

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 6 (168). С. 11-18.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 6 (168). P. 11-18.

Научная статья
УДК 621.9.047; 621.9.048
doi: 10.30987/2223-4608-2025-6-11-18

Обеспечение качества продукции авиационно-космического машиностроения на этапах отработки технологичности изделий

Владислав Павлович Смоленцев¹, д.т.н.

Сергей Владимирович Сафонов², д.т.н.

Евгений Владиславович Смоленцев³, д.т.н.

^{1, 2, 3} Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

¹ vsmolen@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

² SWsafonoff@gmail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

³ smolentsev.rabota@gmail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Представлены разработки путей достижения требуемого качества перспективных изделий применительно к специфичной продукции авиационно-космической отрасли машиностроения. Предложен новый механизм выбора согласованных в процессе отработки технологичности приемов для стабильного получения наукоемких объектов требуемого качества за счет разработки комбинированного управляемого технологического воздействия на детали с учетом условий их эксплуатации. В качестве основного критерия для построения методологии обоснованного выбора технологических режимов при создании перспективных методов обработки, включающих сочетание различных способов воздействий на объект, принят принцип полезности, который позволяет произвести дискретную оценку уровня производственной технологичности. Показано использование в качестве граничного условия при моделировании процессов обработки величины научно обоснованных трудовых и финансовых затрат рассматриваемого метода для обеспечения эксплуатационных показателей создаваемых и модернизируемых наукоемких изделий на этапах освоения серийной продукции машиностроения, параметры которых согласованы с заказчиком и обоснованы разработчиком изделия на стадии отработки его технологичности. Предложены новые, на уровне изобретений, технологические способы и устройства, обеспечивающие высокую эффективность создания изделий новых поколений на примерах авиакосмической техники с требуемыми эксплуатационными показателями. Создана доказательная база для технологических служб машиностроительных предприятий, обеспечивающая согласование достигнутых эксплуатационных показателей изделий с требованиями заказчика и подтвержденными в процессе отработки технологичности продукции на этапах ее создания, совершенствования в ходе отладки, запуска в серийное производство и при эксплуатации.

Ключевые слова: рабочая среда, комбинированные методы обработки, производственная технологичность, этапы отработки показателей качества, отраслевое машиностроение

Для цитирования: Смоленцев В.П., Сафонов С.В., Смоленцев Е. В. Обеспечение качества продукции авиационно-космического машиностроения на этапах отработки технологичности изделий // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 6 (168). С. 11–18. doi: 10.30987/2223-4608-2025-6-11-18

Quality assurance of aerospace engineering products at the stages of products performance development test

Vladislav P. Smolentsev¹, D. Eng.

Sergey V. Safonov², D. Eng.

Evgeny V. Smolentsev³, D. Eng.

^{1, 2, 3} Voronezh Flagship State Technical University, Voronezh, Russia

¹ vsmolen @inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

² SWsafonoff@gmail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

³ smolentsev.rabota@gmail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Abstract. The paper presents the development of ways to achieve the required quality of promising products in relation to specific products of the aerospace engineering industry. A new selection mechanism for techniques agreed upon in the process of testing the performance for the stable production of high-tech objects of the required quality through the development of a combined controlled technological effect on parts, taking into account their in-service environment. The utility principle has been adopted as the main criterion for a methodology aimed at reasonable selection of technological modes when creating promising handling technique with a combination of various routes of exposure, which allows for a discrete assessment of industrial performance level. It is shown that the value of scientifically justified labor and financial costs of the considered method is used as a boundary condition in modeling processing operations to ensure the performance of high-tech products being created and upgraded at the stages of mechanical engineering mass production, the parameters of which are agreed with the customer and justified by the product developer at the stages of products performance development test. New technological methods and devices are proposed that ensure high efficiency in creating new-generation products using examples of aerospace technology with the required performance. New technological methods and devices at the stage of invention are proposed. They ensure high efficiency in creating new-generation products using examples of aerospace technology with the required performance. An evidence base has been created for the technological services of machine-building enterprises, ensuring that the achieved performance indicators of products are consistent with customer requirements and are confirmed in the process of products performance development test at the stages of their creation, improvement during debugging, mass production and operation.

