

Научная статья

УДК 621.787:4

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176843>

## **ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЙ КОМПОНЕНТОВ ПЕРВОНАЧАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В УПРОЧНЁННОМ СЛОЕ ДЕТАЛИ**

**Вячеслав Петрович Сазанов<sup>1</sup>, Валентин Федорович Павлов<sup>2</sup>,**

**Андрей Викторович Письмаров<sup>3</sup>, Карина Федоровна Матвеева<sup>4</sup>✉**

<sup>1,2,3,4</sup>Самарский национальный исследовательский университет имени академика

С.П. Королёва, Самарский университет,

Самара, Россия

<sup>1</sup>[sazanow@mail.ru](mailto:sazanow@mail.ru)

<sup>2</sup>[sopromat@ssau.ru](mailto:sopromat@ssau.ru)

<sup>3</sup>[andrei\\_pismarov@mail.ru](mailto:andrei_pismarov@mail.ru)

<sup>4</sup>[matveeva\\_kf@mail.ru](mailto:matveeva_kf@mail.ru) ✉

***Аннотация.*** В работе приведены результаты исследований влияния анизотропии первоначальных деформаций на распределение осевой, окружной и радиальной компонент остаточных напряжений в упрочнённом слое цилиндрических образцов в зависимости от вида поверхностного упрочнения. За базовый вариант для расчётов были приняты параметры в упрочнённом слое цилиндрических образцов из стали 45 после гидродробеструйной обработки. Соотношения между компонентами первоначальных деформаций принимались в зависимости от видов поверхностного

упрочнения. Рассматривались их соотношения при химико-термической обработке (ХТО), дробеструйной обработке (ДО) и обкатки роликом (ОР). Расчёты проведены на конечно-элементных моделях гладких цилиндрических образцов диаметрами  $D=10$  мм и  $D=25$  мм. Распределения первоначальных деформаций по толщине упрочнённого слоя приняты изменяющимися по линейному закону (максимальное значение на поверхности и нулевое на максимальной глубине упрочнения). Необходимый для исследования объём расчётов проведен в среде комплекса программ PATRAN/NASTRAN. Моделирование цилиндрических образцов проведено в осесимметричной постановке задачи с заменой первоначальных деформаций соответствующими им температурными полями. По результатам исследования установлено, что при всех видах упрочнения радиальные напряжения имеют положительные значения по толщине упрочнённого слоя. При этом радиальная и осевая составляющие первоначальных деформаций на осевые остаточные напряжения по толщине упрочнённого слоя существенного влияния не оказывают. Следовательно, соотношение компонент первоначальных деформаций также не играет существенной роли при оценке влияния остаточного напряжённо-деформированного состояния на предел выносливости упрочнённых деталей, определяемого, например, по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений.

**Ключевые слова:** первоначальные деформации, остаточные напряжения, конечно-элементное моделирование, упрочнение поверхности, химико-термическая

обработка, дробеструйная обработка, обкатка роликом, среднеинтегральные остаточные напряжения

*Для цитирования:* Сазанов В.П., Павлов В.Ф., Письмаров А.В., Матвеева К.Ф.

Влияние соотношений компонентов первоначальных деформаций на распределение остаточных напряжений в упрочнённом слое детали // Труды МАИ. 2023. № 132.

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176843>

Original article

## **INFLUENCE OF THE RATIO OF THE COMPONENTS OF THE INITIAL DEFORMATIONS ON THE DISTRIBUTION OF THE RESIDUAL STRESSES IN THE STRENGTHENED LAYER OF THE PART**

**Vyacheslav P. Sazanov<sup>1</sup>, Valentin F. Pavlov<sup>2</sup>, Andrey V. Pismarov<sup>3</sup>,**

**Karina F. Matveeva<sup>4</sup>**✉

<sup>1,2,3,4</sup>Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara University, Samara, Russia

<sup>1</sup>[sazanow@mail.ru](mailto:sazanow@mail.ru)

<sup>2</sup>[sopromat@ssau.ru](mailto:sopromat@ssau.ru)

<sup>3</sup>[andrei\\_pismarov@mail.ru](mailto:andrei_pismarov@mail.ru)

