



Методика обработки экспериментальных данных при исследовании остаточных напряжений сверлением зондирующих отверстий с использованием метода цифровой корреляции изображений

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

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

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

Резюме. Цель – получение экспериментальных данных и оценка возможности достоверного определения значений остаточных напряжений поверхностного слоя металла сверлением зондирующих отверстий и методом цифровой корреляции изображений. Экспериментальные образцы изготавливались и впоследствии обрабатывались свободным ортогональным резанием и поверхностным пластическим деформированием по схеме качения на специальном станке с числовым программным управлением. Далее с использованием того же станка выполнялось сверление зондирующих отверстий с видеосъемкой изображения поверхности до и после сверления. По изменению спеклов изображений методом цифровой корреляции изображений определялись смещения материальных частиц на поверхности образца, после чего дифференцированием полученных значений перемещений определяли значения радиальных деформаций. Статистический анализ выборки значений радиальных деформаций на одинаковом расстоянии от центра отверстия при изменении угла поворота путем разложения в ряды Фурье с вычислением периода распределения показал, что распределение является периодическим. Установлено, что периодограммы, построенные по экспериментальным данным, имеют локальные максимумы при значении периода, близком к 180 градусам. Это обстоятельство обуславливает неизменность вычисляемых значений главных компонент остаточных напряжений и угла их поворота при выборе для расчета значений радиальных деформаций в произвольных точках вокруг отверстия. В работе изложен подход, позволяющий определить остаточные напряжения путем сверления зондирующих отверстий и оценки перемещений материальных частиц на поверхности образца, обусловленных перераспределением остаточных напряжений. Для аналитического описания экспериментальных данных предложено использовать аппроксимирующую периодическую функцию, установлен физический смысл ее коэффициентов.

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. Методика обработки экспериментальных данных при исследовании остаточных напряжений сверлением зондирующих отверстий с использованием метода цифровой корреляции изображений // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 3. С. 501–510. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-501-510>. EDN: TRSQYG.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Method for processing experimental data when investigating residual stresses by drilling probe holes and digital image correlation

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

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

⁴Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Tomsk, Russia

Abstract. In this work, the possibility of reliable determination of the residual stresses on the surface layer of metal by using drilling probing holes and digital image correlation is investigated. Manufactured experimental samples were

subsequently processed by free orthogonal cutting and rolling contact deformation using a special machine with numerical control. Further, using the same machine, drilling of probing holes was performed with video recording of the surface image prior to and following drilling. By varying the speckle images, the displacements of material particles on the sample surface were determined by the digital image correlation method, following which the radial deformations were determined by differentiating the obtained displacement values. Statistical analysis of a sample of radial deformations equidistant from the centre of the hole while varying the rotation angle by Fourier transformation with the calculation of the distribution period showed that the distribution is periodic. It is established that the periodograms constructed using experimental data have local maxima at a period value close to 180 degrees. This determines that the main calculated components of the residual stresses and the angle of their rotation be constant when selected to calculate the values of radial deformations at arbitrary points around the hole. The paper presents an approach that allows residual stresses to be determined by drilling probing holes and assessing the displacement of material particles on the sample surface due to the redistribution of residual stresses. For the analytical description of experimental data, it is proposed that an approximating periodic function be used, and the physical meaning of its coefficients is determined.

Keywords: residual stresses; metal mechanical condition; surface layer; probing hole drilling; digital image correlation

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. Method for processing experimental data when investigating residual stresses by drilling probe holes and digital image correlation. *iPolytech Journal*. 2023;27(3):501-510. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-501-510>. EDN: TRSQYG.

ВВЕДЕНИЕ

Остаточные напряжения первого рода (ОН) существенно влияют на долговечность изделия. Несмотря на высокую эффективность современных методов моделирования, сохраняется необходимость экспериментального измерения остаточных напряжений (деформаций) [1–13]. Однако большинство механических методов определения ОН являются разрушающими и имеют высокую погрешность (до 40–50%). Несмотря на это, они получили широкое распространение главным образом потому, что основаны на тех же представлениях о напряжениях и деформациях механики твердого тела, что и при расчетах прочности, жесткости и устойчивости деталей машин.

Точность механических методов зависит от погрешности, появляющейся на этапе механического удаления металла (деформационные и температурные воздействия), и от погрешности измерения возникающих деформаций (перемещений). Целью использования комбинации методов сверления зондирующих отверстий и цифровой корреляции изображений [14–16] является значительное снижение погрешности обеих составляющих.

Метод сверления зондирующих отверстий позволяет оценивать остаточные напряжения по перемещениям материальных частиц поверхности образца после выполнения сверления. Эти перемещения, их величина и направление являются результатом перераспределения ОН, которые из-за удаления

металла выходят из состояния равновесия. Сверление зондирующих отверстий происходит с высокой скоростью, что обуславливает относительно небольшой уровень погрешностей в механическом состоянии образца.

