

УДК 621.9.048.6

А.В. КОРОЛЕВ, д-р техн. наук, проф.
профессор кафедры технология машиностроения¹
E-mail: science7@bk.ru

А.А. КОРОЛЕВ, д-р техн. наук, проф.
профессор кафедры информационного права и цифровых технологий²
E-mail: kor_science@mail.ru

А.С. БОНДАРЕВА
аспирант кафедры технология машиностроения¹
E-mail: topeneva97@mail.ru

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

²Саратовская государственная юридическая академия, г. Саратов, Российская Федерация

Поступила в редакцию 31.08.2023.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА НАНЕСЕНИЯ АНТИФРИКЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКОЙ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В статье представлено экспериментальное исследование влияния режима ультразвукового алмазного выглаживания на шероховатость поверхности торца ролика роликового подшипника в условиях наличия на обрабатываемой поверхности нанопорошка графита. При наличии на поверхности нанопорошка графита процесс алмазного выглаживания сопровождается образованием на обрабатываемой поверхности твердого антифрикционного покрытия, что может оказывать влияние на формирование микрорельефа обработанной поверхности. Описана конструкция ультразвуковой установки для осуществления алмазного выглаживания торцевой поверхности роликов с возможностью одновременного нанесения на эту поверхность твердого антифрикционного покрытия. Установка собрана на базе токарно-винторезного станка 16К20. Она состоит из приспособления для установки роликов в патрон токарного станка и ультразвукового преобразователя, закрепленного на суппорте станка. В качестве рабочего инструмента в данном устройстве использовался алмазный наконечник, закрепленный на конце концентратора колебаний ультразвукового преобразователя. В качестве экспериментальных образцов использовались ролики буксового подшипника серии 36-42726E2M (ГОСТ 18855-94). Предметом исследований являлись регрессионные зависимости влияния режима ультразвуковой обработки на шероховатость обработанной поверхности. Для проведения исследований применялся метод полного факторного эксперимента. В качестве варьируемых факторов использовались радиус округления вершины инструмента, поперечная подача инструмента, частота вращения образца и сила прижима инструмента к обрабатываемой поверхности образца. В качестве математической модели была принята степенная зависимость показателей обработки от принятых варьируемых факторов. Показано, что наибольшее влияние на шероховатость поверхности оказывают поперечная подача инструмента и радиус округления алмазного наконечника.

Ключевые слова: шероховатость поверхности, ультразвуковая обработка, алмазное выглаживание, режим обработки, алмазный наконечник, ролик

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-1-66-43-49>

Введение. Повышение требований к качеству и надежности изделий современного машиностроения вызвало необходимость обеспечения благоприятных условий трения на рабочих поверхностях подвижных соединений с целью уменьшения их износа. В особо неблагоприятных условиях находятся детали роликовых подшипников, которым в процессе эксплуатации помимо радиальной

нагрузки приходится воспринимать несвойственную для них осевую нагрузку. К таким подшипникам относятся, например, буксовые подшипники, которые используются в железнодорожном транспорте, поездах метрополитена, ходовой части танков и другой технике. В этих подшипниках возникают осевые динамические нагрузки от давления на транспорт ветра, центробежной силы,

возникающей при поворотах транспорта, бокового качания транспорта и других горизонтальных усилий. Под действием осевой нагрузки на подшипник ролики прижимаются торцами к бортам колец и работают в режиме трения-скольжения. Так как традиционная пластичная смазка плохо удерживается на торцевой поверхности, а торцы роликов имеют повышенную шероховатость, то это вызывает увеличение трения в подшипнике и ускоряет его износ.

Решением указанной проблемы может являться применение при обработке торцов роликов ультразвукового алмазного выравнивания с одновременным нанесением на обрабатываемую поверхность твердого антифрикционного покрытия [1]. Его нанесение при ультразвуковом алмазном выравнивании обеспечивается подачей в зону обработки нанопорошка антифрикционного материала в виде графита. Под действием пластической деформации алмазным наконечником материала заготовки и возникающей в зоне контакта высокой температуры часть нанопорошка диффундирует в обрабатываемую поверхность, а другая часть «запечатывается» во впадинах микронеровностей под действием пластической деформации вершин. Результаты исследования процесса ультразвукового нанесения твердого антифрикционного покрытия представлены в работе [2].

