

УДК 62-757.73

И. В. Качанов¹, доктор технических наук, профессор;**А. В. Филипчик**², кандидат технических наук;**И. М. Шаталов**¹; **Д. М. Бульга**²; **В. С. Ковалевич**¹; **С. В. Недвецкий**²; **В. А. Денисов**¹¹Белорусский национальный технический университет, пр-т Независимости, 65,

220013 Минск, Республика Беларусь, +375 (017) 293 96 13

²Филиал «Институт переподготовки и повышения квалификации» государственного учреждения образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», 202135 д. Светлая Роща, 1, Борисовский район, Минская область, Республика Беларусь, +375 (17) 777 27 74

ГИДРОАБРАЗИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ ОТ КОРРОЗИИ

В статье анализируются современные технологии для очистки металлических поверхностей от коррозии, даны их преимущества и недостатки. Приведены результаты исследований, проведенных авторами, по очистке металлической поверхности гребного винта от коррозии с использованием технологии струйной гидроабразивной обработки с применением бентонитовой глины. Установлено наличие защитного пленочного покрытия, сформированного в процессе струйной гидроабразивной обработки.

Ключевые слова: технология; гидроабразив; струя; очистка; металл; коррозия; бентонитовая глина.

Рис. 8. Библиогр.: 12 назв.

I. V. Kachanov¹, Doctor of Technical Sciences, Professor;**A. V. Filipchik**², PhD in Technical Sciences;**I. M. Shatalov**¹; **D. M. Bulyga**²; **V. S. Kovalevich**¹; **S. V. Nedvetsky**²; **V. A. Denisov**¹¹Belarusian National Technical University, 65 Independence Ave.,

220013 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (017) 293 96 13

²Branch “Institute for Retraining and Advanced Studies” of the State Educational Institution

“University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus”, 202135 Svetlaya Roscha, 1, Borisovsky dist., Minsk reg., the Republic of Belarus, +375 (17) 777 27 74

HYDRO-ABRASIVE TECHNOLOGY FOR CLEANING METAL SURFACES OF PROPELLERS FROM CORROSION

The article analyzes modern technologies for cleaning metal surfaces from corrosion, their advantages and disadvantages are given. The results of the research conducted by the authors on cleaning the metal surface of the propeller from corrosion using the technology of water jet treatment using bentonite clay are presented. The presence of a protective film coating formed during the processing the jet HAC has been established.

Key words: technology; hydro-abrasive; jet; cleaning; metal; corrosion; bentonite clay.

Fig. 8. Ref.: 12 titles.

Введение. При эксплуатации машин и механизмов отмечается значительный рост потерь от коррозионных разрушений, что требует резкого улучшения мер противокоррозионной защиты. Исследования, приведенные рядом авторов, показывают, что весьма эффективно для борьбы с коррозией может быть использована технология гидроабразивной очистки (далее — ГАО), обеспечивающая наряду с очисткой формирование защитного пленочного покрытия с достаточно высокой адгезионной прочностью [1—4].

Практически каждый технологический процесс в современном машиностроительном производстве включает операцию очистки деталей от коррозии, различных загрязнений. Ме-

няющиеся требования к этим процессам неразрывно связаны с модернизацией оборудования для очистки металлических поверхностей. Некоторые новые образцы представляются на международных промышленных выставках по очистке. Например, в 2019 году на выставке в Штутгарте (Германия) фирма Mafac представила моечную установку Java с векторным движением деталей; фирма BVL — установку Libelle Product для точного позиционирования очищаемых деталей; фирма Wigol — специальное средство Booster TE для удаления ржавчины и окалины [5].

Аналитический обзор существующих методов очистки металлических поверхностей от коррозии. В настоящее время за рубежом и в Республике Беларусь для очистки металлических поверхностей от коррозии используются технологии, представленные на рисунке 1.

Выбор того или иного способа очистки зависит от объема выполняемых работ, типа коррозии, размеров очищаемых изделий.

