)

Fig. 8. Relaxation of residual stresses $\sigma_\theta(h)$ (a, c, e) and $\sigma_z(h)$ (b, d, f) in section $I-I$ of cylindrical specimen with V-notch at $c = 0.1$ mm, $\varphi = 1^\circ$ (a, b), $\varphi = 5^\circ$ (c, d); $c = 0.3$ mm, $\varphi = 15^\circ$ (e, f): curve 1 shows data after strengthening at $T = 20^\circ\text{C}$ ($t = 0 - 0$); curve 2 shows data for thermal loading up to $T = 700^\circ\text{C}$ ($t = 0 + 0$); curve 3 shows data after creep at $T = 700^\circ\text{C}$ at time $t = 10 - 0$ h; curve 4 shows data after creep at $T = 700^\circ\text{C}$ at time $t = 100 - 0$ h; curve 5 shows data thermal unloading down to $T = 20^\circ\text{C}$ ($t = 100 + 0$ h)



Из данных, представленных на рис. 8, следует, что изменение угла раскрытия V-образного надреза при одной и той же глубине (например, при $c = 0.1$ мм) не оказывает существенного влияния на уровень сжимающих остаточных напряжений. Последующие вариативные расчеты при значениях $\varphi \in [15^\circ, 30^\circ]$ подтверждают этот факт. Глубина же надреза оказывает существенное влияние на уровень напряжений в надрезе — при увеличении c от 0.1 мм до 0.3 мм уровень напряжений падает на 30–40 %.

Экспериментальные данные свидетельствуют о значительной скорости релаксации остаточных напряжений при 700°C — за первые 10 ч. уровень сжимающих напряжений в образцах с обоими типами надрезов снижается в полтора-два раза.

Весьма интересным является вопрос эффективности поверхностного упрочнения деталей, связанный с процессами релаксации ОН за цикл полного нагружения: «процедура ОППД детали с надрезом при $T = 20^\circ\text{C}$ — мгновенная температурная нагрузка до $T = 700^\circ\text{C}$ — температурная выдержка в течение 100 часов при $T = 700^\circ\text{C}$ — температурная разгрузка до $T = 20^\circ\text{C}$ ». Здесь важную роль играют графики на рис. 7 и рис. 8 с маркерами 1 (распределение ОН после упрочнения) и 5 (финишное распределение ОН после всего цикла нагружения). Во-первых, отметим, что с увеличением времени выдержки скорость релаксации ОН очень быстро затухает, что связано с быстрым уменьшением скорости деформации ползучести. Так, выполненные расчеты для времени $t > 100$ ч. свидетельствуют о незначительном отклонении распределений $\sigma_\theta(t, h)$ и $\sigma_z(t, h)$ от зависимости с маркером 4 ($t = 100$ ч.). Во-вторых, сравнение распределений ОН с маркерами 1 и 5 позволяет сделать вывод о наличии существенных сжимающих напряжений в области надрезов и после полного цикла нагружения. Это в определенной мере демонстрирует эффективность поверхностного упрочнения деталей с надрезами и в условиях высокотемпературной ползучести.

Заключение

В работе предложен метод расчета релаксации остаточных напряжений при высокотемпературной ползучести (700°C) для цилиндрических деталей с концентраторами напряжений квадратного и V-образного профиля после опережающего поверхностного пластического деформирования. Установлено, что корректное определение начального НДС требует решения упругопластической задачи реконструкции полей напряжений и деформаций с последующим использованием полученных результатов в качестве начальных условий для анализа релаксации при длительной термоэкспозиции.

Проведенный параметрический анализ для различных геометрических конфигураций надрезов подтвердил эффективность поверхностного упрочнения рассматриваемых деталей в условиях высокотемпературной ползучести. В частности, несмотря на существенную релаксацию, в деталях сохраняются значительные уровни сжимающих остаточных напряжений после полного цикла термомеханического нагружения.