Одновременно с образованием твердого антифрикционного покрытия при алмазном выравнивании снижается шероховатость обрабатываемой поверхности, что, как известно, также может способствовать снижению износа торца роликов. Алмазному выравниванию различных поверхностей деталей посвящено большое количество публикаций [3–17]. Некоторые работы [17] посвящены исследованию эффективности изготовления роликов буксовых подшипников с применением ультразвукового алмазного выравнивания. Но особенностью исследуемого процесса является то, что процесс алмазного выравнивания осуществляется в среде нанопорошка графита. Он заполняет впадины микронеровностей, поэтому значительная часть ударной нагрузки приходится на этот нанопорошок, что изменяет характер воздействия алмазного наконечника на вершины микронеровностей. Поэтому представляет определенный интерес исследование влияния процесса алмазного выравнивания на формирование микрорельефа обрабатываемой поверхности, осуществляемого в процессе антифрикционного покрытия.

Методика эксперимента. В качестве экспериментальных образцов использовались ролики 32X52 II ГОСТ 22696-2014 буксового подшипника серии 36-42726Е2М (ОСТ 18855-94). Объектом экспериментальных исследований является технологический процесс формирования микрорельефа торцевой поверхности деталей в среде нанопорошка антифрикционного материала в виде

графита. Предметом исследований являются регрессионные зависимости влияния режима ультразвуковой обработки на шероховатость обработанной поверхности.

Экспериментальные исследования влияния условий ультразвуковой обработки на показатели качества поверхности торца роликов осуществлялись на установке ООО «Научно производственное предприятие нестандартных изделий машиностроения». Схема установки приведена на рисунке 1.

Установка была собрана на базе токарно-винторезного станка 16К20. В патроне 1 станка закреплена втулка 2, в глухом отверстии которой размещена пружина 3 и экспериментальный образец 4, который представляет собой ролик роликового подшипника 36-42726Е2М (ГОСТ 18855-94) диаметром D и длиной B . На суппорте станка 5 закреплен ультразвуковой преобразователь 6. На конце ультразвукового концентратора колебаний ультразвукового преобразователя 6 закреплен инструмент 7 в виде алмазного наконечника со сферической рабочей поверхностью радиусом r . Своей рабочей поверхностью инструмент 7 упирается в поверхность 8 экспериментального образца 4. В результате этого сжимается пружина 3, обеспечивая заданную силу P взаимодействия экспериментального образца 4 и инструмента 7.

Предварительно с помощью динамометра была произведена тарировка величины натяга пружины при разной степени ее деформации. Для этого вместо ультразвукового концентратора устанавливали электронный динамометр С-0,5-1-2/2 компании «Мегавес» с допустимой нагрузкой до 500 Н и погрешностью измерения до 50 Н. Динамометр с помощью перемещения суппорта доводили до касания с торцом ролика, а затем контролировали перемещение суппорта и показания динамометра. В процессе проведения исследований достаточно было сначала коснуться инструментом 7 экспериментального образца 4, а затем переместить суппорт на требуемую величину, обеспечивающую действие пружины на ролик с заданной силой.

Работа установки осуществлялась следующим образом. Экспериментальный образец 4 свобод-

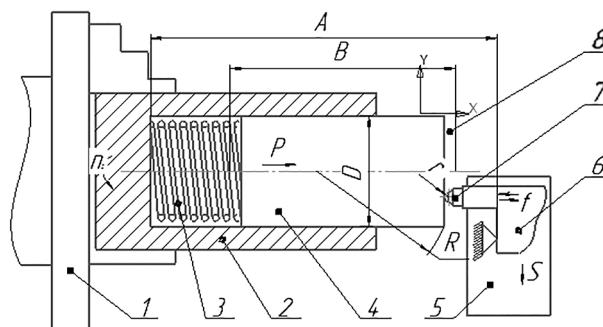


Рисунок 1 — Установка для нанесения антифрикционного покрытия на поверхность торцов роликов
Figure 1 — Installation for applying an anti-friction coating to the roller end surface

но устанавливали в отверстие втулки 2 до упора в пружину 3. Специального крепления экспериментального образца 4 не требовалось, так как силы его трения об отверстие втулки 2 превышают силы трения его торца 8 об алмазный наконечник 7. На торец 8 экспериментального образца 4 наносили слой графитовой смазки. С помощью суппорта станка ультразвуковой концентратор подводили к центральной части торца 8 экспериментального образца 4 с требуемым натягом P , создаваемым пружиной 3.

