

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья

УДК 539.389:621.9.011

EDN: EAULHD

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-1-40-50



Исследование распределения остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя после механической обработки методами сверления зондирующих отверстий и цифровой корреляции изображений

М.С. Махалов^{1✉}, А.А. Кречетов², В.Ю. Блюменштейн³, В.В. Горбатенко⁴

¹⁻³Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачёва, г. Кемерово, Россия

⁴Институт физики прочности металлов СО РАН, г. Томск, Россия

Резюме. Цель – исследование распределения остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя после обработки экспериментальных образцов методами свободного ортогонального резания и поверхностного пластического деформирования. Обработка резанием и поверхностным пластическим деформированием образцов, изготовленных из стали 45, проводилась на фрезерном станке с числовым программным управлением в условиях варьирования технологических факторов обработки. Для проведения сравнительного анализа выполнялось также моделирование процессов методом конечных элементов с использованием идентичных экспериментальных значений геометрических параметров и режимов обработки. Для получения распределений остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя проводилось сверление зондирующих отверстий глубиной 0,5; 0,75; 1; 1,5; и 2 мм соответственно. Путем дифференцирования измеренных с использованием метода цифровой корреляции изображений перемещений материальных частиц поверхности образца были определены радиальные деформации вокруг зондирующих отверстий. Далее по этим значениям определялись компоненты остаточных напряжений для каждого зондирующего отверстия, с использованием представленного в работе расчетного алгоритма осуществлялся расчет усредненных значений каждого компонента остаточных напряжений. Так, после поверхностного пластического деформирования образца с усилием 3400 Н экспериментальное значение компонента σ_x в диапазоне глубин 0,5...0,75 мм от поверхности составило -250 МПа. Получены модельные и экспериментальные распределения компонент тензора остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя после обработки двумя способами. Установлено, что экспериментальные значения остаточных напряжений в целом имеют хорошую сходимость между собой и с модельными распределениями на глубинах до 1 мм от обработанной поверхности при использованном диаметре сверла 1,7 мм. Предложенный авторами подход позволяет получить распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя путем сверления зондирующих отверстий различной глубины и оценки радиальных деформаций на поверхности образца с использованием метода цифровой корреляции изображений.

Ключевые слова: остаточные напряжения, механическое состояние металла, поверхностный слой, сверление зондирующих отверстий, метод цифровой корреляции изображений

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований, грант № 20-08-00587.

Для цитирования: Махалов М.С., Кречетов А.А., Блюменштейн В.Ю., Горбатенко В.В. Исследование распределения остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя после механической обработки методами сверления зондирующих отверстий и цифровой корреляции изображений // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 1. С. 40–50. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-40-50>. EDN: EAULHD.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Study of the distribution of residual stresses across the surface layer depth following machining through probing hole drilling and digital image correlation

Maksim S. Makhalov^{1✉}, Andrey A. Krechetov², Valeriy Yu. Blumenstein³, Vadim V. Gorbatenko⁴

© Махалов М.С., Кречетов А.А., Блюменштейн В.Ю., Горбатенко В.В., 2024

¹⁻³T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia

⁴Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract. The article aims to study the distribution of residual stresses across the surface layer depth following the machining of test specimens (free orthogonal cutting and burnishing). The machining by cutting and burnishing of 45 steel specimens was carried out using a milling machine with numerical control under varying machining factors. For a comparative analysis, the processes were also modeled via the finite element method using identical experimental values of geometric parameters and machining modes. In order to obtain residual stress distributions across the surface layer depth, probe holes having depths of 0.5; 0.75; 1; 1.5; and 2 mm were drilled. By differentiating the displacement of specimen surface particles, measured using digital image correlation, radial strains around the probe holes were determined. Then, these values were used to determine the residual stress components for each probe hole, and the averaged values of each residual stress component were calculated using the calculation algorithm presented in this article. After burnishing the specimen with a force of 3400 N, the test value of the σ_x component within the depth range (from the surface) of 0.5–0.75 mm amounted to -250 MPa. Model and experimental distributions of residual stress tensor components across the surface layer depth were obtained following machining via two methods. The experimental values of residual stresses were found to have good convergence with each other and with model distributions at depths up to 1 mm from the machined surface at a drill diameter of 1.7 mm. The proposed approach provides a means to obtain the residual stress distribution across the surface layer depth by drilling probe holes of different depths and estimating radial strains on the specimen surface using the digital image correlation method.

Keywords: residual stresses, mechanical state of metal, surface layer, drilling probing holes, digital image correlation method

Funding: The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research, grant no. 20-08-00587.

For citation: Makhalov M.S., Krechetov A.A., Blumenstein V.Yu., Gorbatenko V.V. Study of the distribution of residual stresses across the surface layer depth following machining through probing hole drilling and digital image correlation. *iPolytech Journal*. 2024;28(1):40-50. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-40-50>. EDN: EAULHD.

ВВЕДЕНИЕ

Остаточные напряжения (ОН) являются важным фактором, оказывающим большое влияние на эксплуатационные свойства деталей машин. В настоящее время современные инженерные CAE-системы моделирования процессов изготовления и эксплуатации изделия позволяют оценивать значения остаточных напряжений с достаточно высокой достоверностью [1–11]. Однако наличие большого количества влияющих на их формирование факторов, необходимость исследования релаксации при эксплуатации изделия и многие другие вопросы сохраняют актуальным экспериментальное определение остаточных напряжений.

Механические методы определения остаточных напряжений используются для определения ОН как на поверхности, так и по глубине поверхностного слоя. Они получили наибольшее распространение потому, что с одной стороны появились раньше других, а с другой – построены на физических представлениях механики твердого тела, как и расчеты напряжений и деформаций, возникающих от внешних воздействий [12–17]. На практике подавляющее большинство таких методов основано на удалении материала, вследствие чего имеют неприемлемо высокую погрешность, которая вместе с трудоемкостью и необходи-

мостью разрушения объекта контроля составляет их главный недостаток.

Многочисленные неразрушающие методы не оказывают значимых результатов воздействия на исследуемый объект [18–20]. Однако для определения остаточных напряжений 1-го рода имеется ряд трудностей.

