

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №8 (146). С.20-26.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №8 (146). P. 20-26.

Научная статья
УДК 621.7/620.3
doi: 10.30987/2223-4608-2023-20-26

Автоматизация и цифровизация ультразвуковых технологических процессов

Вячеслав Михайлович Приходько¹, чл.-кор. РАН

Равиль Исламович Нигметзянов², к.т.н.

Сергей Константинович Сундуков³, к.т.н.

Дмитрий Сергеевич Фатюхин⁴, д.т.н.

^{1, 2, 3, 4} Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва, Россия

¹ prikhodko@madi.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

² lefmo@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

³ sergey-lefmo@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4393-4471>

⁴ mitriy2@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5914-3415>

Аннотация. На основании проведенного анализа литературных источников выявлено, что цифровое производство включает в себя не только полную автоматизацию производственных процессов, но и создание многоуровневой инфраструктуры управления ими на основе информационных технологий. Основанные на таком подходе технические решения, позволят значительно интенсифицировать производственные процессы. Рассмотрены возможности автоматизации и цифровизации ультразвуковых технологических процессов путём создания аппаратно-программного комплекса, включающего в себя технологическое и измерительное оборудование, а также программное обеспечение для выбора наиболее эффективных технических решений. Обоснованы общие принципы создания ультразвуковых технологий, этапы разработки которых включают в себя постановку задачи, анализ объекта обработки, выбор схемы обработки и оборудования, контроль процесса и оценку качества. Предложены методологические подходы к реализации производственных процессов с многоуровневой инфраструктурой управления ими на основе информационных технологий. Приведены примеры разработанных программных продуктов, с помощью которых методами поисковой оптимизации производится выбор оборудования и рациональных режимов обработки. Показаны не только возможность использования автоматизированной технологии, но и создания на её основе самообучающейся технологической системы. Разработка и создание оборудования для реализации предлагаемых технических решений основывается на общих принципах использования числового программного управления. Предлагаемый алгоритм может применяться для широкого спектра ультразвуковых технологий: очистки, поверхностного пластического деформирования, нанесения покрытий, резания и др. Кроме того, совокупность выбора технических и информационных решений, дает возможность оперативного перехода от одних видов обработки к другим. Даны рекомендации по реализации предлагаемых технических и информационных решений.

Ключевые слова: цифровизация, автоматизация, технологический процесс, ультразвуковая обработка, информационные технологии

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: Приходько В.М., Нигметзянов Р.И., Сундуков С.К., Фатюхин Д.С. Автоматизация и цифровизация ультразвуковых технологических процессов // Научные технологии в машиностроении. 2023. № 8 (146). С. 20–26. doi: 10.30987/2223-4608-2023-20-26

Automation and digitalization of ultrasonic technological processes

Vyacheslav M. Prikhodko¹, Corr. Member of RAS

Ravil I. Nigmatzyanov², PhD. Eng.

Sergey K. Sundukov³, PhD. Eng.

Dmitry S. Fatyukhin⁴, D. Eng.

^{1, 2, 3, 4} Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia

¹ prikhodko@madi.ru

² lefmo@yandex.ru

³ sergey-lefmo@yandex.ru

⁴ mitriy2@yandex.ru

Abstract. Having analyzed the literature sources, it is revealed that digital production includes not only full automation of production processes, but also the creation of a multi-level infrastructure for their control on the basis of information technologies. Technical solutions based on this approach will significantly intensify production processes. The possibilities of automation and digitalization of ultrasonic technological processes are viewed through the creation of a hardware and software complex that includes technological and measuring equipment, as well as software to select the most effective technical solutions. Some general principles of creating ultrasonic technologies are substantiated, their stages of development include setting the task, analysis of the processing object, selection of the processing scheme and equipment, process control and quality monitoring. Methodological approaches to the implementation of production processes with a multi-level process control infrastructure based on information technologies are proposed. Examples of developed software products are given, with the help of which search engine optimization methods are used to select equipment and rational processing modes. It shows not only the possibility of using automated technology, but also the creation of a self-learning technological system based on it. The development and creation of equipment for the implementation of the proposed technical solutions has in its basis general principles of using numerical control software. The proposed algorithm can be used for a wide range of ultrasonic technologies: cleaning, surface plastic deformation, coating, cutting, etc. In addition, the combination of the choice of technical and information solutions makes quick switch from one type of processing to another possible. Recommendations on the implementation of the proposed technical and information solutions are given.