Keywords: working environment, combined handling technique, production adaptability, testing quality indicators stages, industrial engineering

For citation: Smolentsev V.P., Safonov S.V., Smolentsev E.V. Quality assurance of aerospace engineering products at the stages of products performance development test / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 6 (168). P. 11–18. doi: 10.30987/2223-4608-2025-6-11-18

Введение

Отработка технологичности конструкции – это непрерывный процесс оценки качества и совершенствования изделий на всех этапах их создания: освоения, запуска в серийное производство, выпуска, эксплуатации, обслуживания, ремонта и восстановления ремонтоспособности, утилизации продукции [1 – 3]. Технологичность включает обеспечение заданных и требуемых эксплуатационных показателей качества при минимизации сроков их выполнения на этапах проектирования [4] и затрат на выпуск, а также другие этапы ее отработки, формирующее содержание производственной технологичности [5 – 7].

Процесс отработки технологичности при создании наукоемких изделий

Прежде чем освоить и запустить в производство новое, более совершенное изделие, необходимо пройти этап отработки технологичности, на котором технологам требуется согласовать вопросы обеспечения эксплуатационных показателей, заявленных заказчиком (в общем случае – государственными корпорациями), детализированных разработчиком (чаще опытными конструкторскими бюро) и предназначенных для реализации мероприятий изготовителем после отработки производственной технологичности [4]. Для достижения согласия между ними технологическими службами предприятия используется доказательная система, которая определяет возможность,

целесообразность и эффективность изготовления предлагаемых разработчиком объектов, обеспечивающих получение изделия с заданными заказчиком эксплуатационными характеристиками, либо показывает необходимость получения новых комбинированных методов обработки, которые могут вызывать совершенствование эксплуатационных показателей, но обычно связаны с увеличением времени на получение таких методов и требуют дополнительных ограничений по финансированию на их создание и дальнейшее использование.

Требуется аргументированный ответ на вопрос о том, какие эксплуатационные показатели изделий в рассматриваемом случае можно реально оценить по уровню технологичности и обеспечить их величину при современном производстве путем использования и создания новых технологических решений, определяющих и развивающих базовые показатели в изделии и обеспечивающих возрастание его качества в целом.

В отечественном машиностроении существует обширный банк информации о комбинированных методах обработки различных материалов, используемых в ракетных и авиационных двигателях. В их числе разработки научных коллективов Воронежской школы технологов, приоритет которых защищен сотнями изобретений, часть которых признана в развитых зарубежных странах [2, 5].

При создании нового наукоемкого изделия может оказаться, что базовых объектов для сравнения объектов пока не существует даже в виде моделей. Тогда при отработке производственной технологичности требуется изучить прошлый мировой опыт выпуска аналогичной продукции, попытаться выявить опытные образцы подобных изделий у заказчика и разработчика, получить результаты их испытаний на стендах и макетах, учесть и проанализировать опыт использования продукции на всех этапах отработки технологичности. Такой материал дает возможность создать доказательную базу для формирования эффективной системы отработки производственной технологичности путем динамического совершенствования и выпуска изделий с требуемыми эксплуатационными показателями [3, 7].

Для качественного отбора возможных технологических способов изготовления ресурсопределяющих деталей в работе [4] был предложен новый критерий – «принцип

полезности», в котором учитывается возможность использования известных и создаваемых способов для повышения эксплуатационных показателей изделия желательно не ниже уровня, требуемого заказчиком. Так сразу сужается область поиска необходимых способов, но для выбора лучшего варианта, его адаптации к изделию, обоснования необходимости доработки или разработки нового, как правило, комбинированного способа совершенствования поверхностного слоя материала требуется критериальная оценка возможностей технологических способов по их потенциалу улучшения эксплуатационных показателей изделия.

В этом направлении ранее проводились исследования рядом ученых страны, например, Суловым А.Г. [5, 7], Михайловым А.Н., но они остановились на начале критериального анализа традиционных технологических процессов, где технолог может обеспечивать получение улучшенных технологических показателей в процессе обработки поверхности, но не может связать выбранный или разработанный технологический способ и его режимы с эксплуатационными показателями, запрашиваемыми заказчиком и разработчиком, т.к. они имеют различную размерность оценочных показателей.