Механический способ предусматривает очистку ручным и механизированным инструментом. При выполнении объема работ, связанного с очисткой металлической поверхности от коррозии, в качестве ручного инструмента могут использоваться скребки, металлические щетки, шарошки и т. п. [1; 3].

В целях повышения производительности очистки механическим способом используется механизированный инструмент — пневматические и электрические зачистные машины. Рабочими органами таких машин являются металлические щетки, иглофрезы, шлифовальные круги и т. п. Для одновременной очистки от коррозии и старых лакокрасочных покрытий используют иглофрезы или щётки различных модификаций [3].

Производительность процесса очистки металлических поверхностей от коррозии с помощью механизированного инструмента составляет $2 \div 10 \text{ м}^2 / \text{ч}$, а энергоёмкость — $0,5 \text{ кВт ч} / \text{м}^2$ [3; 6].

Наряду с достоинствами указанный способ очистки имеет ряд недостатков [3; 6]:

- применение ручного труда;
- образование замкнутой кинематической системы инструмента с обрабатываемой поверхностью;
- влияние тепловыделения и вибрации на качество обрабатываемой поверхности, которое ухудшается в связи с проявлением таких дефектов на поверхности изделия, как прижоги, трещины, следы вибрации (огранка).

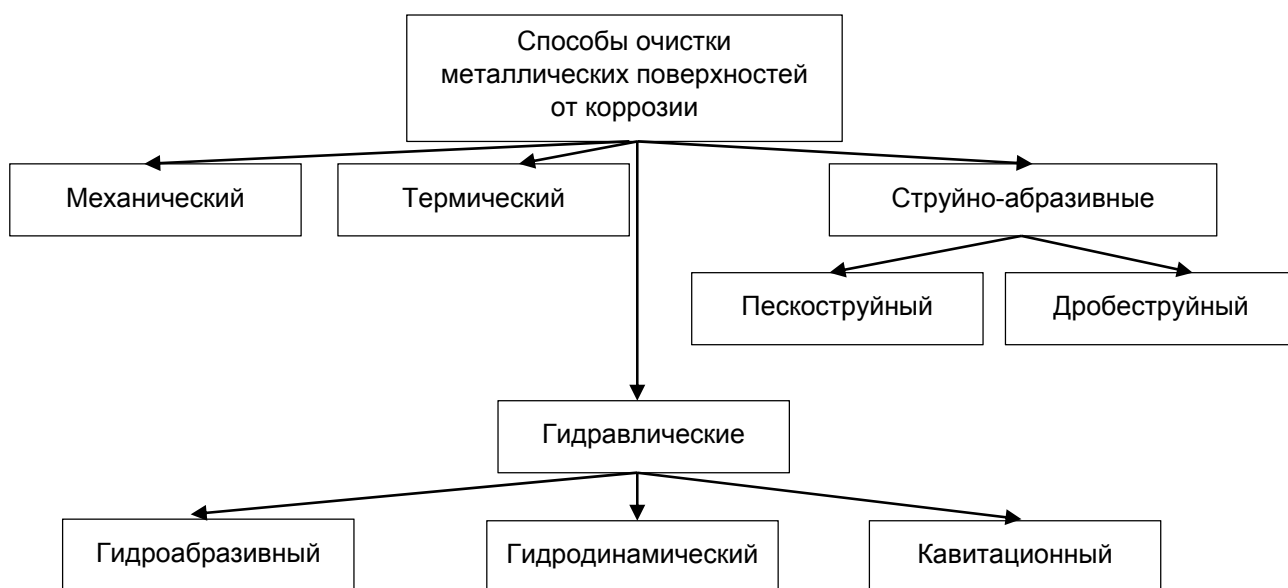


Рисунок 1. — Схема применяемых способов для очистки металлических поверхностей от коррозии [1; 3]

Необходимо отметить, что при очистке металлических поверхностей от коррозии механизированным инструментом на поверхности очищаемого изделия остается до 250 г продуктов коррозии на 1 м^2 [1; 3; 6].