<sup>4</sup>[matveeva\\_kf@mail.ru](mailto:matveeva_kf@mail.ru) ✉

**Abstract.** The article presents the results of studies nce of the of initial deformations anisotropy effect on the axial, circumferential and radial distribution components of residual stresses in the hardened layer of cylindrical samples, depending on the type of

surface hardening. Parameters in the hardened layer of cylindrical samples from the steel 45 after hydraulic shot blasting were assumed as the basic option for computations. The ratios between the components of the initial strains were being accepted depending on the types of surface hardening. Their ratios were being considered at chemical-thermal treatment (CTT), hydraulic shot blasting (HSB), and roller running (RR). Computations were performed on finite element models of smooth cylindrical samples with diameters of  $D = 10$  mm and  $D = 25$  mm. The initial deformations distributions over the hardened layer thickness are assumed to vary according to a linear law (the maximum value on the surface and the zero one at the maximum hardening depth). The necessary for the studies volume of computations was performed in the environment of the PATRAN/NASTRAN software package. Cylindrical samples modeling was performed in an axisymmetric formulation of the problem with the initial deformations replacement by the respective temperature fields. The results of the tests revealed that with all types of hardening radial stresses had positive values over the hardened layer thickness. Both radial and axial components of the initial deformations do not affect significantly herewith the residual stresses over the hardened layer thickness. Hence, the components ratio of the initial deformations does not as well play a significant role in assessing the effect of the residual stress-strain state on the endurance limit of hardened parts, which is determined, for example, by the mean integral residual stresses criterion.

**Keywords:** initial deformations, residual stresses, finite element modeling, surface hardening, chemical-thermal treatment, shot blasting, roller rolling, mean integral residual stresses

**For citation:** Sazanov V.P., Pavlov V.F., Pismarov A.V., Matveeva K.F. Influence of the ratio of the components of the initial deformations on the distribution of the residual stresses in the strengthened layer of the part. *Trudy MAI*, 2023, no. 132. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=176843>

## Введение

Природой возникновения остаточного напряжённо-деформированного состояния в деталях машин являются технологические операции при их изготовлении: термические и химико-термические процессы в материале, механическая обработка. Широко распространены также специальные виды поверхностного упрочнения поверхности деталей по созданию тонкого слоя со сжимающими остаточными напряжениями. В связи с этим решение расчётных задач исследования напряжённо-деформированного состояния, как правило, требует определённого подхода при его моделировании [1-4].

Известно, что остаточные напряжения в деталях машин оказывают существенное влияние на сопротивление усталости при действии переменных нагрузок [1-6]. Для оценки влияния и прогнозирования предела выносливости в расчётах обычно используются аналитические зависимости или конечно-элементное моделирование остаточных напряжений [7-9]. Исследование влияния сжимающих остаточных напряжений в тонком поверхностном слое на сопротивление усталости упрочнённых деталей с использованием первоначальных деформаций [1,10,11] является весьма эффективным инструментом в сочетании с современными расчётными системами типа PATRAN/NASTRAN, ANSYS и ряда других, реализующих метод конечных элементов в форме перемещений [12,13].

При этом моделирование первоначальных деформаций основывается на аналогии данной задачи с задачей термоупругости [10]. Однако есть достаточно сложные вопросы по определению первоначальных деформаций. Во-первых, однозначное решение имеет только прямая задача по определению остаточных напряжений при известных первоначальных деформациях. При решении обратной задачи даже знания остаточных напряжений в точках детали недостаточно. Это означает, что если для компонент остаточных напряжений получено решение, то на него можно наложить любую однородную систему первоначальных деформаций, удовлетворяющую условиям совместности, не оказав влияния на остаточные напряжения. Во-вторых, по напряжённо-деформированному состоянию детали имеется небольшая информация, а именно одна или две эпюры распределения остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя в её гладкой части. Механическими способами определяются распределения осевых (меридиональных)  $\sigma_z$  и окружных  $\sigma_\theta$  остаточных напряжений в тонком поверхностном слое. Радиальные остаточные напряжения  $\sigma_r$  не определяются ввиду малой толщины упрочнённого слоя. Следует отметить, что наиболее распространёнными механическими способами по определению остаточных напряжений являются методы колец и полосок, а также метод удаления части поверхности [14-21]. Из вышеизложенного следует, что решить задачу по определению первоначальных деформаций без принятия определённых допущений невозможно.

Приближённое решение обратной задачи о первоначальных деформациях возможно выполнить методом конечно-элементного моделирования с использованием современных расчётных комплексов (PATRAN/NASTRAN, ANSYS), которые

позволяют заменить первоначальные деформации соответствующим им температурным полем [12,13]. Вместе с тем такое решение выполняется в несколько приближений (итераций) при следующих основных начальных условиях:

- угловые первоначальные деформации равны нулю;
- соотношения между линейными компонентами первоначальных деформаций известны и одинаковы во всех точках упрочнённого слоя;
- после получения первоначальных деформаций в упрочнённом слое в дальнейшем во всей детали пластические деформации не возникают.

