

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 5 (143). С. 33-39.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 5 (143). P. 33-39.

Научная статья
УДК 621.7.075
doi:

Оценка влияния ультразвуковых колебаний на напряженное состояние поверхностного слоя отверстия, обработанного методом калибрования

Валерий Александрович Лебедев¹, к.т.н.,
Юрий Алексеевич Тороп², аспирант,
Андрей Николаевич Кочетов³, к.т.н.,
Николай Сергеевич Коваль⁴, к.т.н.

^{1, 2, 3, 4}Донской государственный технический университет

¹ va.lebedev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1838-245X>

² yuriy.torop87@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2722-8107>

³ ankochetow@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

⁴ koval-nc@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5787-9621>

Аннотация. Предложена технологическая схема калибрования отверстий в деталях типа втулка, диски, зубчатое колесо, в условиях приложения ультразвукового воздействия на деталь. Выведена формула с помощью которой можно варьировать величину ультразвукового импульса $r_{\text{в}}$ на деталь, что позволяет обеспечить требуемую точность отверстия при более пониженных давлениях в зоне контакта дорна с обрабатываемой поверхностью и как следствие уменьшить величину тягового усилия процесса калибрования, что особенно важно при обработке отверстий в деталях, подвергаемых термообработке.

Ключевые слова: калибрование, дорн, цилиндрическое отверстие, тяговое усилие, энергия ультразвукового поля, напряженное состояние поверхностного слоя, качество поверхности отверстия

Для цитирования: Лебедев В.А., Тороп Ю.А., Кочетов А.Н., Коваль Н.С. Оценка влияния ультразвуковых колебаний на напряженное состояние поверхностного слоя отверстия, обработанного методом калибрования // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 5 (143). С. 33–39. doi:

Impact assessment of ultrasonic vibrations on the stress state of the hole surface layer when treated by the calibration method

Valery A. Lebedev, D.Eng.,
Yuri A. Torop, PG student,
Andrey N. Kochetov, PhD Eng.,
Nikolay S. Koval, PhD Eng.
^{1, 2, 3, 4} Don State Technical University
¹ va.lebedev@yandex.ru,
² yuriy.torop87@mail.ru,
³ ankochetow@yandex.ru,
⁴ koval-nc@mail.ru

Abstract. A design project for calibrating holes in parts, e.g. in hobs, discs, gear wheels, under conditions of ultrasonic effects application is suggested. Formula, providing a way for varying the value of the ultrasonic pulse pbr in a part is derived. It allows ensuring the required accuracy of the hole at lower pressures in the contact zone of a mandrel with the treated surface and, as a consequence, to reduce the magnitude of the traction force of the calibration process, which is especially important in hole-making operations for parts subjected to heat treatment.

Keywords: calibration, mandrel, cylindrical hole, traction force, ultrasonic field energy, stress state of the surface layer, hole surface condition

For citation: Lebedev V.A., Torop Yu. A., Kochetov A.N., Koval N.S. Impact assessment of ultrasonic vibrations on the stress state of the hole surface layer when treated by the calibration method / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 5 (143). P. 33–39. doi:

Введение

Калибрование является одним из эффективных методов отделочно-упрочняющей обработки отверстий различной формы. Метод позволяет получить геометрические размеры отверстий с высокой точностью, а также в результате поверхностной пластической деформации, сформировать поверхностный слой с повышенными физико-механическими характеристиками [1, 2]. Особенно востребован этот метод при отделочно-упрочняющей обработке отверстий в деталях, изготавливаемых из труднообрабатываемых материалов и подвергаемых термообработке после выполнения формообразующих операций [2].

Для реализации процесса калибрования отверстий на сегодняшний день, в результате проведенных исследований, разработана конструкция дорна, определены геометрические параметры его рабочих поверхностей и установлены технологические параметры процесса, обуславливающие механизм поверхностного пластического деформирования, среди которых особо следует выделить натяг и скорость дорнования от правильного выбора которых зависит величина тягового усилия [2, 3].

