



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №2 (152). С.12-19.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №2 (152). P. 12-19.

Научная статья  
УДК 534-8;621.92  
doi: 10.30987/2223-4608-2024-12-19

## Анализ возможностей оптимизации выбора ультразвукового оборудования для нанесения функциональных покрытий

Александр Андреевич Нечай<sup>1</sup>, магистрант  
Александр Вадимович Сухов<sup>2</sup>, аспирант  
Дмитрий Сергеевич Фатюхин<sup>3</sup>, д.т.н.

Софья Александровна Фомушкина<sup>4</sup>, студент

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Московский автомобильно-дорожный государственный  
технический университет (МАДИ), Москва, Россия

<sup>1, 2</sup> [sukhov-aleksandr96@mail.ru](mailto:sukhov-aleksandr96@mail.ru) / <https://orcid.org/0009-0009-9097-8216>

<sup>3, 4</sup> [mitriy2@yandex.ru](mailto:mitriy2@yandex.ru) / <https://orcid.org/0000-0002-5914-3415>

**Аннотация.** Для обеспечения требований, влияющих на качество функциональных покрытий, в настоящее время применяются различные технологии, одной из которых является применение ультразвука. Для формирования функциональных покрытий ультразвук применяется как на этапе подготовки поверхности, так и на этапе нанесения покрытия. Так, на этапе подготовки поверхности ультразвук позволяет проводить предварительную очистку поверхности, обеспечить необходимую шероховатость поверхности с помощью ультразвуковой прокатки, а также предварительно активировать поверхность перед азотированием за счет поверхностного пластического деформирования. В случае нанесения покрытий ультразвук позитивно влияет на азотирование и нанесение лакокрасочных покрытий. Однако используемое в рамках различных процессов подготовки и нанесения покрытий ультразвуковое оборудование серьезно различается по своим характеристикам. Так, применяемые ультразвуковые генераторы отличаются по мощности, удельной материалоемкости, рабочей частоте, а также конструктивными особенностями, обеспечивающим стабильную работу, например, автоматическую подстройку частоты. Используемые преобразователи отличаются друг от друга достигаемыми амплитудами, мощностью и рабочей частотой. В связи с этим целью работы является разработка рекомендаций по использованию ультразвукового оборудования в различных технологических процессах создания функциональных покрытий. В работе проанализировано ультразвуковое оборудование, применяющееся в технологиях по подготовке поверхности и нанесению функциональных покрытий. Определены главные технологические параметры, определяющие выбор оборудования. Приведены рекомендации по использованию ультразвукового оборудования при создании различных функциональных покрытий, в рамках которых определена связка преобразователь-генератор, способная обеспечить предъявляемые требования к большинству процессов подготовки поверхности и нанесения покрытия.

**Ключевые слова:** ультразвук, колебательная система, ультразвуковой генератор, функциональное покрытие, азотирование, лакокрасочное покрытие

**Благодарности:** работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда по приоритетному направлению деятельности Российского научного фонда «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами» научного проекта: «Разработка гибридных ультразвуковых технологий получения функциональных покрытий» № 21-19-00660.

**Для цитирования:** Нечай А.А., Сухов А.В., Фатюхин Д.С., Фомушкина С.А. Анализ возможностей оптимизации выбора ультразвукового оборудования для нанесения функциональных покрытий // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 2 (152). С. 12–19. doi: 10.30987/2223-4608-2023-12-19

## Exploratory study for optimization of the choice of ultrasonic equipment for the deposition of functional coatings

Alexander A. Nechai<sup>1</sup>, magistant  
Alexander V. Sukhov<sup>2</sup>, PhD student  
Dmitry S. Fatyukhin<sup>3</sup>, D. Eng.  
Sofya A. Fomushkina<sup>4</sup>, student  
<sup>1, 2, 3, 4</sup> Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI), Moscow, Russia  
<sup>1, 2</sup> sukhov-aleksandr96@mail.ru  
<sup>3, 4</sup> mitriy2@yandex.ru