Первое условие позволяет заменить задачу о первоначальных деформациях на задачу термоупругости, второе снимает статическую неопределимость решения, а третье даёт возможность выполнить решение в упругой постановке. Соответственно, принятые допущения вносят определённую погрешность в решения различных задач о влиянии остаточных напряжений на сопротивление усталости деталей при действии переменных нагрузок. Данный вопрос и является предметом исследования.

### **Методика исследования**

Исследование влияния соотношений (анизотропии) первоначальных деформаций на распределение остаточных напряжений в упрочнённом слое выполнено по результатам расчётов методом конечно-элементного моделирования в среде комплекса программ PATRAN/NASTRAN. Конечно-элементные модели цилиндрических деталей различного диаметра разработаны в осесимметричной постановке с моделированием остаточных напряжений методом термоупругости и представляют собой четверть

сечения цилиндра с наложением соответствующих граничных условий. Выбранная длина расчётной области цилиндра исключает влияние краевых зон для сечения, в котором исследуются компоненты остаточных напряжений. При моделировании был использован треугольный шестиузловой осесимметричный конечный элемент типа 2D-Solid.

Принятая закономерность распределения первоначальных деформаций по толщине упрочнённого слоя линейная с максимальным по модулю значением на поверхности цилиндра и нулевым на границе упрочнённого слоя. Параметры упрочнённого слоя в расчётных моделях и уровень сжимающих остаточных напряжений примерно соответствуют результатам определения осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений в гладких цилиндрических образцах из стали 45 различного диаметра после гидродробеструйной обработки (ГДО), которые приведены на рис. 1. Определение остаточных напряжений в упрочнённом слое выполнено методом колец и полосок [14]. Механические характеристики материала деталей из стали 45 приведены в таблице 1. Режимы гидродробеструйной обработки, характерные для технологических операций упрочнения в авиационной промышленности, имели следующие параметры: давление масла – 0,28 МПа, диаметр шариков (доби) – 1,5-2 мм, время обработки – 8 минут.



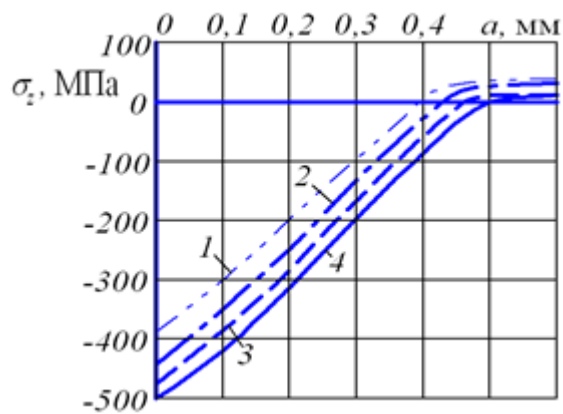


Рисунок 1. Осевые остаточные напряжения  $\sigma_z$  в гладких образцах из стали 45 после ГДО: 1 –  $D = 10$  мм, 2 –  $D = 15$  мм, 3 –  $D = 25$  мм 4 –  $D = 50$  мм ( $D$  – наружный диаметр)

Таблица 1. Механические характеристики материала

Материал	Механические характеристики				
	$\sigma_s$ , МПа а	$\sigma_{0,2}$ , МПа а	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$S_k$ , МПа
сталь 45	757	411	17,4	39,6	1097

В исследовании были рассмотрены три варианта соотношений первоначальных деформаций (таблица 2).

Таблица 2. Варианты соотношений первоначальных деформаций

Вариант соотношений	Соотношения первоначальных деформаций	Соответствие видам поверхностного упрочнения
1	$\varepsilon_{0r} = \varepsilon_{0\theta} = \varepsilon_{0z} = \varepsilon_0$	Химико-термическая обработка (цементация, азотирование и другие)
2	$\varepsilon_{0\theta} = \varepsilon_{0z} = \varepsilon_0$ ; $\varepsilon_{0r} = -2\varepsilon_0$	Гидродробеструйная обработка,

		пневмодробеструйная обработка
3	$\varepsilon_{0z} = \varepsilon_0$ ; $\varepsilon_{0\theta} = 0,5\varepsilon_{0z} =$ $0,5\varepsilon_0$ ; $\varepsilon_{0r} = -1,5\varepsilon_0$	Обкатка роликом, обкатка шариком, алмазное выглаживание и другие

Принятые обозначения в таблице 2:  $\varepsilon_{0r}, \varepsilon_{0\theta}, \varepsilon_{0z}$  – соответственно радиальные, окружные и осевые первоначальные деформации.

Для варианта 1 (химико-термическая обработка поверхности) распределение первоначальных остаточных деформаций в упрочнённом слое цилиндрического образца принималось из условия всестороннего объёмного расширения, так как увеличение объёма связано с внедрением атомов соответствующего вещества в кристаллическую решётку материала детали [2].