Термические способы очистки поверхностей от коррозии основаны на нагреве пламенем до температуры их сгорания.

Для исключения коробления и температурной деформации данная технология применяется для металлов с толщиной не менее 6 мм. Производительность очистки составляет $1 \div 1,5 \text{ м}^2 / \text{ч}$ [1; 3].

Следует отметить, что ряд существенных недостатков (невозможность удаления продуктов коррозии с тонколистовой стали; необходимость дополнительной очистки металлической поверхности от окалины, а воздуха — от вредных продуктов сгорания) ограничивает применение термических способов [1; 3]. Сложность применяемого оборудования и высокие требования по технике безопасности, экологии ограничивают использование этих способов на машиностроительных предприятиях.

Струйно-абразивные способы очистки находят широкое применение при очистке поверхностей от коррозии, нагара, окалины, старых лакокрасочных покрытий. В качестве абразива используется кварцевый песок, корунд, карбид кремния, стальная или чугунная дробь, стеклянная дробь, косточковая крошка, сухой лёд и другие материалы [1; 3].

На международной выставке Parts2clean 2019 (Германия) было представлено различное оборудование для сухой очистки обработанных деталей с использованием струи замороженного CO_2 . Фирма ACP Systems предложила оборудование Quattro Clean System для очистки перед нанесением лака на детали из синтетических материалов. Очистку деталей осуществляют струей замороженной двуокиси углерода с температурой $78,5 \text{ }^\circ\text{C}$, подаваемой в рабочую зону через струеформирующее устройство [7].

Как показывает мировой промышленный опыт, из различных струйно-абразивных способов достаточно широкое распространение получили пескоструйная и дробеструйная очистка металлических поверхностей от коррозии.

Гидроабразивная очистка предусматривает использование в струйном потоке жидкости таких абразивных материалов как стекло, пемза, кварц, гранит, тальк, известняк, глина [1; 3].

При ГАО на поверхности обрабатываемой детали образуется жидкостная пленка, заполняющая неровности поверхности; абразивные частицы при ударе по выступающим неровностям не преодолевают сопротивления этой пленки и поэтому воздействуют только на выступы; частицы же, которые ударяют по впадинам, должны преодолеть сопротивление жидкостной пленки, поэтому эффективность их воздействия невелика. Вследствие этого происходит постепенное уменьшение шероховатости обрабатываемой поверхности до $Ra = 0,05 \div 1 \text{ мкм}$. Производительность ГАО составляет $5 \div 6 \text{ м}^2 / \text{ч}$ [1; 3].

К числу достоинств гидроабразивного способа можно отнести:

- отсутствие пылевыведения в зоне очистки;
- устранение проблемы разупрочнения поверхности за счет теплоотвода повышенной температуры в зоне обработки посредством воды;
- отсутствие зависимости от исходной шероховатости обрабатываемого материала;
- повышенный срок использования абразива (в 2-3 раза выше, чем при пескоструйной обработке) за счет демпфирующего действия рабочей жидкости.

Оборудование для реализации технологии ГАО предлагается фирмой WardJet LLC и представляет установку (X-1530) для быстрой и точной ГАО с соответствующим программным обеспечением для автоматизации операций загрузки/выгрузки и очередности обработки деталей. Установка оснащается специальным насосом, подающим гидроабразивную струю под давлением 420 МПа, что позволяет эффективно и точно обрабатывать стекло, сталь, пластики и различные сплавы [8].

Гидродинамический способ очистки предусматривает использование струй воды низкого (до 1 МПа), среднего ($1 \div 5$ МПа) и высокого давления ($5 \div 60$ МПа) [1; 3].