Далее включали ультразвуковое колебание концентратора с частотой f , вращение экспериментального образца 4 с частотой n_z и поперечную подачу суппорта станка S . При перемещении инструмента в радиальном направлении относительно экспериментального образца 4 производили алмазное выравнивание обрабатываемой поверхности 8 и одновременно под действием пластической деформации и температуры, возникающей в зоне контакта под действием ударов инструмента 7 об обрабатываемую поверхность 8, обеспечивалась диффузия углерода в обрабатываемую поверхность 8.

Осуществлялся полный факторный эксперимент 2^4 . В качестве варьируемых факторов приняты: статическое усилие P , поперечная подача S , радиус округления инструмента r , частота вращения образца n_z . Область определения варьируемых факторов представлена в таблице.

Результаты исследования. По результатам обработки экспериментальных данных построена следующая регрессионная зависимость:

$$R_a = 0,00083 \cdot P^{-0,25} \cdot S^{0,55} \cdot r^{-0,32} \cdot n^{0,11},$$

где P — сила прижима алмазного наконечника к обрабатываемой поверхности, Н; n — частота вращения образца, об/мин; S — поперечная подача алмазного наконечника, мм/об; r — радиус округления вершины алмазного наконечника, мм; R_a — среднее арифметическое отклонение микропрофиля обработанной поверхности, мм.

На рисунке 2 показана зависимость поперечной подачи инструмента на шероховатость поверхности образца.

Из рисунка 2 видно, что с возрастанием поперечной подачи инструмента шероховатость обра-

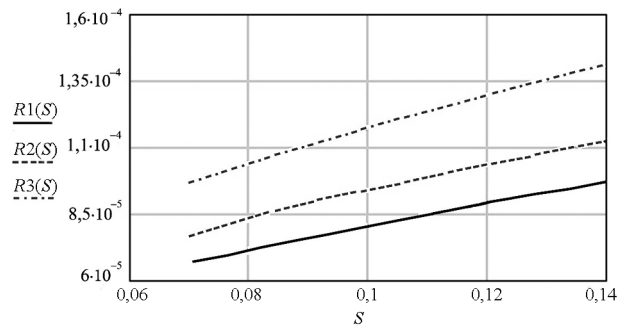


Рисунок 2 — Зависимость среднего арифметического отклонения микропрофиля обработанной поверхности R от поперечной подачи алмазного наконечника S при максимальных $R1(S)$, средних $R2(S)$ и минимальных $R3(S)$ значениях других варьируемых факторов

Figure 2 — Dependence of the arithmetic mean deviation of the microprofile of the treated surface R on the transverse feed of the diamond tip S at maximum $R1(S)$, average $R2(S)$ and minimum $R3(S)$ values of other variable factors

ботанной поверхности при различных значениях других варьируемых факторов возрастает. Объясняется это тем, что поперечная подача инструмента определяет шаг воздействия алмазного наконечника на поверхность образца в направлении подачи. Чем больше шаг воздействия, тем меньшая часть микронеровностей исходной поверхности подвергается интенсивной пластической деформации со стороны алмазного наконечника и тем выше получаются остаточные микронеровности.

Характер данной зависимости не меняется при различных фиксированных значениях других варьируемых факторов, хотя численные значения шероховатости получаются выше при минимальных значениях радиуса алмазного наконечника, силы прижима его к обрабатываемой поверхности и частоты вращения образца и ниже при их максимальных значениях. Обусловлено это отсутствием взаимного влияния поперечной подачи с другими варьируемыми факторами.

На рисунке 3 представлена зависимость среднего арифметического отклонения микропрофиля обработанной поверхности от силы прижима алмазного наконечника к обрабатываемой поверхности.

Как видно из рисунка 3, с возрастанием силы прижима алмазного наконечника шероховатость обработанной поверхности снижается. Объясняется это тем, что с возрастанием силы прижима алмазного наконечника к поверхности образца возрастает сила воздействия этого наконечника на микронеровности обрабатываемой поверхности, в результате чего увеличивается степень их пластической деформации и снижается высота. Одной из особенностей ультразвукового алмазного выравнивания, по сравнению с обычным, состоит в том, что сила воздействия алмазного наконечника на микронеровности определяется не столько силой прижима его к этой поверхности, сколько ударной нагрузкой, которую оказывает алмазный

Таблица — Варьируемые факторы и области их определения
Table — Variable factors and their areas of definition

№ п/п	Фактор	Натуральные границы области определения	
		нижняя	верхняя
1	Статическое усилие P , Н	100	300
2	Продольная подача S , мм/об	0,07	0,14
3	Радиус округления инструмента r , мм	2	4
4	Частота вращения n , об/мин	500	1500

