

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2026-25-2-100-106>

УДК 62-757.73

Производственный технологический процесс лазерной резки с использованием гидроабразивной обработки

Докт. техн. наук, проф. И. В. Качанов¹⁾, канд. техн. наук А. В. Филипчик²⁾,
докт. техн. наук, проф. А. В. Волков³⁾, инженеры И. М. Шаталов¹⁾, Д. М. Иванов²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова
Белорусского государственного университета (Минск, Республика Беларусь),

³⁾ФГБОУВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»
(Москва, Российская Федерация)

Реферат. В статье представлены результаты экспериментальных и производственных исследований, посвященных изучению влияния качества поверхности металлических изделий, очищенных по гидроабразивной технологии (основана на использовании бентонитовой глины в составе водной струи), на скорость лазерной резки. С целью анализа воздействия различных параметров гидроабразивной обработки (ГАО) на эффективность лазерной резки металлических поверхностей выполнены производственные испытания. В ходе данных испытаний применялись три группы образцов из конструкционной стали марки Ст10, имеющих габариты 200×200 мм и толщину в диапазоне от 2 до 12 мм. Выбор данной марки стали обусловлен ее широким применением в машиностроении для изготовления машин, механизмов и сварных конструкций, а также ее оптимальным сочетанием высоких прочностных характеристик с относительно невысокой стоимостью. Применение в составе рабочей струи бентонитовой глины с концентрацией $K_б = 2-3\%$ приводит к увеличению силового воздействия и образованию на очищенной детали пленочного покрытия; кальцинированная сода с концентрацией $K_{кс} = 2-3\%$ позволяет поддерживать рабочий раствор во взвешенном состоянии; сажа с концентрацией $K_{сж} = 11-13\%$ способствует образованию пленочного покрытия с высокими светопоглощающими свойствами; вода исключает пылеобразование в зоне обработки. Представленное исследование подтверждает, что метод ГАО является эффективным (в сравнении с дробеструйной очисткой) для повышения производительности процесса лазерной резки Ст10 на 15–20%. Внедрение модернизированного технологического процесса, основанного на применении гидроабразивной обработки вместо традиционной дробеструйной очистки, позволяет полностью исключить операцию, ранее предназначенную для удаления грата с поверхности детали. Отсутствие грата наряду с увеличением скорости лазерной резки напрямую обусловлено предварительной обработкой заготовки (в виде защитного кожуха) методом ГАО, реализованным с применением инновационного запатентованного состава.

Ключевые слова: технология, машиностроение, лазерная резка, коррозия, очистка, машины, металл, струя, абразив, бентонитовая глина, скорость резки, грат, механика

Для цитирования: Производственный технологический процесс лазерной резки с использованием гидроабразивной обработки / И. В. Качанов [и др.] // *Наука и техника*. 2026. Т. 25, № 2. С. 100–106. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2026-25-2-100-106>

Адрес для переписки

Качанов Игорь Владимирович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 249-56-77
hidrokaf@bntu.by

Address for correspondence

Kachanov Igor V.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 249-56-77
hidrokaf@bntu.by

Manufacturing Technology Process of Laser Cutting Using Waterjet Machining

I. V. Kachanov¹⁾, A. V. Filipchik²⁾, A. V. Volkov³⁾, I. M. Shatalov¹⁾, D. M. Ivanov²⁾

¹⁾Belarussian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus),

³⁾Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “National Research University ‘Moscow Power Engineering Institute’” (Moscow, Russian Federation)

Abstract. The article presents the results of experimental and production studies dedicated to investigating the influence of the surface quality of metal products cleaned using hydro-abrasive technology (based on the use of bentonite clay in a water jet) on the laser cutting speed. To analyze the impact of various hydro-abrasive treatment (HAT) parameters on the efficiency of laser cutting of metal surfaces, production tests were carried out. During these tests, three groups of samples made of St10 structural steel, with dimensions of 200×200 mm and thicknesses ranging from 2 to 12 mm, were used. The choice of this steel grade is due to its widespread use in mechanical engineering for making machines, mechanisms, and welded structures, along with its excellent combination of high strength characteristics with a relatively low cost. The use of bentonite clay with a concentration of $K_b = 2-3\%$ in the working jet leads to an increase in the force impact and the formation of a film coating on the cleaned part; soda ash with a concentration of $K_{ks} = 2-3\%$ allows the working solution to be kept in suspension; carbon black with a concentration of $K_{szh} = 11-13\%$ promotes the formation of a film coating with high light-absorbing properties; water eliminates dust formation in the processing zone. The presented study confirms that the HAT method is effective (compared to shot blasting) for increasing the productivity of the laser cutting process (St10) by 15–20%. The implementation of a modernized technological process based on the use of hydro-abrasive treatment (HAT) instead of traditional shot blasting allows for the complete elimination of the operation previously intended for removing burrs from the part surface. The absence of burrs, along with the increased speed of laser cutting, is directly due to the preliminary processing of the workpiece (in the form of a protective casing) using HAT method, implemented with an innovative patented composition.