Перемещение материальных частиц поверхности при зондирующем сверлении определяется с использованием спекл-структуры, созданной на поверхности образца когерентным лазерным освещением. Спеклы – это яркие пятна на поверхности образца, разделенные темными промежутками, которые появляются при освещении поверхности когерентным источником лазерного излучения вследствие интерференции рассеянного какой-либо точкой поверхности когерентного света со светом, рассеянным другими точками.

Распределение спеклов по изображению поверхности объекта определяется микрорельефом поверхности, меняясь от точки к точке. При перемещениях материальных частиц поверхности распределение спеклов изменяется. Величина и направление перемещения материальных частиц поверхности определяются с использованием метода корреляции цифровых изображений (Digital Image Correlation – DIC).

Суть метода заключается в оценке сдвигов в наборах данных, в качестве которых используются два изображения – в данном случае до процесса сверления и после. Оценка сдвига (то есть направление и величина переме-

щения) осуществляется путем определения максимума кросскорреляционной функции между двумя наборами данных.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Получение экспериментальных данных для оценки возможности достоверного определения значений остаточных напряжений сверлением зондирующих отверстий и методом цифровой корреляции изображений.

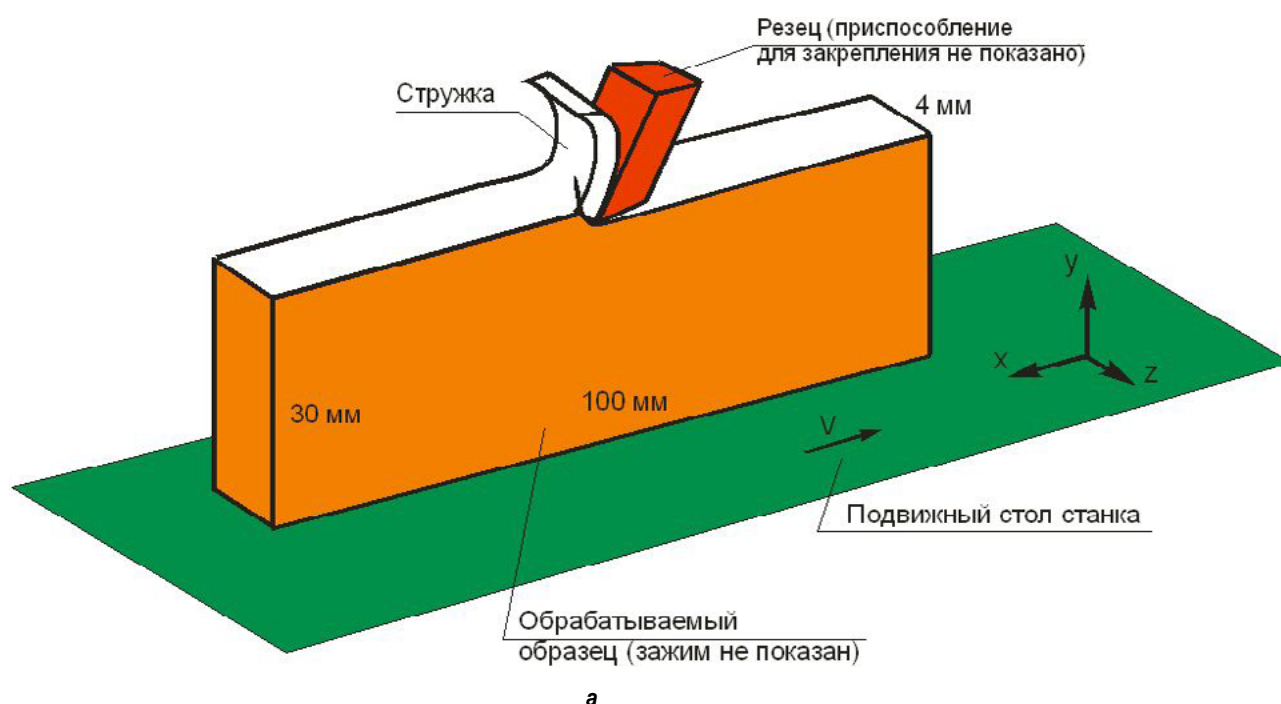
МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования остаточных напряжений осуществлялась предварительная обработка рабочих поверхностей экспериментальных образцов (верхняя грань образца) двумя видами нагружения: свободным ортогональным резанием (рис. 1 а) и свободным ортогональным поверхностным пластическим деформированием (ППД) по схеме качения (рис. 1 б). Экспериментальные образцы были выполнены из конструкционной стали в форме пластины размером 100х30х4 мм [17].

Представленная методика определения ОН основана на работах И.А. Биргера [18]. Значительно позже ряд отечественных и зарубежных авторов развили эти идеи, адаптировали методы пересчета значений перемещений/деформаций к различным мето-

дам измерения и условиям эксперимента [19–21]. Были разработаны рекомендации по выбору диаметра и глубины зондирующего отверстия, а также других параметров режима сверления.