Определение тягового усилия при дорновании отверстий имеет большое практическое значение, т. к., зная заранее величину усилия, можно правильно выбрать конструктивные размеры протяжного станка или пресса, рассчитать инструменты, приспособления и обрабатываемую деталь на прочность и устойчивость. Поэтому его уменьшению в процессе обработки уделяется особое внимание. Снижение тягового усилия

может быть обеспечено или уменьшением коэффициента внешнего трения в зоне контактного взаимодействия дорна с обрабатываемой поверхностью путем применения смазок или изменением напряжённого состояния поверхностного слоя в зоне контактного взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью, приводящего к снижению внутреннего трения в материале путем введения в зону обработки ультразвуковых колебаний (УЗК).

Анализ выполнения различных технологических операций резанием с применением ультразвуковых колебаний предусматривает в основном наложение их на инструмент вдоль его оси. Однако такая схема введения ультразвуковых колебаний в очаг деформации возможна только при создании специальных станков с вмонтированными ультразвуковыми преобразователями, подходит только для определенной группы деталей и характеризуется высокой материалоемкостью технологической оснастки из-за её больших габаритов [4, 5, 6].

Целью настоящих исследований является оценка влияния ультразвуковых колебаний, при наложении их на деталь, на изменение напряженного состояния деформированного в процессе калибрования поверхностного слоя.

Расчет напряженного состояния поверхностного слоя отверстия деформированного в процессе калибрования и действия ультразвукового поля

На рис. 1 представлена технологическая схема реализации процесса калибрования отверстий, в соответствии с которой

формирование и как следствие изменение напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя отверстий является результатом совместного энергосилового

воздействия на него упруго пластических деформаций со стороны дорна и ультразвуковых колебаний [4].

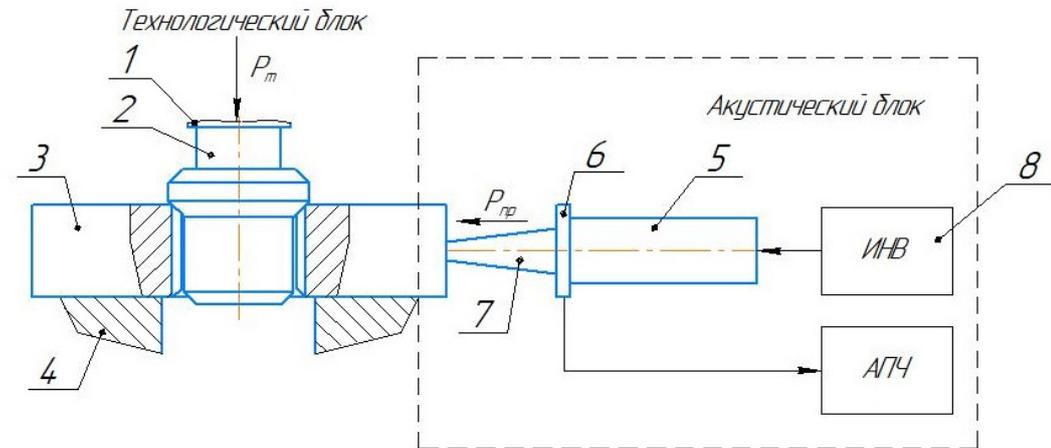


Рис. 1. Схема процесса калибровки отверстий с применением ультразвукового поля:

1 – силовой шток; 2 – дорн; 3 – деталь; 4 – установочный стол; 5 – магнитоstrictionный преобразователь; 6 – датчик акустической обратной связи; 7 – волновод; 8 – генератор (АПЧ – система автоподстройки частоты, ИНВ – инвертор)

Рассмотрим деформированный поверхностный слой отверстия в виде цилиндра из упругого материала, подчиняющегося закону Гука, толщиной равной величине натяга δ и высотой равной длине отверстия H , соизмеримой с высотой детали (рис. 2). Цилиндр находится под внутренним давлением, равного по величине радиальному контактному давлению дорна в точке его взаимодействия с обрабатываемой поверхностью и внешним давлением p_b , соответствующего величине давления, развиваемого ультразвуковыми колебаниями (см. рис. 2) при постоянной температуре $T = T_0$, соответствующей температуре при отсутствии деформаций. При этом считаем, что перемещения имеют место в поперечном направлении, а в осевом направлении отсутствуют.