В вариантах 2 и 3 соотношение первоначальных деформаций в упрочнённом слое принималось из условия неизменности начального объёма (несжимаемости материала) [2], так после получения материалом остаточных деформаций внешние силы отсутствуют. Разница заключается в том, что по данным экспериментальных исследований было установлено, что при дробеструйной обработке сжимающие осевые  $\sigma_z$  и окружные  $\sigma_\theta$  напряжения равны между собой, а при различных видах обкатки осевые превышают окружные в 1,8-2,2 раза [2, 6].

В расчётных моделях были приняты следующие численные значения параметров: модуль продольной упругости  $E = 200000$  МПа (сталь), коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ , первоначальная деформация  $\varepsilon_0 = 0,0025$  на поверхности

цилиндрического образца и  $\varepsilon_0 = 0$  на нижней границе упрочнённого слоя, толщина упрочнённого слоя 0,4 мм.

### Результаты и обсуждение

Результаты расчётов распределения радиальных  $\sigma_r$ , окружных  $\sigma_\theta$ , осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений в цилиндрических образцах диаметрами  $D=10$  мм и  $D=25$  мм для трёх вариантов соотношений первоначальных деформаций приведены на рисунках 2-4.

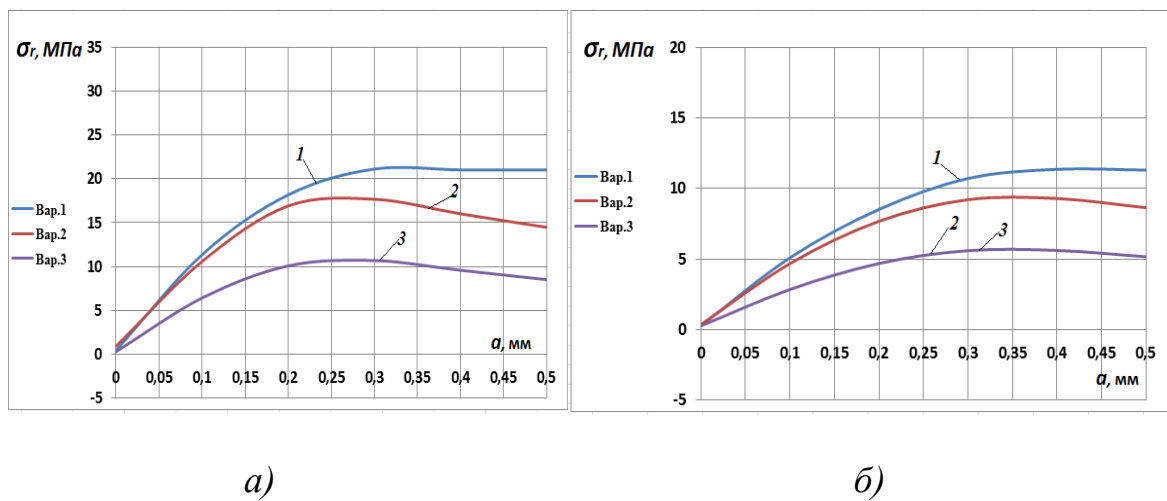


Рисунок 2. Зависимости радиальных  $\sigma_r$  остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя цилиндрического образца:  $a - D = 10$  мм,  $b - D = 25$  мм