Список литературы

1. Биргер И. А. Остаточные напряжения. Москва : Машгиз, 1963. 232 с.
2. Гринченко И. Г. Упрочнение деталей из жаропрочных и титановых сплавов. Москва : Машиностроение, 1971. 120 с.
3. Кудрявцев И. В. Поверхностный наклеп для повышения прочности и долговечности деталей машин поверхностным пластическим деформированием. Москва : Машиностроение, 1969. 100 с.
4. Ножницкий Ю. А., Фишгойт А. В., Ткаченко Р. И., Теплова С. В. Разработка и применение новых методов упрочнения деталей ГТД, основанных на пластическом деформировании поверхностных слоев. (Обзор) // Вестник двигателестроения. 2006. № 2. С. 8–16.
5. Сулима Г. Н., Шувалов В. А., Ягодкин Ю. Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. Москва : Машиностроение, 1988. 240 с.
6. Одинцов Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. Москва : Машиностроение, 1987. 328 с.



7. Иванов С. И., Шатунов М. П., Павлов В. Ф. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций / отв. ред. Х. С. Хазанов. Куйбышев : КуАИ, 1974. Вып. 1. С. 88–95.
8. Митряев К. Ф., Егоров В. И., Мальков Г. Ф., Уланов Б. Н., Степанов В. В. Повышение усталостной прочности жаропрочных материалов алмазным выглаживанием поверхности деталей // Остаточные напряжения / отв. ред. С. И. Иванов. Куйбышев : КуАИ, 1971. Вып. 53. С. 151–159.
9. Павлов В. Ф., Букатый А. С., Семенова О. Ю. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочненных деталей с концентраторами напряжений // Вестник машиностроения. 2019. № 1. С. 3–7. EDN: [VTAEPK](#)
10. Павлов В. Ф., Кирпичев В. А., Вакулюк В. С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочненных деталей по остаточным напряжениям. Самара : Изд-во СЦН РАН, 2012. 125 с. EDN: [TAFJVZ](#)
11. Сазанов В. П. Исследование закономерностей остановки усталостной трещины в цилиндрическом образце с надрезом // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 1. С. 160–169. DOI: [10.18287/2541-7533-2018-17-1-160-169](#), EDN: [UPOWMG](#)
12. Радченко В. П., Кирпичев В. А., Лукин В. В. Влияние пневмодробеструйной обработки и термоэкспозиции на остаточные напряжения и предел выносливости образцов с надрезами из сплавов В95 и Д16Т // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. 2011. № 3 (24). С. 181–184. EDN: [OZDDCH](#)
13. You C., Achintha M., He B. Y., Reed P. A. S. A numerical study of the effects of shot peening on the short crack growth behaviour in notched geometries under bending fatigue tests // International Journal of Fatigue. 2017. Vol. 103. P. 99–111. DOI: [10.1016/j.ijfatigue.2017.05.023](#)