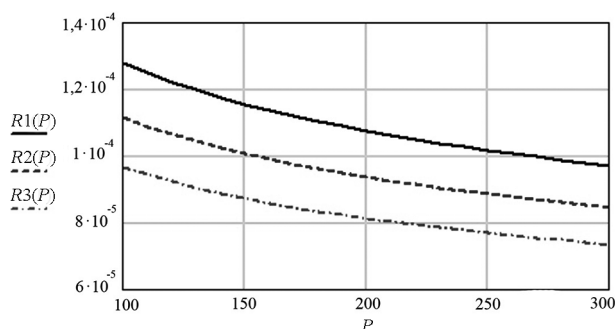


Рисунок 3 — Зависимость среднего арифметического отклонения микропрофиля обработанной поверхности R от силы прижима алмазного наконечника P при максимальных $R1(P)$, средних $R2(P)$ и минимальных $R3(P)$ значениях других варьируемых факторов

Figure 3 — Dependence of the arithmetic mean deviation of the microprofile of the treated surface R on the clamping force of the diamond tip P at maximum $R1(P)$, average $R2(P)$ and minimum $R3(P)$ values of other variable factors

наконечник на микронеровности при своих колебаниях. При малой силе прижима алмазного наконечника сила его удара по микронеровностям поверхности невелика. С возрастанием силы прижима возрастает величина ударной нагрузки и шероховатость поверхности снижается. Но при недостаточной мощности ультразвуковой установки чрезмерное возрастание силы прижима может привести к уменьшению амплитуды колебаний наконечника и даже подавлению его колебания. Как видно из рисунка 3, в выбранном диапазоне силы прижима алмазного наконечника к образцу подавления интенсивности его колебаний не происходит.

При максимальных значениях других варьируемых факторов шероховатость обработанной поверхности получается выше, а при их минимальных значениях — ниже. Объясняется это преобладающим влиянием поперечной подачи инструмента над другими факторами.

На рисунке 4 показана зависимость шероховатости обработанной поверхности от частоты вращения образца.

Как видно из рисунка 4, с возрастанием частоты вращения образца шероховатость обработанной поверхности возрастает. Объясняется это тем, что с возрастанием частоты вращения образца увеличивается шаг периодических ударов алмазного наконечника по вершинам микронеровностей обрабатываемой поверхности. Поэтому возрастает неоднородность воздействия алмазного наконечника на пластическую деформацию микронеровностей, что способствует возрастанию шероховатости обработанной поверхности. Но это влияние невелико. Так, из рисунка 4 видно, что с увеличением частоты вращения образца в 3 раза шероховатость поверхности возросла всего на 10 %. Обусловлено это тем, что алмазный наконечник колеблется с очень высокой частотой. Поэтому шаг ударов наконечника по обрабатываемой поверхности в продольном направлении

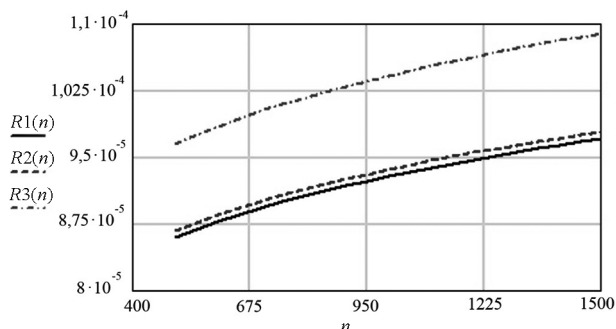


Рисунок 4 — Зависимость среднего арифметического отклонения микропрофиля обработанной поверхности R от частоты вращения образца n при максимальных $R1(n)$, средних $R2(n)$ и минимальных $R3(n)$ значениях других варьируемых факторов

Figure 4 — Dependence of the arithmetic mean deviation of the microprofile of the treated surface R on the sample rotation speed n at maximum $R1(n)$, average $R2(n)$ and minimum $R3(n)$ values of other variable factors

получается очень низким по величине (намного меньшим радиуса округления алмазного наконечника). Следовательно влияние этого фактора получается незначительным.

Из рисунка 4 также следует, что при минимальных значениях прочих варьируемых факторов шероховатость поверхности получается выше, а при максимальных значениях — ниже. Это вызвано преобладающим влиянием поперечной подачи инструмента на шероховатость обработанной поверхности.

Зависимость шероховатости обработанной поверхности от радиуса округления алмазного наконечника приведена на рисунке 5.