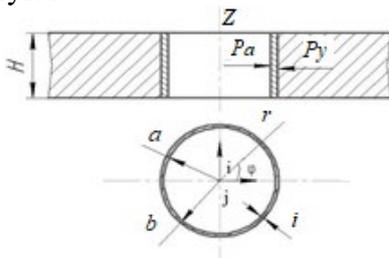


Рис. 2. Схема цилиндра, охватывающего деформированный поверхностный слой отверстия под давлением на него внутренних и внешних сил

Примем за начальное состояние поверхностного слоя, его состояние в условиях, когда $p_a = p_b = 0$, при которых деформации и напряжения отсутствуют и соответственно тензор деформации $\varepsilon_{ij} = 0$. Перемещения ω от начального до напряженно-деформированного состояния происходят в поверхностном слое, когда p_a и $p_b > 0$.

Для решения поставленной задачи используем следующие основные кинематические уравнения теории упругости, принятые при исследовании механики сплошных сред:

– уравнения равновесия (без учета массовых сил):

$$\nabla_j p^{ij} = 0, \quad (1)$$

где p^{ij} – компоненты тензора напряжений;

$$\nabla_j p^{ij} = \frac{dp^{ki}}{dx^i} + \sum p^{ij} \Gamma_{ij}^k;$$

где Γ_{ij}^k – символ Кристоффеля.

– закон Гука для изотропной среды в произвольной криволинейной системе координат:

$$p^{ij} = \lambda I_1(\varepsilon) g^{ij} + 2\mu \varepsilon^{ij}, \quad (2)$$

где λ, μ – коэффициенты Ламе; g^{ij} – метрический тензор в системе координат, $g^{ij} = (\exists^i, \exists^j)$; \exists^i – базисные векторы метрического тензора; $I_1(\epsilon)$ – первый инвариант тензора деформаций.

– выражения тензоров деформации через перемещения, при условии малых деформаций:

$$\epsilon_{ij} = 0,5(\nabla_i \omega_j + \nabla_j \omega_i), \quad (3)$$

где ω_j, ω_i – компоненты вектора перемещений;

$$\nabla_i \omega_j = \frac{d\omega_j}{dx^i} - \omega_k \Gamma_{ij}^k.$$

Установим граничные условия на внутренней и внешней стороне цилиндра (рис. 2) записав:

$$\begin{aligned} p_n &= -p_a n, \text{ при } r = a; \\ p_n &= -p_b n, \text{ при } r = b, \end{aligned} \quad (4)$$

где a – радиус внутренней поверхности цилиндра, $a = d/2$; b – внешний радиус цилиндра, $b = d/2 + i$; n – нормаль к боковым поверхностям цилиндра; d – внутренний диаметр отверстия до деформирования.

Для выполнения граничных условий считаем, что перемещения частиц цилиндра в радиальном направлении малы.

Граничные условия для цилиндра длиной H на торцах при $z = 0$ и $z = H$ запишем в виде:

$$\omega_{n\tau} = 0; p_{n\tau} = 0, \text{ при } z = 0 \text{ и } z = H, \quad (5)$$

где $n\tau$ – нормаль к торцевым поверхностям цилиндра.

Условие $p_{n\tau} = 0$ связано с допущением, что в осевом направлении перемещения отсутствуют.

Если принять, что процесс деформирования отверстия при калибровании и ультразвуковом воздействии носит осесимметричный характер для дальнейших рассуждений целесообразно использовать цилиндрическую систему координат, в которой координаты точек обозначим через $x^1 = r, x^2 = \varphi, x^3 = z$ (рис. 2).