В работах [1, 4] для реализации процесса отработки технологичности были использованы неравенства алгебры Буля, которые позволяют создать критериальные оценки между технологическими показателями комбинированного процесса воздействия на объект и эксплуатационными показателями изделия с таким же назначением. Для достижения требуемого уровня эксплуатационных показателей может понадобиться последовательное или одновременное воздействие нескольких конструкторских или технологических способов, которые могут, в конце концов, обеспечить нужный эксплуатационный показатель. При этом следует учесть такие факторы, как обоснование выбора, адаптации или разработки нового комбинированного способа, так и ограничения, снижающие эффективность мероприятия при отработке технологичности. Это могут быть недопустимо длительные сроки адаптации к изделию или разработки нового технологического способа, а также затраты на мероприятие, выходящие за рамки средств, выделенных на освоение и запуск в производство нового изделия. Предложенная в

[4, 6] критериальная система позволяет получить обобщенные показатели полезности, обеспечивающие требуемый эксплуатационный уровень при минимальном показателе отрицательного влияния на ограничения выбранного или создаваемого комбинированного способа обработки.

Механизм управления качеством создаваемой продукции на этапах обработки производственной технологичности

Описание механизма выполняется с использованием критериев, отражающих уровень полезности при выполнении операций по сравнению показателей технологичности различных возможных вариантов создания и применения продукции. Их можно характеризовать показателями $\Pi_{p1}, \Pi_{p2}, \dots, \Pi_{pn}$, заданными заказчиком и полученными разработчиками изделий (4). с учетом ограничений и перспектив их использования.

Для критериальной оценки уровня полезности введены следующие обозначения: $\Pi_{p1}, \Pi_{p2}, \dots, \Pi_{pn}$ – показатели заданных заказчиком, полученных создателем в текущее время эксплуатационных характеристик $\Pi_{o1}, \Pi_{o2}, \dots, \Pi_{on}$. $\Pi_{d1}, \Pi_{d2}, \dots, \Pi_{dm}$ – показатели перспективного изделия, зависящие от технологических, качественных показателей и других характеристик вариантов сравнения при оценке технологичности: $K_{o1}, K_{o2}, \dots, K_{on}$; $K_{d1}, K_{d2}, \dots, K_{dm}$ – величины критериев полезности технологических воздействия на достигнутые и перспективные эксплуатационные показатели сравниваемых вариантов, где $\vec{K}_1, \vec{K}_2, \dots, \vec{K}_m$ показывают возможность повышения требуемых характеристик, а остальные – динамику уменьшения или устранения нежелательных факторов

$$\vec{K}_1, \vec{K}_2, \dots, \vec{K}_m \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$\vec{K}'_1, \vec{K}'_2, \dots, \vec{K}'_m \rightarrow \min, \quad (2)$$

В обобщенном виде критерий полезности при оценке технологичности имеет вид:

$$\begin{aligned} \vec{K}_{o1} \Pi_{o1} &\geq \Pi_{p1}, \\ \vec{K}_{o2} \Pi_{o2} &\geq \Pi_{p2}, \\ &\dots\dots\dots \\ \vec{K}_{om} \Pi_{on} &\geq \Pi_{pn}. \end{aligned} \quad (3)$$

При использовании критериев учтено как положительное влияние технологических решений (1), так и нежелательное или недопустимое изменение технико-экономических показателей (2). При использовании комбинированных технологических процессов необходимо учитывать взаимное воздействие факторов $\vec{K}_1, \vec{K}_2, \dots, \vec{K}_n, \vec{K}'_n$ при выполнении граничных условий (3).

Если $\Pi_{di} \geq \Pi_{pi}$, то для «i» технологического воздействия принимается $\Pi_{pi} = \Pi_{di}$ и согласовывается с разработчиком возможность снижения заданных эксплуатационных показателей до уровня Π_{di} . Здесь может быть несколько вариантов: согласиться с использованием технологических воздействий достигнутого уровня; предоставить технологам время на разработку новых методов и средств для совершенствования возможного варианта обработки и достижения или превышения первоначально заданного уровня эксплуатационных показателей изделий; использовать комбинированные технологии, учитывающие при одновременном воздействии на показатели варианта нескольких способов, которые способны эффективно воздействовать на положительные показатели рассматриваемых видов обработки.