Для оценки остаточных напряжений экспериментальный образец неподвижно закреплялся на подвижном столе станка (рис. 2). Ось сверла, закрепленного в станке, совмещалась с осью симметрии образца в плоскости XY (рис. 3), при этом поверхность размером 100х4 мм устанавливалась перпендикулярно оси сверла [22]. Система регистрации, состоящая из цифровой видеокамеры и полупроводникового лазера, устанавливалась над подвижным столом, закреплялась отдельно. Цифровая камера была направлена вертикально вниз, перпендикулярно к обрабатываемой поверхности образца размером 100х4 мм (рис. 2). Для регистрации изображения использовали монохромную цифровую видеокамеру FL3GE50S5MC фирмы «PointGray» с объективом Kowa LM50JC10M. В качестве осветителя использовали полупроводниковый лазерный модуль мощностью 5 мВт, длиной волны 650 нм. Данный модуль имеет встроенный регулируемый расширитель пучка, что позволяет установить необходимый уровень освещенности изменением размера светового пятна.



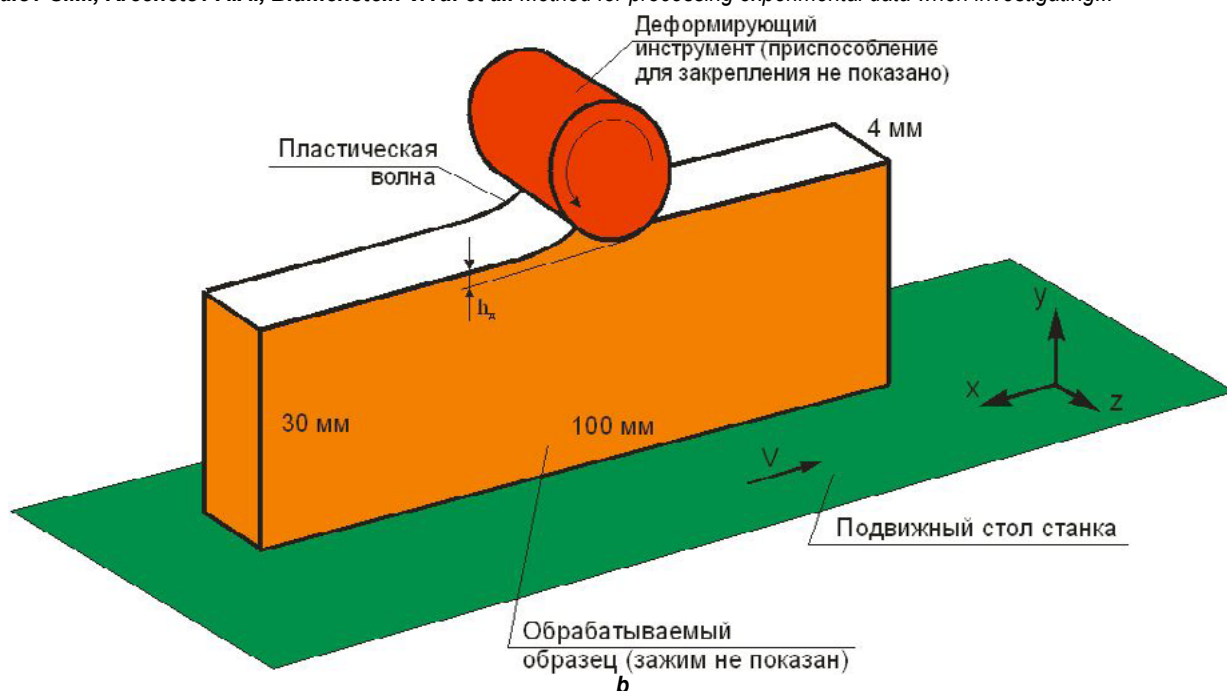


Рис. 1. Схемы нагружения экспериментальных образцов: а – свободное ортогональное резание; б – свободное ортогональное поверхностное пластическое деформирование
 Fig. 1. Experimental samples loading schemes: а – free orthogonal cutting; б – free orthogonal surface plastic deformation

Первоначально осуществлялась съемка области образца, в которой впоследствии выполнялось сверление зондирующего отверстия. Для улучшения качества результатов записывалось значительное (1000...2000) количество кадров. Затем подвижный стол станка с образцом сдвигался на заданное расстояние (m, рис. 2) и в области образца, подвергну-

той первоначальной записи; высверливалось отверстие на заданную глубину.

После отвода сверла подвижный стол с образцом возвращался в исходное положение, микростружка удалялась пылесосом, и возобновлялась запись той же зоны образца с полученным отверстием.

