

УДК 519.6

DOI: [10.26102/2310-6018/2026.59.8.012](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2026.59.8.012)

Математическое моделирование процесса диффузии антифрикционного материала при ультразвуковой обработке

А.С. Бондарева^{1✉}, А.В. Королев¹, А.А. Королев²

¹*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
Саратов, Российская Федерация*

²*Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет, Москва, Российская Федерация*

Резюме. В статье представлена разработанная математическая модель процесса диффузии антифрикционного материала (на примере графита) в поверхностный слой металлической заготовки при ультразвуковой обработке. В отличие от традиционных подходов, основанных на втором законе Фика для объемной диффузии, предложенная модель базируется на уравнении Фишера, описывающем межзеренную диффузию в условиях интенсивной пластической деформации и формирования нанокристаллической структуры. Получено аналитическое выражение для расчета глубины проникновения покрытия, учитывающее температуру в зоне контакта, энергию активации диффузии, геометрию пятна контакта, частоту ультразвуковых колебаний, параметры режима обработки (частота вращения заготовки, поперечная подача) и свойства материала. Реализованы численные методы суммирования вкладов отдельных ударов индентора с учетом импульсного характера нагружения и накопления тепла. Проведен анализ влияния технологических параметров на толщину формируемого слоя: установлено, что снижение частоты вращения и поперечной подачи увеличивает глубину диффузии за счет роста числа перекрытий контактных пятен и времени воздействия на каждую точку поверхности. Результаты моделирования позволяют прогнозировать толщину антифрикционного слоя и оптимизировать режимы ультразвукового упрочнения для обеспечения заданных триботехнических характеристик. Модель может быть использована при проектировании технологических процессов нанесения покрытий в машиностроении.

Ключевые слова: математическое моделирование, ультразвуковая обработка, уравнение Фишера, межзеренная диффузия, антифрикционное покрытие, режимы обработки.

Для цитирования: Бондарева А.С., Королев А.В., Королев А.А. Математическое моделирование процесса диффузии антифрикционного материала при ультразвуковой обработке. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2026;14(8). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2464> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.59.8.012

Mathematical modeling of antifriction material diffusion during ultrasonic machining

A.S. Bondareva^{1✉}, A.V. Korolev¹, A.A. Korolev²

¹*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, the Russian Federation*

²*National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow,
the Russian Federation*

Abstract. This paper presents a mathematical model of antifriction material (graphite) diffusion into the surface layer of a metal workpiece during ultrasonic machining. Unlike classical approaches based on Fick's second law for bulk diffusion, the proposed model is founded on the Fisher equation, which describes grain boundary diffusion under conditions of intense plastic deformation and nanocrystalline structure formation. An analytical expression for calculating the penetration depth of the coating has been derived, taking into account the contact zone temperature, activation energy of diffusion, contact

spot geometry, ultrasonic vibration frequency, machining parameters (workpiece rotation speed, transverse feed), and material properties. Numerical summation methods have been implemented to account for the impulsive nature of loading and heat accumulation from individual indenter impacts. The influence of technological parameters on the thickness of the formed layer has been analyzed: it has been established that reducing the rotation speed and transverse feed increases the diffusion depth due to an increase in the number of overlapping contact spots and exposure time per surface point. Simulation results enable prediction of the antifriction layer thickness and optimization of ultrasonic hardening modes to achieve desired tribological characteristics. The model can be applied in designing coating deposition processes in mechanical engineering.

Keywords: mathematical modeling, ultrasonic processing, Fisher equation, intergranular diffusion, antifriction coating, processing modes.

For citation: Bondareva A.S., Korolev A.V., Korolev A.A. Mathematical modeling of antifriction material diffusion during ultrasonic machining. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2026;14(8). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2464> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.59.8.012

Введение

Ультразвуковая обработка является одним из наиболее эффективных методов поверхностного упрочнения и нанесения антифрикционных покрытий. При ультразвуковой обработке происходит интенсивная пластическая деформация поверхности, создающая условия для проникновения антифрикционного материала [1]. В современном машиностроении к деталям машин предъявляются всё более жёсткие требования: увеличение ресурса работы, снижение энергопотребления, повышение надёжности. Традиционные методы нанесения покрытий – газотермическое напыление, электрохимическое осаждение, лазерная наплавка – требуют сложного оборудования, высоких температур и значительных энергозатрат. Ультразвуковое нанесение антифрикционных покрытий представляет собой альтернативную технологию, позволяющую формировать функциональные слои при сравнительно низких температурах за счёт энергии пластической деформации и импульсного нагрева.