**Abstract.** To meet the requirements affecting the quality of functional coatings, various technologies are currently being used, one of which is the use of ultrasonics. To form functional coatings, ultrasonics are used both at the stage of surface preparation and at the stage of coating deposition. Thus, at the stage of surface preparation, ultrasonics allow making surface preclean, ensuring the necessary surface roughness due to ultrasonic rolling, as well as preactivation of the surface before nitriding due to surface plastic deformation. In case of coating deposition, ultrasonics contribute to better nitriding and painting. However, ultrasonic equipment used in various preparation and coating deposition processes differs significantly in its characteristics. Thus, the ultrasonic generators vary in alternator capacity, specific material consumption, actual frequency, as well as design features that ensure stable operation, for example, automatic frequency control. The converters differ from each other in accomplishable amplitudes, power and actual frequency. In this regard, the aim of the work is to develop recommendations on the use of ultrasonic equipment in various technical processes for the creation of functional coatings. The paper studies ultrasonic equipment used in surface preparation and functional coating application process. The main process-dependent parameters aimed at choosing the required equipment have been characterized. Recommendations are given on the use of ultrasonic equipment for various functional coatings generation, when a converter-generator couple is found and it meets the requirements for most surface preparation and coating deposition processes.

**Keywords:** ultrasonics, oscillatory system, ultrasonic generator, functional coating, nitriding, painting system

**Acknowledgements:** the work was carried out with the support of a grant from the Russian Scientific Foundation in the priority area of activity of the Russian Scientific Foundation «Conducting fundamental scientific research and exploratory scientific research by individual scientific groups» of the scientific project: «Development of hybrid ultrasonic technologies for functional coatings generation» No. 21-19-00660.

**For citation:** Nechai A.A., Sukhov A.V., Fatyukhin D.S., Fomushkina S.A. Exploratory study for optimization of the choice of ultrasonic equipment for the deposition of functional coatings / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 2 (152). P. 12–19. doi: 10.30987/2223-4608-2024-12-19

### Введение

Обеспечение качества функциональных покрытий, применяемых в машиностроении, в настоящее время является приоритетной задачей развития промышленности, что обуславливается внешними вызовами и активно проводимым импортозамещением. Для выполнения требований, влияющих на качество, активно разрабатываются различные методы нанесения покрытий, интенсифицировать которые можно за счет применение ультразвуковых колебаний.

Ультразвуковые колебания показали свою эффективность в различных процессах, как подготовки поверхности перед

нанесением функциональных покрытий, так и непосредственно в процессе нанесения покрытия.

На этапе подготовки поверхности ультразвук успешно применяется в таких процессах, как:

- предварительная очистка обрабатываемой поверхности перед нанесением покрытия;
- создание необходимой величины шероховатости поверхности методом ультразвуковой прокатки;
- предварительная активация поверхности перед процессом азотирования за счет

предварительного поверхностного пластического деформирования (ППД).

Ультразвук показал свою эффективность при очистке различных поверхностей, как простой, так и сложной формы, за счет использования кавитации и акустических потоков. Применение ультразвука позволяет многократно интенсифицировать процессы, происходящие в жидкости при очистке. Помимо повышения качества очистки ультразвук положительно влияет на поверхность при ППД. В этом случае за счет ультразвука при меньшем усилии прижима достигается требуемая шероховатость. Кроме того, ультразвук позволяет повысить глубину азотированного слоя за счет ППД перед азотированием в промежутке между операциями закалки и отпуска [1].

Также ультразвук эффективно влияет на процессы нанесения функциональных покрытий, такие как азотирование и нанесение лакокрасочных материалов (ЛКМ).

Однако при всех достоинствах ультразвука номенклатура используемых в данный момент колебательных систем и генераторов очень широка, что обуславливает сложности разработки новых технологий применения ультразвуковых колебаний на различных этапах создания функциональных покрытий. В связи с этим целью работы является разработка рекомендаций по использованию ультразвукового оборудования в различных технологических процессах создания функциональных покрытий.

#### Анализ оборудования и требований к нему

Применение ультразвука при кристаллизации, очистке, воздействии на поверхность металла, распылении, воздействии на жидкость требует увеличения мощности при высокой эффективности и долговечности аппаратуры [2]. Также важным требованием является обеспечение стабильности режимов ультразвуковой обработки.

Исследование эффективности работы ультразвуковых установок показало, что выпускаемое серийное оборудование не

удовлетворяет современным требованиям. Например, для генератора УЗГ 3-4 отношение массы к мощности составляет порядка 150 кг/кВт. Анализ энергетических аспектов введения ультразвуковых колебаний в нагрузку позволяет сформулировать технические требования к ультразвуковому оборудованию, предназначенному для использования в технологических процессах, связанных с нанесением функциональных покрытий:

– воздействия на поверхность твердого металла при температурах от комнатной до 600 °С (упрочнение поверхностного слоя и выглаживание поверхности);

– ультразвуковой очистки наружных поверхностей и поверхностей внутренних полостей изделий машиностроения;

– ультразвукового распыления вязких жидкостей.