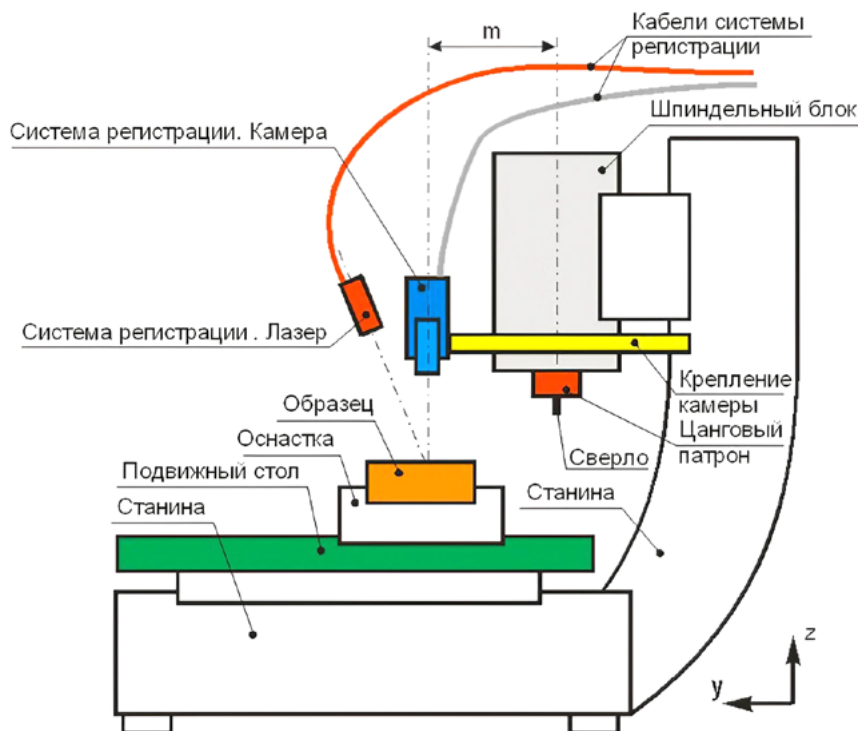


Рис. 2. Экспериментальная установка для определения остаточных напряжений сверлением зондирующих отверстий и цифровой корреляцией изображений
 Fig. 2. The experimental assembly for residual stresses determination by probing hole drilling and digital image correlation

По полученным изображениям до и после сверления определялись векторы перемещения материальных частиц вдоль осей X и Y .

В соответствии с рекомендациями, приведенными в [18–20], было принято, что зона определения деформаций и напряжений находится на расстоянии 0,1...0,5 мм от края отверстия (радиус расположения точек от центра отверстия $r = 1...1,4$ мм). Такие значения выбирались, с одной стороны, для исключения влияния краевых эффектов вблизи кромки отверстия, а с другой – с учетом интенсивного уменьшения деформаций по мере их удаления от кромки.

$$\varepsilon_r = -\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2E} (1 + \mu) \frac{R^2}{r^2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2E} \left[(1 + \mu) \frac{3R^4}{r^4} - \frac{4R^2}{r^2} \right] \cos 2\theta, \quad (1)$$

Обработка результатов для каждого отверстия выполнялась в 4 этапа:

1. Из дальнейшего расчета исключались значения векторов смещения в точках, принадлежащих отверстию.

2. Для значений векторов смещения в остальных точках внутри зоны определения деформаций ($r = 1...1,4$ мм) осуществлялась фильтрация случайных и систематических ошибок. Основная идея алгоритма фильтрации основана на тезисе о том, что отношения значений векторов в различных опорных точках не должны изменяться от кадра к кадру. Те значения векторов, для которых это условие не выполняется, считаются случайной ошибкой, вызванной несовершенством системы позиционирования станка, внешними воздействиями, ударами при сверлении и т.д. Следовательно, они исключаются из дальнейшего анализа.

3. Усреднение полученных значений в рамках записанного количества кадров.

4. Расчет радиальных деформаций в точках вокруг отверстия происходил путем дифференцирования значений перемещений материальных частиц. На этом этапе требовалось задать начальное и конечное значения радиуса, а также шаг изменения радиуса и угла для определения координат точек, в которых рассчитывается радиальная деформация в полярных координатах.

После вычисления программа экспортирует данные в файл текстового формата, содержащий следующие массивы:

1. Полярные координаты точки: радиус r (мм) относительно центра отверстия и угол поворота α (град) относительно оси X .

2. Величина радиальной деформации в точке ε_r .

3. Декартовы координаты точки X , Y (мм).

Для определения остаточных напряжений, существовавших в заготовке до сверления отверстия, за основу был принят метод отверстий для пластин, находящихся в двухосном напряженном состоянии [18].

Радиальная деформация, компоненты главных напряжений σ_1 , σ_2 и угол их поворота θ относительно выбранной системы координат связаны соотношением: где E – модуль Юнга, μ – коэффициент Пуассона, R – радиус отверстия, r – радиус

расположения точки (расстояние от центра отверстия до рассматриваемой точки).

Определив значения радиальной деформации в трех различных точках с помощью выражения (1), можно получить систему из трех уравнений, решение которой даст искомые значения остаточных напряжений и угла поворота относительно выбранной системы координат.