Keywords: digitalization, automation, technological process, ultrasonic machining, information technologies

Acknowledgements: the work was supported by the grant of the Russian Science Foundation under the priority direction of the Russian Science Foundation «Carrying out fundamental scientific research and search scientific research by separate scientific groups» of the scientific project: «Development of hybrid ultrasonic technologies for obtaining functional coatings» № 21-19-00660.

For citation: Prikhodko V.M., Nigmatzyanov R.I., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S. Automation and digitalization of ultrasonic technological processes / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 8 (146). P. 20–26. doi: 10.30987/2223-4608-2023-20-26

Введение

Одной из современных глобальных задач общества является цифровизация промышленности. Несмотря на это, сами термины «цифровизация» и «цифровая промышленность» пока ещё не стандартизованы. Согласно [1], концепция индустрии 4.0, характеризующая переходом к киберфизическим системам, наиболее точно отражает понятие «цифровизация». Основой цифровизации машиностроительного производства безусловно является автоматизация –

«применение энергии неживой природы в технологическом процессе или его составных частях для их выполнения и управления ими без непосредственного участия людей, осуществляемое в целях сокращения трудовых затрат, улучшения условий производства, повышения объема выпуска и качества продукции» [2].

Цифровое производство включает в себя не только полную автоматизацию производственных процессов, но и создание многоуровневой инфраструктуры управления ими на основе информационных технологий.

Основанные на таком подходе технические решения, позволят значительно интенсифицировать производственные процессы.

Ультразвуковые технологические процессы, как процессы, связанные с постоянными изменениями свойств обрабатываемой среды, требуют системы постоянных обратных связей между собственно обрабатываемой средой и технологическим оборудованием. Так, например, изменение температуры обрабатываемой жидкости влечёт за собой как изменение технологического режима обработки, так и корректировку рабочей частоты колебательной системы.

Наиболее эффективное использование информационных технологий возможно при их комплексном применении на различных этапах разработки и использования технологии – от подготовки производства до контроля готовой продукции. В статье рассмотрены методологические подходы и технические решения, позволяющие повысить эффективность ультразвуковых технологий за счёт автоматизации и цифровизации производственных процессов.

Спектр применения ультразвука для интенсификации самых различных технологических процессов достаточно широк. Воздействие высокочастотных колебаний позволяет изменять структуру и свойства материалов, улучшать эксплуатационные свойства деталей при их обработке, повысить качество нанесения функциональных покрытий и др. Несмотря на различия воздействий на газообразные, жидкие и твердые среды, существуют общие подходы к разработке и созданию ультразвуковых технологий, этапы разработки которых включают в себя постановку задачи, анализ объекта обработки, выбор схемы обработки и оборудования, контроль процесса и оценку качества.

Подготовка производственного процесса

Этап подготовки производства включает в себя выбор схемы и рациональных режимов обработки, ультразвукового оборудования, стратегии и параметров обработки, а также характеристик технологической среды. Для автоматизации этого процесса приём, обработка и

распространение информации, т. е. информационная система, являются частью технологии.

Создание информационной системы основывается на использовании системы управления базами данных (СУБД) для выбора наиболее эффективных технических решений. В настоящее время накоплено достаточное количество результатов теоретических и экспериментальных исследований, позволяющие создавать и использовать эти материалы для создания СУБД. Активно создаются базы данных ультразвуковых преобразователей, генераторов, технологических режимов обработки [3, 4]. Интеграция информации различных баз данных позволяет создать информационную систему.

Для выбора технических решений применяется 3D-модель объекта обработки. В качестве моделей используются модели, созданные при проектировании изделия. В случае отсутствия конструкторской документации необходимо создание цифровой копии с помощью CAD (Computeraideddesign) программ.

Основываясь на конструктивных особенностях изделий и требованиях к обработке, можно выделить минимальный набор баз данных, достаточных для разработки технологического процесса.