Основным препятствием на пути применения высоконапорных гидродинамических установок является их высокая стоимость и значительные энергозатраты. Для создания высокого давления приходится использовать дорогое и громоздкое энергоемкое оборудование.

Кавитационный способ очистки основан на использовании эффекта схлопывания кавитационных парогазовых микропузырьков. При схлопывании кавитационного микропузырька в локальном объеме вблизи и внутри него возникают поля высоких давлений (до 1 000 МПа) и температур (1 000÷2 000 °С). При коллапсе пузырька в жидкости генерируются волны разрежения/сжатия, способные на обработанной поверхности сформировать кумулятивные микроструи со скоростями движения в 100÷520 м / с [1; 3].

Очистка от коррозии кавитационными струями является эффективным способом обработки поверхностей, а присутствие кавитационных пузырьков усиливает эрозионное воздействие [1; 3].

Существенными недостатками рассмотренных гидравлических способов очистки являются: быстрая повторная коррозия очищенных влажных поверхностей; необходимость обязательного пассивирования поверхности; повышенный износ струеформирующих устройств.

Анализ вышеуказанных современных технологий позволил разработать на кафедре «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика» БНТУ новый отечественный способ борьбы с коррозией с применением бентонитовой глины, кальцинированной соды, полиакриламида, обеспечивающий наряду с очисткой формирование защитного пленочного покрытия с высокой адгезионной прочностью. Следует отметить, что разработанная технология ГАО обладает патентной новизной [9—12].

Материалы и методы исследования. Для экспериментального исследования, а также для оценки практической применимости новой технологии ГАО в качестве образца был выбран гребной винт (марка материала — ВСт3сп4), применяемый в роли движителя на буксире-толкаче проекта 861У.

Гребной винт до обработки (рисунок 2, а), имевший серьезный износ от биологической и химической коррозии основного металла, не мог обладать проектными качествами, что приводило к потере ходкости судна, а следовательно, снижению КПД пропульсивного комплекса и повышенному расходу топлива.

В ходе экспериментальных исследований в лабораторных условиях гребной винт был обработан с помощью новой технологии — струйной ГАО (рисунок 2, б). После обработки было обнаружено и зафиксировано на поверхности гребного винта пленочное покрытие (рисунок 3), которое далее было исследовано на морфологию и химический состав.



Рисунок 2. — Внешний вид лопастей гребного винта:
а — поверхность до обработки; б — обработанная поверхность