Так, рентгеновский метод с помощью дорогостоящего и громоздкого оборудования позволяет достоверно оценивать лишь ОН 2-го и 3-го рода в поверхностном слое преимущественно небольшой толщины (примерно до 50 мкм).

Характеристики, измеряемые акустическими и магнитными методами, имеют разную с ОН физическую природу и оценивают комплексное состояние металла: изменение измеряемой величины является результатом действия целого ряда факторов – изменений микроструктуры металла, степени поврежденности, а также величины и направления остаточных напряжений 1-го, 2-го и даже 3-го рода. Существенную проблему в этом направлении, в полной мере нерешаемую процедурами тарировки на эталонных образцах, представляет установление количественных взаимосвязей между величиной ОН и измеряемыми параметрами.

Оптические методы служат для измерения возникающих перемещений (деформаций) и для определения ОН применимы лишь со-

вместно с каким-либо разрушающим методом [21–23].

В работе [24] приведены результаты оценки напряженного состояния как непосредственно в процессе обкатывания, так и после механической обработки с использованием метода рентгеноструктурного анализа. Такой подход позволяет получить распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя в плоскости боковой грани образца, оценить влияние режимов обработки на формирование остаточных напряжений. Однако для измерения остаточных напряжений этим способом требуется громоздкое, дорогостоящее и энергоемкое оборудование. Время измерения в одной точке составляет 1 с, при необходимости определения в большом количестве точек общее время измерения может быть значительным.

Учитывая сказанное, перспективным для определения ОН, в том числе и по глубине поверхностного слоя представляется использованный в настоящей работе метод сверления зондирующего отверстия, дополненный методом цифровой корреляции изображений, который в свою очередь является развитием метода голографической интерферометрии [25–37].

При сверлении зондирующих отверстий на поверхности образца, имеющего ОН, происходят малые по величине перемещения материальных частиц, вызванные перераспределением внутренних напряжений, вышедших вследствие сверления из равновесного состояния. Для определения этих перемещений применяется метод цифровой корреляции изображений (Digital Image Correlation – DIC), использующий для оценки величины и направления смещения изображения спекл-структуры, созданной на поверхности образца когерентным лазерным освещением до и после процесса сверления. Уникальность спекл-структуры каждого фрагмента поверхности объекта определяется микрорельефом поверхности и изменяется при перемещениях материальных частиц поверхности.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование распределения остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя после обработки экспериментальных образцов методами резания и поверхностным пластическим деформированием (ППД).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обработка экспериментальных образцов, изготовленных из стали 45 в состоянии поставки, резанием и ППД проводилась на фрезерном станке с ЧПУ [38]. Для проведения сравнительного анализа выполнялось также моделирование процессов методом конечных элементов, при этом использовались идентичные экспериментальным значения геометрических параметров и режима обработки (рис. 1).

В качестве базового режима резания (образцы серии 0101) были приняты:

- глубина резания $t = 0,35$ мм (использованный диапазон 0,2...0,5 мм);
- скорость резания $V = 20$ мм/мин (использованный диапазон 5...20 мм/мин).

Параметры режима ППД (образцы серии 0102) составили:

- профильный радиус индентора/валка $R_{пр} = 5$ мм (использованный диапазон 2...10 мм);
- усилие обработки $P = 3400$ Н (использованный диапазон 1500...3400 Н);
- скорость обработки $V = 20$ мм/мин (использованный диапазон 2...20 мм/мин).

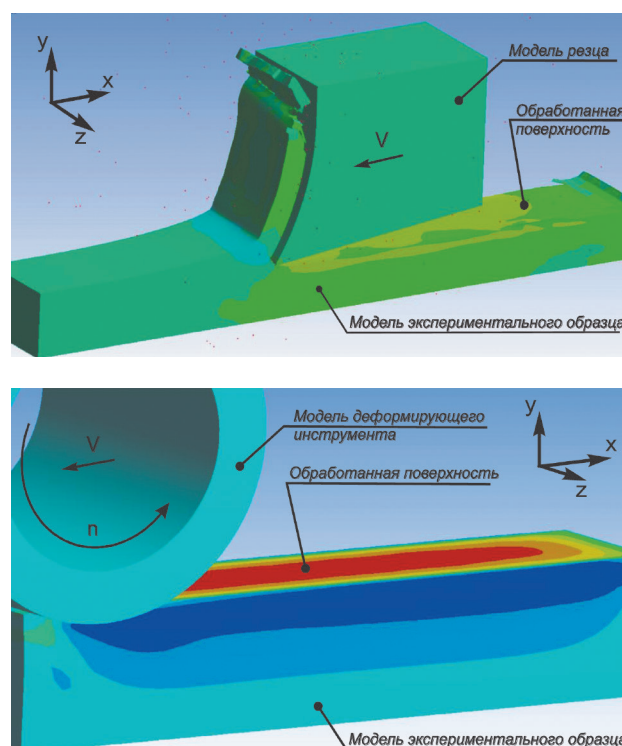


Рис. 1. Конечно-элементные модели нагружения экспериментальных образцов свободным ортогональным резанием и поверхностным пластическим деформированием

Fig. 1. Finite element models of free orthogonal cutting and surface plastic deformation loading of experimental samples

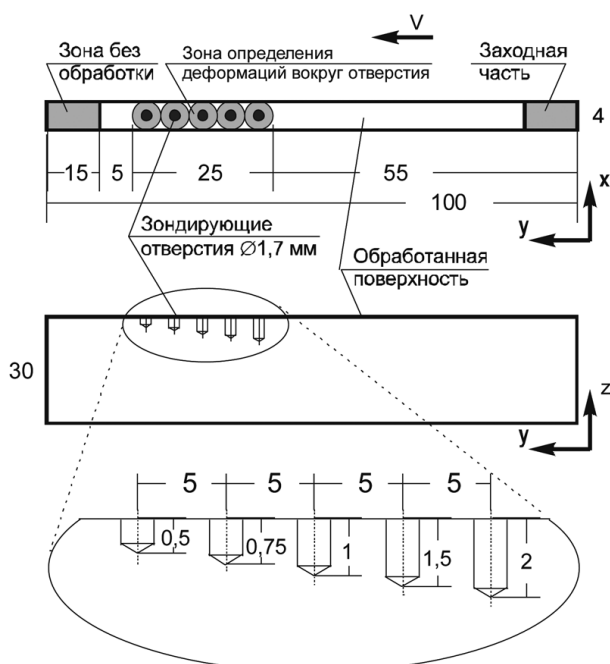


Рис. 2. Схема расположения зондирующих отверстий на экспериментальном образце
 Fig. 2. Experimental sample probing hole layout

Для измерения распределения ОН по глубине поверхностного слоя, на основе приведенных в [39] рекомендаций, на каждом образце на равных расстояниях друг от друга выполнялось 5 отверстий различной глубины (рис. 2). Частота вращения сверла составила 10000 об/мин, подача – 1 мм/мин.