Следует отметить, что в связи с неизменностью остаточных напряжений в образце в зависимости от выбранных точек, в которых известна радиальная деформация, результаты расчета остаточных напряжений должны быть постоянными вне зависимости от выбранных значений радиальной деформации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ выражения (1) показывает, что условие неизменности расчетных значений остаточных напряжений и угла поворота относительно выбранной системы координат при выборе различных точек радиальной деформации выполняется только тогда, когда распределение радиальных деформаций в точках с полярными координатами одного радиуса при изменении угла поворота относительно центра координатной системы является периодической функцией с периодом 180° . Максимальные и минимальные значения деформации определяют величину главных ОН и их знак. Если угол поворота относительно выбранной системы координат θ отличается от нуля, значения функции сдвигаются вдоль оси абсцисс на соответствующие значения.

Для определения значений главных компонент σ_1 , σ_2 и угла θ был проведен дальнейший анализ экспериментальных данных путем разложения полученных статистических выборок в ряды Фурье с вычислением периода распределения.

Установлено, что периодограммы, построенные по экспериментальным данным, имеют локальный максимум при близком к 180° значении периода.

основные остаточные напряжения и их угол поворота, которые для отверстия глубиной 0,5 мм в образце 1А составляли $\sigma_1 = 600$ МПа, $\sigma_2 = -80$ МПа и $\theta = 0$ градусов, соответственно.

Для аналитического описания аппроксимирующей периодической функции предлагается использовать следующее выражение (рис. 4):

$$\varepsilon_r = \cos\left(2 \cdot (\alpha - b) \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot c + d, \quad (2)$$

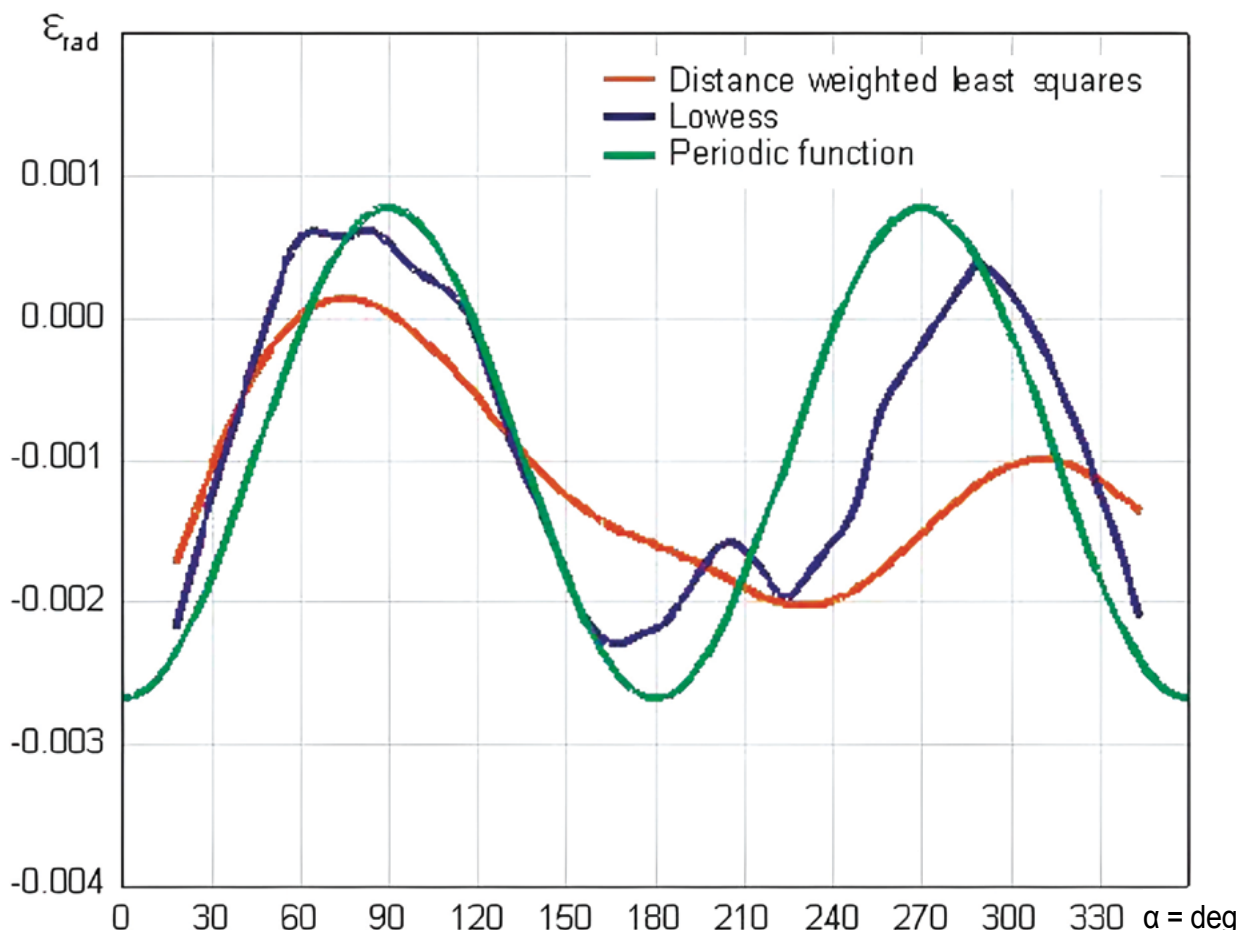


Рис. 3. Аппроксимации значений радиальных деформаций вокруг отверстия (образец 0102-1А, отверстие глубиной 0,5 мм)
 Fig. 3. Radial strains approximations around the hole (sample 0102-1A, 0.5 mm depth hole)

В процессе дальнейшего анализа значения радиальных деформаций были усреднены в диапазоне значений радиуса $r = 1...1,4$ мм, и на основе полученных данных были построены три различные аппроксимирующие функции (рис. 3): кривая с использованием метода наименьших квадратов (distance weighted least squares – показана красным цветом), локально взвешенная регрессия (lowess – синим), периодическая функция с периодом 180° (periodic function – зеленым).