Раскрытие механизма управления качеством путем оценки значимости принципа полезности в процессе обработки производственной и общей технологичности позволяет моделировать последовательность действий и разработать цифровые технологии, интенсифицирующие автоматизацию производства с использованием комбинированных методов обработки. В создаваемых моделях в качестве начальных условий используют: достоверную исходную цифровую базу, охватывающую предшествующий период жизненного цикла изделий; реальность создания новых технологических воздействий, известных хотя бы на уровне патентов на способы и устройства; параметры ограничений по срокам освоения новой продукции; ориентировочные затраты на выполнение экспериментальных исследований при запуске изделий в серийное производство и специфичные требования заказчика, отражающие отраслевые условия эксплуатации изделий. Полученные и проанализированные сведения позволяют на базе моделей, использующих принцип полезности и булевы переменные [1, 4], провести выбор приоритетов для

применения или создания новых технологических приемов с учетом ограничений технического, экономического плана и доступности средств технологического оснащения в условиях международных санкций. Устанавливаются и обосновываются связи между технологическими показателями комбинированных способов, ресурсные характеристики создаваемых или модернизируемых изделий с учетом всего цикла эксплуатации и утилизации объектов.

При выборе граничных условий на этапе изучения процесса на моделях, кроме вышеназванных показателей, требуется расширить область поиска вариантов. Например, по использованию резервов смежных предприятий, степени защищенности собственных изобретений, допустимые затраты на охрану труда и экологию.

На основе принятых в модели критериев выполняется многокритериальная оптимизация выбора вариантов с булевыми переменными [4]. Результат (R) расчетов по модели при синтезе технологических воздействий (U) выражается зависимостью:

$$R \subset \otimes U_n, n \in P_p, \quad (4)$$

где \otimes – декартово произведение; $i = 0$, P_{pi} – множество возможных технологий внешнего воздействия для конкретного изделия; P_p – заданный разработчиком параметр изделия U , где определяющее влияние на результат оказывает показатель полезности i -го воздействия P_{pi} .

Реализация процесса обработки технологичности при создании и модернизации наукоемких изделий машиностроения

Обработка технологичности является обязательной стадией работы технолога при изготовлении любой продукции. Но особое внимание уделяется такому вопросу в авиакосмической отрасли, где качество изделий постоянно совершенствуется по результатам качественной и количественной оценки общей технологичности и, в частности, производственной, достаточно полно раскрытой в [1, 4].

Исследования выполнялись как на создаваемой, так и универсальной технологической оснастке. На примере технологической оснастки для комбинированной размерной обработки реактивных и ракетных двигателей показаны пути последовательного использования мероприятий по обработке технологичности и совершенствования проточной части подачи топлива в горячей зоне изделия, приведенного на рис. 1.



Рис.1. Система подачи топлива ракетного двигателя

Fig.1. The fuel supply system through the nozzles of the rocket engine firing disc

На разрезе детали (рис. 1) показаны каналы для подвода охлаждающего топлива к форсункам (рис. 2), изготовление которых выполняется комбинированным эрозионно-химическим способом в среде, изменяющей агрегатное состояние от жидкого до парообразного [8]. Форсунки, рекомендованные для установки на изделие после обработки технологичности, выполняются в основном из нержавеющей стали и изготовление в них каналов традиционными методами механической обработки в большинстве случаев оказывается не технологичным или неосуществимым из-за ограничений для подвода металлорежущего инструмента. В рассматриваемом случае целесообразно применять комбинированные методы прошивки каналов, обеспечивающие получение проточной части с различными сечениями. Часть операций по изготовлению деталей на рис 2 может выполняться по аддитивным технологиям, предложенными авторами путем наращивания порошкового металла. Здесь для очистки полученных отверстий может эффективно использоваться комбинированная обработка по патенту [9].

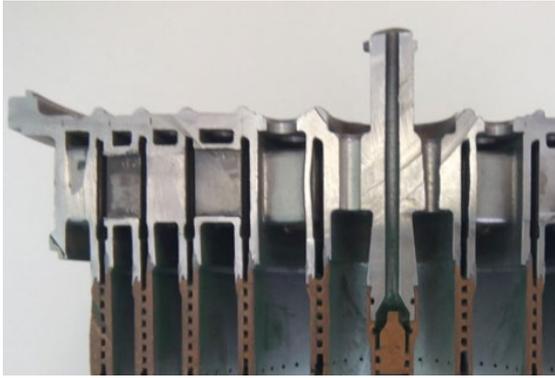


Рис. 2. Разрезы типовых форсунок

Fig.2. Sections of typical injectors

Этот метод позволил создать в форсунках каналы с переменным по длине профилем, в том числе с формой сопла Лавалья, приведенного на рис. 3.