Для каждого отверстия с использованием метода цифровой корреляции изображений по изображениям до и после сверления проводилась оценка векторов перемещений материальных частиц, дифференцированием

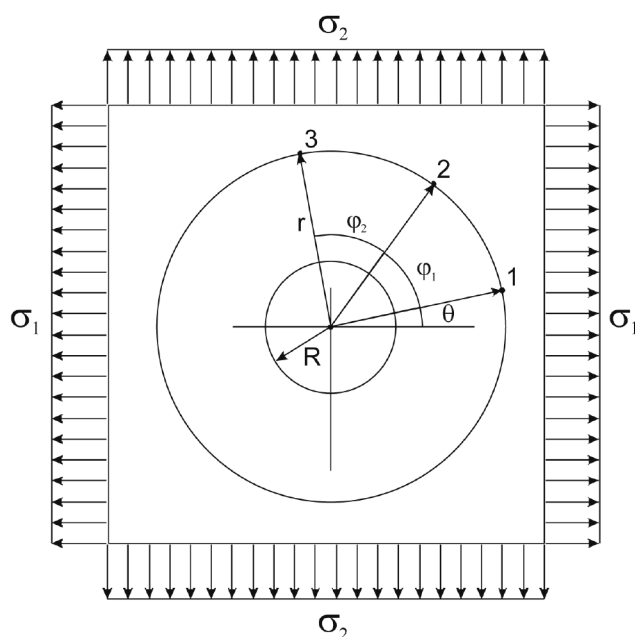


Рис. 3. К расчету ОН в тонких пластинах после сверления сквозных отверстий [12]
 Fig. 3. To residual stress calculation in thin plates after through holes drilling [12]

которых получали значения радиальных деформаций в точках вокруг отверстия.

Значения радиальной деформации в любых трех точках вокруг отверстия позволили рассчитать компоненты главных напряжений σ_1 , σ_2 и угол их поворота θ в выбранной системе координат.

В случае, когда все три точки лежат на одинаковом расстоянии r от центра отверстия (рис. 3), использовались следующие выражения [12, 39]:

$$\operatorname{tg} 2\theta = -\frac{\varepsilon_{r3} - \varepsilon_{r2} - (\varepsilon_{r3} - \varepsilon_{r1}) \cos 2\varphi_1 + (\varepsilon_{r2} - \varepsilon_{r1}) \cos 2(\varphi_1 + \varphi_2)}{(\varepsilon_{r2} - \varepsilon_{r1}) \sin 2(\varphi_1 + \varphi_2) - (\varepsilon_{r3} - \varepsilon_{r1}) \sin 2\varphi_1}; \quad (1)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{A} \cdot \frac{\varepsilon_{r1} \cos 2(\theta + \varphi_1) - \varepsilon_{r2} \cos 2\theta}{\cos 2\theta - \cos 2(\theta + \varphi_1)} - \frac{E}{B} \cdot \frac{\varepsilon_{r2} - \varepsilon_{r1}}{\cos 2\theta - \cos 2(\theta + \varphi_1)}; \quad (2)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{A} \cdot \frac{\varepsilon_{r1} \cos 2(\theta + \varphi_1) - \varepsilon_{r2} \cos 2\theta}{\cos 2\theta - \cos 2(\theta + \varphi_1)} - \frac{E}{B} \cdot \frac{\varepsilon_{r2} - \varepsilon_{r1}}{\cos 2\theta - \cos 2(\theta + \varphi_1)}; \quad (3)$$

$$A = \frac{R^2}{r^2} (1 + \mu); \quad B = \frac{R^2}{r^2} \left[4 - \frac{3R^2(1 + \mu)}{r^2} \right], \quad (4, 5)$$

где φ_1 – угол между 1-й и 2-й точками, град.; φ_2 , – угол между 2-й и 3-й точками, град.; E – модуль Юнга, МПа; ε_{r1} , ε_{r2} , ε_{r3} – радиальная деформация в 1-й, 2-й и 3-й точках соответственно; μ – коэффициент Пуассона; R – радиус отверстия, мм; A , B – комплексные коэффициенты.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Получаемые по выражениям (1)–(5) результаты справедливы для случая определения ОН при сверлении сквозных отверстий в тонкой пластине. Однако для решения поставленной задачи получения распределений напряжений по глубине необходима адаптация представленных расчетных взаимосвязей для несквозных отверстий различной глубины в сплошной заготовке.

Анализ литературных источников [33–34, 39] показывает, что смещения (деформации), полученные при сверлении несквозного отверстия, как и в случае сверления отверстия в тонкой пластине, позволяют получить среднее значение ОН по толщине слоя, равного глубине этого отверстия.

Тогда, поскольку для зондирующих отверстий различной глубины главные напряжения s_1 , s_2 имеют различный угол поворота q относительно выбранной системы координат, для вычисления распределения по глубине для каждого отверстия необходимо определить нормальные s_x , s_y и касательные s_{xy} компоненты ОН. Предположим, что направление главного напряжения s_1 образует с осью x угол q , который меньше 90° , тогда:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sigma_1 \cos^2 \theta + \sigma_2 \sin^2 \theta; \\ \sigma_y &= \sigma_2 \cos^2 \theta + \sigma_1 \sin^2 \theta; \\ \sigma_{xy} &= \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\theta.\end{aligned}\quad (6)$$

Обозначим полученные для отверстий различной глубины компоненты соответствующими индексами (таблица) и рассмотрим последующий расчет на примере компонента σ_x .

