

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-185-191>

УДК 62-757.73

Качество металлической поверхности после гидроабразивной очистки от коррозионных отложений

Докт. техн. наук, проф. И. В. Качанов¹⁾,
канд. техн. наук, доц. А. В. Филипчик²⁾,
инженеры В. С. Ковалевич³⁾, И. М. Шаталов¹⁾, С. В. Недвецкий⁴⁾

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

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

³⁾ОАО «Белсудопроект» (Гомель, Республика Беларусь),

⁴⁾Институт переподготовки и повышения квалификации ГУО «Университет гражданской защиты МЧС Беларуси»
(д. Светлая Роща, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. Приводится краткий аналитический обзор существующих гидравлических способов и методов, используемых для удаления коррозионных отложений, образующихся на металлических поверхностях. Описывается эффективный способ очистки – гидроабразивная очистка с использованием в своем составе бентонитовой глины, кальцинированной соды и полиакриламида, которые позволяют не только повысить качество очищаемой поверхности, но и сформировать на ней коррозионно-защитное пленочное покрытие. Приводятся результаты экспериментальных исследований по изучению влияния параметров технологии гидроабразивной очистки на обрабатываемую поверхность образцов, изготовленных из сталей Ст3, Ст20 и Ст45. Показано, что изменение параметров гидроабразивной обработки (скорости струи, расстояния до обрабатываемой поверхности, времени) позволяет достичь шероховатости металлоизделий в диапазоне от 3,2 до 12,5 мкм. Установлено, что применение новой технологии гидроабразивной обработки приводит к получению очищенных от коррозионных отложений металлических поверхностей с минимальной шероховатостью до 0,01 мкм. Также показано, что при концентрации бентонитовой глины 2–4 % можно достичь шероховатости поверхностей в диапазоне 20–30 мкм, что является оптимальным для технологического процесса газопламенного напыления. При концентрации бентонитовой глины 0,5–2 % можно достичь шероховатости поверхностей в диапазоне 30–50 мкм, что является оптимальным для последующего процесса покраски. Кроме того, при проведении гидроабразивной очистки на обработанных металлических поверхностях формируется долговременное антикоррозионное покрытие, которое сохраняет свои свойства в течение длительного времени (до 1 года).

Ключевые слова: коррозия, материал, очистка, металл, машины, механизмы, технология, машиностроение, струя, шероховатость, покрытие, бентонитовая глина

Для цитирования: Качество металлической поверхности после гидроабразивной очистки от коррозионных отложений / И. В. Качанов [и др.] // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 3. С. 185–191. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-185-191>

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

Quality of Metal Surface After Hydroabrasive Cleaning from Corrosive Deposits

I. V. Kachanov¹⁾, A. V. Filipchik²⁾, V. S. Kovalevich³⁾, I. M. Shatalov¹⁾, S. V. Nedvetsky⁴⁾

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

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

³⁾JSC «Belsudoproekt» (Gomel, Republic of Belarus),

⁴⁾Institute for Retraining and Advanced Training of the State Educational Institution University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Belarus, (v. Svetlaya Roshcha, Republic of Belarus)

Abstract. A brief analytical review of existing hydraulic methods and techniques used to remove corrosive deposits formed on metal surfaces is provided. An effective cleaning method is described – hydro-abrasive cleaning (HAC) using bentonite clay, soda ash and polyacrylamide in its composition, which can not only improve the quality of the surface being cleaned, but also form a corrosion-protective film coating on it. The results of experimental research to study the influence of hydro-abrasive cleaning technology parameters on the processed surface of samples made from steels Ст3 (St3), Ст20 (St20) and Ст45 (St45) are presented. It has been shown that changing the parameters of hydro-abrasive cleaning (jet speed, distance to the treated surface, time) makes it possible to achieve a roughness of metal products ranging from 3.2 μm to 12.5 μm . It has been established that the use of a new technology of hydro-abrasive cleaning (HAC) results in the removal of corrosive deposits from metal surfaces with a minimum roughness of up to 0.01 microns. It has also been shown that with a bentonite clay content of 2–4 %, it is possible to achieve surface roughness in the range of 20–30 μm , which is optimal for the flame spraying process. With a bentonite clay content of 0.5–2 %, a surface roughness of 30–50 μm can be achieved, which is optimal for the subsequent painting process. In addition, when carrying out hydro-abrasive cleaning (HAC) on the treated metal surfaces, a long-term anti-corrosion coating is formed, which retains its properties for a long time (up to 1 year).