Keywords: technology, mechanical engineering, laser cutting, corrosion, cleaning, machines, metal, jet, abrasive, bentonite clay, cutting speed, burr, mechanics

For citation: Kachanov I. V., Filipchik A. V., Volkov A. V., Shatalov I. M., Ivanov D. M. (2026) Manufacturing Technology Process of Laser Cutting Using Waterjet Machining. *Science and Technique*. 25 (2), 100–106 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2026-25-2-100-106>

Введение

Коррозия в машиностроении является серьезной проблемой, так как она приводит к значительному ущербу, связанному с заменой поврежденных деталей, ремонтом оборудования и снижением производительности целого ряда технологических операций, таких как лазерная резка, дуговая сварка, гибка, штамповка и др. [1–4].

Современное развитие машиностроения связано с внедрением и использованием высокотехнологичных лазерных комплексов типа

Hyper Gear 510 корпорации Yamazaki Mazak Optronic Corp (Япония) (рис. 1), которые за счет своей высокой производительности позволяют увеличить выпуск машиностроительной продукции [5–7].

Однако следует отметить, что эффективное использование комплексов лазерной резки напрямую зависит от качества поверхности обрабатываемого материала. Очистка металла от коррозии, масел или покрытий помогает улучшить поглощение лазерного луча и предотвратить помехи во время резки [8–10].



Рис. 1. Внешний вид комплекса лазерной резки Hyper Gear 510:
1 – модуль лазерного станка; 2 – лист для лазерной резки; 3 – паллета

Fig. 1. Exterior of the Hyper Gear 510 laser cutting complex:
1 – laser machine module; 2 – laser cutting sheet; 3 – pallets

В рамках технологических процессов машиностроительного производства осуществляется специализированная очистка металлических поверхностей с целью устранения коррозии, различного рода загрязнений, масел, остатков краски. Для этого применяют такие виды обработки, как: пескоструйная, дробеструйная, химическая, с помощью ручного механизированного инструмента и др. [8].

Пескоструйная обработка металлических поверхностей способствует удалению коррозии, зазубрин и царапин, делая поверхности гладкими и блестящими, подготовке их к нанесению различных покрытий (покраска, грунтовка и т. д.). Однако данный способ очистки металла обладает рядом существенных недостатков, таких как: запыленность в зоне обработки; наличие частиц песка на обработанной поверхности, что при нанесении лакокрасочных покрытий будет приводить к их разрушению в процессе эксплуатации за счет разных значений коэффициента температурного расширения [1–4, 8].

Дробеструйная обработка – это высокопроизводительный метод очистки металлических поверхностей от коррозии. Многие дробеструйные установки работают в автоматическом режиме, что снижает затраты на рабочую силу и повышает эффективность процесса очистки. Однако дробеструйная обработка не всегда эффективна для очистки изделий сложной формы или с труднодоступными полостями. К недостаткам следует отнести и то, что необходима периодическая остановка для загрузки и выгрузки обрабатываемых изделий, а некоторые дробеструйные установки обладают повышенным уровнем шума и пыли [1–4, 8].

Химическая очистка металлических поверхностей от коррозии предполагает использование соляной, серной, ортофосфорной кислот, а также специальных преобразователей ржавчины. Данный способ очистки металлоизделий эффективно удаляет коррозию в труднодоступных местах, возвращает металлическим поверхностям их первоначальный внешний вид. Однако следует отметить и недостатки данного способа. Несоблюдение времени обработки может привести к повреждению структуры металлической поверхности и появлению новых дефектов; после очистки требуется утилизация отработанных реагентов; работа с химическими веществами требует повышенных мер безопасности для рабочего персонала (ожоги, отравления) [1–4, 8].