Если для каждого отверстия известно осредненное по глубине этого отверстия значение какого-либо компонента, то произведение величины компонента на глубину отверстия (например, $\sigma_{x1} h_1$) эквивалентно площади соответствующего прямоугольника на рис. 4.

Расчет на примере компонента σ_x
Calculation by example of σ_x component

Номер отверстия (интервала)	Зондирующее отверстие		Обозначение компонента			Интервал глубины		Средне-интервальное значение компонента
	Обозначение	Глубина, мм	σ_x	σ_y	σ_{xy}	от	до	
1	h_1	0,5	σ_{x1}	σ_{y1}	σ_{xy1}	0	h_1	σ_{x1}^*
2	h_2	0,75	σ_{x2}	σ_{y2}	σ_{xy2}	h_1	h_2	σ_{x2}^*
3	h_3	1,0	σ_{x3}	σ_{y3}	σ_{xy3}	h_2	h_3	σ_{x3}^*
4	h_4	1,5	σ_{x4}	σ_{y4}	σ_{xy4}	h_3	h_4	σ_{x4}^*
5	h_5	2,0	σ_{x5}	σ_{y5}	σ_{xy5}	h_4	h_5	σ_{x5}^*

Очевидно, что, например, произведение $\sigma_{x2} h_2$ включает в себя произведение $\sigma_{x1} h_1$, а произведение $\sigma_{x3} h_3$ содержит $\sigma_{x2} h_2$ и т.д., поскольку каждое отверстие большей глубины охватывает собой слои металла, расположенные на меньших глубинах.

Учитывая это и используя соответствующие обозначения, имеется возможность рассчитать средне-интервальные значения компонент в интервалах глубин, представленных в таблице.

Очевидно, что $\sigma_{x1}^* = \sigma_{x1}$, далее определим σ_{x2}^* :

$$\sigma_{x2} h_2 = \sigma_{x1} h_1 + \sigma_{x2}^* (h_2 - h_1);$$

откуда

$$\sigma_{x2}^* = \frac{\sigma_{x2} h_2 - \sigma_{x1} h_1}{(h_2 - h_1)}.$$

Аналогично этому:

$$\sigma_{x3}^* = \frac{\sigma_{x3} h_3 - \sigma_{x2} h_2}{(h_3 - h_2)}; \quad \sigma_{x4}^* = \frac{\sigma_{x4} h_4 - \sigma_{x3} h_3}{(h_4 - h_3)};$$

$$\sigma_{x5}^* = \frac{\sigma_{x5} h_5 - \sigma_{x4} h_4}{(h_5 - h_4)}. \quad (7)$$

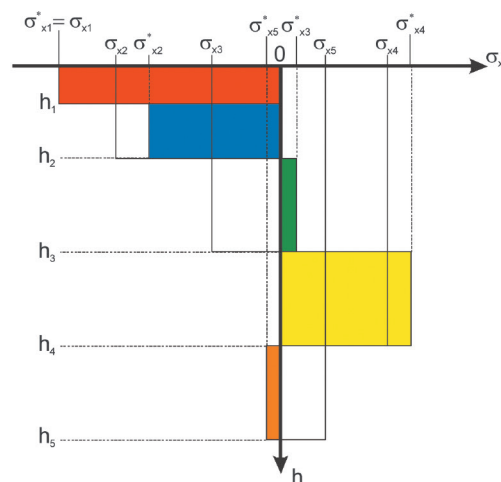


Рис. 4. Схема к определению и пример результирующего распределения компонента σ_x остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя

Fig. 4. Diagram of σ_x component surface layer depth determination and resulted averaged distribution example

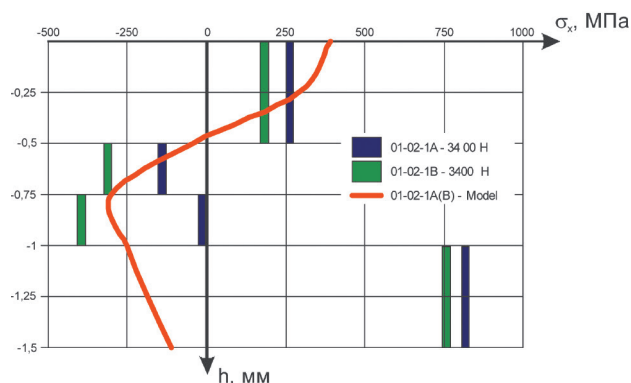


Рис. 5. Модельное и экспериментальные распределения осевого компонента ОН по глубине поверхностного слоя после обработки пластическим деформированием ($P = 3400$ Н, $V = 20$ мм/мин)

Fig. 5. Model and experimental distribution of the axial residual stress component by the surface layer depth after surface plastic deformation treatment ($P = 3400$ N, $V = 20$ mm/min)

С использованием представленных преобразований осуществляется расчет усредненных в пределах указанных диапазонов значений каждого компонента ОН (см. рис. 4).

В качестве примера на рис. 5 показано экспериментальное распределение осевого (вдоль наибольшего размера образца) компонента ОН по глубине поверхностного слоя. Экспериментальные точки получены на двух различных образцах (0102-1А и 0102-1В), обработанных ППД с идентичным режимом.

В использованной постановке процесса ППД осевой компонент имеет экстремум растягивающих ОН (370 МПа) на поверхности, распространяемых на глубину около 0,5 мм. Второй (отрицательный) экстремум для обеих моделей одинаков и располагается на глубине 0,8 мм от поверхности, величина ОН в нем составляет -300 МПа.

Экспериментальные значения ОН для представленных образцов имеют высокую сходимость между собой на всей рассматри-

ваемой глубине и хорошую сходимость с модельным распределением в диапазоне глубин 0...0,8 мм.

Полученные распределения качественно согласуются с результатами более ранних работ, в которых авторы подчеркивают возможность экстремума сжимающих ОН как на поверхности заготовки, так и на некоторой глубине [40, 41].