На основании анализа объекта обработки и требуемого технологического воздействия с помощью СУБД осуществляется выбор схемы обработки, от которой зависят тип и характеристики генератора, колебательной системы и рабочего инструмента. В случае применения контурной или объёмной обработки производится выбор стратегии обработки.

Поисковая оптимизация позволяет не только идентифицировать начальное состояние деталей и выбрать значения параметров обработки, но и корректировать их в процессе ультразвукового воздействия в соответствии с показаниями измерительных средств.

Для реализации автоматического выбора технологии и оборудования для конкретного объекта обработки, поддержания заданного технологического режима, отображения параметров обработки в реальном масштабе времени, а также работы оборудования по специально заданной программе или в интерактивном режиме разработана программа «Управление и мониторинг ультразвуковой установки» [5] (рис. 1).

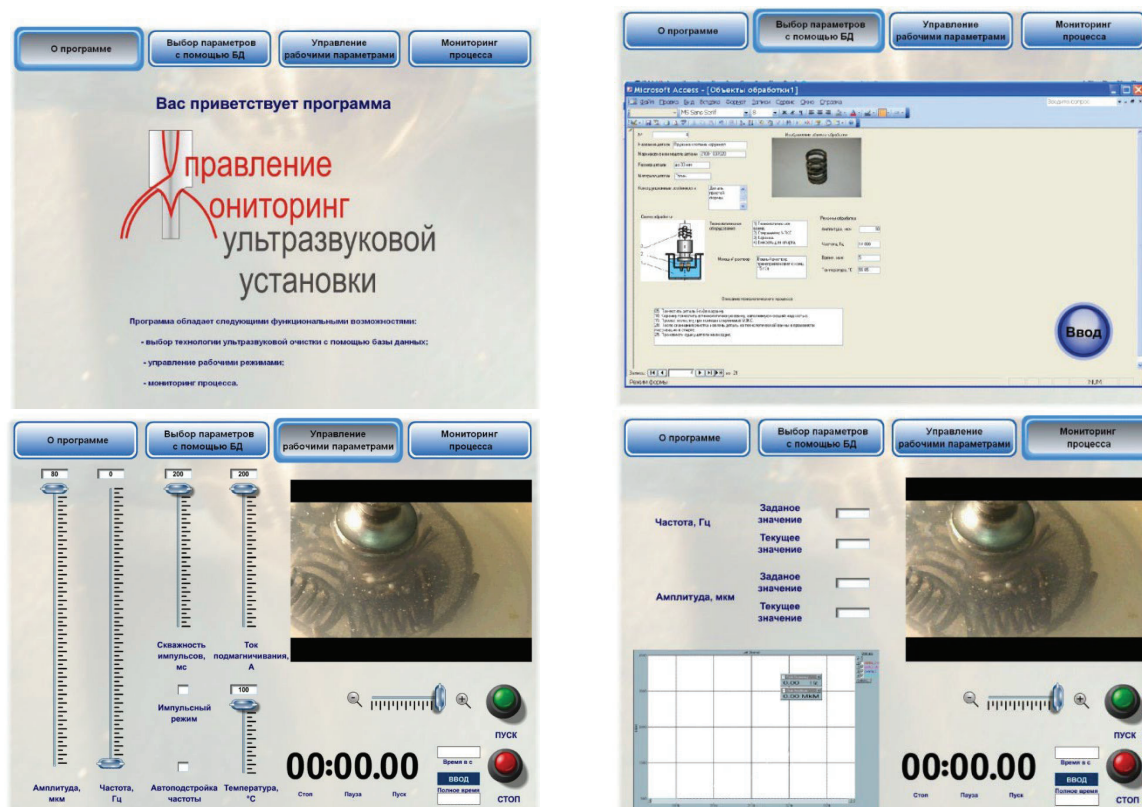


Рис. 1. Программная оболочка «Управление и мониторинг ультразвуковой установки»

Fig. 1. Shell program «Control and monitoring of ultrasonic installation»

Важной особенностью программы является возможность самообучения. Пополнение и корректировка базы данных (БД) технологий происходит занесением или изменением записей, полученных непосредственно в процессе обработки. Источниками получения информации могут быть ручной ввод данных, информация, полученная от средств обратной связи или внешних источников. Подобный подход позволяет сформировать необходимый объем данных по существующим технологиям и обеспечить его постоянное пополнение, что обеспечивает оперативное освоение обработки новых изделий.