Как видно из рис. 3, периодическая функция надежно описывает экспериментально полученные данные и позволяет рассчитать

где ε_r – радиальная деформация; α – угол точки относительно выбранной оси абсцисс (угол полярной системы координат); b , c , d – аппроксимирующие коэффициенты.

Поскольку периодическая функция с периодом 180° представляет собой косинус двойного угла, значение угла в выражении (2) умножается на два.

Рассмотрим значения коэффициентов b , c и d (рис. 4).

Коэффициент b описывает смещение функции вдоль оси абсцисс на соответствующий угол. Так, например, если $b = 10^\circ$, то функция принимает экстремальное значение при $\alpha = 10^\circ$.

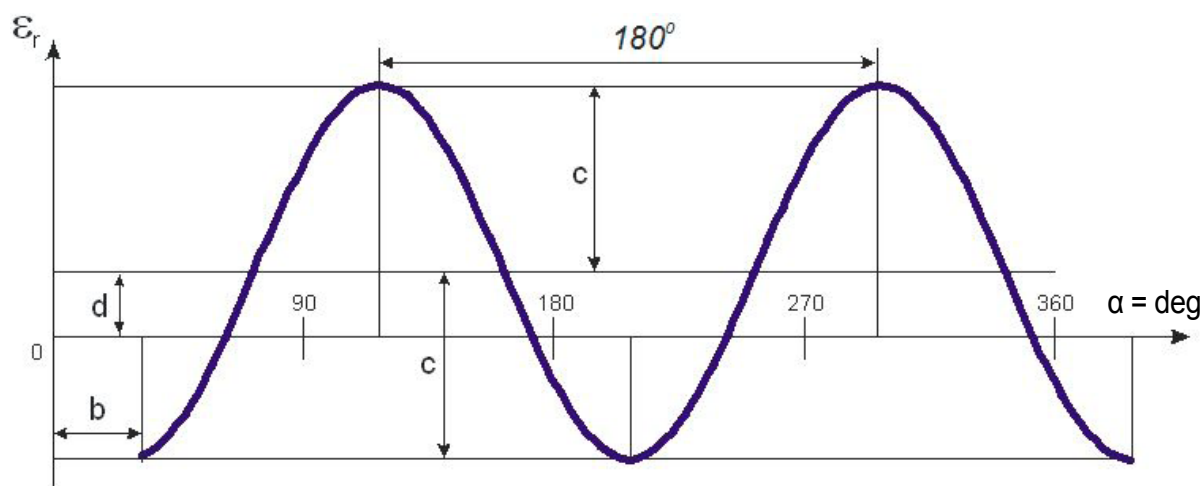


Рис. 4. К аналитическому описанию аппроксимирующей периодической функции
Fig. 4. To approximating periodic function analytical description

Тогда значение коэффициента b можно считать равным значению угла θ .

Коэффициент c описывает амплитуду радиальных деформаций, которая, соответственно, равна $2c$. Знак коэффициента определяет значение (минимальное или максимальное), которое принимает функция в своем первом экстремуме: поскольку $\cos(2.0^\circ) = 1$, $\cos(2.90^\circ) = -1$, отрицательное значение коэффициента c указывает на минимальное значение функции в первом экстремуме, а положительное значение указывает на функцию максимум.

Коэффициент d описывает смещение функции вдоль оси ординат. Если $d = 0$, то функция симметрична относительно оси абсцисс.

Основываясь на предложенном аналитическом описании аппроксимирующей функции, радиальная деформация в экстремумах:

- в первом: $\varepsilon_r^{1ex} = c + d$;
- во втором: $\varepsilon_r^{2ex} = -c + d$.

Полученный результат справедлив для случая сверления сквозных отверстий в тонкой пластине. Дальнейшая задача состоит в экстраполяции этого алгоритма на несквозные отверстия различной глубины в сплошной заготовке, что позволит получить распределение компонентов по глубине.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Представлена методика обработки экспериментальных данных при оценке остаточных

напряжений путем сверления зондирующих отверстий и цифровой корреляции изображений, позволяющая оценить распределение тангенциальной и нормальных составляющих в плоскости поверхности образца.

2. Сверление зондирующих отверстий осуществляется на специальном станке с ЧПУ, обеспечивающим высокую точность перемещений для четкого позиционирования образца при съемке его поверхности до и после сверления.