Анализ показал, что использованная постановка моделирования позволяет получить качественное и количественное соответствие экспериментальным данным, полученным для аналогичных условий обработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Представлена методика экспериментального определения остаточных напряжений путем сверления зондирующих отверстий совместно с методом цифровой корреляции изображений, позволяющая оценить распределение тангенциальной и нормальных составляющих в плоскости поверхности образца по глубине поверхностного слоя.

2. Показано, что определение остаточных напряжений на определенной глубине поверхностного слоя возможно путем сверления зондирующего отверстия соответствующей глубины и оценке радиальной деформации на поверхности образца, которая возникает вследствие перераспределения остаточных напряжений.

3. Получены модельные и экспериментальные распределения компонент тензора остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя после обработки свободным ортогональным резанием и поверхностным пластическим деформированием. Экспериментальные значения ОН в целом имеют хорошую сходимость между собой и с модельными распределениями на глубинах до 1 мм от обработанной поверхности.

Список источников

1. Kostylev V.I., Margolin B.Z. Determination of residual stress and strain fields caused by cladding and tempering of reactor pressure vessels // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2000. Vol. 77. P. 723–735. [https://doi.org/10.1016/S0308-0161\(00\)00062-4](https://doi.org/10.1016/S0308-0161(00)00062-4).
2. Чирков А.В., Сазанов В.П., Самойлов В.А., Ларионова Ю.С. Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических образцах при опережающем поверхностном пластическом деформировании // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2011. № 3. С. 171–174. EDN: TVWGJH.
3. Покровский А.М. Расчет остаточных напряжений в биметаллических опорных прокатных валках после термической обработки // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2012. С. 186–196. EDN: QNUUYV.
4. Hassani-Gangarajab S.M., Carbonib M., Guaglianob M. Finite element approach toward an advanced understanding of

- deep rolling induced residual stresses, and an application to railway axles // *Materials & Design*. 2015. Vol. 83. P. 689–703. <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.026>.
5. Lyubenova N., Baehre D. Finite element modelling and investigation of the process parameters in deep rolling of AISI 4140 steel // *Journal of Materials Science and Engineering*. 2015. Vol. 5. Iss. 7-8. P. 277–287. <http://doi.org/10.17265/2161-6221/2015.7-8.004>.
6. Kukiela L., Szczesniak M., et al. Analysis of the states of deformation and stress in the surface layer of the product after the burnishing cold rolling operation // *Materials Science Forum*. 2016. Vol. 862. P. 278–287. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.862.278>.
7. Радченко В.П., Саушкин М.Н., Бочкова Т.И. Математическое моделирование и экспериментальное исследование формирования и релаксации остаточных напряжений в плоских образцах из сплава ЭП742 после ультразвукового упрочнения в условиях высокотемпературной ползучести // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Серия: Машиностроение, материаловедение*. 2016. № 1. P. 93–112. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2016.1.07>. EDN: VQTAHL.
8. Saini S., Ahuja I.S., Sharma V.S. Modeling the effects of cutting parameters on residual stresses in hard turning of AISI H11 tool steel // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. Vol. 65. P. 667–678. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4206-0>.
9. Huang Xiaoming, Sun Jie, Li Jianfeng. Finite element simulation and experimental investigation on the residual stress-related monolithic component deformation // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 77. Iss. 5-8. P. 1035–1041. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6533-9>.
10. Su Jiann-Cherng, Young A. Keith, Ma Kong, Srivatsa Shesh, Morehouse B. John, Liang Y. Steven. Modeling of residual stresses in milling // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. Vol. 65. P. 717–733. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4211-3>.
11. Ji Xia, Zhang Xueping, Liang Y. Steven Predictive modeling of residual stress in minimum quantity lubrication machining // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014. Vol. 70. P. 2159–2168. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5439-2>.
12. Биргер И.А. Остаточные напряжения. Серия: Физико-математическое наследие: физика (механика). 2-е изд. М.: Ленанд, 2015. 234 с.
13. Давиденков Н.Н. Измерение остаточных напряжений в трубах // *Журнал технической физики*. 1931. Т. 1. № 1. С. 206–218.
14. Разумовский И.А. Экспериментальные методы исследования напряженно-деформированного состояния: история, проблемы, перспективы развития // *Машиностроение и инженерное образование*. 2018. № 2. С. 17–32. EDN: XZIJKH.
15. Елеонский С.И., Одинцев И.Н., Писарев В.С., Усов С.М. Определение остаточных напряжений и коэффициентов интенсивности напряжений на основе локального удаления материала // *Ученые Записки ЦАГИ*. 2017. Т. 48. № 4. С. 57–77. EDN: ZDMMQL.
16. Aniskovich E.V., Moskvichev V.V., Makhutov N.A., Razumovskii I.A., Apalkov A.A., Plugatar T.P. Evaluation of residual stresses in the impeller blades of hydraulic units // *Power Technology and Engineering*. 2019. Vol. 53. № 1. P. 33–38. <https://doi.org/10.1007/s10749-019-01030-y>. EDN: SAKRHC.
17. Yonezu A., Kusano R., Hiyoshi T., Chen Xi. A method to estimate residual stress in austenitic stainless steel using a microindentation test // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2015. Vol. 24. Iss. 1. P. 362–372. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-1280-5>.
18. Венгринович В.Л., Винтов Д.А., Прудников А.Н., Подугольников П.А., Рябцев В.Н. Особенности измерения напряжений в ферромагнетиках методом эффекта Баркгаузена // *Контроль. Диагностика*. 2017. № 8. С. 10–17. <https://doi.org/10.14489/td.2017.08.pp.010-017>. EDN: ZCRNIJ.
19. Паньковский Ю.П. Аппаратная реализация некоторых магнитных методов неразрушающего контроля // *Мир измерений*. 2005. № 5. С. 9–12.
20. Улыбин А.В., Васильков С.Д. Использование резистивного электроконтактного метода для контроля напряжённо-деформированного состояния элементов стальных конструкций // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского политехнического университета*. 2009. № 6. С. 155–160. EDN: QLMNUD.
21. Луценко А.Н., Одинцев И.Н., Гриневич А.В., Северов П.Б., Плугатарь Т.П. Исследование процесса деформации материала оптико-корреляционными методами // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № 14. С. 70–86. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2014-0-s4-70-86>.
22. Дорофеев В.С., Зинченко А.В. Исследование напряженно-деформированного состояния изгибаемых элементов с учетом технологической поврежденности поляризационно-оптическим методом // *European Cooperation*. 2016. Vol. 19. Iss. 12. P. 48–58.
23. Barile C., Casavola C., Pappaletta G., Pappaletta C. A review of residual stress measurements by HDM and optical techniques // *Machines. Technologies. Materials*. 2017. Vol. 11. Iss. 1. P. 27–29.
24. Meyer H., Epp J. In Situ x-ray diffraction analysis of stresses during deep rolling of steel // *Quantum Beam Science*. 2018. Vol. 2. Iss. 4. P. 20. <https://doi.org/10.3390/qubs2040020>.
25. Одинцев И.Н., Щепинов В.П., Щиканов А.Ю. Применение голографической интерферометрии для измерения остаточных напряжений методом зондирующего отверстия // *Журнал технической физики*. 2003. Т. 73. Вып. 11. С. 106–110. EDN: TTEUVV.
26. Апальков А.А., Ларкин А.И., Осинцев А.В., Одинцев И.Н., Щепинов В.П., Щиканов А.Ю. [и др.]. Голографический метод исследования остаточных напряжений // *Квантовая электроника*. 2007. Т. 37. № 6. С. 590–59.