Ручной механизированный инструмент широко применяется для удаления коррозии с металлических поверхностей. К преимуществам данного вида очистки можно отнести то, что модели механизированного инструмента разработаны с учетом простоты и удобства применения и не требуют специальной подготовки рабочего персонала. Многие модели оснащены набором сменных насадок, что может использоваться для выполнения различных задач. В отличие от стационарного оборудования ручной механизированный инструмент может легко перемещаться, что делает его удобным для работы на выезде или в условиях ограниченного пространства. Недостатки данного способа очистки металлических поверхностей от коррозии – большой объем удаляемого металла из-за отсутствия копирования рельефа поверхности при обработке и образование прижоговых зон [1–4, 8].

Основная часть

В рамках совместных научно-исследовательских работ, проводимых кафедрой «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика» БНТУ совместно с кафедрой «Энергоэффективных технологий» МГЭИ имени А. Д. Сахарова, получены данные, свидетельствующие о возможности повышения качества процессов удаления коррозии с металлических поверхностей посредством добавления в высоконапорную струю воды специальных компонентов, таких как бентонитовая глина (ГОСТ 28177–89), кальцинированная сода (ГОСТ 5100–85), сажа (ГОСТ 7885–86) [8, 12–14]. Применение в составе рабочей струи бентонитовой глины с концентрацией $K_6 = 2–3 \%$ приводит к увеличению силового воздействия и образованию на очищенной детали пленочного покрытия; кальцинированная сода с концентрацией $K_{Kc} = 2–3 \%$ позволяет поддерживать рабочий раствор во взвешенном состоянии; сажа с концентрацией $K_{сж} = 11–13 \%$ способствует образованию пленочного покрытия с высокими светопоглощающими свойствами; вода исключает пылеобразование в зоне обработки [11].

При анализе эффективности лазерной резки металлов необходимо учитывать два основных параметра: скорость, с которой происходит сам процесс резки $v_{лр}$, и качество получаемых кромок, а именно отсутствие нежелательных наплывов или заусенцев (грата) на вырезанных деталях. Эти факторы напря-

мую влияют на общую производительность процесса [5–7].

В ходе осуществления технологических операций на базе производственного предприятия «Агродок» (г. Минск) с применением новейшего оборудования Nureg Gear 510, произведенного японским концерном Yamazaki Mazak Optronic Corp, были проведены исследования, направленные на определение эффективности от гидроабразивной обработки с использованием рабочей жидкости, обладающей патентной новизной [11], на изменение максимальной скорости лазерной резки.

С целью анализа воздействия различных параметров гидроабразивной обработки (ГАО) на эффективность лазерной резки металлических поверхностей были организованы и проведены производственные испытания. В рамках этих испытаний использовались три группы образцов из конструкционной стали Ст10 с размерами 200×200 мм и толщиной от 2 до 12 мм. Выбор данной марки стали обусловлен ее широким применением в области машиностроения для производства машин, механизмов и сварных конструкций благодаря оптимальному балансу прочностных характеристик и доступной стоимости.

Образцы первой группы были очищены с использованием новой запатентованной технологии [11]. Рабочая жидкость, подаваемая под давлением 30 МПа через конфузур диаметром 1 мм, представляла собой водный раствор с концентрацией: бентонитовой глины $K_b = 2-3\%$; кальцинированной соды $K_{xc} = 2-3\%$; сажи $K_{сж} = 11-13\%$. Струя жидкости достигала обрабатываемой поверхности на расстоянии $L = 50$ мм со скоростью $v_{стр} = 250-260$ м/с, обеспечивая шероховатость $Ra = 30-50$ мкм.

Чтобы сравнить результаты, была создана вторая группа образцов. Они прошли стандартную дробеструйную заводскую обработку, благодаря чему поверхность образцов тоже приобрела шероховатость $Ra = 30-50$ мкм.

Образцы третьей группы получены из листового металла в состоянии поставки, на поверхности которого присутствовали продукты коррозии.

Исследования проводились с целью определения максимальной скорости лазерной резки на станке Nureg Gear 510. Результаты производственных испытаний для трех групп об-

разцов приведены на рис. 2. Главным условием была абсолютная чистота режущей кромки, свободная от заусенцев (грата).