Воздействие на поверхность твердого металла для выглаживания не требуется использования ультразвуковых установок большой мощности. В таком случае система может быть построена на базе генератора мощностью до 1,0 кВт, однако амплитуда колебательных смещений инструмента должна быть не менее 15...20 мкм.

Для очистки наружных поверхностей большинства деталей сложной формы и обработки внутренних поверхностей необходимо применение излучателей стержневого типа, позволяющих реализовать в жидкости удельную акустическую мощность более 12 Вт/см<sup>2</sup>. Для этого используются генераторы мощностью, не превышающей 3,0...4,0 кВт, обладающие высоким КПД (не менее 90 %) и удельной материалоемкостью генератора не более 10 кг/кВт.

Существует большое количество ультразвуковых генераторов, позволяющих проводить ультразвуковые операции при широком спектре параметров. Доступные в Российской Федерации ультразвуковые генераторы имеют различные мощность, рабочие частоты и конструктивные особенности, примеры используемых генераторов с основными характеристиками представлены в табл. 1.

1. Примеры ультразвуковых генераторов и их основные характеристики

1. Examples of ultrasonic generators and their main characteristics

Наименование	Тип используемых преобразователей	Конструктивные особенности	Мощность, кВт	Рабочая частота, кГц
УЗГ13-0,1/22	Магнитострикционный	АПЧ, АСА, ИА, ПРМ	0,1	18; 22
УЗГ-2-22	Магнитострикционный	АПЧ, АСА, ПРМ	2,0	18...44
Ультразвуковой генератор И10	Магнитострикционный, пьезокерамический	АПЧ, ПРМ или СРМ, ВПО	1,5	16...25
УЗГ17-2,0/22	Пьезокерамический	АПЧ, ИА, СРМ, ВПО	2,0	18; 22
УЗГ5-4,0/22	Магнитострикционный	ПРМ, ВПО	4,0	16; 18; 22
УЗГ15-0,1/22	Пьезокерамический	АПЧ, СРМ	0,1	18; 22

*Примечания:* АПЧ – автоматическая подстройка частоты; АСА – автоматическая стабилизация амплитуды; ВПО – воздушное принудительное охлаждение; ИА – индикатор амплитуды; ПРМ – плавная регулировка мощности; СРМ – ступенчатая регулировка мощности.

Наиболее распространенными являются генераторы УЗГ5-4,0/22, УЗГ17-2,0/22, УЗГ-2-22. Они предназначены для питания магнитострикционных преобразователей ультразвуковых колебательных систем различного технологического назначения. Эти генераторы отличаются удельной материалоемкостью, которая составляет 13,12; 11,25 и 3,5 кг/кВт соответственно

Наиболее сбалансированным можно отметить УЗГ-2-22, внешний вид которого представлен на рис. 1. Генератор позволяет в широком частотном диапазоне решать исследовательские задачи, измерять амплитуду, ток, частоту, потребляемую мощность и другие параметры, снижать и исследовать амплитудно-частотные характеристики. Имея массу в 7,0 кг, данный генератор развивает мощность в 2,0 кВт, за счет чего превосходит генераторы УЗГ5-4,0/22 и УЗГ17-2,0/22 в удельной материалоемкости.



Рис. 1. Ультразвуковой генератор УЗГ-2-22

Fig. 1. Ultrasonic generator UZG-2-22

Помимо генераторов существует множество различных ультразвуковых преобразователей, как магнитострикционных (ПМС), так и пьезокерамических (ПП). Примеры используемых преобразователей с основными характеристиками представлены в табл. 2.

2. Примеры ультразвуковых преобразователей и их основные характеристики

2. Examples of ultrasonic converters and their main characteristics

Наименование	Назначение	Амплитуда, мкм	Мощность, кВт	Рабочая частота, кГц
ПМС1-0,63/22	Сварка пластмасс и металлов; размерная обработка твёрдых и хрупких материалов; озвучивание жидких сред; полировка	20	0,4	22
ПМС1-1,0/22	Сварка пластмасс и металлов; размерная обработка твёрдых и хрупких материалов; озвучивание жидких сред; полировка	10	1,0	22
ПМС-2,5/18	Озвучивание жидких сред	5	2,5	18
ПП1-0,63/35	Озвучивание жидких сред	2	0,63	35
ПП1-0,1/22	Сварка термопластичных материалов, металлов; размерная обработка твердых и хрупких материалов; озвучивание жидких сред; очистка; резание; впес-совка; полировка; гравировка	10	0.1	22
ПП1-0,063/22	Озвучивание жидких сред, диспергирование, эмульгирование, гомогенизация, очистка и т.п	70	0.063	22

В качестве электроакустического преобразователя для работы в непрерывном режиме, которым является режим работы при технологических процессах, связанных с нанесением функциональных покрытий, наиболее рационально использовать магнито-стрикционные преобразователи с мощностью до 3,0 кВт.