14. Soyama H. Comparison between shot peening, cavitation peening and laser peening by observation of crack initiation and crack growth in stainless steel // Metals. 2019. Vol. 10, iss. 1. Art. 63. DOI: [10.3390/met10010063](#), EDN: [OLPPYZ](#)
15. Zhao X., Sun Z., Xu D., Liu Y. Local fatigue strength evaluation of shop peened 40Cr notched steel // Metals. 2018. Vol. 128, iss. 9. Art. 681. DOI: [10.3390/met8090681](#)
16. Takahashi K., Osedo H., Suzuki T., Fukuda S. Fatigue strength improvement of an aluminum alloy with a crack-like surface defect using shot peening and cavitation peening // Engineering Fracture Mechanics. 2018. Vol. 193. P. 151–161. DOI: [10.1016/j.engfracmech.2018.02.013](#)
17. Fleury R., Nowell D. Evaluating the influence of residual stresses and surface damage on fatigue life of nickel superalloys // International Journal of Fatigue. 2017. Vol. 105. P. 27–33. DOI: [10.1016/j.ijfatigue.2017.08.015](#)
18. Bag A., Levesque M., Brochu M. Effect of shot peening on short crack propagation in 300M steel // International Journal of Fatigue. 2020. Vol. 131. Art. 105346. DOI: [10.1016/j.ijfatigue.2019.105346](#), EDN: [TDCZZK](#)
19. Nag Chaundhury J. Effect of heat treatment, pre-stress and surface hardening on fracture toughness of micro-alloyed steel // Journal of Materials Engineering and Performance. 2014. Vol. 23, iss. 1. P. 152–168. DOI: [10.1007/s11665-013-0709-6](#)
20. Радченко В. П., Морозов А. П. Экспериментальное исследование влияния пневмодробеструйной обработки температурных выдержек и многоцикловых усталостных испытаний на физико-механическое состояние упрочненного слоя цилиндрических образцов из сплавов В95 и Д16Т // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. 2010. № 5 (21). С. 222–228. EDN: [NCTNON](#)
21. Lin D. J., Fuh L. J., Chen C. Y., Chen W. C., Lin J. H. C., Chen C. C. Rapid nano-scale surface modification on micro-arc oxidation coated titanium by microwave-assisted hydrothermal process // Materials Science and Engineering: C. 2019. Vol. 95. P. 236–247. DOI: [10.1016/j.msec.2018.10.085](#), EDN: [JOCCNC](#)
22. Maytorena-Sanchez A., Hernandez-Torres J., Lopez-Huerta F., Hernandez-Campos M. A., Zamora-Peredo L., Pacio-Castillo M., Serrano-De la Rosa L. E., Garcia-Gonzalez L. Analysis of the hardness and tribological properties of grade 2 titanium using the thermal oxidation process at different temperatures // Materials Letters. 2021. Vol. 282. Art. 128679. DOI: [10.1016/j.matlet.2020.128679](#), EDN: [CQVOPZ](#)
23. Кравченко Б. А., Круцило В. Г., Гутман Г. Н. Термопластическое упрочнение – резерв повышения прочности и надежности деталей машин. Самара : Изд-во СамГТУ, 2000. 216 с. EDN: [TTRVCB](#)