Из рисунка 5 видно, что возрастанием радиуса алмазного наконечника шероховатость поверхности снижается. Это следствие того, что с увеличением радиуса алмазного наконечника уменьшается степень неоднородности его воздействия на микронеровности поверхности образца. При каждом ударе алмазного наконечника по обрабатываемой поверхности вершины микронеровностей, которые находятся ближе к вершине алмазного

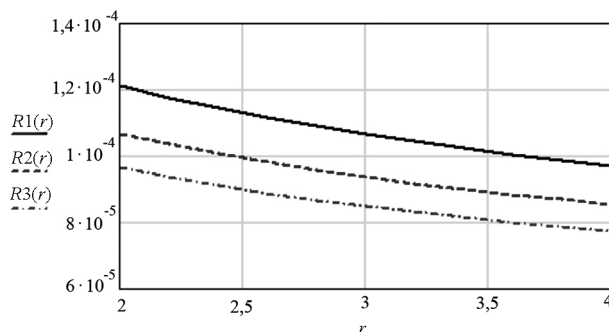


Рисунок 5 — Зависимость среднего арифметического отклонения микропрофиля обработанной поверхности R от радиуса алмазного наконечника r при максимальных $R1(r)$, средних $R2(r)$ и минимальных $R3(r)$ значениях других варьируемых факторов

Figure 5 — Dependence of the arithmetic mean deviation of the microprofile of the treated surface R on the radius of the diamond tip r at maximum $R1(r)$, average $R2(r)$ and minimum $R3(r)$ values of other variable factors

наконечника, деформируются в большей степени, чем вершины, стоящие дальше. Но с увеличением радиуса алмазного наконечника эта разница уменьшается, что повышает однородность воздействия алмазного наконечника на вершины микронеровностей, поэтому шероховатость обработанной поверхности уменьшается.

При максимальных значениях прочих варьируемых факторов шероховатость поверхности получается выше, а при минимальных их значениях шероховатость поверхности снижается. Но сам характер влияния радиуса округления алмазного наконечника на шероховатость обработанной поверхности остается неизменным при различных фиксированных значениях других факторов.

Заключение. В результате выполненных экспериментальных исследований выявлено влияние режима нанесения антифрикционного покрытия ультразвуковой обработкой на толщину слоя покрытия торцевой поверхности ролика подшипника серии 36-42726Е2М (ГОСТ 18855-94) в условиях наличия на обрабатываемой поверхности нанопорошка графита. Установлено, что наибольшее влияние на толщину слоя покрытия оказывают поперечная подача инструмента и радиус округления алмазного наконечника. С увеличением поперечной подачи высота микронеровностей возрастает, а с возрастанием радиуса округления алмазного наконечника — снижается. Сила прижима алмазного наконечника к обрабатываемой поверхности и частота вращения образца оказывают на шероховатость поверхности менее значительное влияние.

Результаты выполненных исследований могут использоваться при производстве буксовых подшипников железнодорожного и других видов транспорта для снижения трения и износа торцевой рабочей поверхности роликов и повышения надежности и долговечности этих подшипников.

Список литературы

1. Способ нанесения покрытия: пат. RU 2526342 C1 / А.В. Королев, А.С. Носков. — Оpubл. 20.08.2014.
2. Королев, А.В. Влияние режима нанесения антифрикционного покрытия на толщину покрытия детали / А.В. Королев, А.А. Королев, А.С. Бондарева // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2023. — Т. 19, № 8(224). — С. 349–352. — DOI: <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2023-19-8-349-352>.
3. Папшева, Н.Д. Методы алмазного выглаживания деталей машин и инструментов / Н.Д. Папшева // Современные проблемы теории машин. — 2016. — № 4-2. — С. 102–104.
4. Болтоков, Д.О. Сравнительный анализ методов поверхностного пластического деформирования: алмазное выглаживание и ультразвуковое пластическое деформирование / Д.О. Болтоков, А.Г. Самуль, В.П. Гилета // Социально-экономические и технические проблемы оборонно-промышленного комплекса России: история, реальность, инновации: сб. ст. VIII Всероссийской науч.-практ. конф., Арзамас,