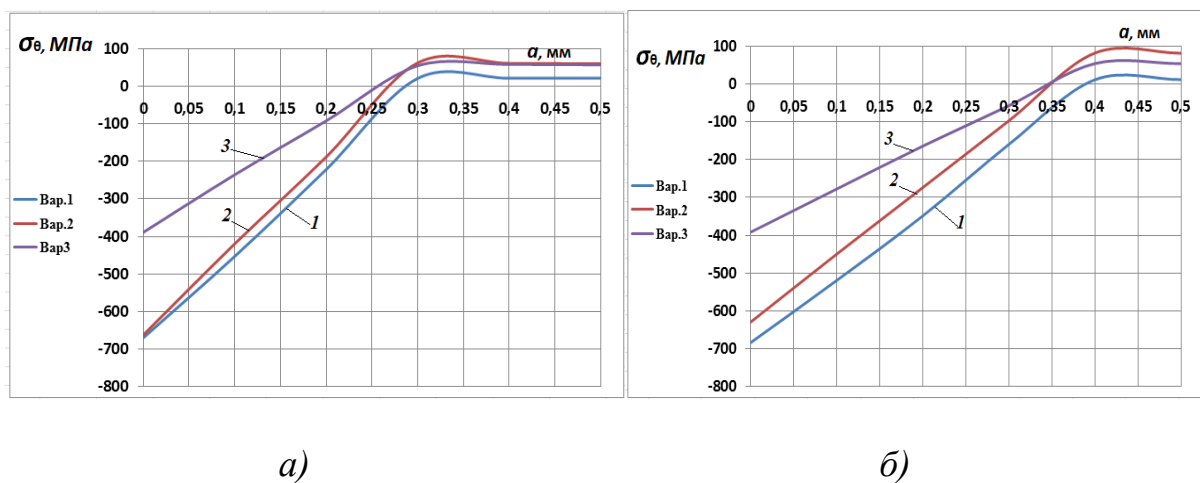
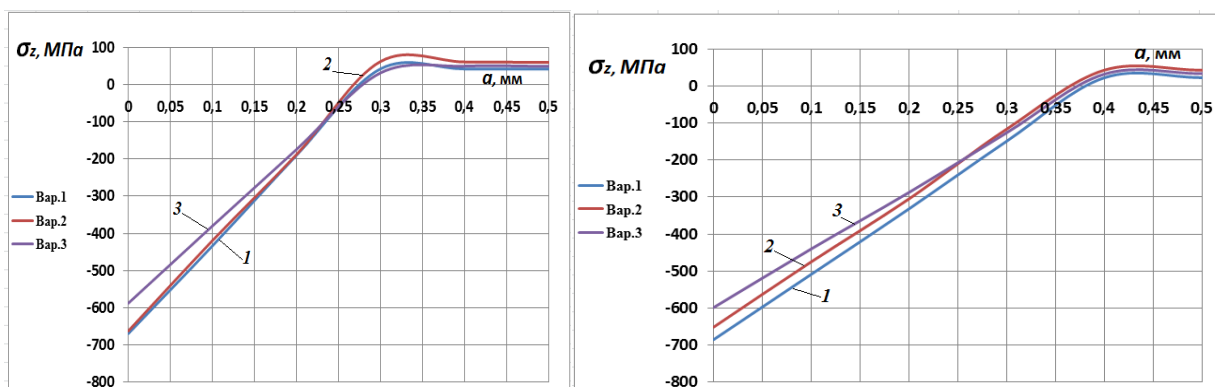


Рисунок 3. Зависимости окружных  $\sigma_\theta$  остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя цилиндрического образца:  $a - D = 10$  мм,  $b - D = 25$  мм



а)

б)

Рисунок 4. Зависимости осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя цилиндрического образца:  $a - D = 10$  мм,  $b - D = 25$  мм

Необходимо в первую очередь обратить внимание на то, что при выборе исходных данных для расчётов особо выделяется осевая первоначальная деформация  $\epsilon_{0z}$ , а окружная  $\epsilon_{0\theta}$  и радиальная  $\epsilon_{0r}$  составляющие принимались как часть от осевой компоненты. Данное обстоятельство связано с тем, что определяющее влияние на повышение сопротивления усталости за счёт упрочнения поверхности детали оказывает осевая компонента остаточных напряжений  $\sigma_z$  [2]. Отметим также, что образование и развитие усталостной трещины в опасном сечении происходит в плоскости, перпендикулярной оси детали [22,23]. Кроме того, известные методы прогнозирования сопротивления усталости упрочнённых деталей рассматривают обычно только осевую составляющую остаточных напряжений в поверхностном слое  $\sigma_z$  [2,6]. Поэтому проведение анализа результатов расчётов и получение выводов исследования выполнялось относительно влияния соотношений первоначальных деформаций на осевую компоненту остаточных напряжений  $\sigma_z$ .

Анализ результатов расчётов проведён применительно к компонентам остаточных напряжений в границах упрочнённого слоя и по их модулю. Из

представленных на рис. 2-4 графиков зависимостей следует, что при положительных первоначальных деформациях  $\varepsilon_{0z}$  и  $\varepsilon_{0\theta}$  осевые  $\sigma_z$  и окружные  $\sigma_\theta$  остаточные напряжения являются отрицательными по значениям. При этих условиях радиальные остаточные напряжения  $\sigma_r$  (рис. 2) являются положительными с нулевым значением на поверхности цилиндра и максимальным значением ближе к границе упрочнённого слоя. Наибольшее значение радиальных остаточных напряжений получено для варианта 1 (табл. 2), когда первоначальная деформация  $\varepsilon_{0r}$  положительная. Наименьшее значение  $\sigma_r$  получено для варианта 3 с меньшим по модулю отрицательным значением  $\varepsilon_{0r}$ . С увеличением диаметра цилиндра от  $D = 10$  мм до  $D = 25$  мм уровень радиальных остаточных напряжений снижается почти в два раза, что очевидно связано с увеличением жёсткости поперечного сечения детали.