Управление процессом и оценка качества обработки

Сбор входных параметров и регулирование этих параметров в процессе обработки осуществляется виртуальными приборами [6]. В качестве измерительной части используются такие приборы, как электродинамические датчики, термодатчики, гидрофоны, вискозиметры и др. С их помощью информация об

изменении рабочих параметров поступает на многоканальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), который передает оцифрованную информацию на персональный компьютер через интерфейс USB.

Физические эффекты, создаваемые ультразвуком в жидкой среде, распространяются и распределяются неравномерно по обрабатываемому объему. Для обеспечения наибольшей эффективности объект обработки необходимо четко позиционировать в той области ультразвукового поля, где кавитация и гидродинамические потоки оказывают на него требуемое технологическое воздействие.

Корректировка работы технологического оборудования осуществляется программно-аппаратным комплексом.

Учитывая стохастический характер распределения кавитации, наибольшее значение имеет концентрация эффектов, создаваемых ультразвуком в жидкости, в требуемом месте обрабатываемого объема. Изменение температуры и плотности жидкости в процессе обработки требует подстройки рабочих параметров колебательной системы в режиме реального

времени. Измерение спектральных составляющих сигнала, поступающего с гидрофона, позволяет контролировать качественные и количественные характеристики ультразвукового поля. Организация обратной связи обеспечивается синхронизацией работы программы MIXI [7] и сигнала гидрофона, полученного и обработанного аппаратно - программным комплексом ZETLAB [8] (рис. 2).

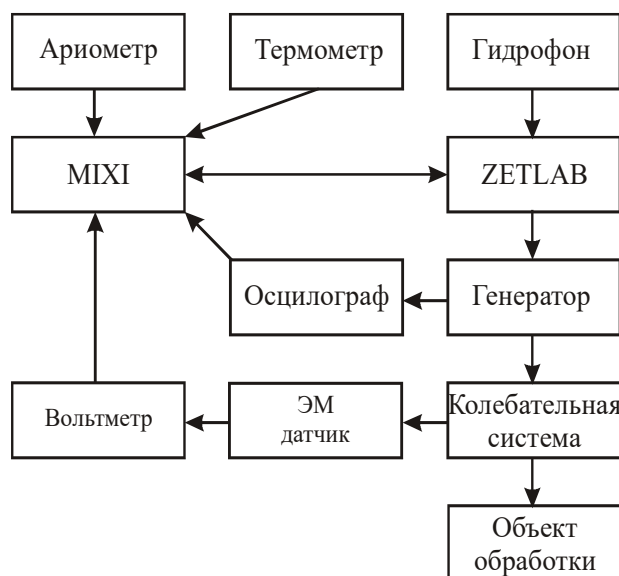
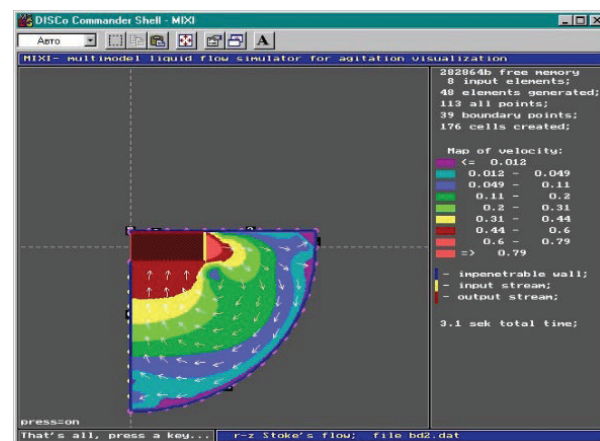
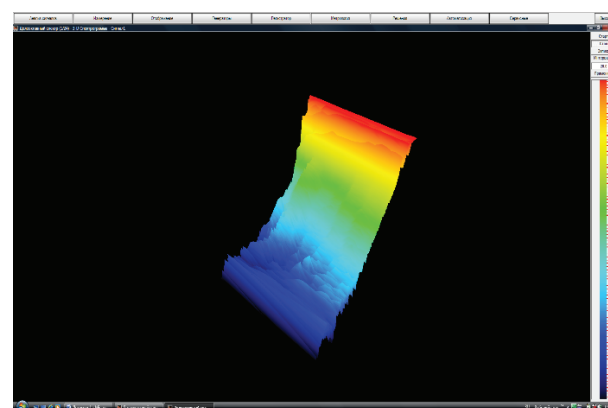