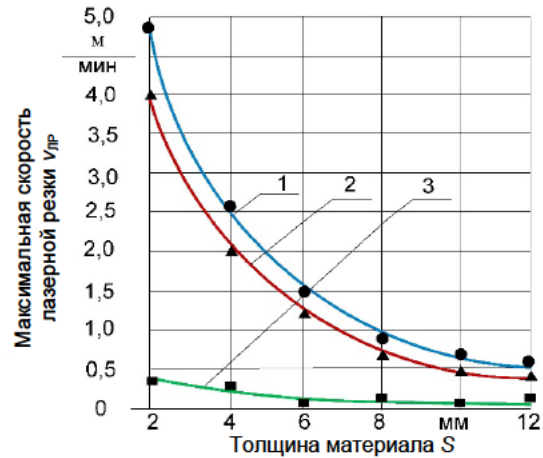


Рис. 2. Зависимость максимальной скорости лазерной резки от толщины материала: 1 – образцы после гидроабразивной обработки [11]; 2 – дробеструйная обработка образцов; 3 – отсутствие очистки образцов от продуктов коррозии

Fig. 2. Dependence of maximum laser cutting speed on material thickness: 1 – samples after waterjet machining [11]; waterjet machining [11]; 2 – shot-blasted samples; 3 – samples without cleaning of corrosion products

С целью верификации технологической результативности выполненных исследований на базе предприятия «Агродок» были инициированы промышленные испытания деталей, подвергнутых обработке по технологии ГАО. Основной задачей данных испытаний являлись подтверждение целесообразности подготовки поверхностей для последующей лазерной резки и апробация предложенной технологии в условиях реального производства.

Для решения задачи очистки металлических поверхностей от коррозии и их подготовки к лазерной резке на предприятии «Агродок» в настоящее время используется дробеструйная обработка. Чтобы оценить, насколько эффективен этот метод, сопоставим его с новой технологией очистки, базирующейся на ГАО.

С учетом данных, полученных выше (рис. 2), проведена оценка технологической эффективности использования ГАО (рис. 3) применительно к производству конкретной детали КМ 754.022.023 «защитный кожух» (рис. 4) из номенклатуры предприятия «Агродок» на лазерном комплексе Nureg Gear 510. Данная деталь вырезалась из листа (Ст10) толщиной 2 мм со скоростью 4,9 м/мин.