- 12–13 апр. 2022 г. / Нижегородский гос. техн. ун-т; ред.: Е.Г. Моисеева [и др.]. — Нижний Новгород, 2022. — С. 125–128.
5. Малышев, В.И. Анализ взаимосвязи плотности дислокаций с пластической деформацией поверхностного слоя при обычном и ультразвуковом алмазном выглаживании / В.И. Малышев, А.С. Селиванов // Вектор науки Тольяттинского гос. ун-та. — 2009. — № 6(9). — С. 7–13.
6. Малышев, В.И. Анализ развития пластической деформации в поверхностном слое при ультразвуковом алмазном выглаживании / В.И. Малышев, А.С. Селиванов // Изв. Самарского науч. центра РАН. — 2010. — Т. 12, № 4-1. — С. 233–236.
7. Малышев, В.И. Теоретический анализ развития пластической деформации в поверхностном слое при ультразвуковом алмазном выглаживании / В.И. Малышев, А.С. Селиванов // Проведение научных исследований в области машиностроения: сб. мат. Всероссийской науч.-техн. конф. с элементами научной школы для молодежи, Тольятти, 27–28 нояб. 2009 г.: в 3 т. / Тольяттинский гос. ун-т. — Тольятти, 2009. — Т. 1. — С. 245–251.
8. Исакова, Г.А. Формирование поверхностного слоя деталей при ультразвуковом алмазном выглаживании / Г.А. Исакова, В.П. Гилета // Сверхтвердые материалы. — 1987. — № 5. — С. 53–58.
9. Samul, A. Ultrasonic processing of low hardness materials / A. Samul // Science. Research. Practice: сб. ст. город. науч.-практ. конф. аспирантов и магистрантов, Новосибирск, 15 дек. 2017 г. / Новосибирский гос. техн. ун-т; ред.: А.Ю. Алябьева [и др.]. — Новосибирск, 2017. — С. 145–147.
10. Степчева, З.В. Повышение эффективности алмазного выглаживания на основе рационального использования энергии модулированного ультразвукового поля: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / З.В. Степчева. — Ульяновск, 2007. — 232 л.
11. Киселев, Е.С. Формирование регулярного микрорельефа ультразвуковым алмазным выглаживанием с предварительной релаксацией остаточных напряжений / Е.С. Киселев, З.В. Степчева, П.А. Половников // Прогресивні технології і системи машинобудування. — 2007. — № 2(34). — С. 103–108.
12. Исакова, Г.А. Моделирование процесса формирования регулярного рельефа при ультразвуковом алмазном выглаживании / Г.А. Исакова, В.П. Гилета // Сверхтвердые материалы. — 1988. — № 6. — С. 48–53.
13. Киселев, Е.С. Эффективность касательно-осевых наложений ультразвуковых колебаний в процессе алмазного выглаживания стальных заготовок / Е.С. Киселев, З.В. Степчева // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2007. — № 7(31). — С. 34–38.
14. Киселев, Е.С. Эффективность применения модуляции ультразвуковых колебаний при алмазном выглаживании заготовок / Е.С. Киселев, З.В. Степчева // Вестн. Ульяновского гос. техн. ун-та. — 2007. — № 1(37). — С. 36–39.
15. Киселев, Е.С. Алмазное выглаживание стальных заготовок с использованием энергии модулированного УЗ-поля / Е.С. Киселев, Д.Е. Подопрigorov, Т.Г. Кирнасов // Вестн. Ульяновского гос. техн. ун-та. — 2002. — № 1(17). — С. 81–85.
16. Селиванов, А.С. Формирование дислокационной структуры при ультразвуковом алмазном выглаживании стали 08X12H10T / А.С. Селиванов, В.И. Малышев, Е.А. Данышина // Проведение научных исследований в области машиностроения: сб. мат. Всероссийской науч.-тех. конф. с элементами научной школы для молодежи, Тольятти, 27–28 нояб. 2009 г.: в 3 т. / Тольяттинский гос. ун-т. — Тольятти, 2009. — Т. 1. — С. 231–236.
17. Лихобабина, Н.В. Повышение эффективности и качества изготовления роликов буксовых подшипников путем введения в технологический процесс операции ультразвукового алмазного выглаживания: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Н.В. Лихобабина. — Саратов, 2009. — 125 л.

KOROLEV Albert V., D. Sc. in Eng., Prof.
Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology¹
E-mail: science7@bk.ru

KOROLEV Andrey A., D. Sc. in Eng., Prof.
Professor of the Department of Information Law and Digital Technology²
E-mail: kor_science@mail.ru

BONDAREVA Albina S.
Postgraduate Student of the Department of Mechanical Engineering Technology¹
E-mail: topeneva97@mail.ru

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

²Saratov State Academy of Law, Saratov, Russian Federation

Received 31 August 2023.