Основными факторами, влияющими на процесс формирования покрытия, являются: пластическая деформация обрабатываемой поверхности; температура, возникающая в зоне контакта индентора с заготовкой; параметры режима обработки. Несмотря на широкое промышленное применение ультразвуковой обработки, теоретические основы процесса формирования антифрикционных покрытий разработаны недостаточно. Существующие математические модели, как правило, рассматривают диффузию как квазистационарный процесс и не учитывают импульсный характер ультразвукового воздействия. Это приводит к существенным расхождениям между расчётными и экспериментальными данными, особенно при высокочастотной обработке (20–22 кГц).

Для оптимизации технологического процесса необходимо наличие адекватной математической модели, позволяющей прогнозировать глубину диффузионного слоя в зависимости от параметров обработки.

Материалы и методы

Математическое моделирование процесса диффузии. В процессе ультразвуковой обработки под действием циклических нагрузок происходит пластическая деформация поверхностного слоя материала. В результате пластической деформации вершины микронеровностей исходной поверхности деформируются, а находящийся на поверхности порошок антифрикционного материала (например, графит) частично

диффундирует в обрабатываемую поверхность [2, 3]. При этом толщина верхнего механически удерживаемого слоя покрытия приблизительно соответствует высоте микронеровностей, тогда как глубина диффузионного слоя зависит от температурно-временных параметров процесса и требует математического моделирования для прогнозирования. Традиционные математические модели процесса диффузии при поверхностной обработке опираются на второй закон Фика, описывающий диффузию внутри зерна металла. Однако, при ультразвуковой обработке происходит интенсивная пластическая деформация поверхностного слоя, приводящая к дроблению зерен и формированию нанокристаллической структуры¹. В таких условиях доля границ зерен в объеме материала резко возрастает. Согласно работе [4], коэффициент диффузии по границам зерен существенно превышает коэффициент объемной диффузии ($D_g \gg D_v$), поэтому при наличии развитой сети границ зерен возрастает вклад межзеренной диффузии.

Важной особенностью ультразвуковой обработки является эффект накопления тепла. Время между последовательными ударами индентора составляет около 45 мкс (при частоте 22 кГц), тогда как время релаксации температурного поля в металле составляет 1–10 мс. Таким образом, тепло от предыдущих ударов не успевает рассеяться вглубь заготовки, и температура в зоне контакта постепенно нарастает. Именно этот эффект накопления тепла обеспечивает высокую интенсивность диффузии при ультразвуковой обработке.

Разработка математической модели процесса диффузии антифрикционного материала в межзеренное пространство материала основывается на уравнении Фишера [5]. Для практических расчетов глубины проникновения покрытия используется аналитическое решение этого уравнения для полубесконечного тела с постоянной концентрацией покрытия на поверхности, которое имеет вид:

$$C(z, t) = C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{z}{2\sqrt{D_{\text{ef}}t}} \right) \right], \quad (1)$$

где C – концентрация диффундирующих атомов в границе зерна, кг/с·м²; z – расстояние от рассматриваемой точки на поверхности вглубь поверхности, м; t – время обработки, с; C_0 – концентрация антифрикционного материала на границе с поверхностью, кг/с·м²; erf – функция ошибок; D_{ef} – эффективный коэффициент диффузии, учитывающий взаимодействие граничной и объемной диффузии.

В отличие от упрощенных моделей, предполагающих независимость граничной и объемной диффузии, уравнение Фишера описывает их взаимодействие: атомы, диффундирующие по границе зерна, частично уходят в объем зерна, что создаёт поперечный поток вещества. Это взаимодействие описывается через эффективный коэффициент диффузии [6], который можно записать:

$$D_{\text{ef}} = \frac{\delta_g \cdot D_g}{D_v}, \quad (2)$$

где δ_g – толщина границы зерна, м; D_g – коэффициент диффузии в границе зерна, м²/с; D_v – коэффициент объемной диффузии, м²/с.