Наиболее универсальным магнито-стрикционным преобразователем является ПМС1-1,0/22, внешний вид которой представлен на рис. 2. Данный ПМС является универсальным за счет оптимального соотношения мощность/амплитуда, что позволяет использовать ее в различных процессах обработки.



Рис. 2. Колебательная система ПМС1-1,0/22

Fig. 2. Oscillatory system PMS 1-1.0/22

Данный преобразователь применяется для широкого спектра процессов – сварки, размерной и жидкой обработки и т. п. Магнито-стрикционный эффект обеспечивает пакет пластин из пермендюра 49К2Ф. Однако для работы ПМС1-1,0/22, как и любого магнито-стрикционного преобразователя, необходимо охлаждение, что накладывает определенные ограничения на условия эксплуатации.

Подбор оборудования для конкретной технологии зачастую зависит от параметров процесса или материала, которые необходимо обеспечить.

Например, для нанесения лакокрасочного покрытия могут использоваться как магнито-стрикционные [3], так и пьезо-керамические колебательные системы [4].

Экспериментальное исследование по влиянию ультразвука на процессы подготовки и распыления ЛКМ, проводимое с помощью магнито-стрикционной колебательной системы представлено в работе [3]. Описываемая колебательная система (КС) является аналогом

ПМС1-1,0/22 и позволяет достигать амплитуд в 10 мкм, которые, в свою очередь, можно увеличить до 70 мкм с помощью рабочего инструмента различных конструкций. При подготовке ЛКМ достигаются амплитуды до 20 мкм, большие значения не рассматриваются по причине сильного нагрева ЛКМ, что снижает его характеристики.

В работе [4] описана конструкция инструмента для пневмоультразвукового распыления, где в качестве электроакустического преобразователя выступают пьезоэлектрические пластины. В самой работе марка пластин не указана, однако результаты применения данной конструкции показывают высокую эффективность ее применения, что позволяет говорить о целесообразности использования пьезокерамики для распыления с помощью ультразвука.

В работе [5] описано ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование (УППД), которое проводится перед азотированием. УППД проводилось на токарном станке ультразвуковым комплектом, состоящим из генератора УЗГ 02/22 и магнитострикционного преобразователя ПМС-063. Обработка осуществлялась сферическим индентором с радиусом закругления 5,0 мм на следующих режимах: мощность генератора 200 Вт; амплитуда колебания индентора 10 мкм; усилие прижима индентора 75 Н [5].

В работе [6] представлен расчет электрических параметров пакета УКС. Максимально допустимая электрическая мощность возбуждения разрабатываемого пакета УКС составила 3,9 кВт; величина тока подмагничивания – 7,26 А; эффективное значение полного тока – 8,12 А; амплитуда напряжения возбуждения – 744,4 В; амплитуды колебательных смещений на выходе с магнитострикционного преобразователя – 4,27 мкм; амплитуда колебательных смещений на конце волновода – 8,71 мкм. Для разработанной УКС с целью интенсификации газового азотирования выбран ультразвуковой генератор УЗГ-2-22, т. к. его технические характеристики отвечают необходимым условиям при решении поставленных задач. Авторами предполагается, что указанная связка «ультразвуковой генератор-колебательная система» позволяет за счет достигаемых

параметров мощности и амплитуды достичь высоких результатов.

В работе [7] рассмотрены особенности переноса микрочастиц на поверхности LiNbO<sub>3</sub> при возбуждении в пластине различных мод и взаимодействие пьезоэлектрического поля с микрочастицами с соответствующим влиянием на процесс их переноса вдоль поверхности LiNbO<sub>3</sub>. В эксперименте использовалась пластина ниобата лития толщиной среза 630 мкм. Для возбуждения УЗ-волн она размещалась на заземленном металлическом основании. На верхнюю грань пластины LiNbO<sub>3</sub> наносился медный электрод шириной 1,0 мм. Приложение высокочастотного электрического напряжения  $V$  между электродами приводило к возбуждению в пластине УЗ-волн Лэмба. Исследования проводились на двух частотах,  $f_1 = 3,7$  МГц и  $f_2 = 5,2$  МГц. Результаты показали эффективность метода для переноса микрочастиц.