INFLUENCE OF THE APPLYING MODE OF THE ANTIFRICTION COATING BY ULTRASONIC TREATMENT ON THE ROUGHNESS OF THE TREATED SURFACE

The article presents an experimental study of the effect of the ultrasonic diamond smoothing mode on the surface roughness of the roller bearing roller end face in the presence of graphite nanopowder on the treated surface. In the presence of graphite nanopowder on the surface, the diamond smoothing process is accompanied by the formation of a solid antifriction coating on the treated surface, which can affect the formation of the microrelief of the treated surface. The design of an ultrasonic installation is described for diamond smoothing of the rollers end surface with the possibility of simultaneous application of a solid antifriction coating to this surface. The installation is assembled on the basis of a 16K20 screw-cutting machine. It consists of a device for installing rollers in the chuck of the lathe and an ultrasonic transducer mounted on the caliper of the machine. A diamond tip was used as a working tool in this device which was attached to the end of the oscillation concentrator of the ultrasonic transducer. Axle box bearing rollers of 36-42726E2M series (GOST 18855-94) were used as experimental samples. The subject of research was regression dependences of the influence of ultrasonic processing mode on the treated surface roughness. Full factorial experiment method was used to conduct the research. The tool tip rounding radius, tool transverse feed, specimen rotation speed, and tool pressure force on the machined surface of the specimen were used as varying factors. The power-law dependence of treatment indices on the adopted varying factors was taken as a mathematical model. It is shown that the greatest influence on the surface roughness is exerted by the tool transverse feed and the diamond tip rounding radius.

Keywords: surface roughness, ultrasonic treatment, diamond smoothing, treatment mode, diamond tip, roller

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-1-66-43-49>

References

1. Korolev A.V., Noskov A.S. *Sposob naneseniya pokrytiya* [Coating application method]. Patent RU, no. 2526342 C1, 2014 (in Russ.).
2. Korolev A.V., Korolev A.A., Bondareva A.S. Vliyanie rezhima naneseniya antifriktsionnogo pokrytiya na tolshchinu pokrytiya detali [Effect of antifriction coating deposition mode on coating thickness of part surface]. *Strengthening technologies and coatings*, 2023, vol. 19, no. 8(224), pp. 349–352. DOI: <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2023-19-8-349-352> (in Russ.).
3. Papsheva N.D. Metody almaznogo vyglazhivaniya detaley mashin i instrumentov [Methods of diamond smoothing of machine parts and tools]. *Sovremennye problemy teorii mashin*, 2016, no. 4-2, pp. 102–104 (in Russ.).
4. Boltokov D.O., Samul A.G., Gileta V.P. Sravnitelnyy analiz metodov poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya: almaznoe vyglazhivanie i ultrazvukovoe plasticheskoe deformirovanie [Comparative analysis of methods of surface plastic deformation: diamond smoothing and ultrasonic plastic deformation]. 8 *Vserossiyskaya nauchno-practicheskaya konferentsiya "Sotsialno-ekonomicheskie i tekhnicheskie problemy oboronno-promyslennogo kompleksa Rossii: istoriya, realnost, innovatsii"* [8th All-Russian scientific and practical conference "Socio-economic and technical problems of the Russian military-industrial complex: history, reality, innovations"]. Nizhniy Novgorod, 2022, pp. 125–128 (in Russ.).
5. Malyshev V.I., Selivanov A.S. Analiz vzaimosvyazi plotnosti dislokatsiy s plasticheskoy deformatsiey poverkhnostnogo sloya pri obychnom i ultrazvukovom almaznom vyglazhivani [The analysis of interrelation of density of dislocations with plastic deformation of the blanket at usual and ultrasonic superficial plastic deformation]. *Science vector of Togliatti State University*, 2009, no. 6(9), pp. 7–13 (in Russ.).
6. Malyshev V.I., Selivanov A.S. Analiz razvitiya plasticheskoy deformatsii v poverkhnostnom sloe pri ultrazvukovom al-