Согласно [7] квадрат модуля вектора перемещения dr в цилиндрической системе координат определяется из выражения:

$$ds^2 = g_{ij} dx^i dx^j = dr^2 + r^2 d\varphi^2 + dz^2. \quad (6)$$

В соответствии с выражением (6) матрицы метрического тензора имеют вид:

$$\|g_{ij}\| = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \|g^{ij}\| = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{r^2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

а определяющие их базисные векторы равны:

$$\begin{aligned} [\exists_1] &= 1; [\exists_2] = r; [\exists_3] = 1; \\ [\exists^1] &= 1; [\exists^2] = \frac{1}{r}; [\exists^3] = 1. \end{aligned} \quad (8)$$

Для определения символов Кристоффеля Γ_{ij}^k в цилиндрической системе координат воспользуемся формулой [7]:

$$\Gamma_{ij}^k = 0,5 g^{ks} \left(\frac{dg_{is}}{dx^i} + \frac{dg_{js}}{dx^j} - \frac{dg_{ij}}{dx^s} \right). \quad (9)$$

На основе (9) и матрицы (7) получим следующие значения символов:

$$\Gamma_{22}^1 = -r; \Gamma_{12}^2 = 1/r; \Gamma_{21}^2 = 1/r; \quad (10)$$

для всех остальных вариаций матрицы $\Gamma_{ij}^k = 0$

С целью оценки влияния ультразвуковых колебаний на изменение напряженного состояния деформированного в процессе калибрования поверхностного слоя, при наложении их на деталь, в рамках настоящего исследования решим задачу, предусматривающую, что все искомые функции зависят только от координаты r . Тогда для вектора перемещений ω можно записать:

$$\omega_1 = \omega(r), \quad \omega_2 = \omega_3 = 0. \quad (11)$$

Составим уравнения компонент тензора деформаций, применив выражение (3):

$$\epsilon_{11} = \nabla_1 \omega_1 = \left(\frac{d\omega_1}{dr} - \omega_k \Gamma_{11}^k \right) = \frac{d\omega}{dr};$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{22} &= \nabla_2 \omega_2 = \left(\frac{d\omega_2}{d\varphi} - \omega_k \Gamma_{22}^k \right) = \omega r ; \\ \varepsilon_{33} &= \nabla_3 \omega_3 = \left(\frac{d\omega_3}{dz} - \omega_k \Gamma_{33}^k \right) = 0; \\ \varepsilon_{12} &= 0,5(\nabla_1 \omega_2 + \nabla_2 \omega_1) = 0,5 \left(\frac{d\omega_2}{dr} + \frac{d\omega_1}{d\varphi} - 2\omega_k \Gamma_{12}^k \right) = 0; \\ \varepsilon_{13} &= 0,5(\nabla_1 \omega_3 + \nabla_3 \omega_1) = 0,5 \left(\frac{d\omega_3}{dr} + \frac{d\omega_1}{dz} - 2\omega_k \Gamma_{13}^k \right) = 0; \\ \varepsilon_{23} &= 0,5(\nabla_2 \omega_3 + \nabla_3 \omega_2) = 0,5 \left(\frac{d\omega_3}{d\varphi} + \frac{d\omega_2}{dz} - 2\omega_k \Gamma_{23}^k \right) = 0.\end{aligned}\quad (12)$$

Первый инвариант тензора деформаций согласно [7] определим как сумму его основных компонентов:

$$I_1(\varepsilon) = (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33})g^{ij} = \frac{d\omega}{dr} + \frac{\omega}{r}. \quad (13)$$

Подставляя (13) в формулу закона Гука (2), получим выражения для компонентов тензора напряжений:

$$\begin{cases} p^{11} = \lambda \left(\frac{d\omega}{dr} + \frac{\omega}{r} \right) + 2\mu \frac{d\omega}{dr}; \\ p^{22} = \lambda \left(\frac{d\omega}{dr} + \frac{\omega}{r} \right) \frac{1}{r^2} + 2\mu \frac{\omega}{r^3}; \\ p^{33} = \lambda \left(\frac{d\omega}{dr} + \frac{\omega}{r} \right). \end{cases} \quad (14)$$