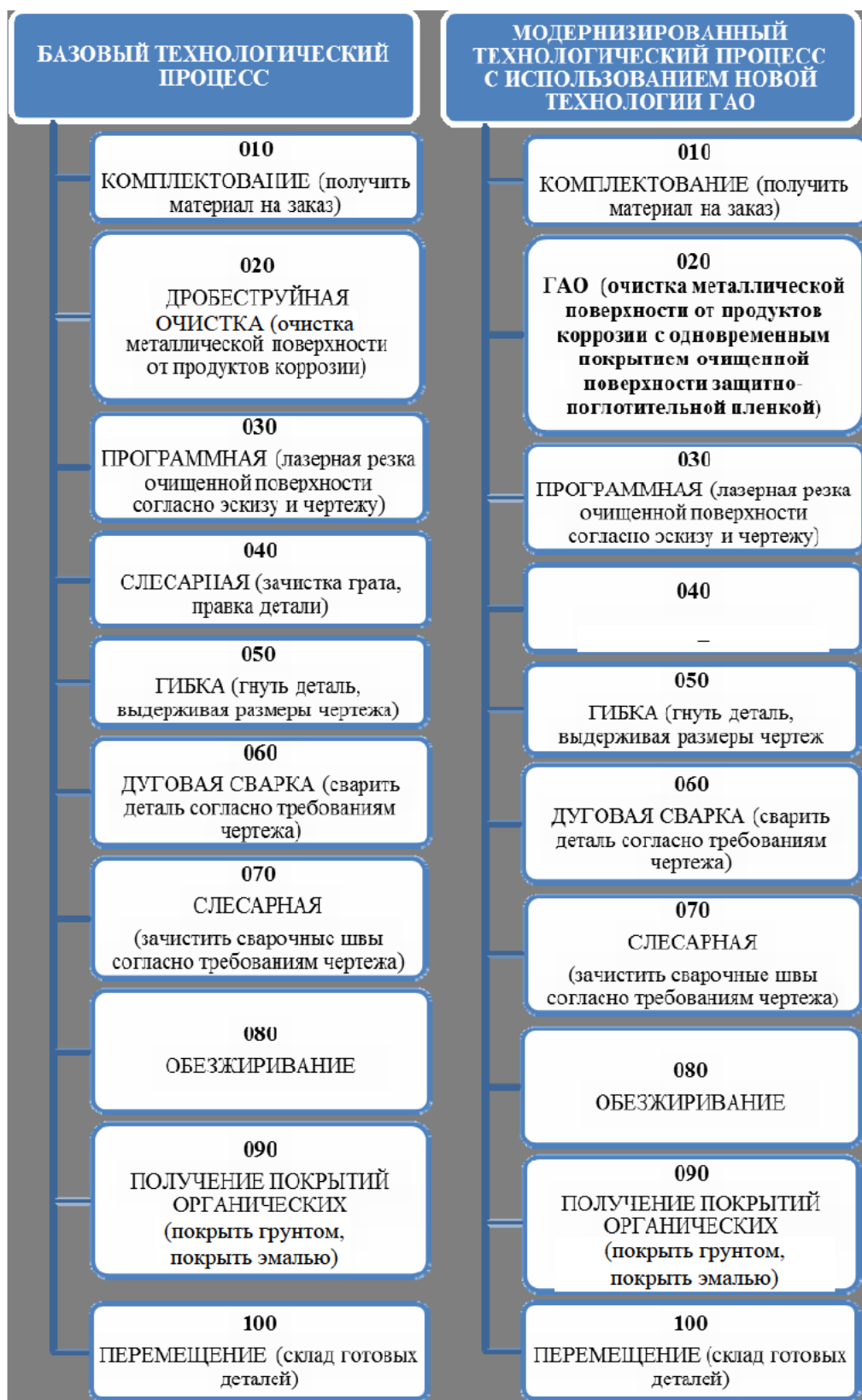


Рис. 3. Схемы базового и модернизированного с использованием новой технологии гидроабразивной обработки технологических процессов

Fig. 3. Schemes of the basic and modernized technological process using the new waterjet machining technology

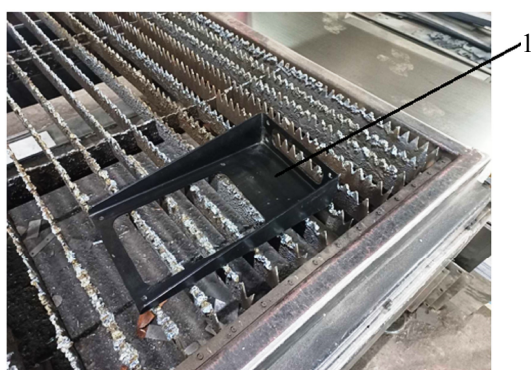


Рис. 4. 1 – защитный кожух KM 754.022.023, изготовленный с применением гидроабразивной обработки в условиях предприятия «Агродок»

Fig. 4. 1 – protective cover KM 754.022.023, manufactured using waterjet machining method at the “Agrodok”

Результаты исследования и их обсуждение

Исследования продемонстрировали существенную разницу в скорости лазерной резки стальных образцов толщиной 2 мм (Ст10). Скорость варьировалась от 0,38 м/мин для образцов 3-й группы (кривая 3) до 4,9 м/мин для образцов 1-й группы (кривая 1) (рис. 2). Максимальная скорость была достигнута без образования грата на кромке реза. Образцы 1-й группы, вырезанные с максимальной скоростью (4,9 м/мин), не имели грата, что устраняет необходимость их последующей обработки. В то же время образцы 2-й и 3-й групп, обработанные с той же скоростью, имели грат длиной 1–3 мм.

Увеличение скорости лазерной резки (для образцов из Ст10), наблюдаемое при добавлении сажи в рабочую жидкость, объясняется тем, что сажа способствует созданию на поверхности материала слоя, который гораздо хуже отражает лазерное излучение. Это позволяет материалу поглощать больше энергии лазерного луча, что в свою очередь ускоряет процесс резки.