### Подбор универсального оборудования

Анализ источников показывает, что в различных технологических процессах создания функциональных покрытий используются различные комплекты ультразвукового оборудования, которые серьезно отличаются друг от друга [1, 5, 8].

Также анализ показывает, что основными параметрами обработки, как правило, указывается амплитуда колебаний, частота колебаний и мощность.

Главным параметром обработки в технологических процессах создания функциональных покрытий в работах [9, 10] является амплитуда колебаний. Ее оптимальное значение варьируется от 2,0...3,0 мкм до 25 мкм в зависимости от процесса. Однако значения амплитуды свыше 25 мкм не рассматриваются ввиду отсутствия такой необходимости. В связи с этим к ультразвуковому оборудованию предъявляется требование по обеспечению амплитуды в широком диапазоне от 2,0 до 25 мкм. Амплитуда колебаний определяется конструкцией колебательной системы и рабочего инструмента.

Два других фактора влияют на технологические процессы меньше, чем амплитуда. Частота колебаний может влиять на процесс,

но она ограничивается применяемым оборудованием, поскольку каждая КС работает на своей резонансной частоте. Анализ существующего ультразвукового оборудования показал, что наиболее распространенной является резонансная частота 22 кГц. Это обуславливается наибольшей эффективностью колебательных систем, работающих на этой частоте одновременно с соответствием требованиям, предъявляемым к ультразвуковым установкам для работы в промышленности. Требуемая величина мощности обуславливается необходимостью передавать через колебательную систему необходимое количество энергии в технологическую среду. Для рассматриваемых технологических процессов мощность более 3,0...4,0 кВт является избыточной.

Учитывая вышеизложенное, в качестве рационального комплекта ультразвукового оборудования предлагается использовать УЗГ-2-22 и ПМС1-1.0/22. Такая комбинация позволяет эффективно провести операции предварительной подготовки поверхности перед нанесением функциональных покрытий, а также непосредственно наносить покрытие.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Перевалова О.Б., Панин А.В., Синякова Е.А.** Особенности поверхностного упрочнения 12Cr ферритно-мартенситной стали при совмещении ионно-плазменного азотирования и ультразвуковой обработки // Физика и химия обработки материалов. 2012. № 3. С. 43–50.
2. **Технологическое** применение ультразвука в транспортном машиностроении / О.В. Абрамов, В.О. Абрамов, В.В. Артемьев, и др. М.: Издательство «Техполграфцентр», 2007. 112 с.
3. **Нигметзянов Р.И., Сундуков С.К., Фатюхин Д.С.** Применение ультразвуковых технологий для подготовки лакокрасочного материала к нанесению // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2014. № 2 (37). С. 36–43. EDN SDMOWZ.
4. **Сундуков С.К., Чендаров А.С., Фатюхин Д.С.** Ультразвуковая технология получения лакокрасочных покрытий // Юность и знания – гарантия успеха: Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции, Курск, 17–18 декабря 2014 г. / Ответственный редактор: Разумов М.С. Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2014. С. 402–407. EDN TGAHRZ.
5. **Ковалевская Ж.Г., Уваркин П.В., Толмачев А.И.** Исследование влияния дефектов точения на формирование микрорельефа поверхности стали при ультразвуковой финишной обработке // Обработка металлов

(технология, оборудование, инструменты). 2012. № 1 (54). С. 14–18. EDN OXWXTD.

6. **Перекрестова В.А., Сухов А.В., Левушкина Н.В., Нигметзянов Р.И.** Расчет основных показателей ультразвуковой колебательной системы для интенсификации процессов газового азотирования // Научные технологии в машиностроении. 2021. № 10 (124). С. 11–17. DOI 10.30987/2223-4608-2021-10-11-17. EDN HFLLYD.

7. **Горб А.Н., Коротченков О.А.** Стимулированный ультразвуком перенос микрочастиц на поверхности пластины LiNbO<sub>3</sub> // Письма в Журнал технической физики. 2002. Т. 28. № 17. С. 67–73. EDN RYRABP.