Окружные остаточные напряжения  $\sigma_\theta$  (рис. 3), сжимающие по знаку, имеют наибольшее значение для варианта 3, а наименьшее – для варианта 1. С увеличением диаметра цилиндра уровень остаточных окружных напряжений возрастает, что также связано с увеличением жёсткости поперечного сечения. Для рассмотренных трёх вариантов соотношений первоначальных деформаций остаточные радиальные и окружные напряжения имеют достаточно большой разброс до 43%, который имеет наибольшее значение для диаметра цилиндра  $D = 10$  мм.

Осевые остаточные напряжения  $\sigma_z$  (рис. 4) аналогично окружной составляющей имеют наибольшее значение для варианта 3, а наименьшее – для варианта 1. При увеличении диаметра цилиндра уровень напряжений  $\sigma_z$  возрастает.

Для рассматриваемых вариантов соотношений первоначальных деформаций разброс наибольших значений  $\sigma_z$  составляет всего 12,1% при  $D = 10$  мм и 14,3% при  $D = 25$  мм.

Основные выводы данного исследования сделаны относительно влияния соотношений первоначальных деформаций на распределение остаточных осевых напряжений  $\sigma_z$  по толщине упрочнённого слоя, а также для обоснования выше принятых допущений и их использования при расчёте первоначальных деформаций методом конечно-элементного моделирования в среде комплексов типа PATRAN/NASTRAN, ANSYS.

### **Выводы**

1. Во всех рассмотренных вариантах соотношений первоначальных деформаций радиальные остаточные напряжения  $\sigma_r$  по толщине упрочнённого поверхностного слоя (рис. 2) являются растягивающими, а их максимальная величина по модулю не превышает 3% от максимальной величины осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений. Следовательно, первоначальная радиальная деформация существенного влияния на осевые остаточные напряжения  $\sigma_z$  оказывать не может вследствие небольшой толщины упрочнённого слоя.
2. Ввиду незначительной величины радиальных остаточных напряжений для упрощения решения задач, связанных с исследованием в области механики остаточных напряжений методом первоначальных деформаций, напряжениями  $\sigma_r$  вполне допускается пренебрегать.

3. В данном исследовании проведены расчёты компонент остаточного напряжённого состояния в диапазоне различных соотношений первоначальных деформаций, который охватывает их величину практически для всех видов поверхностного упрочнения деталей. Полученные результаты расчётов указывают на незначительное влияние соотношений первоначальных деформаций на осевые остаточные напряжения. Также дополнительно нужно учесть тот факт, что распределения остаточных напряжений  $\sigma_z$  и  $\sigma_\theta$  по толщине упрочнённого слоя определяются экспериментально и по их результатам соотношения первоначальных деформаций, как правило, всегда уточняются при расчёте.

### **Список источников**

1. Бабайцев А.В., Рабинский Л.Н., Ян Наинг Мин. Методика оценки остаточных напряжений в образцах из сплава AlSi10Mg, полученных по технологии SLM // Труды МАИ. 2021. № 119. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=159788>. DOI: [10.34759/trd-2021-119-10](https://doi.org/10.34759/trd-2021-119-10)
2. Шляпников П.А. Определение предельной амплитуды цикла упрочненных деталей с концентраторами напряжений с сжимающими средними напряжениями // Труды МАИ. 2020. № 114. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=118911>. DOI: [10.34759/trd-2020-114-08](https://doi.org/10.34759/trd-2020-114-08)
3. Афанасьев А.В., Дудченко А.А., Рабинский Л.Н. Влияние тканых слоев на остаточное напряженно-деформированное состояние изделий из полимерных

композиционных материалов // Труды МАИ. 2010. № 37. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=13411>

4. Штрикман М.М., Кащук Н.М. Определение тепловых напряжений и деформаций при фрикционной сварке трёхслойных панелей из алюминиевых сплавов // Труды МАИ. 2010. № 37. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=24728>

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

6. Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Вакулюк В.С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям. - Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2012. – 125 с.

7. Павлов В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение. 1986. № 8. С. 29-32.

8. Павлов В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение I. Сплошные детали // Известия вузов. Машиностроение. 1988. № 8. С. 22-25.

9. Павлов В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение II. Полые детали // Известия вузов. Машиностроение. 1988. № 12. С. 37-40.