24. Chekalova E., Zhuravlev A. Improving the durability of titanium alloy products through a combined hardening technology // *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 38, pt. 4. P. 1804–1809. DOI: [10.1016/j.matpr.2020.08.413](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.413), EDN: [RDCCGQ](#)
25. Guo W., Wang H., Peng P., Song B., Zhang H., Shao T., Huan H., Qiao H., Qu G., Zhu D., Yan J. Effect of laser shock processing on oxidation resistance of laser additive manufacture Ti6Al4V titanium alloy // *Corrosion Science*. 2020. Vol. 170. Art. 108655. DOI: [10.1016/j.corsci.2020.108655](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108655), EDN: [GDQQDH](#)
26. Цейтлин В. И., Колотникова О. В. Релаксация остаточных напряжений в деталях турбин ГТД в процессе эксплуатации // *Проблемы прочности*. 1980. № 3. С. 6–11.
27. Колотникова О. В. Эффективность упрочнения методами поверхностного пластического деформирования деталей, работающих при повышенных температурах // *Проблемы прочности*. 1983. № 2. С. 112–114.
28. Радченко В. П., Саушкин М. Н. Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочненных конструкциях. Москва : Машиностроение-1, 2005. 226 с.
29. 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 // *Прикладная механика и техническая физика*. 2015. Т. 56, № 2. С. 169–177. DOI: [10.15372/PMTF20150217](https://doi.org/10.15372/PMTF20150217), EDN: [TWGXHH](#)
30. Радченко В. П., Цветков В. В., Саушкин М. Н. Релаксация остаточных напряжений в упрочненном цилиндре в условиях ползучести при нагружении осевой силой, крутящим моментом и внутренним давлением // *Прикладная механика и техническая физика*. 2020. Т. 61, № 4. С. 96–107. DOI: [10.15372/PMTF20200412](https://doi.org/10.15372/PMTF20200412), EDN: [DOAXGA](#)
31. Радченко В. П., Деревянка Е. Е. Кинетика остаточных напряжений в тонкостенных цилиндрических образцах после двухстороннего поверхностного упрочнения в условиях ползучести при жестких ограничениях на угловые и осевые линейные перемещения // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика*. 2023. Т. 23, вып. 2. С. 227–240. DOI: [10.18500/1816-9791-2023-23-2-227-240](https://doi.org/10.18500/1816-9791-2023-23-2-227-240), EDN: [VGQVUH](#)
32. Деревянка Е. Е., Радченко В. П., Цветков В. В. Релаксация остаточных напряжений в поверхностно упрочненном цилиндре в условиях ползучести при жестких ограничениях на линейные и угловые деформации // *Известия РАН. Механика твердого тела*. 2021. № 3. С. 118–127. DOI: [10.31857/S057232992103003X](https://doi.org/10.31857/S057232992103003X), EDN: [OVGDFE](#)
33. Радченко В. П., Либерман А. Е., Блохин О. Л. Релаксация остаточных напряжений в поверхностно упрочненном вращающемся цилиндре в условиях ползучести // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки*. 2022. Т. 26, № 1. С. 119–139. DOI: [10.14498/vsgtu1884](https://doi.org/10.14498/vsgtu1884), EDN: [GFBZBC](#)
34. Radchenko V., Glebov V. A method for calculating the relaxation of residual creep stresses in a surface-hardened cylinder with a series of periodically arranged semicircular incisions under thermal exposure conditions // *Mechanics of Solids*. 2024. Vol. 59, iss. 7. P. 3735–3746. DOI: [10.1134/S0025654424606293](https://doi.org/10.1134/S0025654424606293), EDN: [UYGCLY](#)
35. Радченко В. П., Саушкин М. Н., Павлов В. Ф. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния в поверхностно упрочненных втулках с учетом остаточных касательных напряжений // *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2019. № 1. С. 138–150. DOI: [10.15593/perm.mech/2019.1.12](https://doi.org/10.15593/perm.mech/2019.1.12), EDN: [XKSCQS](#)
36. Сазанов В. П., Кирпичев В. А., Вакулюк В. С., Павлов В. Ф. Определение первоначальных деформаций в упрочненном слое цилиндрической детали методом конечно-элементного моделирования с использованием расчетного комплекса PATRAN/NASTRAN // *Вестник УГАТУ*. 2015. Т. 19, № 2 (68). С. 35–40. EDN: [VYWUPR](#)
37. Сазанов В. П., Семенова О. Ю., Кирпичев В. А., Вакулюк В. С. Математическое моделирование первоначальных деформаций в поверхностно упрочненных деталях при выборе образцесвидетеля // *Вестник УГАТУ*. 2016. Т. 20, № 3 (73). С. 31–37. EDN: [XBGSHT](#)
38. Павлов В. Ф., Столяров А. К., Кирпичев В. А., Вакулюк В. С. Расчет остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям. Самара : Изд-во СЦН РАН, 2008. 124 с.
39. Радченко В. П., Шишкин Д. М., Саушкин М. Н. Численное решение задачи о напряженно-деформированном состоянии поверхностно упрочненного призматического образца с надрезом V-образного профиля в упругой и упругопластической постановках // *Вестник Самарского*



го государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. 2023. Т. 27, № 3. С. 491–508. DOI: [10.14498/vsgtu2017](https://doi.org/10.14498/vsgtu2017), EDN: CDEJKC

References

1. Birger I. A. *Ostatochnye napryazheniya* [Residual stresses]. Moscow, Mashgiz, 1963. 232 p. (in Russian).
2. Grinchenko I. G. *Uprochnenie detaley iz zharoprochnykh i titanovykh splavov* [Hardening of parts made of heat-resistant and titanium alloys]. Moscow, Mashinostroenie, 1971. 120 p. (in Russian).
3. Kudryavtsev I. V. *Poverkhnostnyy naklep dlya povysheniya prochnosti i dolgovechnosti detaley mashin poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Surface strain hardening to increase the strength and durability of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie, 1969. 100 p. (in Russian).
4. Nozhnitskii Yu. A., Fishgoit A. V., Tkachenko R. I., Teplova S. V. Development and application of new GTE parts hardening methods based on plastic deformation of surface layers. *Vestnik dvigatelestroeniya* [Bulletin of Engine Building], 2006, iss. 2, pp. 8–16 (in Russian).
5. Sulima G. N., Shuvalov V. A., Yagodkin Yu. D. *Poverkhnostnyy sloy i ekspluatatsionnye svoystva detaley mashin* [Surface layer and performance properties of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie, 1988. 240 p. (in Russian).
6. Odincov L. G. *Uprochnenie i otdelka detaley poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Hardening and finishing of parts by surface plastic deformation]. Moscow, Mashinostroenie, 1987. 328 p. (in Russian).
7. Ivanov S. I., Shatunov M. P., Pavlov V. F. The effect of residual stresses on the endurance of incised samples. *Voprosy Prochnosti Elementov Aviatsionnykh Konstruktsiy* [Khazanov Kh. S. (ed.) Problems of Strength of Elements of Aircraft Structures]. Kuibyshev, Kuibyshev Aviation Institute Publ., 1974, iss. 1, pp. 88–95 (in Russian).
8. Mitryaev K. F., Egorov V. I., Malkov G. F., Ulanov B. N., Stepanov V. V. Increasing the fatigue strength of heat-resistant materials by diamond smoothing of the surface of the parts. *Ostatochnye napryazheniya* [Ivanov S. I. (ed.) Residual Stresses]. Kuibyshev, Kuibyshev Aviation Institute Publ., 1971, vol. 53, pp. 151–159 (in Russian).
9. Pavlov V. F., Bukaty A. S., Semenova O. Yu. Forecasting of the endurance limit of surface-hardened parts with stress concentrators. *Vestnik mashinostroeniya*, 2016, iss. 1, pp. 3–7 (in Russian). EDN: [VTAEPK](https://www.edn.ru/VTAEPK)
10. Pavlov V. F., Kirpichev V. A., Vakulyuk V. S. *Prognozirovanie soprotivleniya ustalosti poverkhnostno uprochnennykh detaley po ostatochnym napryazheniyam* [Prediction of fatigue resistance of surface-hardened parts by residual stresses]. Samara, SCN RAN Publ., 2012. 125 p. (in Russian). EDN: [TAFJVZ](https://www.edn.ru/TAFJVZ)
11. Sazanov V. P. Analysis of the mechanism of fatigue crack arrest in a cylindrical notched specimen. *VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2018, vol. 17, iss. 1, pp. 160–169 (in Russian). DOI: [10.18287/2541-7533-2018-17-1-160-169](https://doi.org/10.18287/2541-7533-2018-17-1-160-169), EDN: [UPOWMG](https://www.edn.ru/UPOWMG)
12. Radchenko V. P., Kirpichyov V. A., Lunin V. V. Influence of air shot blasting and temperature exposure on residual stresses and fatigue strength of notched specimens from alloys V95 and D16T. *Journal of Samara State Technical University, Ser. Physical and Mathematical Sciences*, 2011, iss. 3 (24), pp. 181–184 (in Russian). EDN: [OZDDCH](https://www.edn.ru/OZDDCH)
13. You C., Achintha M., He B. Y., Reed P. A. S. A numerical study of the effects of shot peening on the short crack growth behaviour in notched geometries under bending fatigue tests. *International Journal of Fatigue*, 2017, vol. 103, pp. 99–111. DOI: [10.1016/j.ijfatigue.2017.05.023](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.05.023)
14. Soyama H. Comparison between shot peening, cavitation peening and laser peening by observation of crack initiation and crack growth in stainless steel. *Metals*, 2019, vol. 10, iss. 1, art. 63. DOI: [10.3390/met100110063](https://doi.org/10.3390/met100110063), EDN: [OLPPYZ](https://www.edn.ru/OLPPYZ)
15. Zhao X., Sun Z., Xu D., Liu Y. Local fatigue strength evaluation of shot peened 40Cr notched steel. *Metals*, 2018, vol. 128, iss. 9, art. 681. DOI: [10.3390/met8090681](https://doi.org/10.3390/met8090681)
16. Takahashi K., Osedo H., Suzuki T., Fukuda S. Fatigue strength improvement of an aluminum alloy with a crack-like surface defect using shot peening and cavitation peening. *Engineering Fracture Mechanics*, 2018, vol. 193, pp. 151–161. DOI: [10.1016/j.engfracmech.2018.02.013](https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.02.013)
17. Fleury R., Nowell D. Evaluating the influence of residual stresses and surface damage on fatigue life of nickel superalloys. *International Journal of Fatigue*, 2017, vol. 105, pp. 27–33. DOI: [10.1016/j.ijfatigue.2017.08.015](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.08.015)
18. Bag A., Levesque M., Brochu M. Effect of shot peening on short crack propagation in 300M steel.