Для межзеренной диффузии характерная глубина проникновения определяется не только эффективным коэффициентом диффузии, но и соотношением между граничной и объемной диффузией. После преобразования решения Фишера для случая преобладания межзеренной диффузии характеристическая глубина диффузии за время контакта t определяется:

¹ Бокштейн Б.С. *Диффузия в металлах*. Москва: Металлургия; 1978. 248 с.

$$z = \left(\frac{\delta_g \cdot D_g \cdot \sqrt{\pi \cdot t}}{2 \sqrt{D_v}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

Температурная зависимость коэффициента диффузии в границе зерна от температуры подчиняется закону Аррениуса и имеет вид:

$$D_g = D_0 \cdot e^{-\frac{E_D}{P_b \cdot \theta}}, \quad (4)$$

где D_0 – частотный множитель, характеризующий частоту перескоков атомов в решетке при бесконечно большой температуре, $\text{м}^2/\text{с}$; E_D – энергия активации, Дж/моль; P_b – постоянная Больцмана, Дж/К; θ – температура в зоне контакта инструмента и заготовки, К.

Подставляя (4) в (3), получаем окончательную формулу для определения глубины диффузии антифрикционного материала в поверхностный слой заготовки за время одного непрерывного контакта индентора t с поверхностью при температуре θ , что позволяет учесть сильную температурную зависимость коэффициента диффузии в границе зерна:

$$z = \left(\frac{\delta_g \cdot D_0 \cdot \sqrt{\pi \cdot t}}{2 \sqrt{D_v}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot e^{-\frac{E_D}{2 P_b \cdot \theta}}, \quad (5)$$

При ультразвуковой обработке контакт индентора с поверхностью носит импульсный характер: серия ударов с частотой $f = 22$ кГц. Так как время между ударами равно $t = 1/f$, то, преобразовав выражение (5), получаем соотношение для определения глубины диффузии за один удар индентора:

$$z = \left(\frac{\delta_g \cdot D_0 \cdot \sqrt{\pi / f}}{2 \sqrt{D_v}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot e^{-\frac{E_D}{2 P_b \cdot \theta}}, \quad (6)$$

где f – частота ультразвуковых колебаний индентора, $1/\text{с}$.

Поскольку контакт носит импульсный характер, каждый удар вызывает локальный нагрев и пластическую деформацию, способствующие диффузии. Время между ударами (~ 45 мкс) значительно меньше времени релаксации температурного поля в металле, поэтому тепло накапливается от удара к удару, что усиливает процесс диффузии.

Для расчета общей глубины покрытия за время обработки необходимо просуммировать вклады от всех ударов, произошедших в данной точке поверхности, т. е. каждый удар происходит при своей мгновенной температуре θ_i . Следовательно, глубина диффузии за все время одного непрерывного контакта индентора с обрабатываемой поверхностью по всем i -м ударам индентора в зоне контакта определяется:

$$z = \sum_{i=1}^c \left(\frac{\delta_g \cdot D_0 \cdot \sqrt{\pi / f}}{2 \sqrt{D_v}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot e^{-\frac{E_D}{2 P_b \cdot \theta_i}}, \quad (7)$$

где c – общее число ударов; θ_i – температура в зоне контакта при i -м ударе.

Равенство (6) определяет глубину диффузии антифрикционного материала за один непрерывный контакт индентора с обрабатываемой поверхностью. Время одного непрерывного контакта определим из условия, что центральная точка контакта не обязательно пройдет по диагонали пятна непрерывного контакта, а по средней хорде длиной $0,62 \cdot b_t$. Поэтому время одного непрерывного контакта будет равно:

$$t = \frac{0,62 \cdot b_t}{\pi \cdot D_z \cdot n_z}, \quad (8)$$

где b_t – радиус пластической зоны поверхности контакта, м; D_z – диаметр заготовки, м; n_z – частота вращения заготовки, об/с.

На Рисунке 1 показано взаимодействие индентора с заготовкой, где при ударе образуется углубление и возникают контактные напряжения. В середине зоны контакта образуется круговая поверхность контакта радиусом b_t (м) с контактными напряжениями, равными напряжению пластической деформации, а на остальной части поверхности контакта, имеющей радиус b (м), возникают упругие напряжения.