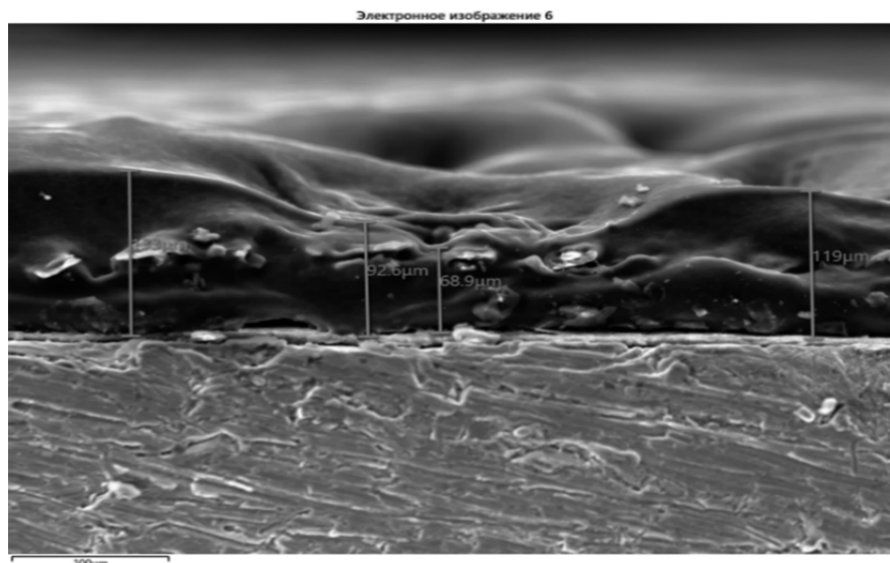
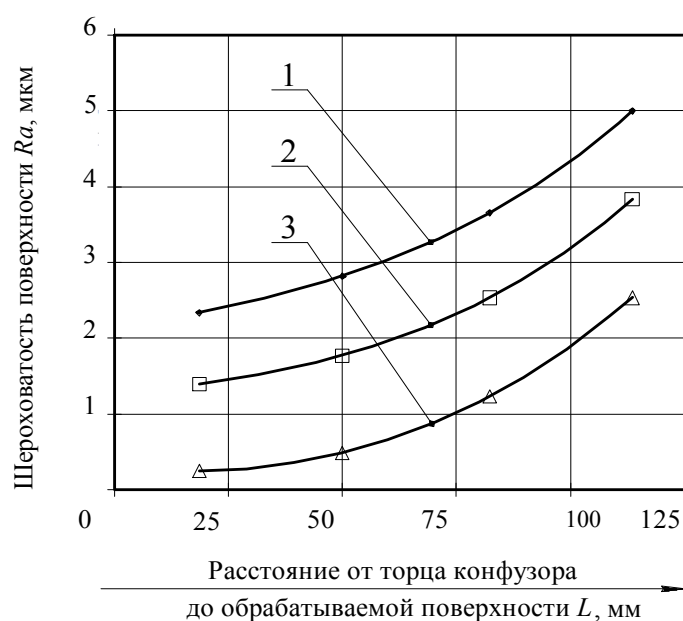


Рисунок 3. — Пленочное покрытие, образованное после обработки струйной ГАО на поверхности гребного винта

Для установления химического состава пленочного покрытия на поверхности гребного винта в нескольких точках производился рентгеновский энергодисперсионный спектрометрический анализ с учетом Fe и без учета Fe. Анализ полученных данных позволил установить, что в состав пленочного покрытия входят те же элементы, которые составляют химическую основу компонентов рабочей жидкости (бентонитовая глина, кальцинированная сода, полиакриламид).

Одними из важных морфологических характеристик, влияющих на пропульсивные качества гребного винта, являются шероховатость и микротвердость засасывающей и нагнетательной поверхностей. На рисунке 4 представлено влияние расстояния L от конфузора до обрабатываемой поверхности на шероховатость поверхности Ra при изменении давления на входе в конфузор $p_{вх}$ от 17 до 30 МПа.



1 — $p_{вх} = 17$ МПа; 2 — $p_{вх} = 22$ МПа; 3 — $p_{вх} = 30$ МПа;
 $K_б = 3\%$; $K_п = 10^{-5}\%$; $K_{к.с} = 2\%$; остальное — вода;
 материал — ВСтЗсп4

Рисунок 4. — Зависимость шероховатости Ra от расстояния L

Исследования морфологических характеристик гребного винта проводились в испытательном центре государственного научного учреждения «Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа» (Минск). При проведении испытаний шероховатость определялась на профилометре-профилографе модели 252 типа А1. Измерение микротвердости проводилось на микротвердомере Micromet-2. Адгезионная прочность измерялась методом склерометрии.

Результаты исследования и их обсуждение. Как следует из рисунка 4, шероховатость обработанной поверхности Ra увеличивается от 0,2 до 5,5 мкм при изменении L от 20 до 110 мм. Увеличение Ra объясняется тем, что силовое воздействие уменьшается по мере удаления обрабатываемой поверхности от выходного сечения конфузора за счет раскрытия факела струи.

На рисунке 4 видно, что при давлении на входе в конфузор $p_{вх} = 30$ МПа и расстоянии L от 15 до 50 мм значения шероховатости $Ra = 0,2 \div 0,4$ мкм, что согласно ГОСТ 8054-81 является оптимальным показателем для поверхности гребного винта.