- maznom vyglazhivani [Analysis of plastic deformation on the surface in the process of ultrasonic diamond burnishing]. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2010, vol. 12, no. 4-1, pp. 233–236 (in Russ.).
7. Malyshev V.I., Selivanov A.S. Teoreticheskiy analiz razvitiya plasticheskoy deformatsii v poverkhnostnom sloe pri ultrazvukovom almaznom vyglazhivani [Theoretical analysis of the development of plastic deformation in the surface layer during ultrasonic diamond smoothing]. *Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s elementami nauchnoy shkoly dlya molodezhi "Provedenie nauchnykh issledovaniy v oblasti mashinostroeniya"* [Proc. All-Russian scientific and technical conference with elements of a scientific school for young people "Conducting scientific research in the field of mechanical engineering"]. Togliatti, 2009, vol. 1, pp. 245–251 (in Russ.).
8. Iskhakova G.A., Gileta V.P. Formirovanie poverkhnostnogo sloya detaley pri ultrazvukovom almaznom vyglazhivani [Formation of the surface layer of parts during ultrasonic diamond smoothing]. *Sverkhverdye materialy*, 1987, no. 5, pp. 53–58 (in Russ.).
9. Samul A. Ultrasonic processing of low hardness materials. *Nauchno-prakticheskaya konferentsiya aspirantov i magistrantov "Science. Research. Practice"* [Scientific and practical conference of postgraduates and undergraduates "Science. Research. Practice"]. Novosibirsk, 2017, pp. 145–147 (in Russ.).
10. Stepcheva Z.V. *Povyshenie effektivnosti almaznogo vyglazhivaniya na osnove ratsionalnogo ispolzovaniya energii modulirovannogo ultrazvukovogo polya*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of diamond smoothing based on the rational use of the energy of the modulated ultrasonic field. Ph. D. Thesis]. Ulyanovsk, 2007. 232 p. (in Russ.).
11. Kiselev E.S., Stepcheva Z.V., Polovnikov P.A. Formirovanie regul'yarnogo mikrorel'efa ultrazvukovym almaznym vyglazhivaniem s predvaritel'noy relaksatsiey ostatochnykh napryazheniy [Formation of a regular microrelief by ultrasonic diamond smoothing with preliminary relaxation of residual stresses]. *Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniya*, 2007, no. 2(34), pp. 103–108 (in Russ.).
12. Iskhakova G.A., Gileta V.P. Modelirovanie protsessa formirovaniya regul'yarnogo rel'efa pri ultrazvukovom almaznom vyglazhivani [Modeling of the process of forming a regular relief with ultrasonic diamond smoothing]. *Sverkhverdye materialy*, 1988, no. 6, pp. 48–53 (in Russ.).
13. Kiselev E.S., Stepcheva Z.V. Effektivnost kasatel'no-osevykh nalozeniy ultrazvukovykh kolebaniy v protsesse almaznogo vyglazhivaniya stalnykh zagotovok [The efficiency of using the tangent-axial direction of ultrasonic fluctuations in process diamond burnishing]. *Strengthening technologies and coatings*, 2007, no. 7(31), pp. 34–38 (in Russ.).
14. Kiselev E.S., Stepcheva Z.V. Effektivnost primeneniya modul'yatsii ultrazvukovykh kolebaniy pri almaznom vyglazhivani zagotovok [Effectiveness of using the modulation of ultrasonic vibrations when diamond burnishing of blanks]. *Bulletin of Ulyanovsk State Technical University*, 2007, no. 1(37), pp. 36–39 (in Russ.).
15. Kiselev E.S., Podoprigorov D.E., Kirasov T.G. Almaznoe vyglazhivanie stalnykh zagotovok s ispolzovaniem energii modulirovannogo UZ-polya [Diamond smoothing of steel workpieces using the energy of a modulated ultrasonic field]. *Bulletin of Ulyanovsk State Technical University*, 2002, no. 1(17), pp. 81–85 (in Russ.).
16. Selivanov A.S., Malyshev V.I., Danshina E.A. Formirovanie dislokatsionnoy struktury pri ultrazvukovom almaznom vyglazhivani stali 08Kh12N10T [Formation of dislocation structure during ultrasonic diamond smoothing of 08Kh12N10T steel]. *Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s elementami nauchnoy shkoly dlya molodezhi "Provedenie nauchnykh issledovaniy v oblasti mashinostroeniya"* [Proc. All-Russian scientific and technical conference with elements of a scientific school for young people "Conducting scientific research in the field of mechanical engineering"]. Togliatti, 2009, vol. 1, pp. 231–236 (in Russ.).
17. Likhobabina N.V. *Povyshenie effektivnosti i kachestva izgotovleniya rolikov buksovykh podshipnikov putem vvedeniya v tekhnologicheskii protsess operatsii ultrazvukovogo almaznogo vyglazhivaniya*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency and quality of the manufacture of box bearing rollers by introducing ultrasonic diamond smoothing operations into the technological process. Ph. D. Thesis]. Saratov, 2009. 125 p. (in Russ.).