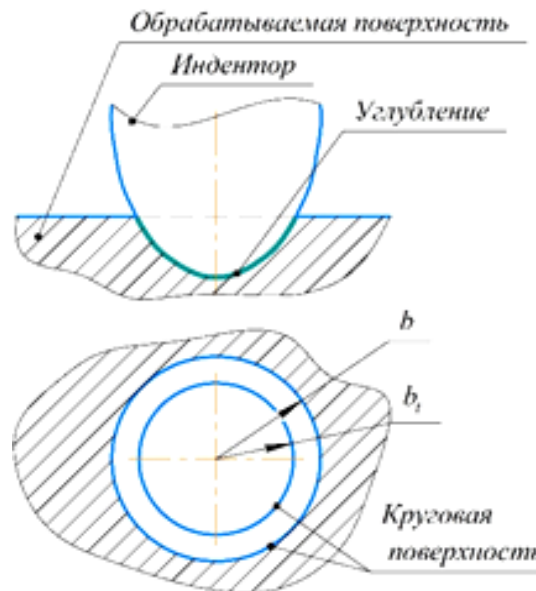


Рисунок 1 – Взаимодействие индентора и заготовки
Figure 1 – Interaction of the indenter and the workpiece

Число ударов индентора за один непрерывный контакт с поверхностью заготовки определяется:

$$c = t \cdot f = \frac{0,62 \cdot b_t \cdot f}{\pi \cdot D_z \cdot n_z}, \quad (9)$$

Формула (9) определяет число ультразвуковых ударов индентора, приходящихся на одну точку поверхности заготовки в течение одного непрерывного контакта. Это ключевой параметр модели, поскольку каждый удар вызывает локальный нагрев и пластическую деформацию, способствующие диффузии антифрикционного материала.

При поперечной подаче инструмента по величине меньше диаметра пятна контакта, число непрерывных контактов k_s будет равно:

$$k_s = \frac{2b_t}{S_z}, \quad (10)$$

где S_z – поперечная подача индентора, м/об.

Формула (10) определяет число непрерывных контактов индентора с одной и той же точкой поверхности заготовки за один полный оборот детали при поперечной подаче S_z .

Поскольку индентор имеет конечный размер поверхности контакта диаметром $2b_t$, а за один оборот заготовки он смещается вдоль её торца на величину подачи S_z , то количество перекрытий или повторных воздействий на одну точку определяется отношением ширины поверхности контакта к величине подачи. Если подача меньше

диаметра поверхности контакта ($S_z < 2b_t$), то каждая точка поверхности попадает под индентор несколько раз за один оборот – именно это число повторных контактов и даёт формула (10). Чем меньше подача, тем больше перекрытий, тем интенсивнее нагрев и глубже диффузия.

Этот параметр позволяет учесть эффект многократного воздействия ультразвуковых колебаний на одну зону поверхности, что является ключевой особенностью технологии формирования антифрикционных покрытий при ультразвуковой обработке.

Подставив значения (9) и (10) в равенство (7), определим глубину диффузии антифрикционного покрытия в обрабатываемую поверхность в любой точке поверхности от одного удара индентора с порядковым номером i , учитывая мгновенную температуру, которая определяется суммированием вкладов каждого удара индентора [7, 8]:

$$z = \frac{2b_t}{S_z} \sum_{i=1}^c \left(\frac{\delta_g \cdot D_0 \cdot \sqrt{\pi/f}}{2\sqrt{D_v}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot e^{-\frac{E_D}{2P_b \cdot \theta_i}}. \quad (11)$$

С учетом того, что при частоте 22 кГц за время обработки точка поверхности получает сотни и тысячи ударов с малыми интервалами, расчет каждого удара требует значительного времени и усложняет вычисления без существенного выигрыша в точности, т. к. температура не успевает значительно измениться между соседними ударами.