На рисунке 5 представлена зависимость изменения шероховатости поверхности Ra от скорости струи рабочей жидкости $V_{стр}$.

Из анализа кривых на рисунке 5 следует, что шероховатость обработанной поверхности Ra уменьшается от 6 до 0,2 мкм при увеличении $V_{стр}$ от 15 до 280 м / с. Уменьшение Ra объясняется тем, что с увеличением скорости струи рабочей жидкости $V_{стр}$ происходит увеличение силового воздействия струи рабочей жидкости на обрабатываемую поверхность. При изменении скорости струи от 200 до 250 м / с ($L = 20$ мм) шероховатость изменяется в диапазоне $Ra = 0,2 \div 0,4$ мкм, что, согласно ГОСТ 8054-81, является оптимальным показателем для поверхности гребного винта.

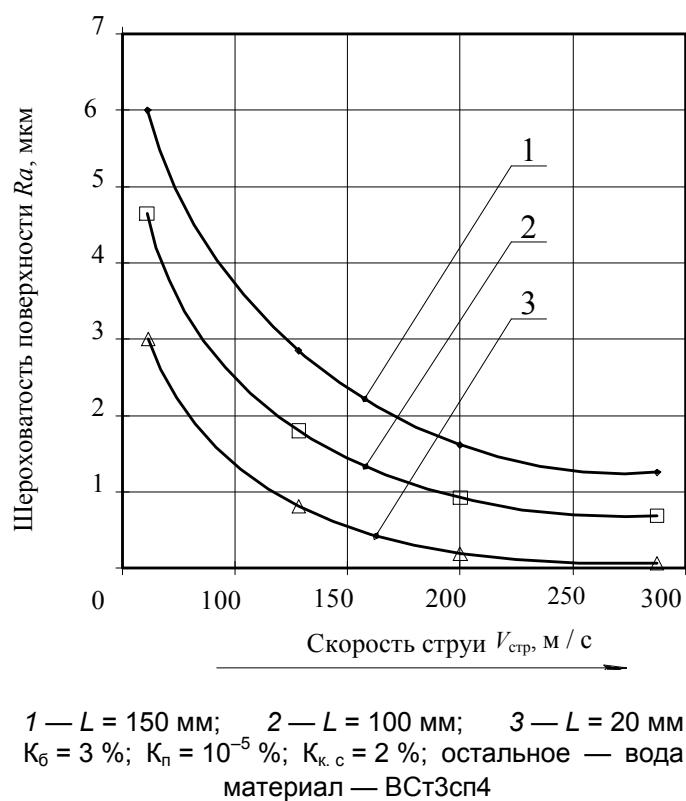


Рисунок 5. – Зависимость шероховатости Ra от скорости струи $V_{стр}$

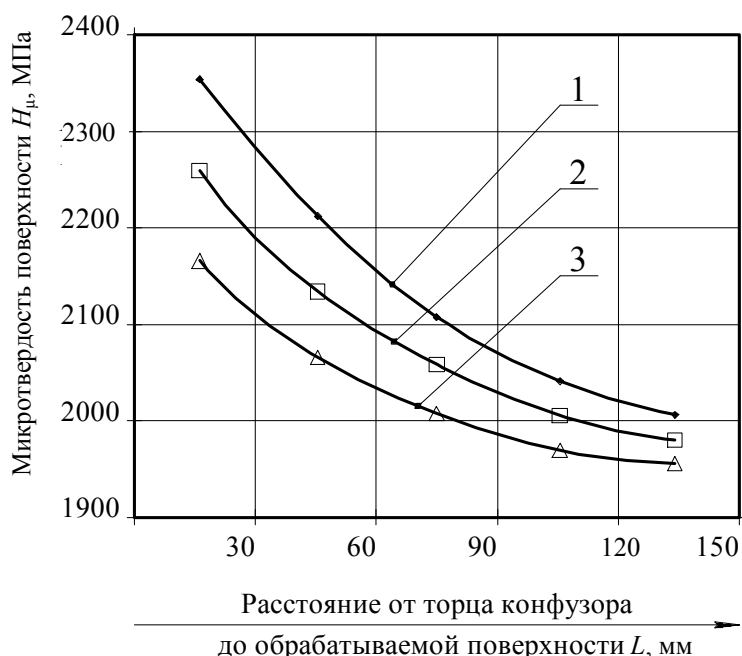
Наряду с исследованиями влияния гидроабразивной очистки на шероховатость также изучалось влияние струйной обработки на микротвердость H_{μ} (МПа) поверхности. На рисунке 6 представлена зависимость влияния расстояния L от конфузора до обрабатываемой поверхности на микротвердость поверхности H_{μ} при изменении давления на входе в конфузор.