Рис. 3. Образец из жаропрочного материала, имеющий профиль отверстия с переменным сечением

Fig. 3. A sample made of heat-resistant material having a hole profile with a variable cross-section

Сечение канала может быть не только круглым, но и овальным, эллиптическим, многогранным. Его профиль формируется с помощью расчетов на ЭВМ, отрабатывается экспериментально на стадии внедрения по предложенной модели обоснования технологичности конструкций и выбора способа обработки каналов. В работах [1, 3, 4] указывается, что современные технологии позволяют за счет совершенствования геометрии проточной части систем подачи топлива значительно повысить эксплуатационные показатели жидкостных двигателей новых поколений.

На базе созданного нового способа и устройства [8] для подачи дозированной технологической среды по предложенному патенту получена возможность оценить эффективность влияния каждого этапа отработки производственной технологичности на повышение до требуемого или желаемого уровня качества изделий, а также достичь увеличения сроков работоспособности оснастки практически без роста себестоимости, изменения трудоемкости операции, которые могут выступать в виде ограничений при использовании способов [8, 9].

Основным узлом ракетного двигателя является турбонасосный агрегат, определяющий срок ресурса изделия (рис. 4).



Рис.4. Рабочий диск турбонасосного агрегата

Fig. 4. The turbopump unit work disk

При создании агрегатов, приведенных на рис. 4 был проведен комплекс оценочных расчетов с использованием принципа полезности по предложенной в работе методике выполнены экспериментальные работы, на базе которых проведены мероприятия по повышению показателя технологичности на этапе проектирования изделия разработчиком (например, использование новых жаропрочных, стойких к воздействию окислителей материалов и др.), использованы для формирования межлопаточных каналов новые комбинированные методы обработки с наложением электрического поля.

Процесс уже освоен в имеющихся изделиях и был принят заказчиком за достоверный базовый показатель, обеспечивающий гарантированный одноразовый срок работоспособности изделия в течение 80 с. Однако в

перспективных аналогичных изделиях этот срок постоянно требует увеличения: сначала до 119 с., затем до 240 и 500 с., а с возникновением необходимости многократного использования двигателей ракетной техники он может достигать 800 с. Начиная с ресурса в 120 с., понадобилось создание новых комбинированных способов нанесения на лопатки термозащитных покрытий: сначала это было алитирование, потом нанесение карбида титана, далее использование способа по изобретению [10] для комбинированного эрозионно-плазменного нанесения тугоплавких многослойных покрытий. Далее в отрасли было освоено запатентованное многослойное ионно-плазменное покрытие керамическими материалами. Использование предлагаемых новых способов в создаваемых двигателях нового поколения космических систем подтверждено актами внедрения. Этот способ также используется в турбостроении, станкостроении и в других отраслях машиностроения.

В современных изделиях авиационно-ракетной техники используются однослойные и многослойные охлаждаемые лопатки, приведенные на рис. 5.



Рис.5. Охлаждаемая металлическая лопатка с продольными и радиальными каналами

Fig.5. Cooled metal blade with longitudinal and radial channels

Лопатка с внутренним каркасом для направления охлаждающей среды через отверстия малого сечения с различным профилем и наклоном оси показана на рис. 5. При обработке производственной технологичности были использованы сведения, полученные на

моделях цифровыми методами, что дало возможность в укороченные сроки создать, изготовить комбинированными методами и запустить в серийное производство облегченные конструкции с высокими эксплуатационными характеристиками.

Заключение

Сформирован новый подход к обоснованию применения известных и созданию новых технологий комбинированной обработки с наложением электрического поля для выбора технологических приемов, наиболее полно и эффективно обеспечивающих получение наукоемких изделий с требуемыми эксплуатационными характеристиками. В основу выбора приемов положен принцип полезности, реализуемый через критериальную оценку технологических воздействий, что в настоящее время решает крупную научную проблему по совершенствованию качества и эксплуатационных показателей создаваемых отечественных изделий новых поколений конкурентоспособной техники. Создана научно обоснованная доказательная база изготовителя для согласования при отработке технологичности возможности достижения требуемых эксплуатационных показателей. Разработаны новые способы и устройства для реализации технологий модификации и придания нужных параметров поверхностным слоям металлических изделий, отвечающих требованиям разработчиков. Для этого предложены новые принципы, критерии и разработана методология разработки комбинированных технологических процессов, синтезирующих полезные воздействия, снижающих уровень или устраняющих негативные факторы и обеспечивающих достижение заданных или возможных эксплуатационных показателей осваиваемых изделий.