Keywords: corrosion, material, cleaning, metal, machines, mechanisms, technology, mechanical engineering, jet, roughness, coating, bentonite clay

For citation: Kachanov I. V., Filipchik A. V., Kovalevich V. S., Shatalov I. M., Nedvetsky S. V. (2024) Quality of Metal Surface After Hydroabrasive Cleaning from Corrosive Deposits. *Science and Technique*. 23 (3), 185–191. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-185-191> (in Russian)

Введение

Машиностроительное производство характеризуется существенной зависимостью от иностранных материальных ресурсов и энергоносителей, поставляемых по мировым ценам. При работе в таких условиях эффективность производства может быть достигнута за счет оптимального использования энерго- и ресурсосберегающих технологий.

Определяющее значение в достижении высокой эффективности технологического процесса производства деталей машин и механизмов имеют результаты качественной очистки металлов от продуктов коррозии с помощью гидроабразивных операций, а также получения необходимых параметров шероховатости для последующих производственных операций [1–5].

Предпочтительным для оценки качества поверхности является параметр шероховатости Ra , который характеризует среднеарифметическое отклонение профиля.

Согласно инструкции по визуально-измерительной проверке РД 03-606-03, поверхность

металлоизделия должна быть очищена от продуктов коррозии и загрязнений, при этом шероховатость поверхностей деталей сварных соединений, а также плоскость разделки кромок деталей не должна достигать $Ra = 12,5$ мкм. При проведении последующих методов неразрушающего контроля шероховатость поверхностей металлоизделий должна составлять не более:

- при капиллярном контроле $Ra = 3,2$ мкм;
- при магнитопорошковом контроле $Ra = 10$ мкм;
- при ультразвуковом контроле $Ra = 6,3$ мкм.

При газопламенном напылении металлическая поверхность должна быть очищена от коррозии, брызг металла и загрязнений и иметь шероховатость по параметру $Ra = 20–30$ мкм для лучшей адгезии наносимого покрытия с металлической основой [6].

Для обеспечения эффективной адгезии слоев краски к очищенной поверхности металлоизделий в процессе окраски применяется технология, которая требует достижения определенного показателя шероховатости Ra , находящегося в диапазоне от 30 до 50 мкм.

Этот диапазон шероховатости обеспечивает оптимальные условия для прочного сцепления красочных материалов с поверхностью и, следовательно, повышает долговечность покрытия. При правильной регулировке режимов сушки после окраски достигается долговечное покрытие металлических изделий [7].

При показателях параметра шероховатости $Ra = 0,16-0,01$ мкм полированной поверхности происходит повышение коррозионной стойкости [8] производственных деталей, что способствует увеличению межоперационного технологического периода.

Необходимо отметить, что под воздействием атмосферной коррозии детали, очищенные по технологии ГАО, могут подвергаться повторной коррозии при нахождении в производственных условиях (межоперационный период более 8 ч).

Технологии струйной обработки сжатым воздухом, предназначенные для очистки металлоизделий от коррозии (пескоструйные, дробеструйные и т. д.), в которых применяется абразивный материал (различные металлические дробы, песок, сухой лёд и т. д.), имеют ряд существенных недостатков:

- процесс удаления коррозии сопровождается интенсивным выделением пыли, что требует применения специализированных средств защиты для персонала;
- частицы абразивного материала остаются на обработанной поверхности, что неблагоприятно сказывается на последующих эксплуатационных характеристиках деталей;
- применение шаржирования, при котором металлическая поверхность очищается с использованием дробы, требует дополнительных энергетических затрат для их удаления;
- не соответствуют технологическим требованиям по повторному образованию коррозионных отложений;
- увеличение температуры в зоне обработки.

Для удаления коррозионных отложений с металлических поверхностей используются гидравлические методы, исключаящие содержание пыли в воздухе и температуры в области обработки. Гидравлические методы очистки металлических поверхностей от коррозии могут классифицироваться на: гидродинамический, кавитационный (очистка струей жидкости с использованием эффекта кавитации) и гидроабразивный [1–3].

Гидродинамический способ очистки металлических поверхностей от коррозии предусматривает использование струй воды различных параметров давлений [1]:

- низкого (до 1 МПа);
- среднего (1–5 МПа);
- высокого (5–60 МПа).