Рис. 2. Схема аппаратно-программного комплекса
Fig. 2. Hardware and software complex scheme

На основании сигналов, получаемых с измерительных приборов, программа MIXI рассчитывает поле скоростей гидродинамических потоков и поле давления в зависимости от температуры и вязкости жидкости, а также от амплитуды и частоты колебательной системы (рис. 3, а). Сигнал гидрофона принимается и анализируется программой ZETLAB (рис. 3, б). После сравнения расчётных значений и измеренных показаний происходит корректировка управляющего сигнала, который передаётся на ультразвуковой генератор. Созданные генератором электрические колебания передаются колебательной системе. Контроль амплитуды и частоты работы колебательной системы осуществляется с помощью электромагнитного (ЭМ) датчика и осциллографа, сигналы от которых передаются программе MIXI.



а)



б)

Рис. 3. Распространение гидродинамических потоков:
а – полученные расчётные значения; б – результат измерений

Fig. 3. Distribution of hydrodynamic flows:
а – obtained calculated values; б – measurement result

Предлагаемое решение позволяет организовать самонастраивающуюся систему, приспособляющуюся к изменению внешних условий. Основной и дополнительные потоки информации позволяют корректировать процесс обработки с учётом изменений рабочей среды, требований к обработке и др.

Оценка качества проводится по ряду показателей характерных для используемого вида обработки. Так, например, при ультразвуковом выглаживании наиболее значимым показателем является шероховатость поверхности. Мониторинг параметров шероховатости позволяет не только обеспечить заданное качество, но и вносить необходимые изменения в базу данных технологических режимов обработки [9].

Разработка и создание оборудования для реализации предлагаемых технических

решений основывается на общих принципах использования числового программного управления.

Источниками движения могут являться шаговые двигатели, которые позволяют осуществлять регулирование угла поворота выходного вала, обеспечивающего точное управление скоростью вращения ротора, и, соответственно, перемещение исполнительных механизмов. Число шаговых двигателей соответствует необходимому числу перемещений обрабатываемой заготовки и инструмента.

Управление двигателями осуществляется контроллерами. В качестве программируемого контроллера могут быть использованы многоканальные контроллеры, например, SMSD-4.2. Кроме управления шаговыми двигателями, контроллеры позволяют управлять ещё и дополнительным оборудованием (например, регулировать подачу моющей жидкости с необходимым расходом, температурой и т. п.).

Коммутация персонального компьютера и контроллера управления реализуется драйвером коммутации. Коды управляющей программы преобразуются драйвером и контроллером в импульсное напряжение питания шаговых двигателей [10].

Заключение

На основе приведённых в статье методологических подходов возможна не только реализация автоматизированной технологии, но и самообучение технологической системы.

Предлагаемый алгоритм может применяться для широкого спектра ультразвуковых технологий: очистки, поверхностного пластического деформирования, нанесения покрытий, резания и др. Кроме того, совокупность выбора технических и информационных решений, дает возможность оперативного перехода от одних видов обработки к другим.