3. Разработаны средства автоматизации обработки результатов, позволяющие осуществлять первичную фильтрацию и обработку экспериментальных результатов, расчет радиальных деформаций.

4. Разработана методика обработки экспериментальных результатов, основанная на разложении полученных данных для точек (равноудаленных от центра отверстия) в ряды Фурье. Показано, что для такого разложения периодограмма имеет локальный максимум для периода 180° . Данный период соответствует теоретическому распределению, обеспечивающему неизменность получаемых значений остаточных напряжений при выборе для их расчета произвольных точек вокруг отверстия.

5. Предложено аналитическое описание аппроксимирующей экспериментальные результаты периодической функции, установлен физический смысл ее коэффициентов.

Список источников

1. Gopinath A., Lim A., Nagarajan B., Wong Chow Cher, Maiti R., Castagne S. Introduction of enhanced compressive residual stress profiles in aerospace components using combined mechanical surface treatments // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2016. Vol. 157. Iss. 1. P. 012013. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/157/1/012013>.
2. Sadasivam B., Hizal A., Arola D. Abrasive waterjet peening with elastic prestress: subsurface residual stress distribution // International Mechanical Engineering Congress and Exposition (Seattle, Washington, 11–15 November 2007). Seattle, Washington: IMECE, 2007. P. 471–475. <https://doi.org/10.1115/IMECE2007-43473>.

3. 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. Iss. 5-8. P. 667–678. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4206-0>.
4. 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>.
5. Qin W.J., Dong C., Li X. Assessment of Bending Fatigue Strength of Crankshaft Sections with Consideration of Quenching Residual Stress // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2016. Vol. 25. Iss. 3. P. 938–947. <https://doi.org/10.1007/s11665-016-1890-1>.
6. Ma Yuan, Feng Pingfa, Zhang Jianfu, Wu Zhijun, Yu Dingwen Energy criteria for machining-induced residual stresses in face milling and their relation with cutting power // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 81. P. 1023–1032. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7278-9>.
7. 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. P. 1035–1041. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6533-9>.
8. Su Jiann-Cherng, Young A. Keith, Ma Kong, Srivatsa Shesh, Morehouse B.J., 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>.
9. 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>.
10. Martell J.J., Liu C.R., Shi Jing. Experimental investigation on variation of machined residual stresses by turning and grinding of hardened AISI 1053 steel // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014. Vol. 74. Iss. 9-12. P. 1381–1392. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6089-8>.
11. Chen Jianbin, Fang Qihong, Zhang Liangchi. Investigate on distribution and scatter of surface residual stress in ultra-high speed grinding // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014. Vol. 75. P. 615–627. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6128-5>.
12. Lohe D., Lang K.-H., Vohringer O. Residual stresses and fatigue behavior // *Handbook of residual stress and deformation of steel*. Materials Park: ASM International, 2002, P. 27–54.
13. Chenegrin K., Bouscaud D., Girinon M., Karaoui H., Bergheau J.-M., Feulvarch E. Study of the thermal history upon residual stresses during the dry drilling of inconel 718 // *Metals*. 2022. Vol. 12. Iss. 2. P. 305. <https://doi.org/10.3390/met12020305>.
14. 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>.
15. Barannikova S., Li Yu., Zuev L. Research of the plastic deformation localization of bimetal // *Metalurgija*. 2018. Vol. 57. Iss. 4. P. 275–278.
16. Zuev L.B., Barannikova S.A., Orlova D.V. Autowave criteria of fracture and plastic strain localization of zirconium alloys // *Metals*. 2022. Vol. 12. P. 95. <https://doi.org/10.3390/met12010095>.
17. 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>.
18. Биргер И.А. Остаточные напряжения. Изд. 2-е. М.: ЛЕНАНД, 2015. 234 с.
19. Чернышев Г.Н., Попов А.Л., Козинцев В.М., Пономарев И.И. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах. М.: Наука; Физматлит, 1996. 240 с.
20. Rickert T. Residual Stress Measurement by ESPI Hole-Drilling // *Procedia CIRP*. 2016. Vol. 45. P. 203–206. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.256>.
21. 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>.
22. Махалов М.С. Методика исследований остаточных напряжений методами сверления зондирующего отверстия и 2-х экспозиционной спекл фотографии // Инновации в машиностроении: Сб. тр. XII Междунар. науч.-практ. конф., посвященной памяти д-ра техн. наук, профессора Рахимянова Хариса Марсумановича (г. Новосибирск, 7–9 октября 2021 г). Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2021. С. С. 405–411.

References

1. Gopinath A., Lim A., Nagarajan B., Wong Chow Cher, Maiti R., Castagne S. Introduction of enhanced compressive residual stress profiles in aerospace components using combined mechanical surface treatments. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2016;157(1):012013. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/157/1/012013>.
2. Sadasivam B., Hizal A., Arola D. Abrasive waterjet peening with elastic prestress: subsurface residual stress distribution. In: *International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. 11–15 November 2007, Seattle, Washington. Seattle, Washington: IMECE; 2007, p. 471–475. <https://doi.org/10.1115/IMECE2007-43473>.
3. 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(5-8):667-678. <https://doi.org/10.1007/>

s00170-012-4206-0.