Сформирован новый подход к применению известных и проектированию новых технологий, наиболее полно обеспечивающих получение отраслевых и общетехнических наукоемких изделий с высокими эксплуатационными характеристиками, в основу которого положен принцип полезности, реализуемый через синтез технологических воздействий, что решает крупную научную проблему по совершенствованию качества и эксплуатационных

показателей создаваемых изделий новых поколений конкурентоспособной техники.

Разработаны перспективные способы и устройства для реализации технологий модификации и придания нужных эксплуатационных параметров требуемой продукции, отвечающих требованиям разработчиков. Для этого предложены принципы, критерии и разработана методология автоматизированного выбора приоритетного эксплуатационного показателя и построения адаптивного технологического процесса, синтезирующего полезные воздействия и значительно снижающего действие негативных факторов, что позволяет уменьшить зависимость отрасли от импортных поставок.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Бондарь А.В.** Качество и надежность. М.: Машиностроение, 2007. 326 с.
2. **Смоленцев В.П., Часовских А.И.** Отработка конструкций электрохимического оборудования на технологичность // Проектирование технологических машин: сб. научн. тр. М.: СТАНКИН, 1997. С. 77–82.
3. **Смоленцев Е.В.** Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. М.: Машиностроение, 2005. 511 с.
4. **Сафонов С.В.** Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик изделий // Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2015. 232 с.
5. **Справочник технолога** / Под общей ред. А.Г. Сулова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.
6. **Смоленцев В.П., Мельников В.П., Сиртладзе А.Г.** Управление системами и процессами. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 336 с.
7. **Сулов А.Г., Федонин О.Н., Медведев Д.М.** Проектирование функционально ориентированных технологических процессов // Вестник машиностроения, 2019. № 9. С. 66–91.
8. **Патент на изобретение 2396153.** (РФ). В23Н. Заявка № 2008120420 от 22.05.2008. Способ

электроэрозионного восстановления детали из стали или чугуна / В.П. Смоленцев и др.

9. **Патент на изобретение 2516523.** (РФ). В08В. Заявка № 2011148556 от 29.11.2011. Способ очистки изделий от загрязнений / В.П. Смоленцев и др.

10. **Патент на изобретение 2333822.** (РФ). В23Н. Заявка № 2006140558 от 16.11.2000. Способ получения многослойного покрытия на восстанавливаемой стальной или чугунной детали / В.П. Смоленцев и др.

REFERENCES

1. Bondar A.V. Quality and reliability. Moscow: Mashinostroenie, 2007. 326 p.
2. Smolentsev V.P., Chasovskikh A.I. Testing the designs of electrochemical equipment for manufacturability // Designing technological machines: proceedings. Moscow: STANKIN, 1997. pp.77–82
3. Smolentsev E.V. Design of electrical and combined processing methods. Moscow: Mashinostroenie, 2005. 511 p.
4. Safonov S.V. Technological support of operational characteristics of products // Voronezh: VSU Publishing House, 2015. 232 p.
5. Technologist's Reference Book / under the general editorship of A.G. Suslov. Moscow: Innovation Mechanical Engineering, 2019. 800 p.
6. Smolentsev V.P., Melnikov V.P., Skhirtladze A.G. Management of systems and processes. Moscow: Publishing Center "Academy", 2010. 336 p.
7. Suslov A.G., Fedonin O.N., Medvedev D.M. Designing of functionally oriented technological processes // Bulletin of Mechanical Engineering, 2019. No. 9. pp.66–91
8. Patent 2396153. (RF). B23N. A method of electroerosion restoration of a part made of steel or cast iron. Authors: V.P. Smolentsev et al. Application 2008120420 dated 05/22/2008, publ. 08/10/2010, bul. No. 22.
9. Patent 2516523. (RF). IN08B. The method of cleaning products from contamination. Authors: V.P. Smolentsev et al. Application 2011148556 dated 11/29/2011, publ. 05/20/2014, Bul. no. 14.
10. Patent 2333822 (Russian Federation). B23N. A method for obtaining a multilayer coating on a recoverable steel or cast iron part. Authors: V.P. Smolentsev et al. Application 2006140558 dated 11/16/2000, publ. 10.01.2001, bul. No. 1.

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 22.02.2025; одобрена после рецензирования 06.03.2025; принята к публикации 27.03.2025.

The article was submitted 22.02.2025; approved after reviewing 06.03.2025; assepted for publication 27.03.2025.