Анализ данных, представленных на рис. 3, демонстрирует, что внедрение модернизированного технологического процесса, основанного на применении гидроабразивной обработки вместо традиционной дробеструйной очистки, позволяет полностью исключить операцию 040 (рис. 3), ранее предназначенную для удаления грата с поверхности детали. Отсут-

ствие грата, наряду с увеличением скорости лазерной резки, является прямым результатом предварительной обработки детали KM 754.022.023 «защитный кожух» методом ГАО с использованием состава, описанного в патенте [11].

ВЫВОДЫ

1. Проведенные исследования подтверждают, что метод гидроабразивной обработки более эффективен, чем метод дробеструйной обработки, так как повышается производительность процесса лазерной резки (Ст10) на 15–20 %.

2. В результате применения разработанной технологии гидроабразивной обработки (вместо дробеструйной) для очистки металлических листов от коррозии перед операцией лазерной резки оптимизируется технологический процесс изготовления детали (защитный кожух) за счет отсутствия слесарной операции 040 по зачистке грата.

3. Целесообразно применение метода гидроабразивной обработки для ряда других деталей из номенклатуры машиностроительного производства Республики Беларусь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сысоев, С. К. Технология машиностроения. Проектирование технологических процессов: учеб. пособие для СПО / С. К. Сысоев, А. С. Сысоев, В. А. Левко. 4-е изд., стер. СПб.: Лань, 2025. 352 с.
2. Марголит, Р. Б. Технология машиностроения: учеб. для вузов / Р. Б. Марголит. М.: Изд-во Юрайт, 2025. 413 с.
3. Попок, Н. Н. Основы технологии машиностроения: учеб. пособие / Н. Н. Попок, В. И. Абрамов; Министерство образования Республики Беларусь, Полоцкий государственный университет. Новополоцк: ПГУ, 2020. 272 с.
4. Материаловедение. Перспективные машиностроительные и специальные материалы (с электронным приложением): учеб. пособие / Н. А. Сви́дунович, В. М. Константинов, П. А. Витязь [и др.]; под ред. Н. А. Сви́дуновича, В. М. Константинова. Минск: РИВШ, 2024. 628 с.
5. Шершне́в, Е. Б. Технологии лазерной и механической модификации материалов электронной техники: монография / Е. Б. Шершне́в; Учреждение образования «Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины». Минск: Типография «Интегралполиграф», 2025. 347 с.
6. Евтихийев, Н. Н. Лазерные технологии: учеб. пособие / Н. Н. Евтихийев, О. Ф. Очин, И. А. Бегунов. 2-е исправ. изд. Долгопрудный: Интеллект, 2022. 239 с.

7. Григорьянц, А. Г. Лазерная резка металлов: учеб. пособие / А. Г. Григорьянц, А. А. Соколов. М.: Директ-Медиа, 2021. 128 с.
 8. Технология струйной гидроабразивной очистки и защиты от коррозии стальных изделий с применением бентонитовой глины / И. В. Качанов, А. В. Филипчик, В. Е. Бабич [и др.]. Минск: БНТУ, 2016. 167 с.
 9. Повышение эффективности лазерной резки стальных материалов путем предварительной обработки гидроабразивным способом / И. В. Качанов, А. В. Филипчик, И. М. Шаталов [и др.] // Наука и техника. 2025. Т. 24, № 4. С. 278–283. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-278-283>
 10. Практическое применение гидроабразивной очистки металлических поверхностей от коррозии при эксплуатации пожарной аварийно-спасательной техники / А. В. Филипчик, В. С. Ковалевич, А. Б. Бычек [и др.] // Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций: методы, технологии, проблемы и перспективы: сб. материалов V Междунар. заоч. науч.-практ. конф. Светлая Роща: филиал ИПП УГЗ МЧС Беларуси, 2021. С. 102–104.
 11. Патент ВУ 17688, МПК В08В 3/04 (2006.01). Состав для подготовки металлической поверхности под лазерную резку: № а 20111188: заявлено 12.09.2011: опубл. 30.04.2013 / Качанов И. В., Филипчик А. В., Мойса А. С., Яглов В. Н., Филипчик Я. В., Шаповалов В. В.; заявитель БГТУ. URL: <https://by.patents.su/3-17688-sostav-dlya-podgotovki-metallicheskojj-poverhnosti-pod-lazernuyu-rezku.html>
 12. Буканов, А. М. Технический углерод: учебное пособие / А. М. Буканов, Н. Я. Овсянников, Л. А. Ковалева. М.: МИРЭА, 2018. 79 с.
 13. Кельцев, В. В. Сажа: свойства, производство и применение / В. В. Кельцев, П. А. Теснер. Л.–М.: Гостоптехиздат, 1952. 172 с.
 14. Зуев, В. П. Производство сажи: учеб. пособие / В. П. Зуев, В. В. Михайлов. М.: Химия, 1965. 329 с.
- Поступила 08.12.2025
Подписана в печать 10.02.2026
Опубликована онлайн 31.03.2026