27. Махутов Н.А., Разумовский И.А., Косов В.С., Апальков А.А., Одинцев И.Н. Исследование остаточных напряжений с применением электронной цифровой спекл-интерферометрии в натуральных условиях // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008. Т. 74. № 5. С. 47–51. EDN: JUHLPR.
28. Beghini M., Bertini L., Santus C. A procedure for evaluating high residual stresses using the blind hole drilling method, including the effect of plasticity // The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 2010. Vol. 45. Iss. 4. P. 301–320. <https://doi.org/10.1243/03093247JSA579>.
29. Апальков А.А., Одинцев И.Н., Плотников А.С. Оценка диапазона достоверных измерений остаточных напряжений методом сверления отверстий // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82. № 2. С. 47–52. EDN: VPIOUB.
30. Zhang Keming, Li Yong, Xu Min, Ke Youlong. Residual stress release characteristics of hole drilling determined by in-plane three-directional optical interference moiré // Journal of Modern Optics. 2018. Vol. 65. Iss. 21. P. 1362–3044. <https://doi.org/10.1080/09500340.2018.1506519>.
31. Baldi A. On the implementation of the integral method for residual stress measurement by integrated digital image correlation // Experimental Mechanics. 2019. Vol. 59. Iss. 7. P. 1007–1020. <https://doi.org/10.1007/s11340-019-00503-5>.
32. Клименко И.С. Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия. М.: Наука, 1985. 224 с.
33. Rickert T. Residual stress measurement by ESPI hole-drilling // 3rd CIRP Conference on Surface Integrity: Procedia CIRP. 2016. Vol. 45. P. 203–206. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.256>.
34. Usov S.M., Razumovsky I.A., Odintsev I.A. Study of inhomogeneous fields of residual stresses using step-by-step enlarged crack method in combination with electronic speckle pattern interferometry // Industrial laboratory. Diagnostics of materials. 2021. Vol. 87. Iss. 9. P. 50–58. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2021-87-9-50-58>.
35. Zuev L.B., Barannikova S.A., Lunev A.G., Kolosov S.V., Zharmukhambetova A.M. Basic relationships of the autowave model of a plastic flow // Russian Physics Journal. 2019. Vol. 61. P. 1709–1717. <https://doi.org/10.1007/s11182-018-1591-3>. EDN: PANUBB.
36. Barannikova S., Li Y., Zuev L. Research of the plastic deformation localization of bimetal // Metalurgija. 2018. Vol. 57. Iss. 4. P. 275–278.
37. Zuev L.B., Barannikova S.A., Orlova D.V. Autowave criteria of fracture and plastic strain localization of zirconium alloys // Metals. 2022. Vol. 12. Iss. 1. P. 95. <https://doi.org/10.3390/met12010095>. EDN: MUKZIO.
38. Блюменштейн В.Ю., Жирков А.А., Учайкин С.Е., Кречетов А.А., Махалов М.С. Разработка методик и средств технологического оснащения для исследования пластического течения металла в процессах обработки. Часть 1. Проектирование и изготовление специального настольно-фрезерного станка с ЧПУ для исследования пластического течения металла // Упрочняющие технологии и покрытия. 2022. Т. 18. № 7. С. 311–319. <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2022-18-7-311-319>. EDN: JESJUB.
39. Чернышев Г.Н., Попов А.Л., Козинцев В.М., Пономарев И.И. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах. М.: Наука; Физматлит, 1996. 240 с.
40. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1978. 152 с.
41. Чепя П.А. Технологические основы упрочнения деталей поверхностным деформированием. Минск: Наука и техника, 1981. 128 с.