Использование метода гидродинамической очистки помогает избежать повреждений на очищаемых металлоизделиях. В процессе очистки получается очищенная поверхность более высокого качества, чем при механической обработке с помощью фрезеровки или шарошек [1].

К недостаткам гидродинамической очистки можно отнести:

- гидродинамические установки имеют значительную стоимость;
- гидродинамические методы очистки потребляют большое количество энергии для обеспечения процесса очистки;
- применение гидродинамических методов очистки может приводить к повышенному износу устройств, ответственных за формирование струи;
- возникает проблема отсутствия защиты от повторного образования коррозии на очищенной поверхности, для предотвращения повторной коррозии необходимо применять дополнительные методы защиты, такие как нанесение защитных покрытий или антикоррозионных составов, чтобы сохранить и продлить эффективность очистки.

Кавитационный способ очистки использует энергию схлопывания парогазового пузырька при контакте с очищаемой поверхностью. В результате этого процесса происходит местное ослабление прочности материала, что позволяет гидродинамической силе струи разрушить и удалить загрязнения [1].

Недостатки кавитационного способа очистки:

- после очистки поверхностей с использованием кавитационного метода существует риск быстрого возникновения повторной коррозии;
- требуется обязательное пассивирование поверхности обработанного металлоизделия;
- возникает проблема повышенного износа устройств, отвечающих за формирование струи.

Гидроабразивная обработка (ГАО) – это эффективный способ очистки металлоизделий от коррозионных отложений. Данная технология является перспективной для очистки от нагара, окисных пленок и других загрязнений с деталей машин и механизмов. В процессе гидроабразивной обработки такие частицы, как песок, гранит или стекло, применяются в струйном потоке для повышения эффективности очистки [1].

При гидроабразивной обработке на поверхности обрабатываемой детали образуется жидкостная пленка, которая заполняет ее неровности. При ударе абразивных частиц по выступающим неровностям, эти частицы не преодолевают сопротивления жидкостной пленки и воздействуют только на выступы. Частицы, попадающие во впадины, должны преодолеть сопротивление жидкостной пленки, и их воздействие на очищаемую поверхность ограничено. В результате этого процесса постепенно снижается шероховатость обрабатываемой поверхности, что способствует получению поверхности с более низкими параметрами шероховатости [1, 3].

Гидроабразивный способ очистки имеет следующие преимущества:

- очистка поверхностей от коррозии отличается отсутствием образования пыли в процессе обработки;
- решает проблему ухудшения прочностных характеристик обрабатываемой поверхности путем эффективного отвода теплоты за счет использования воды в процессе очистки.
- позволяет формировать поверхность с необходимыми характеристиками рельефа (шероховатость);
- обработка поверхностей от коррозионных отложений обеспечивает продление срока службы абразивного материала в 2–3 раза по сравнению с пескоструйной обработкой благодаря амортизирующему действию рабочей жидкости.

Но, конечно, нельзя не отметить и недостатки, возникающие при таком способе очистки изделия. В процессе гидроабразивной очистки не решается проблема противокоррозионной защиты. Это может привести к существенному сокращению временного интервала между операциями из-за риска повторной коррозии очищенной поверхности.

Основная часть

На кафедре «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика» БНТУ предложен новый метод борьбы с коррозионными отложениями на металлических поверхностях, основанный на анализе преимуществ и недостатков современных технологий ГАО. Этот метод использует в своем составе: бентонитовую глину, кальцинированную соду и полиакриламид, которые позволяют не только очистить поверхности, но и формировать защитное пленочное покрытие. Важно отметить, что данная разработка обладает технической новизной и имеет соответствующие патенты [9, 10].

Отсутствие исследований, касающихся влияния концентрации компонентов в составе рабочей жидкости на параметры шероховатости металлоизделия и процессы формирования защитных пленочных покрытий на обработанной поверхности, обеспечивает основу для более детального исследования данного вопроса.

Для оценки воздействия различных режимов гидроабразивной обработки на параметры шероховатости металлоизделия, которое было предварительно очищено от коррозионных отложений, проводились лабораторные исследования на образцах из сталей Ст3, Ст20 и Ст45 (образцы толщиной $S = 4$ мм с размерами 100×100 мм). В процессе обработки использовалась струя рабочей жидкости со следующими концентрациями компонентов: 3 % бентонита (K_6), 5–10 % полиакриламида (K_n), 2 % кальцинированной соды (K_{kc}), остальное – вода.