10. Иванов С.И., Павлов В.Ф., Минин Б.В., Кирпичёв В.А., Кочеров Е.П., Головкин В.В. Остаточные напряжения и сопротивление усталости высокопрочных резьбовых деталей: монография. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2015. – 170 с.
11. Саушкин М.Н., Куров А.Ю. Конечно-элементное моделирование распределения остаточных напряжений в сплошных упрочнённых цилиндрических образцах с полукруглым надрезом // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. 2011. № 3 (24). С. 72-78.
12. Храмова Д.А., Егорова Д.А., Жилин Я.Д. Расчёт и моделирование остаточных напряжений // Политехнический молодежный журнал. 2018. № 1 (18). С. 1-11. DOI: [10.18698/2541-8009-2018-1-231](https://doi.org/10.18698/2541-8009-2018-1-231)
13. Каратушин С.И., Храмова Д.А., Бильдюк Н.А. Моделирование и расчёт остаточных напряжений в прокатных профилях // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 6. С. 28–34.
14. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. - М.: Наука, 1979. - 341 с.
15. Шатунов М.П., Иванов С.И., Филатов А.П. Концентрация остаточных напряжений, вызванных изотропной первоначальной деформацией // Вопросы прикладной механики авиационной техники: сборник трудов. - Куйбышев: КуАИ, 1975. № 77. С. 37-43.
16. Сазанов В.П., Кирпичёв В.А., Вакулюк В.С., Павлов В.Ф. Определение первоначальных деформаций в упрочнённом слое цилиндрической детали методом конечно-элементного моделирования с использованием расчётного комплекса

PATRAN/NASTRAN // Вестник УГАТУ. 2015. Т. 19. № 2 (68). С. 35-40.

17. Вакулюк В.С., Сазанов В.П., Шадрин В.К., Микушев Н.Н., Злобин А.С. Применение метода термоупругости при конечно-элементном моделировании остаточного напряжённого состояния в поверхностно упрочнённых деталях // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16. № 4. С. 168-174.

18. Иванов С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок. Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ, 1971. Вып. 53. С. 32-42.

19. Иванов С.И., Григорьева И.В. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом снятия части поверхности. Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: КуАИ, 1971. Вып. 48. С. 179-183.

20. Гликман Л.А. Методы определения остаточных напряжений // Труды Ленинградского инженерно-экономического института. 1960. № 30. С. 58-98.

21. Биргер И.А. Определение остаточных напряжений в образцах сложной формы // Заводская лаборатория. 1970. № 1. С. 81-83.

22. Григорьева И.В. Определение остаточных напряжений в цилиндрических деталях: Дисс. канд. техн. наук. – Куйбышев, 1978. – 130 с.

23. Бабей Ю.И., Бережницкая М.Ф. Методы определения остаточных напряжений первого рода. - Львов: ФМИ АН УССР, 1980. - 64 с.

24. Вакулюк В.С. Определение остаточных напряжений в шлицевых деталях: Автореф. дисс... канд. техн. наук. – Москва, 1983. – 15 с.

25. Гринченко И.Г., Полоскин Ю.В., Макаровский Н.Л. Определение окружных остаточных напряжений в местах конструктивного концентратора // Заводская лаборатория, 1972. № 7. С. 868-871.
26. Кудрявцев П.И., Морозова Т.И. Развитие усталостных трещин в сталях в связи с поверхностным наклёпом. - М.: Машиностроение, 1972. С. 194-200.
27. Троценко В.Т., Покровский В.В., Прокопенко А.В. Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении. - Киев: Наукова Думка, 1987. - 256 с.

## References

1. Babaitsev A.V., Rabinskii L.N., Yan Naing Min. *Trudy MAI*, 2021, no. 119. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=159788>. DOI: [34759/trd-2021-119-102](https://doi.org/10.34759/trd-2021-119-102)
2. Shlyapnikov P.A. *Trudy MAI*, 2020, no. 114. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=118911>. DOI: [10.34759/trd-2020-114-08](https://doi.org/10.34759/trd-2020-114-08)
3. Afanas'ev A.V., Dudchenko A.A., Rabinskii L.N. *Trudy MAI*, 2010, no. 37. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=13411>
4. Shtrikman M.M., Kashchuk N.M. *Trudy MAI*, 2010, no. 37. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=24728>
5. Birger I.A. *Ostatochnye napryazheniya* (Residual stresses), Moscow, Mashgiz, 1963, 232 p.
6. Pavlov V.F., Kirpichev V.A., Vakulyuk V.S. *Prognozirovanie soprotivleniya ustalosti poverkhnostno uprochnennykh detalei po ostatochnym napryazheniyam* (Prediction of

fatigue resistance of surface hardened parts by residual stresses), Samara, Izd-vo SNTs RAN, 2012, 125 p.