References

1. Kostylev V.I., Margolin B.Z. Determination of residual stress and strain fields caused by cladding and tempering of reactor pressure vessels. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2000;77:723-735. [https://doi.org/10.1016/S0308-0161\(00\)00062-4](https://doi.org/10.1016/S0308-0161(00)00062-4).
2. Chirkov A.V., Sazanov V.P., Samoylov V.A., Larionov Yu.S. Modeling of redistribution of residual stresses in the cylindrical specimens after advancing surface plastic forming. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta = Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2011;3:171-174. (In Russ.). EDN: TVWGJH.
3. Pokrovskij A.M. Calculation of residual stresses in bimetallic support rolls after heat treatment. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni N.E. Baumana. Seriya: Seriya Mashinostroyeniye = Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*. 2012;186-196. (In Russ.). EDN: QNUUYV.
4. Hassani-Gangarajab S.M., Carbonib M., Guaglianob M. Finite element approach toward an advanced understanding of deep rolling induced residual stresses, and an application to railway axles. *Materials & Design*. 2015;83:689-703. <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.026>.
5. Lyubenova N., Baehre D. Finite element modelling and investigation of the process parameters in deep rolling of AISI 4140 steel. *Journal of Materials Science and Engineering*. 2015;5(7-8):277-287. <http://doi.org/10.17265/2161-6221/2015.7-8.004>.
6. Kukielka L., Szczesniak M., et al. Analysis of the states of deformation and stress in the surface layer of the product after the burnishing cold rolling operation. *Materials Science Forum*. 2016;862:278-287.
7. Radchenko V.P., Saushkin M.N., Bochkova T.I. Mathematical modeling and experimental study of forming and relaxation of the residual stresses in plane samples made of EP742 alloy after the ultrasonic hardening under the high temperature creep conditions. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Seriya: Mashinostroyeniye, materialovedeniye = Bulletin of Perm National Research Polytechnic University*. 2016;1:93-112. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2016.1.07>. EDN: VQTAHL.

8. Saini S., Ahuja I.S., Sharma V.S. Modeling the effects of cutting parameters on residual stresses in hard turning of AISI H11 tool steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013;65:667-678. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4206-0>.
9. Huang Xiaoming, Sun Jie, Li Jianfeng. Finite element simulation and experimental investigation on the residual stress-related monolithic component deformation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015;77(5-8):1035-1041. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6533-9>.
10. Su Jiann-Cherng, Young A. Keith, Ma Kong, Srivatsa Shesh, Morehouse B. John, Liang Y. Steven Modeling of residual stresses in milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013; 65:717-733. doi 10.1007/s00170-012-4211-3
11. Ji Xia, Zhang Xueping, Liang Y. Steven predictive modeling of residual stress in minimum quantity lubrication machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014;70:2159-2168. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5439-2>.
12. Birger I.A. *Residual stresses. Series: Physico-mathematical heritage: physics (mechanics)*. Moscow: Lenand; 2015, 234 p. (In Russ.).
13. Davidenkov N.N. Pipe residual stress measurement. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 1931;1(1):206-218. (In Russ.).
14. Razumovsky I.A. Stress-strain condition studying experimental methods: history, problems, development prospects. *Mashinostroyeniye i inzhenernoye obrazovanie*. 2018;2:17-32. (In Russ.). EDN: XZIJKH.
15. Eleonskiy S.I., Odincev I.N., Pisarev V.S., Usov S.M. Determination of residual stresses and stress intensity factors based on local material removal. *Uchenye Zapiski CAGI*. 2017;48(4):57-77. (In Russ.). EDN: ZDMMQL.
16. Aniskovich E.V., Moskvichev V.V., Makhutov N.A., Razumovskii I.A., Apalkov A.A., Plugatar T.P. Evaluation of residual stresses in the impeller blades of hydraulic units. *Power Technology and Engineering*. 2019;53(1):33-38. <https://doi.org/10.1007/s10749-019-01030-y>. EDN: SAKRHC.
17. Yonezu A., Kusano R., Hiyoshi T., Chen Xi. A method to estimate residual stress in austenitic stainless steel using a microindentation test. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2015;24(1):362-372. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-1280-5>.
18. Vengrinovich V.L., Vintov D.A., Prudnikov A.N., Podugolnikov P.A., Rabcev V.N. Features of measurement of stresses and deformations in ferromagnets by the Barkhausen noise. *Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics*. 2017;8:10-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.14489/td.2017.08.pp.010-017>. EDN: ZCRNIJ.
19. Pan'kovskiy Yu.P. Hardware implementation of some magnetic methods of non-destructive testing. *Mir izmerenij = Measurements World*. 2005;5:9-12. (In Russ.).
20. Ulybin A.V., Vasilkov S.D. Steel structure elements stress-strain condition control using the resistive electrocontact method. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo politekhnicheskogo universiteta. = St. Petersburg Polytechnic University*. 2009;6:155-160. (In Russ.). EDN: QLMNUD.
21. Lucenko A.N., Odincev I.N., Grinevich A.V., Severov P.B., Plugatar T.P. Material deformation study using optical-correlation methods. *Aviacionnye materialy i tekhnologii = Aviation Materials and Technologies*. 2014;14:70-86. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2014-0-s4-70-86>. (In Russ.).
22. Dorofeev V.S., Zinchenko A.V. The bending elements stress-strain condition investigation, taking into account technological damage by the polarization-optical method. *European Cooperation*. 2016;19(12):48-58. (In Russ.).
23. Barile C., Casavola C., Pappalettera G., Pappalettera C. A review of residual stress measurements by HDM and optical techniques. *Machines. Technologies. Materials*. 2017;11(1):27-29.
24. Meyer H., Epp J. In situ x-ray diffraction analysis of stresses during deep rolling of steel. *Quantum Beam Science*. 2018;2(4):20. <https://doi.org/10.3390/qbs2040020>.
25. Odintsev I.N., Shchepinov V.P., Shchikanov A.Yu. Holographic interferometry application for residual stresses measuring using the probing hole method. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki = Technical Physics Letters*. 2003;73(11):106-110. (In Russ.). EDN: TTEUVV.
26. Apalkov A.A., Larkin A.I., Osintsev A.V., Odintsev I.N., Shchepinov V.P., Shchikanov A.Yu., et al. Holographic method for residual stresses researching. *Kvantovaya elektronika = Lasers & Their Applications*. 2007;37(6):590-594. (In Russ.).
27. Makhutov N.A., Razumovsky I.A., Kosov V.S., Apalkov A.A., Odintsev I.N. Residual stresses investigation in natural conditions using electronic digital speckle interferometry. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2008;74(5):47-51. (In Russ.). EDN: JUHLPR.
28. Beghini M., Bertini L., Santus C. A procedure for evaluating high residual stresses using the blind hole drilling method, including the effect of plasticity. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2010;45(4):301-320. <https://doi.org/10.1243/03093247JSA579>.
29. Apalkov A.A., Odintsev I.N., Plotnikov A.S. Evaluation of the range of reliable residual stress measurements using hole drilling technique. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2016;82(2):47-52. (In Russ.). EDN: VPIOUB.
30. Zhang Keming, Li Yong, Xu Min, Ke Youlong. Residual stress release characteristics of hole drilling determined by in-plane three-directional optical interference moiré. *Journal of Modern Optics*. 2018;65(21):1362-3044. <https://doi.org/10.1080/09500340.2018.1506519>.
31. Baldi A. On the implementation of the integral method for residual stress measurement by integrated digital image correlation. *Experimental Mechanics*. 2019;59(7):1007-1020. <https://doi.org/10.1007/s11340-019-00503-5>.