8. **Чудина О.В., Симонов Д.С., Симонова Т.С., Литовченко А.Н.** Повышение эффективности поверхностного упрочнения конструкционных сталей закалкой ТВЧ и ультразвуковой обработкой // Упрочняющие технологии и покрытия. 2023. Т. 19, № 9 (225). С. 427–431. DOI 10.36652/1813-1336-2023-19-9-427-431. EDN APAVCM.

9. **Чудина О.В., Приходько В.М., Симонов Д.С.** К вопросу разработки высокоэффективных комбинированных процессов поверхностного упрочнения деталей транспортного машиностроения // Технологическое обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической отрасли : сборник научных статей 14-ой международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию Брянской научной школы технологов-машиностроителей, Брянск, 05–07 октября 2022 года. Брянск: Брянский государственный технический университет, 2022. С. 178–183. EDN NCHRLN.

10. **Приходько В.М., Симонов Д.С.** Ультразвук в гибридных технологиях производственных процессов // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2022. № 3 (77). С. 191–196. DOI 10.34771/UZCEPU.2022.77.3.037. EDN FVTQCP.

## REFERENCES

1. **Perevalova O.B., Panin A.V., Sinyakova E.A.** Features of surface hardening of 12Cr ferritic-martensitic steel when combining ion-plasma nitriding and ultrasonic treatment // Physics and chemistry of materials processing, 2012, no. 3, pp. 43–50
2. **Technological application of ultrasound in transport engineering / O.V. Abramov, V.O. Abramov, V.V. Artemyev, et al.** Moscow.: Publishing house «Techpoligrafcentr», 2007, 112 p.
3. **Nigmatzyanov R.I., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S.** Application of ultrasonic technologies for the preparation of paintwork material for its application // Bulletin of the Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI), 2014, no. 2 (37), pp. 36–43, EDN SDMOWZ.
4. **Sundukov S.K., Chendarov A.S., Fatyukhin D.S.** Ultrasonic technology for obtaining paint materials // Youth and knowledge are a guarantee of success: proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Kursk, December 17-18, 2014 / Executive editor: Razumov M.S. Kursk: CJSC «University Book», 2014. pp. 402–407. EDN TGAHRZ.
5. **Kovalevskaya Zh.G., Uvarkin P.V., Tolmachev A.I.** Investigation of the influence of turning defects on the

formation of the surface microrelief of steel at ultrasonic finishing treatment // Metalworking (technology, equipment, tools), 2012, no. 1 (54), pp. 14–18. EDN OXWXTD.

6. Perekrestova V.A., Sukhov A.V., Levushkina N.V., Nigmatzyanov R.I. Calculation of the main parameters of the ultrasonic oscillatory system for the intensification of gas nitriding processes // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2021, no. 10 (124), pp. 11–17. DOI 10.30987/2223-4608-2021-10-11-17. EDN HFLLYD.

7. Gorb A.N., Korotchenkov O.A. Ultrasound-stimulated translation of microparticles on the surface of a LiNbO<sub>3</sub> plate // Technical Physics Letters, 2002, vol. 28, no. 17, pp. 67–73. EDN RYRABP.

8. Chudina O.V., Simonov D.S., Simonova T.S., Litvchenko A.N. Increasing in efficiency of surface hardening of structural steels by HFC hardening and ultrasonic treatment // Hardening technologies and coatings, 2023, vol. 19, no. 9 (225), pp. 427–431. DOI 10.36652/1813-1336-2023-19-9-427-431. EDN APAVCM.

9. Chudina O.V., Prikhodko V.M., Simonov D.S. On the issue of the development of highly effective combined processes for surface hardening of transport engineering parts // Technological support and quality improvement of engineering and aerospace industries: proceedings of the 14th International Scientific and Technical Conference dedicated to the 50th anniversary of the Bryansk Scientific School of Engineering Technologists, Bryansk, 05-07 October 2022. Bryansk: Bryansk State Technical University, 2022, pp. 178–183. EDN NCHRLN.

10. Prikhodko V.M., Simonov D.S. Ultrasound in hybrid technologies of production processes // Transactions of the Crimean Engineering and Pedagogical University, 2022, no. 3 (77), pp. 191–196. DOI 10.34771/UZCEPU.2022.77.3.037. EDN FVTQCP.

**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 06.12.2023; одобрена после рецензирования 14.12.2023; принята к публикации 18.12.2023.

The article was submitted 06.12.2023; approved after reviewing 14.12.2023; accepted for publication 18.12.2023.