Из (14) и (11) запишем граничные условия на боковых поверхностях условно выделенного цилиндра, охватывающего деформированный в процессе калибрования и ультразвукового воздействия поверхностный слой:

$$p^{11} = (\lambda + 2\mu) \frac{d\omega}{dr} + \lambda \frac{\omega}{r} = -p_a, \text{ при } r = a; \quad (15)$$

$$p^{11} = (\lambda + 2\mu) \frac{d\omega}{dr} + \lambda \frac{\omega}{r} = -b, \text{ при } r = b. \quad (16)$$

Запишем уравнение равновесия (1) в проекции на ось $x^1 = r$ в соответствии с условием (11):

$$\frac{dp^{11}}{dr} + p^{22}\Gamma_{22}^1 + p^{11}\Gamma_{12}^2 = 0. \quad (17)$$

С учетом выражений (14) и значений Γ_{ij}^k (10) уравнение равновесия будет иметь вид:

$$\frac{d}{dr} \left(\frac{d\omega}{dr} + \frac{\omega}{r} \right) = 0. \quad (18)$$

Продифференцировав (18), получим соотношение:

$$\left(\frac{d\omega}{dr} + \frac{\omega}{r} \right) = \frac{1}{r} \frac{d\omega r}{dr} = \text{const},$$

из которого следует зависимость вида:

$$\omega = Ar + \frac{B}{r}, \quad (18)$$

где A и B – коэффициенты, которые можно найти, используя граничные условия (15) и (16) представив их следующим образом:

$$2((\lambda + \mu)A - \frac{2\mu B}{a^2}) = -p_a; \quad (19)$$

$$2((\lambda + \mu)A - \frac{2\mu B}{b^2}) = -p_b. \quad (20)$$

Путем совместного решения (19) и (20) получены следующие формулы для определения коэффициентов A и B :

$$A = \frac{a^2 p_a - b^2 p_b}{2(\lambda + \mu)(b^2 - a^2)}, \quad (21)$$

$$B = \frac{a^2 b^2 (p_a - p_b)}{2\mu(b^2 - a^2)}. \quad (22)$$

Установленные, в результате проведенного исследования, зависимости (12), (14), (18), (21), (22) являются основой оценки деформаций и напряжений в различных точках цилиндра и, как следствие, поверхностного слоя, модифицируемого в процессе малых упругопластических деформаций.

Используя эти зависимости проведем анализ напряженного состояния стенок цилиндра, ограничивающего деформированный поверхностный слой. Для этого применим подход, предложенный в работе [7], суть которого заключатся в том, что для наилучшего представления о действительной величине напряжений предлагается использовать, так называемые «физические компоненты» тензоров напряжений, т. е. компоненты единичного базисного вектора p_{ϕ}^{ij} . Так как в нашем случае компоненты единичного базисного вектора совпадают главными

компонентами тензора напряжений можно записать:

$$p_{\phi}^{11} = p^{11}; p_{\phi}^{22} = r^2 p^{22}; p_{\phi}^{33} = p^{33}. \quad (22)$$

Введя обозначения $p_{\phi}^{11} = p_{rr}$, $p_{\phi}^{22} = p_{\phi\phi}$, $p_{\phi}^{33} = p_{zz}$, из (14), с учетом (18), (19),

$$\begin{cases} p_{rr} = p^{11} = \frac{a^2 p_a}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{b^2}{r^2}\right) - \frac{b^2 p_b}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right); \\ p_{\phi\phi} = r^2 p^{22} = \frac{a^2 p_a}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{r^2}\right) - \frac{b^2 p_b}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right); \\ p_{zz} = p^{33} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \frac{a^2 p_a - b^2 p_b}{b^2 - a^2}. \end{cases} \quad (22)$$

Выразим коэффициенты λ и μ через постоянные Ламе:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (23)$$

где E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона; a и b определяются: $a = d/2$, $b = d/2 + \delta$, где d – диаметр исходного

(20) (21), (22) после преобразований получим в общем виде уравнения, описывающие напряженное состояние точек деформированного поверхностного слоя, охватываемого условным цилиндром:

отверстия до калибрования; δ – натяг калибрования.