32. Klimenko I.S. *Focused images holography and speckle interferometry*. Moscow: Science; 1985, 224 p. (In Russ.).
33. Rickert T. Residual stress measurement by ESPI hole-drilling. In: *3rd CIRP Conference on Surface Integrity: Procedia CIRP*. 2016;45:203-206. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.256>.
34. Usov S.M., Razumovsky I.A., Odintsev I.A. Study of inhomogeneous fields of residual stresses using step-by-step enlarged crack method in combination with electronic speckle pattern interferometry. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2021;87(9):50-58. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2021-87-9-50-58>.
35. Zuev L.B., Barannikova S.A., Lunev A.G., Kolosov S.V., Zharmukhambetova A.M. Basic relationships of the autowave model of a plastic flow. *Russian Physics Journal*. 2019;61:1709-1717. <https://doi.org/10.1007/s11182-018-1591-3>. EDN: PANUBB.
36. Barannikova S., Li Y., Zuev L. Research of the plastic deformation localization of bimetal. *Metalurgija*. 2018;57(4): 275-278.
37. Zuev L.B., Barannikova S.A., Orlova D.V. Autowave criteria of fracture and plastic strain localization of zirconium alloys. *Metals*. 2022;12(1):95. <https://doi.org/10.3390/met12010095>. EDN: MUKZIO.
38. Blumenstein V.Yu., Zhirkov A.A., Uchaykin S.E., Krechetov A.A., Makhalov M.S. Developing methods and technological equipment to study metal plastic flow in treatment processes. Part 1. Special milling CNC machine design and manufacture for metal plastic flow research. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening Technologies and coatings*. 2022;18(7):311-319. (In Russ.). <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2022-18-7-311-319>. EDN: JESJUB.
39. Chernyshev G.N., Popov A.L., Kozintsev V.M., Ponomarev I.I. *Residual stresses in deformable solids*. Moscow, Science; 1996, 240 p. (In Russ.).
40. Papshev D.D. *Finishing and strengthening treatment by surface plastic deformation*. Moscow, Mechanical engineering; 1978, 152 p. (In Russ.).
41. Chepa P.A. *Technological basis for part surface deformation hardening*. Minsk: Science and technology; 1981, 128 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Махалов Максим Сергеевич,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры технологии машиностроения,
Кузбасский государственный технический университет
им. Т.Ф. Горбачёва,
650026, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, Россия
✉ maxim_ste@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3266-9724>

Кречетов Андрей Александрович,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры технологии машиностроения,
Кузбасский государственный технический университет
им. Т.Ф. Горбачёва,
650026, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, Россия
krechetovaa@kuzstu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7569-7362>

Блюменштейн Валерий Юрьевич,

д.т.н., профессор,
профессор кафедры технологии машиностроения,
Кузбасский государственный технический университет
им. Т.Ф. Горбачёва,
650026, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, Россия
blumenstein@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3711-1535>

Горбатенко Вадим Владимирович,

к. ф.-м. н.,
старший научный сотрудник,
Институт физики прочности и материаловедения
СО РАН,
634025, г. Томск, Академический просп., 2/4, Россия
gvv@ispms.tsc.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6464-6159>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Maksim S. Makhalov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Mechanical Engineering
Technology Department,
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
28 Vesennyya St., Kemerovo 650026, Russia
✉ maxim_ste@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3266-9724>

Andrey A. Krechetov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Mechanical Engineering
Technology Department,
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
28 Vesennyya St., Kemerovo 650026, Russia
krechetovaa@kuzstu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7569-7362>

Valeriy Yu. Blumenstein,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Mechanical Engineering Technology
Department,
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
28 Vesennyya St., Kemerovo 650026, Russia
blumenstein@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3711-1535>

Vadim V. Gorbatenko,

Cand. Sci. (Phys.-Math.),
Senior Researcher,
Institute of Strength Physics and Materials Science
SB RAS,
2/4, Akademicheskij pr., Tomsk 634025, Russia
gvv@ispms.tsc.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6464-6159>

Вклад авторов

Махалов М.С. – формирование концепции статьи; разработка методики обработки экспериментальных результатов; моделирование остаточных напряжений в процессах механической обработки экспериментальных образцов; подготовка текста; графическое оформление полученных результатов. Кречетов А.А. – разработка средств автоматизации обработки результатов; первичная фильтрация, обработка, анализ и обобщение экспериментальных результатов; моделирование остаточных напряжений в процессах механической обработки экспериментальных образцов; подготовка текста. Блюменштейн В.Ю. – определение цели и задачи исследования; разработка методики эксперимента; определение граничных условий. Горбатенко В.В. – техническое обоснование задач исследования; выполнение эксперимента и получение первичных результатов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 01.09.2023 г.; одобрена после рецензирования 05.10.2023 г.; принята к публикации 20.10.2023 г.

Contribution of the authors

Makhalov M.S. formed the concept of the article, developed the methodology to process experimental results, simulated residual stresses in mechanical treatment processes of experimental samples, prepared the text of the article, provided graphic design of the results obtained. Krechetov A.A. developed automation tools to process results, carried out primary filtering, processing, analysis and summary of experimental results, simulated residual stresses in mechanical treatment processes of experimental samples, prepared the text of the article. Blumenstein V.Yu. formulated the research purpose and objectives, developed experiment methodology, identified boundary conditions. Gorbatenko V.V. provided technical justification of research tasks, performed the experiment and obtained primary results.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 01.09.2023; approved after reviewing 05.10.2023; accepted for publication 20.10.2023.