Поскольку диффузия наиболее интенсивно протекает при максимальном нагреве, средняя температура выбирается в зоне пикового нагрева. Экспоненциальная зависимость диффузии от температуры приводит к тому, что основной вклад дают удары при максимальной температуре, а расчет отдельных ударов при низких температурах практически не влияет на результат. Тогда в качестве среднего значения температуры следует взять температуру θ_{co} , которая равна:

$$\theta_{co} = \frac{0,31b_t}{\Delta x} \cdot \theta_{max}, \quad (12)$$

где θ_{co} – медианная температура, К; 0,31 – соответствует расстоянию средней хорды от центра круга контакта и получается из геометрического усреднения времени пребывания точки поверхности в зоне пластического контакта; Δx – перемещение заготовки за время одного удара алмазного индентора, м: $\Delta x = \pi \cdot D_z \cdot n_z / f$.

Для упрощения вычислений сумма в выражении (11) заменяется произведением числа ударов на вклад, соответствующий эффективной температуре θ_{co} . Таким образом, подставив значение (12) в равенство (5) и раскрыв значение времени t одного непрерывного контакта (8), получаем соотношение для определения средней глубины диффузии антифрикционного покрытия в обрабатываемую поверхность, которое учитывает: число ударов (9), число непрерывных контактов (10) и медианную температуру (12):

$$z = 1,2 \cdot \frac{\sqrt{\pi} \cdot b_t^{1,25}}{S_z} \cdot \sqrt{\frac{\delta_g \cdot D_0}{2\sqrt{D_v} \cdot \sqrt{D_z \cdot n_z}}} \cdot e\left(\frac{-E_D}{2 \cdot P_b \cdot \theta_0}\right), \quad (13)$$

Разработанная модель учитывает основные механизмы межзеренной диффузии. Но дополнительное влияние может оказывать наличие пластической деформации поверхности заготовки со стороны индентора, что при повышенной температуре вызывает механизм облегченной диффузии. Кроме того, наличие легирующих элементов

способно изменять энергию активации и коэффициенты как объемной, так и межзеренной диффузии, что оказывает существенное влияние на интенсивность переноса углерода и глубину формируемого диффузионного слоя. К тому же, диффузия углерода (в виде графита) в железо осуществляется не путем движения и замещения вакансий, как других веществ, а по межузельному механизму, поэтому для ее осуществления требуется меньше затрат энергии.

Важно отметить, что разработанная модель справедлива для определённого диапазона параметров обработки: частота вращения заготовки 300–2000 об/мин, поперечная подача 0,03–0,2 мм/об, сила прижима 100–500 Н, амплитуда ультразвуковых колебаний 5–20 мкм. За пределами этих диапазонов могут проявиться дополнительные эффекты: при очень высоких скоростях вращения время контакта становится слишком малым для накопления тепла, при очень больших подачах исчезает эффект перекрытия контактных пятен, при чрезмерных силах прижима возможно разрушение индентора или заготовки.

Таким образом, разработанная математическая модель представляет собой физически обоснованное решение, позволяющее прогнозировать глубину диффузии для любых заданных параметров обработки и свойств материала. Модель учитывает ключевые особенности процесса: межзеренную диффузию, температурную зависимость коэффициента диффузии, импульсный характер нагружения и геометрию контакта.

Результаты

Полученное аналитическое выражение (13) позволяет выполнить численную оценку глубины диффузии антифрикционного материала в зависимости от параметров ультразвуковой обработки. Для анализа чувствительности модели были проведены расчеты при различных значениях частоты вращения заготовки и поперечной подачи инструмента при радиусе индентора, равном $r = 2$ мм и силе прижима индентора к обрабатываемой поверхности $P = 300$ Н (Рисунок 2). Расчёты проводились для стали 45 (предел текучести $\sigma_t = 400$ МПа, плотность $\rho = 7850$ кг/м³, теплопроводность $\lambda = 50$ Вт/(м·К)) с нанесением графитового покрытия. Параметры диффузии углерода в железе принимались по справочным данным: $D_0 = 1,0 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $E_D = 140$ кДж/моль, $\delta_g = 0,5$ нм, $D_v = 1,0 \cdot 10^{-14}$ м²/с.

Как видно из Рисунка 2, с возрастанием поперечной подачи ультразвукового инструмента глубина антифрикционного покрытия снижается. Это объясняется тем, что при возрастании поперечной подачи уменьшается число наложений пятен пластического контакта инструмента на каждую точку поверхности заготовки в процессе обработки при каждом обороте заготовки. То есть точка обрабатываемой поверхности меньше попадает в зону контакта с инструментом.