4. 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>.
5. Qin W.J., Dong C., Li X. Assessment of Bending Fatigue Strength of Crankshaft Sections with Consideration of Quenching Residual Stress. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2016;25(3):938-947. <https://doi.org/10.1007/s11665-016-1890-1>.
6. Ma Yuan, Feng Pingfa, Zhang Jianfu, Wu Zhijun, Yu Dingwen Energy criteria for machining-induced residual stresses in face milling and their relation with cutting power. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015;81:1023-1032. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7278-9>.
7. 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;77:1035-1041. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6533-9>.
8. Su Jiann-Cherng, Young A. Keith, Ma Kong, Srivatsa Shesh, Morehouse B.J., Liang Y. Steven. Modeling of residual stresses in milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013;65:717-733. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4211-3>.
9. 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>.
10. Martell J.J., Liu C.R., Shi Jing. Experimental investigation on variation of machined residual stresses by turning and grinding of hardened AISI 1053 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014;74(9-12):1381-1392. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6089-8>.
11. Chen Jianbin, Fang Qihong, Zhang Liangchi. Investigate on distribution and scatter of surface residual stress in ultra-high speed grinding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014;75:615-627. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6128-5>.
12. Lohe D., Lang K.-H., Vohringer O. Residual stresses and fatigue behavior. In: *Handbook of residual stress and deformation of steel*. Materials Park: ASM International; 2002, P. 27-54.
13. Chenegrin K., Bouscaud D., Girinon M., Karaouni H., Bergheau J.-M., Feulvarch E. Study of the thermal history upon residual stresses during the dry drilling of inconel 718. *Metals*. 2022;12(2):305. <https://doi.org/10.3390/met12020305>.
14. 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>.
15. Barannikova S., Li Yu., Zuev L. Research of the plastic deformation localization of bimetal. *Metalurgija*. 2018;57(4):275-278.
16. Zuev L.B., Barannikova S.A., Orlova D.V. Autowave criteria of fracture and plastic strain localization of zirconium alloys. *Metals*. 2022;12:95. <https://doi.org/10.3390/met12010095>.
17. Blumenstein V.Yu., Zhirkov A.A., Uchaykin S.E., Krechetov A.A., Makhlov M.S. Development of methods and technological equipment for metal plastic flow in treatment processes researches. 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>.
18. Birger I.A. *Residual stresses*. Moscow: Lenand; 2015, 234 p. (In Russ.).
19. Chernyshev G.N., Popov A.L., Kozintsev V.M., Ponomarev I.I. *Residual stresses in deformable solids*. Moscow: Nauka; Fizmatlit; 1996, 240 p. (In Russ.).
20. Rickert T. Residual stress measurement by ESPI hole-drilling. *Procedia CIRP*. 2016;45:203-206. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.256>.
21. 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. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2021;87(9):50-58. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2021-87-9-50-58>.
22. Makhlov M.S. The probe hole drilling and 2-exposure speckle photography residual stress research methods. In: *Innovacii v mashinostroenii: Sbornik trudov XII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj pamyati doktora tekhnicheskikh nauk, professora Rahimyanova Harisa Magsumanovicha = Innovations in mechanical engineering: Collected works of the 12th International scientific and practical conference devoted to the memory of the Doctor of technical sciences, Professor Rakhimianov Kharis Magsumanovich*. 7–9 October 2021, Novosibirsk. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University; 2021, p. 405-411. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Махалов Максим Сергеевич,

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

Горбатенко Вадим Владимирович,

к. ф.-м. наук,
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>

Вклад авторов

Махалов М.С. – формирование концепции статьи; разработка методики обработки экспериментальных результатов; аналитическое описание аппроксимирующей экспериментальные результаты периодической функции; подготовка текста; графическое оформление полученных результатов.

Кречетов А.А. – разработка средств автоматизации обработки результатов; первичная фильтрация, обработка, анализ и обобщение экспериментальных результатов; 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 29.07.2023 г.; одобрена после рецензирования 01.09.2023 г.; принята к публикации 05.09.2023 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Maksim S. Makhalov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Mechanical Engineering
Technologies 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
Technologies 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 Technologies
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, Akademicheskii pr., Tomsk 634025, Russia
gvv@ispms.tsc.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6464-6159>

Contribution of the authors

Makhalov M.S. worked out the concept of the article, developed the experimental result processing methods, delivered the analytical description of the approximating periodic function of the experimental results, prepared the copyright and was responsible for the graphic design of the obtained results.

Krechetov A.A. developed the tools of automated result processing, performed primary filtering processing, analysis and generalization of experimental results, prepared the copyright.

Blumenstein V.Yu. identified the purpose and objectives of the research, developed the experiment procedure, determined boundary conditions.

Gorbatenko V.V. provided technical justification of the research objectives, 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 29.07.2023; approved after reviewing 01.09.2023; accepted for publication 05.09.2023.