- International Journal of Fatigue*, 2020, vol. 131, art. 105346. DOI: [10.1016/j.ijfatigue.2019.105346](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105346), EDN: [TDCZZK](#)
19. Nag Chaundhury J. Effect of heat treatment, pre-stress and surface hardening on fracture toughness of micro-alloyed steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, vol. 23, iss. 1, pp. 152–168. DOI: [10.1007/s11665-013-0709-6](https://doi.org/10.1007/s11665-013-0709-6)
 20. Radchenko V. P., Morozov A. P. Experimental study of the effect induced by air shot-blasting processing, thermal exposition and high cycle fatigue tests on physical and mechanical condition hardening layer of cylindrical samples of alloys V95 and D16T. *Journal of Samara State Technical University, Ser. Physical and Mathematical Sciences*, 2010, iss. 5 (21), pp. 222–228 (in Russian). EDN: [NCTNON](#)
 21. Lin D. J., Fuh L. J., Chen C. Y., Chen W. C., Lin J. H. C., Chen C. C. Rapid nano-scale surface modification on micro-arc oxidation coated titanium by microwave-assisted hydrothermal process. *Materials Science and Engineering: C*, 2019, vol. 95, pp. 236–247. DOI: [10.1016/j.msec.2018.10.085](https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.10.085), EDN: [JOCCNC](#)
 22. Maytorena-Sanchez A., Hernandez-Torres J., Lopez-Huerta F., Hernandez-Campos M. A., Zamora-Peredo L., Pacio-Castillo M., Serrano-De la Rosa L. E., Garcia-Gonzalez L. Analysis of the hardness and tribological properties of grade 2 titanium using the thermal oxidation process at different temperatures. *Materials Letters*, 2021, vol. 282, art. 128679. DOI: [10.1016/j.matlet.2020.128679](https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128679), EDN: [CQVOPZ](#)
 23. Kravchenko B. A., Krutsilo V. G., Gutman G. N. *Termoplasticheskoe uprochnenie — rezerv povysheniya prochnosti i nadyozhnosti detaley mashin* [Thermoplastic hardening as a reserve for increasing the strength and reliability of machine parts]. Samara, SamSTU Publ., 2000. 216 p. (in Russian). EDN: [TTRVCB](#)
 24. Chekalova E., Zhuravlev A. Improving the durability of titanium alloy products through a combined hardening technology. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 38, pt. 4, pp. 1804–1809. DOI: [10.1016/j.matpr.2020.08.413](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.413), EDN: [RDCCGQ](#)
 25. Guo W., Wang H., Peng P., Song B., Zhang H., Shao T., Huan H., Qiao H., Qu G., Zhu D., Yan J. Effect of laser shock processing on oxidation resistance of laser additive manufacture Ti6Al4V titanium alloy. *Corrosion Science*, 2020, vol. 170, art. 108655. DOI: [10.1016/j.corsci.2020.108655](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108655), EDN: [GDQQDH](#)
 26. Tseytlin V. I., Kolotnikova O. V. Relaxation of residual stresses in turbine parts of GTE during operation. *Problemy prochnosti* [Durability Issues], 1980, iss. 3, pp. 6–11 (in Russian).
 27. Kolotnikova O. V. The effectiveness of hardening by methods of surface plastic deformation of parts operating at elevated temperatures. *Problemy prochnosti* [Durability Issues], 1983, iss. 2, pp. 112–114 (in Russian).
 28. Radchenko V. P., Saushkin M. N. *Polzuchest' i relaksatsiya ostatochnykh napryazheniy v uprochnykh konstruktsiyakh* [Creep and relaxation of residual stresses in strengthened structures]. Moscow, Mashinostroenie-1, 2005. 226 p. (in Russian).
 29. Radchenko V. P., Kocherov E. P., Saushkin M. N., Smyslov V. A. Experimental and theoretical studies of the influence of a tensile load on the relaxation of residual stresses in a hardened cylindrical specimen under creep conditions. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2015, vol. 56, iss. 2, pp. 313–320. DOI: [10.1134/S0021894415020170](https://doi.org/10.1134/S0021894415020170), EDN: [UGHRIL](#)
 30. Radchenko V. P., Tsvetkov V. V., Saushkin M. N. Residual stress relaxation in a hardened cylinder under creep, loaded by an axial force, torque, and internal pressure. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2020, vol. 61, iss. 4, pp. 583–592. DOI: [10.1134/S0021894420040124](https://doi.org/10.1134/S0021894420040124), EDN: [REDSOB](#)
 31. Radchenko V. P., Derevyanka E. E. Kinetics of residual stresses in thin-walled cylindrical samples after bilateral surface hardening under creep conditions with strict restrictions on angular and axial linear displacements. *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*, 2023, vol. 23, iss. 2, pp. 227–240 (in Russian). DOI: [10.18500/1816-9791-2023-23-2-227-240](https://doi.org/10.18500/1816-9791-2023-23-2-227-240), EDN: [VGQVUH](#)
 32. Radchenko V. P., Tsvetkov V. V., Derevyanka E. E. Relaxation of residual stresses in a surface-hardened cylinder under creep conditions and rigid restrictions on linear and angular deformations. *Mechanics of Solids*, 2020, vol. 55, iss. 6, pp. 898–906. DOI: [10.3103/S0025654420660024](https://doi.org/10.3103/S0025654420660024), EDN: [VVJDZI](#)
 33. Radchenko V. P., Liberman A. E., Blokhin O. L. Relaxation of residual stresses in a surface-hardened rotating cylinder under creep conditions. *Journal of Samara State Technical University*,