7. Pavlov V.F. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, 1986, no. 8, pp. 29-32.

8. Pavlov V.F. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, 1988, no. 8, pp. 22-25.

9. Pavlov V.F. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, 1988, no. 12, pp. 37-40.

10. Ivanov S.I., Pavlov V.F., Minin B.V., Kirpichev V.A., Kocherov E.P., Golovkin V.V. *Ostatochnye napryazheniya i soprotivlenie ustalosti vysokoprochnykh rez'bovykh detalei* (Residual stresses and fatigue resistance of high-strength threaded parts), Samara, Izd-vo SamNTs RAN, 2015, 170 p.

11. Saushkin M.N., Kurov A.Yu. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie nauki*. 2011, no. 3 (24), pp. 72-78.

12. Khramova D.A., Egorova D.A., Zhilin Ya.D. *Politekhnicheskii molodezhnyi zhurnal*, 2018, no. 1 (18), pp. 1-11. DOI: [10.18698/2541-8009-2018-1-231](https://doi.org/10.18698/2541-8009-2018-1-231)

13. Karatushin S.I., Khramova D.A., Bil'dyuk N.A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie*. 2017, no. 6, pp. 28–34.

14. Timoshenko S.P., Gud'er Dzh. *Teoriya uprugosti* (Theory of elasticity), Moscow, Nauka, 1979, 341 p.

15. Shatunov M.P., Ivanov S.I., Filatov A.P. *Voprosy prikladnoi mekhaniki aviatsionnoi tekhniki*, Kuibyshev, KuAI, 1975, no 77, pp. 37-43.

16. Sazanov V.P., Kirpichev V.A., Vakulyuk V.S., Pavlov V.F. *Vestnik UGATU*, 2015, vol. 19, no. 2 (68), pp. 35-40.

17. Vakulyuk V.S., Sazanov V.P., Shadrin V.K., Mikushev N.N., Zlobin A.S. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2014, vol. 16, no. 4, pp. 168-174.
18. Ivanov S.I. *K opredeleniyu ostatochnykh napryazhenii v tsilindre metodom kolets i polosok. Ostatochnye napryazheniya* (To the determination of residual stresses in the cylinder by the method of rings and strips. Residual stresses), Kuibyshev, KuAI, 1971, issue 53, pp. 32-42.
19. Ivanov S.I., Grigor'eva I.V. *K opredeleniyu ostatochnykh napryazhenii v tsilindre metodom snyatiya chasti poverkhnosti. Voprosy prochnosti elementov aviatsionnykh konstruksii* (To the determination of residual stresses in the cylinder by removing part of the surface Issues of the strength of elements of aircraft structures), Kuibyshev, KuAI, 1971, issue 48, pp. 179-183.
20. Glikman L.A. *Trudy Leningradskogo inzhenerno-ekonomicheskogo instituta*, 1960, no. 30, pp. 58-98.
21. Birger I.A. *Zavodskaya laboratoriya*, 1970, no. 1, pp. 81-83.
22. Grigor'eva I.V. *Opredelenie ostatochnykh napryazhenii v tsilindricheskikh detalyakh* (Determination of residual stresses in cylindrical parts), Doctor's thesis, Kuibyshev, 1978, 130 p.
23. Babei Yu.I., Berezhnitskaya M.F. *Metody opredeleniya ostatochnykh napryazhenii pervogo roda* (Methods for determining residual stresses of the first kind), Lvov, FMI AN USSR, 1980, 64 p.

24. Vakulyuk V.S. *Opredelenie ostatochnykh napryazhenii v shlitsevykh detalyakh*: (Determination of residual stresses in splined parts), dissertation abstract, Moscow, 1983, 15 p.
25. Grinchenko I.G., Poloskin Yu.V., Makarovskii N.L. *Zavodskaya laboratoriya*, 1972, no. 7, pp. 868-871.
26. Kudryavtsev P.I., Morozova T.I. *Razvitie ustalostnykh treshchin v stalyakh v svyazi s poverkhnostnym naklepom* (Development of fatigue cracks in steels due to surface hardening), Moscow, Mashinostroenie, 1972, pp. 194-200.
27. Troshchenko V.T., Pokrovskii V.V., Prokopenko A.V. *Treshchinostoikost' metallov pri tsiklicheskom nagruzhenii* (Crack resistance of metals under cyclic loading), Kiev, Naukova Dumka, 1987, 256 p.

Статья поступила в редакцию 04.09.2023

Одобрена после рецензирования 20.09.2023

Принята к публикации 27.10.2023

The article was submitted on 04.09.2023; approved after reviewing on 20.09.2023; accepted for publication on 27.10.2023