В Государственном научном учреждении «Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа» (Минск) проведены исследования морфологических характеристик. Определение шероховатости поверхности производилось с использованием профилометра-профилографа модели 252 тип А1. Для анализа морфологии покрытий был применен сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) модели Cam Scan от Oxford Instruments (Великобритания). Микроскоп функционировал в режиме отраженных электронов при напряжении ускорения 20 кВ и масштабировании в диапазоне 50–5000 крат.

На рис. 1 изображено влияние расстояния L между торцом сопла и обрабатываемой поверхностью на шероховатость поверхности Ra при заданной скорости струи $v_{стр} = 200$ м/с и выходном диаметре сопла $d_k = 1$ мм.

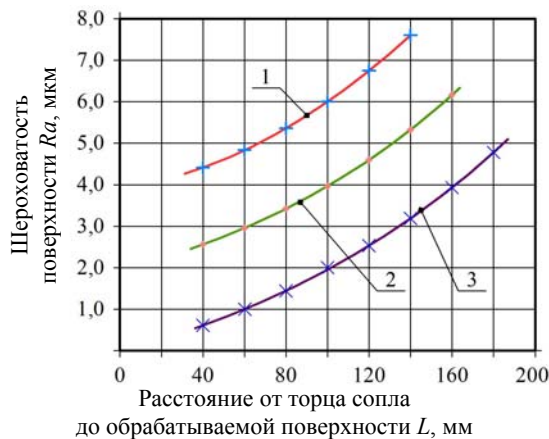


Рис. 1. Зависимость шероховатости обрабатываемой поверхности от расстояния между торцом сопла и обрабатываемой поверхностью:
1 – Сталь 45; 2 – Сталь 20; 3 – Сталь 3

Fig. 1. Dependence of roughness of the processed surface on the distance between the nozzle end and the processed surface:
1 – Steel 45; 2 – Steel 20; 3 – Steel 3

На рис. 2 представлено влияние различных параметров скорости струи $v_{стр}$ на шероховатость обрабатываемой поверхности Ra при выходном диаметре сопла $d_k = 1$ мм.

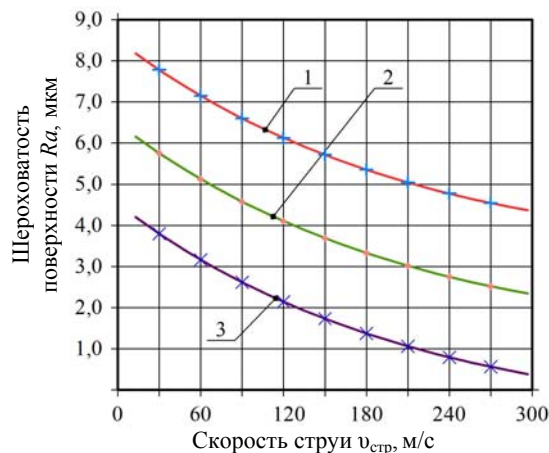


Рис. 2. Зависимость параметров шероховатости обрабатываемого металлоизделия от значений скорости струи компонентов рабочей жидкости:
1 – Сталь 45; 2 – Сталь 20; 3 – Сталь 3

Fig. 2. Dependence of roughness parameters of the processed metal product on the jet speed values of the working fluid elements:
1 – Steel 45; 2 – Steel 20; 3 – Steel 3

Рис. 3 демонстрирует зависимость шероховатости металлоизделия Ra от времени обработки при следующих условиях: $v_{стр} = 250$ м/с, $d_k = 1$ мм, $L = 50$ мм.