- Ser. Physical and Mathematical Sciences*, 2022, vol. 26, iss. 1, pp. 119–139 (in Russian). DOI: [10.14498/vsgtu1884](https://doi.org/10.14498/vsgtu1884), EDN: [GFBZBC](#)
34. Radchenko V. P., Glebov V. E. A method for calculating the relaxation of residual creep stresses in a surface-hardened cylinder with a series of periodically arranged semicircular incisions under thermal exposure conditions. *Mechanics of Solids*, 2024, vol. 59, iss. 7, pp. 3735–3746. DOI: [10.1134/S0025654424606293](https://doi.org/10.1134/S0025654424606293), EDN: [UYGCLY](#)
35. Radchenko V. P., Saushkin M. N., Pavlov V. F. Mathematical modeling of the stress-strain state in surface-hardened thin-walled tubes with regard to the residual shear stresses. *Vestnik PNIPU. Mekhanika* [Bulletin of PNIPU. Mechanics], 2019, iss. 1, pp. 138–150 (in Russian). DOI: [10.15593/perm.mech/2019.1.12](https://doi.org/10.15593/perm.mech/2019.1.12), EDN: [XKSCQS](#)
36. Sazanov V. P., Kirpichev V. A., Vakulyuk V. S., Pavlov V. F. The definition of initial deformations in the cylindrical parts surface layer by Finite Elements Modeling method using PATRAN/NASTRAN program complex. *Vestnik UGATU*, 2015, vol. 19, iss. 2 (68), pp. 35–40 (in Russian). EDN: [VYWUPR](#)
37. Sazanov V. P., Semenova O. Yu., Kirpichev V. A., Vakulyuk V. S. Mathematical modeling of initial deformations in surface hardened parts for the choice of a reference specimen. *Vestnik UGATU*, 2016, vol. 20, iss. 3 (73), pp. 31–37 (in Russian). EDN: [XBGSHT](#)
38. Pavlov V. F., Stoljarov A. K., Kirpichev V. A., Vakulyuk V. S. *Raschet ostatochnykh napryazheniy v detalyakh s kontsentratorami napryazheniy po pervonachal'nyim deformatsiyam* [Calculation of residual stresses in parts with stress concentrators according to initial deformations]. Samara, SCN RAN Publ., 2008. 124 p. (in Russian).
39. Radchenko V. P., Shishkin D. M., Saushkin M. N. Numerical solution of the problem of stress-strain state of a surface-hardened prismatic V-notched specimen in elastic and elastoplastic formulations. *Journal of Samara State Technical University, Ser. Physical and Mathematical Sciences*, 2023, vol. 27, iss. 3, pp. 491–508 (in Russian). DOI: [10.14498/vsgtu2017](https://doi.org/10.14498/vsgtu2017), EDN: [CDEJKC](#)

Поступила в редакцию / Received 15.10.2024

Принята к публикации / Accepted 20.11.2024

Опубликована / Published 29.08.2025