Уравнения (22) преобразуются к следующему виду:

$$\begin{cases} p_{rr} = \frac{4d^2 p_a}{(d+2\delta)^2 - 4d^2} \left(1 - \frac{(d+2\delta)^2}{4r^2}\right) - \frac{4(d+2\delta)^2 p_b}{(d+2\delta)^2 - 4d^2} \left(1 - \frac{d^2}{4r^2}\right); \\ p_{\phi\phi} = \frac{4d^2 p_a}{(d+2\delta)^2 - 4d^2} \left(1 + \frac{(d+2\delta)^2}{4r^2}\right) - \frac{4(d+2\delta)^2 p_b}{(d+2\delta)^2 - 4d^2} \left(1 + \frac{d^2}{4r^2}\right); \\ p_{zz} = 4\nu \frac{d^2 p_a - (d+2\delta)^2 p_b}{(d+2\delta)^2 - 4d^2}. \end{cases} \quad (24)$$

На рис. 3 показано распределение напряжений в деформированном поверхностном слое отверстия при отсутствии ультразвукового воздействия на деталь $p_b = 0$ (сплошная линия) и ультразвуковым воздействием (пунктирная линия).

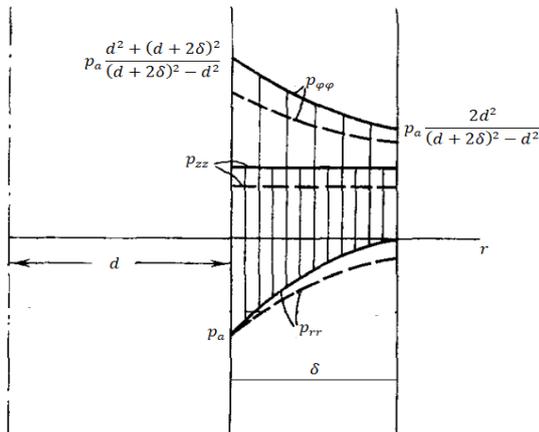


Рис. 3. Распределение напряжений в деформированном поверхностном слое отверстия

Из (24) запишем уравнения показывающие влияние ультразвукового воздействия на изменение величины радиального, окружного и осевого контактного давления деформирования поверхностного слоя в процессе калибрования отверстия:

$$\begin{cases} p_{ar} = \frac{[(d+2\delta)^2 - 4d^2] r^2 p_{rr} \pm (d+2\delta)^2 (4r^2 - d^2) p_{br}}{d^2 [4r^2 - (d+2\delta)^2]}; \\ p_{a\phi} = \frac{[(d+2\delta)^2 - 4d^2] r^2 p_{\phi\phi} \pm (d+2\delta)^2 (4r^2 + d^2) p_{b\phi}}{d^2 [4r^2 + (d+2\delta)^2]}; \\ p_{az} = \frac{[(d+2\delta)^2 - 4d^2] p_{zz} + 4\nu (d+2\delta)^2 p_{bz}}{4\nu d^2}. \end{cases} \quad (25)$$

При калибровании величина пластически деформируемого поверхностного слоя должна находиться в пределах допуска задаваемого на точность обрабатываемого отверстия [IT], то есть $2\delta \leq [IT]$. Исходя из этого ограничения и учитывая, что напряжения в поверхностном слое, необходимые для реализации процесса

поверхностно пластической деформации должны превышать предел текучести обрабатываемого материала детали σ_T , запишем формулу для определения минимального контактного радиального давления, обеспечивающего калибрование отверстий в условиях ультразвукового поля:

$$p_{ar} = \frac{[(d+[IT])^2 - 4d^2]r^2\sigma_T - (d+[IT])^2(4r^2 - d^2)p_{br}}{d^2[4r^2 - (d+[IT])^2]} \quad (26)$$