Из Рисунка 2 также следует, что с уменьшением частоты вращения заготовки глубина антифрикционного покрытия возрастает. Объясняется это тем, что с уменьшением частоты вращения заготовки увеличивается число непрерывных контактов индентора с каждой точкой поверхности заготовки. Например, при частоте вращения $n = 500$ об/мин и подаче $S = 0,07$ мм/об глубина диффузии составляет $z \approx 0,028$ мм. При увеличении частоты до 1500 об/мин глубина снижается до $z \approx 0,014$ мм.

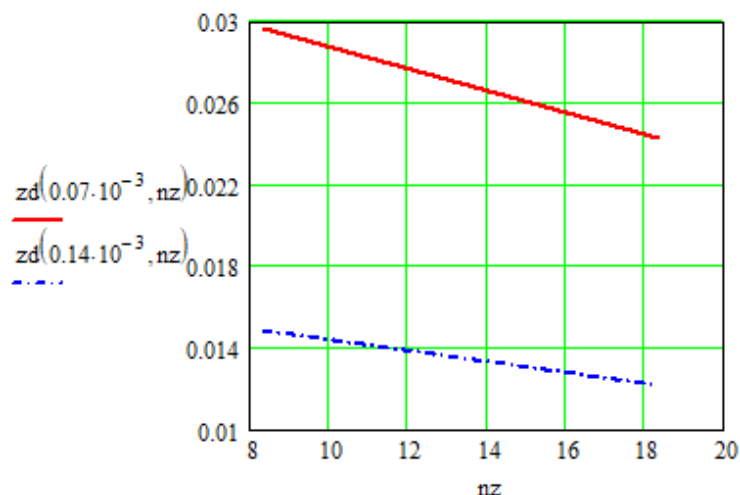


Рисунок 2 – Зависимость глубины диффузии z (мм) от частоты вращения детали n (об/с) при $r = 2$ мм, $P = 300$ Н, $S_1 = 0,07$ мм/об и $S_2 = 0,14$ мм/об

Figure 2 – Dependence of the diffusion depth z (mm) on the rotation frequency of the part n (rev/s) at $r = 2$ mm, $P = 300$ N, $S_1 = 0.07$ mm/rev and $S_2 = 0.14$ mm/rev

Полученные зависимости глубины диффузии от параметров обработки качественно согласуются с результатами работ [9, 10], где экспериментально подтверждено, что уменьшение частоты вращения и подачи приводит к увеличению глубины модифицированного слоя за счёт эффекта накопления пластической деформации и многократного воздействия на одну и ту же зону поверхности. А также, что при частоте вращения увеличивается время контакта и число наложений ультразвуковых воздействий на каждую точку поверхности, что способствует более глубокой пластической деформации.

Заключение

Разработана математическая модель процесса диффузии антифрикционного материала при ультразвуковой обработке на основе уравнения Фишера, описывающего диффузию в межзеренное пространство, учитывающее энергию пластической деформации, температуру, время контакта и свойства материала заготовки. Установлено, что уменьшение частоты вращения заготовки и поперечной подачи приводит к увеличению глубины проникновения покрытия вследствие роста числа наложений контактных пятен и суммарного времени диффузии. Ключевой особенностью модели является учёт импульсного характера ультразвукового воздействия с частотой 22 кГц и эффекта накопления тепла от серии последовательных ударов индентора, что позволяет более точно прогнозировать температурное поле в зоне контакта.

Разработанные зависимости позволяют прогнозировать толщину антифрикционного слоя и оптимизировать режимы обработки для обеспечения заданных триботехнических свойств поверхности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Марков А.И. *Ультразвуковая обработка материалов*. Москва: Машиностроение; 1980. 236 с.
2. Носков А.С., Балтаев Т.А. Ультразвуковая финишная обработка с эффектом нанесения твердой графитной смазки. *Вестник СГТУ*. 2011;3(2):109–113.