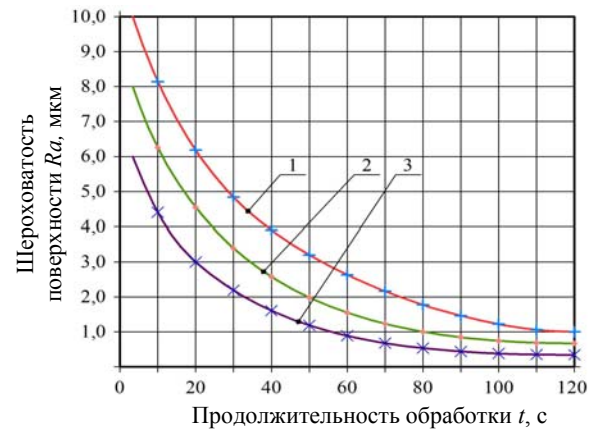


Рис. 3. Зависимость шероховатости обрабатываемой поверхности от продолжительности обработки:
1 – Сталь 45; 2 – Сталь 20; 3 – Сталь 3

Fig. 3. Dependence of roughness of the processed surface on the processing duration:
1 – Steel 45; 2 – Steel 20; 3 – Steel 3

Эффект увеличения концентрации бентонита на шероховатость Ra металлоизделия при $v_{стр} = 200$ м/с, $d_k = 1$ мм, $L = 200$ мм иллюстрирует рис. 4.

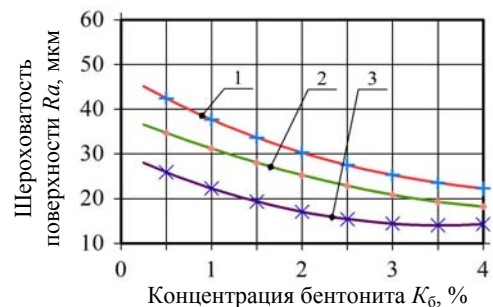


Рис. 4. Зависимость шероховатости обрабатываемого металлоизделия от увеличения концентрации бентонита в составе компонентов рабочей жидкости:
1 – Сталь 45; 2 – Сталь 20; 3 – Сталь 3

Fig. 4. Dependence of roughness of the metal product being processed on an increase in the concentration of bentonite in the components of the working fluid:
1 – Steel 45; 2 – Steel 20; 3 – Steel 3

Фотографии участков поверхности, на которых изучалась морфология пленочных покрытий, представлены на рис. 5a, b. После обработки образцы были высушены на открытом воздухе при температуре $T = 20$ °C в течение 20–24 ч.

Исходя из анализа рис. 5a видно, что на обработанных стальных образцах формируется плотное покрытие, состоящее из отдельных чешуек. Расположенные на рис. 5b участки, обозначенные как позиции 1–4, представляют наглядные результаты процесса очистки.

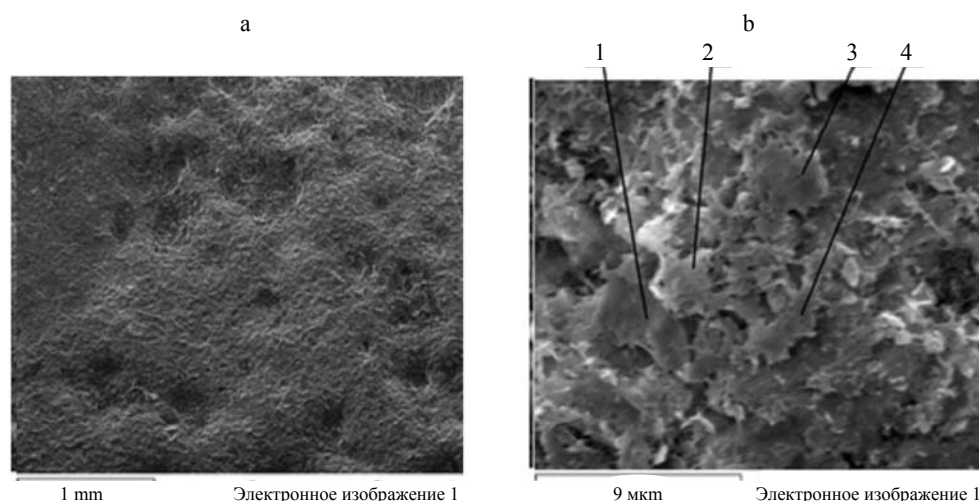


Рис. 5. Внешний вид защитного пленочного покрытия, создаваемого на поверхности образцов после гидроабразивной очистки с использованием в качестве одного из компонентов бентонитовой глины: 1, 2, 3, 4 – чешуйки, основная структурная составляющая сформированного защитного покрытия; а – увеличение $\times 40$; б – увеличение $\times 5000$; материал – Ст3; $K_6 = 3\%$, $K_{II} = 10^{-5}\%$, $K_{к.с} = 2\%$, остальное – вода, $v_{стр} = 185$ м/с