REFERENCES

1. Sysoev S. K., Sysoev A. S., Levko V. A. (2025) *Mechanical Engineering Technology. Design of Technological Processes*. 4th ed. Saint Petersburg, Lan Publ. 352 (in Russian).
2. Margolit R. B. (2015) *Mechanical Engineering Technology*. Moscow, Yurait Publ. 413 (in Russian).
3. Popok, N. N., Abramov V. I. (2020) *Fundamentals of Mechanical Engineering Technology*. Novopolotsk, Polotsk State University. 272 (in Russian).
4. Svidunovich, N. A., Konstantinov V. M., Vityaz' P. A., Voitov I. V., Kuis D. V., Myurek M. N., Grigor'ev I. E. (2024) *Materials Science. Advanced Mechanical Engineering and Special Materials (with Electronic Appendix)*. Minsk, National Institute for Higher Education. 628 (in Russian).
5. Shershnev E. B. (2025) *Technologies for Laser and Mechanical Modification of Materials of Electronic Equipment*. Minsk: Printing House "Integralpoligraph". 347 (in Russian).
6. Evtikhiev N. N., Ochinnikov O. F., Begunov I. A. (2022) *Laser Technologies*. 2nd ed. Dolgoprudny, Intellect Publ. 239 (in Russian).
7. Grigoriyants A. G., Sokolov A. A. (2021) *Laser Cutting of Metals*. Moscow, Direct-Media Publ. 128 (in Russian).
8. Качанов И. В., Филипчик А. В., Бабич В. Е., Жук А. Н., Ушев С. И. (2016) *Technology of Hydroabrasive Cleaning and Corrosion Protection of Steel Products Using Bentonite Clay*. Minsk, Belarusian National Technical University. 167 (in Russian).
9. Качанов И. В., Филипчик А. В., Шаталов И. М., Иванов Д. М., Зык А. Н. (2025) Improving the Efficiency of Laser Cutting of Steel Materials by Pre-Treatment with Waterjet Method. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 24 (4), 278–283 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-278-283>
10. Filipchik A. V., Kovalevich V. S., Bychek A. B., Losich A. I., Bontsevich A. A. (2021) Practical Application of Hydroabrasive Cleaning of Metal Surfaces from Corrosion During the Operation of Fire-Fighting Emergency and Rescue Equipment. *Preduprezhdenie i likvidatsiya chrezvychainykh situatsii: metody, tekhnologii, problemy i perspektivy: sb. materialov V Mezhdunar. zaoch. nauch.-prakt. konf.* [Prevention and Elimination of Emergency Situations: Methods, Technologies, Problems and Prospects: Collection of Materials of the 5th International Correspondence Scientific and Practical Conference]. Svetlaya Roshcha Village: Branch of Institute for Retraining and Advanced Training of University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus, 102–104 (in Russian).
11. Качанов И. В., Филипчик А. В., Мойса А. С., Яглов В. Н., Филипчик Я. В., Шаповалов В. В. (2013) *Composition for Preparing Metal Surface for Laser Cutting*: Patent BY 17688 (in Russian).
12. Буканов А. М., Овсянников Н. Я., Ковалева Л. А. (2018) *Technical Carbon*. Moscow, Moscow Institute of Radio Engineering, Electronics and Automation. 79 (in Russian).
13. Кельцев В. В., Теснер П. А. (1952) *Soot: Properties, Production and Application*. Leningrad, Moscow, Gostoptekhizdat Publ. 172 (in Russian).
14. Зуев В. П., Михайлов В. В. (1965) *Production of Soot*. Moscow, Khimiya Publ. 329 (in Russian).

Received: 08.12.2025

Accepted: 10.02.2026

Published online: 31.03.2026