- Noskov A.S., Baltayev T.A. Ultrasonic finishing processing with effect of drawing of firm graphitic greasing. *Vestnik SGTU*. 2011;3(2):109–113. (In Russ.).
3. Приходько В.М., Нигметзянов Р.И., Сундуков С.К. и др. Применение ультразвука для модификации поверхностного слоя деталей, полученных аддитивными технологиями. *Научно-технические технологии в машиностроении*. 2025;(7):3–12. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2025-7-3-12>
Prikhodko V., Nigmatzyanov R., Sundukov S., et al. Ultrasonic application for surface layer modifying in parts produced by additive technologies. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2025;(7):3–12. (In Russ.). <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2025-7-3-12>
 4. Чувильдеев В.Н., Нохрин А.В., Пирожникова О.Э. и др. Анализ изменения диффузионных свойств неравновесных границ зерен при рекристаллизации и сверхпластической деформации субмикроструктурных металлов и сплавов. *Физика твердого тела*. 2017;59(8):1561–1569. <https://doi.org/10.21883/ftt.2017.08.44759.420>
Chuvil'deev V.N., Nokhrin A.V., Pirozhnikova O.E., et al. Changes in the diffusion properties of nonequilibrium grain boundaries upon recrystallization and superplastic deformation of submicrocrystalline metals and alloys. *Physics of the Solid State*. 2017;59(8):1584–1593. <https://doi.org/10.1134/S1063783417080066>
 5. Fisher J.C. Calculation of diffusion penetration curves for surface and grain boundary diffusion. *Journal of Applied Physics*. 1951;22(1):74–77. <https://doi.org/10.1063/1.1699825>
 6. Herzig Ch., Divinski S.V. Grain boundary diffusion in metals: recent developments. *Materials Transactions*. 2003;44(1):14–27. <https://doi.org/10.2320/matertrans.44.14>
 7. Королев А.В., Бондарева А.С. Механизм возникновения теплового эффекта при ультразвуковой обработке поверхностей деталей. *Машиностроение и инженерное образование*. 2025;(1):32–39. https://doi.org/10.52261/18151051_2025_1_32
Korolev A.V., Bondareva A.S. Mechanism of thermal effect occurrence in ultrasonic treatment of parts surfaces. *Mechanical Engineering and Engineering Education*. 2025;(1):32–39. (In Russ.). https://doi.org/10.52261/18151051_2025_1_32
 8. Королев А.В., Королев А.А., Бондарева А.С. Влияние режима нанесения антифрикционного покрытия на толщину покрытия поверхности детали. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2023;19(8):349–352. <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2023-19-8-349-352>
Korolev A.V., Korolev A.A., Bondareva A.S. Effect of antifriction coating deposition mode on coating thickness of part surface. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2023;19(8):349–352. (In Russ.). <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2023-19-8-349-352>
 9. Pang Zh., Wang Sh., Yin X., et al. Effect of spindle speed during ultrasonic rolling on surface integrity and fatigue performance of Ti6Al4V alloy. *International Journal of Fatigue*. 2022;159(6):106794. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106794>
 10. Teimouri R., Amini S. Analytical modeling of ultrasonic surface burnishing process: evaluation of through depth localized strain. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019;151:118–132. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.11.008>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Бондарева Альбина Серкалиевна, аспирант
Саратовский государственный технический
университет имени Гагарина Ю.А., Саратов,
Российская Федерация.
e-mail: topeneva97@mail.ru

Albina S. Bondareva, Postgraduate, Yuri
Gagarin State Technical University of Saratov,
Saratov, the Russian Federation.

Королев Альберт Викторович, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов, Российская Федерация.

e-mail: science7@bk.ru

Albert V. Korolev, Doctor of Engineering Sciences, Professor at the Department of Mechanical Engineering Technology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, the Russian Federation.

Королев Андрей Альбертович, доктор технических наук, профессор кафедры информатики и прикладной математики, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация.

e-mail: kor_science@mail.ru

Andrey A. Korolev, Doctor of Engineering Sciences, Professor at the Department of Computer Science and Applied Mathematics, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 09.06.2026; одобрена после рецензирования 18.08.2026; принята к публикации 25.08.2026.

The article was submitted 09.06.2026; approved after reviewing 18.08.2026; accepted for publication 25.08.2026.