Fig. 5. Outward appearance of the protective film coating, which is created on the surface of the samples following hydro-abrasive cleaning utilizing bentonite clay as one of the components: 1, 2, 3, 4 – scales – the main structural component of the formed protective coating; а – magnification $\times 40$; б – magnification $\times 5000$; material – Steel 3; $K_{6(b)} = 3\%$, $K_{II(p)} = 10^{-5}\%$, $K_{к.с(k.s.)} = 2\%$, the rest is water, $v_{стр(str)} = 185$ m/s

Результаты исследования и их обсуждение

Полученные в ходе лабораторных испытаний результаты (рис. 1–3) свидетельствуют о том, что изменение параметров гидроабразивной обработки ($v_{стр}$, L , t) позволяет достичь шероховатости металлоизделий в диапазоне $Ra = 3,2$ – $12,5$ мкм для проводимых впоследствии операций сварочного производства.

Изменяя концентрацию бентонита в составе компонентов рабочей жидкости ($K_6 = 2$ – 4%), а также при заданных значениях $v_{стр} = 200$ м/с, $d_k = 1$ мм и $L = 200$ мм можно достичь требуемой шероховатости поверхностей в диапазоне $Ra = 20$ – 30 мкм. Это является оптимальным для технологического процесса газопламенного напыления, как показано на рис. 4 (кривая 1).

При увеличении концентрации бентонита в составе компонентов рабочей жидкости (K_6 от $0,5$ до 2%) и при заданных значениях $v_{стр} = 200$ м/с, $d_k = 1$ мм и $L = 200$ мм можно достичь требуемой шероховатости поверхностей в диапазоне $Ra = 30$ – 50 мкм. Это является оптимальным для последующего процесса покраски, как показано на рис. 4 (кривая 1).

Применение новой технологии гидроабразивной обработки приводит к получению очищенных от коррозионных отложений металлических поверхностей с минимальной шероховатостью $Ra = 0,16$ – $0,01$ мкм, как показано на рис. 1–3. Это имеет положительное влияние на коррозионную стойкость деталей. Кроме того, при проведении ГАО формируется долговременное антикоррозионное покрытие (показано на рис. 5), которое сохраняет свои свойства в течение 1 года.

ВЫВОДЫ

1. На основе проведенных экспериментальных исследований разработана новая энергосберегающая технология гидроабразивной обработки, которая позволяет эффективно очищать металлические поверхности от коррозионных отложений и одновременно формировать коррозионно-защитное пленочное покрытие.

2. Применение различных параметров очистки ($v_{стр}$, L , t , K_6) в рамках новой технологии гидроабразивной обработки позволяет получать поверхности с необходимыми значениями шероховатости, что является важным для последующих технологических операций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология струйной гидроабразивной очистки и защиты от коррозии стальных изделий с применением бентонитовой глины / И. В. Качанов [и др.]. Минск: БНТУ, 2016. 167 с.
2. Гидроабразивная технология очистки металлических поверхностей гребных винтов от коррозии / И. В. Качанов [и др.] // Вестник БарГУ. Сер. технических наук. 2021. Вып. 10. С. 51–60.
3. Практическое применение гидроабразивной очистки металлических поверхностей от коррозии при эксплуатации пожарной аварийно-спасательной техники / А. В. Филипчик [и др.] // Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций: методы, технологии, проблемы и перспективы: сб. материалов V Междунар. заочной науч.-практ. конф., Светлая Роща, 25 июня 2021. Светлая Роща: филиал ИПП УГЗ МЧС Беларуси, 2021. С. 102–104.
4. Практическое применение гидроабразивной очистки металлических поверхностей от коррозии / И. В. Качанов [и др.] // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте: сб. материалов республиканской науч.-техн. конф. Минск: БНТУ, 2021. С. 104–108.
5. Агасарян, Р. Р. Струйно-абразивная обработка металлов / Р. Р. Агасарян, Р. Т. Дохинян. Ереван: АтрНИИТИ, 1990. 51 с.
6. Ярошевич, В. К. Коленчатые валы автомобильных двигателей / В. К. Ярошевич, М. А. Белоцерковский, Е. Л. Савич. Минск: БНТУ, 2004. 176 с.
7. Искра, Е. В. Справочник по окраске судов и металлических конструкций / Е. В. Искра, Е. П. Куцевалова. Л.: Судостроение, 1980. 263 с.
8. Маркова, Т. В. Шероховатость поверхности: метод. указания / Т. В. Маркова, И. М. Крыжановская. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. 32 с.
9. Способ создания кавитирующей струи жидкости: пат. ВУ 13312 / И. В. Качанов, В. Н. Яглов, В. К. Недбальский, А. В. Филипчик. Опубл. 30.06.2010.
10. Способ очистки металлических поверхностей: пат. ВУ 21512 / И. В. Качанов, А. Н. Жук, А. В. Филипчик, А. С. Исаенко. Опубл. 30.12.2017.