Заключение

Из предложенной формулы следует, что варьирование величиной ультразвукового импульса p_{br} на деталь позволяет обеспечить требуемую точность отверстия при более пониженных давлениях в зоне контакта дорна с обрабатываемой поверхностью и, как следствие, уменьшить величину тягового усилия процесса калибрования, что особенно важно при обработке отверстий в деталях подвергаемых термообработке и изготавливаемых из высокопрочных материалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Проскуряков Ю. Г.** Объемное дорнование отверстий / Ю. Г. Проскуряков, В. Н. Романов, А. Н. Исаев. М.: Машиностроение, 1984. 223 с.
2. **Берберов С.А., Лебедев В.А.** Применение фасонных дорнов для калибрования шлицевых отверстий в термообработанных деталях // Научно-технические технологии в машиностроении. 2017. № 9 (75). С. 38–41.
3. **Справочник по процессам поверхностного пластического деформирования** / под ред. С.А. Зайдеса. Иркутск: Изд. ИРНИТУ, 2021. 504 с.
4. **Берберов С.А., Лебедев В.А., Тороп Ю.А.** Повышение эффективности процесса дорнования шлицевых отверстий в условиях воздействия ультразвукового поля / Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. Т. 16. № 9 (189). С. 391–394.

5. **Кисилев Е.С.** Интенсификация процессов механической обработки использованием энергии ультразвукового поля: учебное пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2003. С. 186.

6. **Агапов С.И., Головкин В.В.** Повышение эффективности механической обработки путем применения ультразвука: монография. Самара: Изд. «СНЦ», 2010. 134 с.

7. **Седов Л.И.** Механика сплошной среды. Т. 2, М.: Наука, 1970. 568 с.

8. **Осипенкова Г.А.** Отделочно-упрочняющая обработка с применением ультразвуковых крутильных колебаний / Г.А. Осипенкова, В.Ф. Пегашкин; Мин-во образования и науки РФ: ФГАОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т (фил.). Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2013. 116 с.

REFERENCES

1. Proskuryakov Yu. G. Volumetric mandreling of holes / Yu. G. Proskuryakov, V. N. Romanov, A. N. Isaev. Moscow: Mashinostroenie, 1984, 223 p. (in Russian).
2. Berberov S.A., Lebedev V.A. Forming mandrel use for slot hole calibration in heat-treated parts / Science intensive technologies in mechanical engineering, 2017, no. 9 (75), pp. 38–41.
3. Handbook of Surface Plastic Deformation Processes, vol. 2, ed. by S.A. Zaides, Irkutsk: Izdatel'stvo IRNITU, 2022, 584 p. (in Russian).
4. Berberov S.A., Lebedev V.A., Torop Yu.A. Improving in mandrelling efficiency of spline holes under influence of ultrasonic field / Strengthening technologies and coatings, 2020, vol. 16, no. 9 (189), pp. 391–394. (in Russian).
5. Kiselev E.S. Intensification of the processes of mechanical treatment using the ultrasonic field energy: textbook. Ulyanovsk, UIGTU Publ., 2003, p. 186. (in Russian).
6. Agapov S.I., Golovkin V.V. Machining effectiveness increase through ultrasound use: monograph. Samara: SNC Publishing House, 2010, 134 p. (in Russian).
7. Sedov L.I. Mechanics Of Continuous Media (In 2 vols), Moscow: Nauka, 1970, 568 p. (in Russian).
8. Osipenkova G.A. Finishing-hardening treatment using ultrasonic torsion oscillation / G.A. Osipenkova, V.F. Pegashkin; Ministry of Education and Science of the Russian Federation: Federal State Educational Institution of Higher Education "UrFU named after the first President of Russia B.N. Yeltsin", Nizhnetagil'sk technological institute (branch). Nizhny Tagil: NTI (branch) UrFU, 2013, 116 p.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 12.02.2023; одобрена после рецензирования 09.03.2023; принята к публикации 20.03.2023

The article was submitted 12.02.2023; approved after reviewing 09.03.2023; assepted for publication 20.03.2023