Интерактивное взаимодействие с другими предприятиями обеспечивает не только совместное использование и совершенствование технологий несколькими различными предприятиями, но и создает условия для передачи технологии и соответствующих прав на них от передающей стороны к принимающей в целях их последующего внедрения и использования, т. е. трансфера технологий [11].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шваб К. Четвертая промышленная революция. М.: «Эксмо», 2016. 138 с.
2. ГОСТ 23004-78. Механизация и автоматизация технологических процессов в машиностроении и приборостроении.
3. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022623243 РФ. База данных технических характеристик ультразвуковых генераторов: № 2022623151: заявл. 24.11.2022: опубл. 05.12.2022 / Д.С. Фатюхин, Р.И. Нигметзянов, С.К. Сундуков [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет».
4. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022622370 РФ. База данных технологических режимов ультразвуковой очистки деталей машин: № 2022622321: заявл. 26.09.2022: опубл. 29.09.2022 / Д.С. Фатюхин, Р.И. Нигметзянов, В.М. Приходько [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет».
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022663082 РФ. Мониторинг ультразвуковой колебательной системы: № 2022662789: заявл. 11.07.2022: опубл. 11.07.2022 / Д. С. Фатюхин, Р. И. Нигметзянов, С. К. Сундуков [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет».
6. Харуби Н. Автоматизация проектирования виртуальных приборов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2009. № 6 (20). С. 161–165.
7. Приходько В.М., Фатюхин Д.С., Юдаков Е.Г. Научно-технологическая технология ультразвуковой очистки крупногабаритных корпусных деталей // Научно-технические технологии в машиностроении. 2012. № 1 (7). С. 17–20.
8. Контрольно-измерительное оборудование ZETLAB. [Электронный ресурс]. 2023. URL: <https://zetlab.com> (дата обращения: 10.05.2023).
9. Fatyukhin D.S., Nigmatzyanov R.I., Prihodko V.M., Sukhov, A.V., Sundukov, S.K. Comprehensive Estimation of Changes in the Microgeometry of Steel 45 by Ultrasonic Plastic Deformation with a Free Deforming Element // Metals, 2023, 13(1), 114 p.
10. Ловыгин А.А., Васильев А.В., Кривцов С.Ю. Современный станок с ЧПУ и CAD/CAM система. М.: ДМК Пресс, 2017. 286 с.
11. ГОСТ Р 57194.1-2016. Трансфер технологий. Общие положения.

REFERENCES

1. Schwab K. The Fourth Industrial Revolution. Moscow: Eksmo, 2016, 138 p.
2. State standard 23004-78. Mechanization and automation of technological processes in mechanical engineering and instrumentation.
3. Certificate of state registration of the database No. 2022623243 of the Russian Federation. Database of technical characteristics of ultrasonic generators: No. 2022623151: application 24.11.2022: publ. 05.12.2022 / D. S. Fatyukhin, R. I. Nigmatzyanov, S. K. Sundukov [et al.]; the applicant is the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Moscow Automobile and Road Construction State Technical University».
4. Certificate of state registration of the database No. 2022622370 of the Russian Federation. Database of technological modes of ultrasonic cleaning of machine parts: No. 2022622321: application 26.09.2022: publ. 29.09.2022 / D. S. Fatyukhin, R. I. Nigmatzyanov, V. M. Prikhodko [et al.]; the applicant is the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Moscow Automobile and Road Construction State Technical University».
5. Certificate of state registration of the computer program No. 2022663082 of the Russian Federation. Monitoring of the ultrasonic oscillatory system: No. 2022662789: application 11.07.2022: publ. 11.07.2022 / D. S. Fatyukhin, R. I. Nigmatzyanov, S. K. Sundukov [et al.]; the applicant is the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Moscow Automobile and Road Construction State Technical University».
6. Harubi N. Automation of design of virtual devices // Issues of modern science and practice. V.I. Vernadsky Crimean Federal University, 2009, no. 6 (20), pp. 161–165.
7. Prikhodko V.M., Fatyukhin D.S., Yudakov E.G. Science-intensive technology of ultrasonic cleaning of large-sized body parts // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2012, no. 1 (7), pp. 17–20.
8. ZETLAB control and measuring equipment. [[Electronic resource]. 2023. URL: <https://zetlab.com> (accessed: 10.05.2023).
9. Fatyukhin D.S., Nigmatzyanov R.I., Prikhodko V.M., Sukhov, A.V., Sundukov, S.K. Comprehensive Estimation of Changes in the Microgeometry of Steel 45 by Ultrasonic Plastic Deformation with a Free Deforming Element // Metals, 2023, 13(1), 114 p.
10. Lovygin, A.A., Vasiliev, A.V., Krivtsov, S.Yu. Modern CNC machine and CAD/CAM system. Moscow: DMK Press, 2017, 286 p.
11. State Standard R 57194.1-2016. Technology transfer. General provisions.

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 30.06.2023; одобрена после рецензирования 04.07.2023; принята к публикации 10.07.2023.

The article was submitted 30.06.2023; approved after reviewing 04.07.2023; assepted for publication 10.07.2023.