Поступила 07.12.2023

Подписана к печати 07.02.2024

Опубликована онлайн 31.05.2024

REFERENCES

1. Kachanov I. V., Filipchik A. V., Babich V. E., Zhuk A. N., Ushev S. I. (2016) *Technology of Hydroabrasive Cleaning and Corrosion Protection of Steel Products Using Bentonite Clay*. Minsk, Belarusian National Technical University. 167 (in Russian).
2. Kachanov I. V., Filipchik A. V., Shatalov I. M., Bulyga D. M., Kovalevich V. S., Nedvetsky S. V., Denisov V. A. (2021) Hydro-Abrasive Technology for Cleaning Metal Surfaces of Propellers from Corrosion. *Vestnik BarGU. Ser. Tekhnicheskie Nauki = BarSU. Herald. Series Engineering*, (10), 51–60 (in Russian).
3. Filipchik A. V., Kovalevich V. S., Bychek A. B., Losich A. I., Bontsevich A. A. (2021) Practical Application of Waterjet Cleaning of Metal Surfaces from Corrosion during the Operation of Fire Rescue Equipment. *Preduprezhdenie i Likvidatsiya Chrezvychaynykh Situatsii: Metody, Tekhnologii, Problemy i Perspektivy: Sb. Materialov V Mezhdunar. Zaochnoi Nauch.-Prakt. Konf., Svetlaya Roshcha, 25 iyunya 2021* [Prevention and Response to Emergency Situations: Methods, Technologies, Problems and Prospects: Collection of Materials of the 5th International-Correspondence Scientific and Practical Conference, Svetlaya Roshcha, Branch of the Institute of Retraining and Advanced Qualifications of the University of Civil Protection of the Ministry of Emergencies of the Republic of Belarus June 25, 2021]. Svetlaya Roshcha, 102–104 (in Russian).
4. Kachanov I. V., Shatalov I. M., Filipchik A. V., Nedvetskii S. V., Kovalevich V. S. (2021) Practical Application of Water Jet Cleaning of Metal Surfaces From Corrosion. *Innovatsionnye Tekhnologii v Vodnom, Kommunal'nom Khozyaistve i Vodnom Transporte: Sb. Materialov Respublikanskoi Nauch.-Tekhn. Konf.* [Innovative Technologies in Water, Municipal Services and Water Transport: Collection of Materials of the Republican Scientific and Technical Conference]. Minsk, Belarusian National Technical University, 104–108 (in Russian).
5. Agasaryan R. R., Dohinyan R. T. (1990) *Jet-Abrasive Processing of Metals*. Yerevan, Publishing House of AtrNIINTI, 1990. 51 p.
6. Yaroshevich V. K., Belotserkovsky M. A., Savich E. L. (2004) *Crankshafts of Automobile Engines*. Minsk, Belarusian National Technical University. 176 (in Russian).
7. Iskra E. V., Kutsevalova E. P. (1980) *Guide to Painting Boats and Metal Structures*. Leningrad, Sudostroenie Publ. 263 (in Russian).
8. Markova T. V., Kryzhanovskaya I. M. (2006) *Surface Roughness: Methodological Guidelines*. Saint Petersburg, Publishing House of Polytechnical University. 32 (in Russian).
9. Kachanov I. V., Yaglov V. N., Nedbalsky V. K., Filipchik A. V. (2010) *Method for Creating Cavitating Jet of Liquid*. Patent BY 13312 (in Russian).
10. Kachanov I. V., Zhuk A. N., Filipchik A. V., Isaenko A. S. (2017) *Method for Cleaning Metal Surfaces*. Patent BY 21512 (in Russian).

Received: 07.12.2023

Accepted: 07.02.2024

Published online: 31.05.2024