Как следует из рисунка 6, микротвердость обработанной поверхности H_{μ} уменьшается от 2 350 до 1 950 МПа при изменении L от 15 до 135 мм. Уменьшение H_{μ} объясняется тем, что силовое воздействие уменьшается по мере удаления обрабатываемой поверхности от конфузора.

На рисунке 7 представлена зависимость изменения микротвердости от скорости струи рабочей жидкости $V_{стр}$.

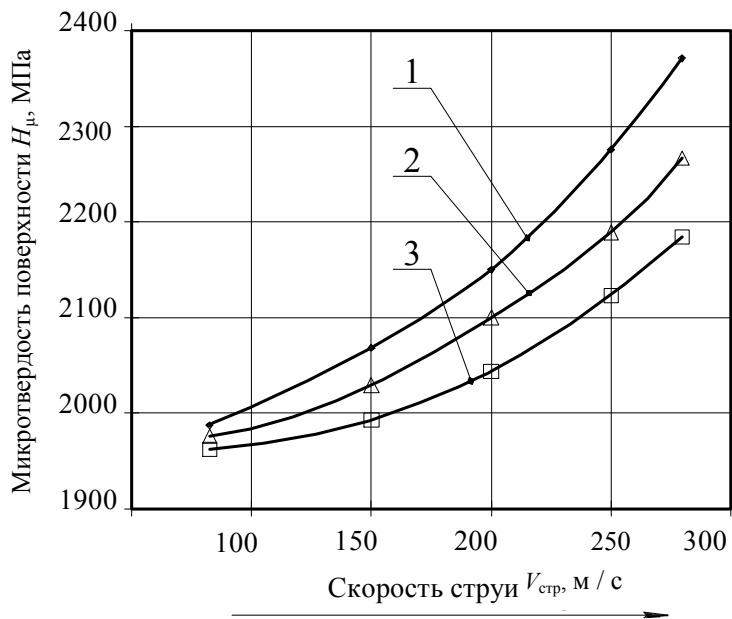
Из анализа данных рисунка 7 видно, что микротвердость обработанной поверхности увеличивается от 1 970 до 2 360 МПа при увеличении скорости струи от 70 до 270 м / с. Микротвердость возрастает в среднем на 25÷30 % по отношению к исходной величине ($H_{\mu 0} = 1\ 800 \div 1\ 900$ МПа). Увеличение H_{μ} объясняется увеличением наклепа обработанной поверхности, что связано с ростом кинетической энергии струи рабочей жидкости при возрастании скорости $V_{стр}$. При этом с увеличением расстояния L до обрабатываемой поверхности от 20 до 150 мм при скорости струи 100 м / с отмечается практически незначительное уменьшение H_{μ} от 2 000 до 1 960 МПа. При скоростях 250÷270 м / с снижение микротвердости с ростом расстояния L отмечается более существенное — от 2 320 до 2 140 МПа, т. е. в среднем на 10÷12 %.

Одним из основных параметров при исследовании пленочного покрытия является его адгезионная прочность, определяемая в момент разрушения индентором (рисунок 8).



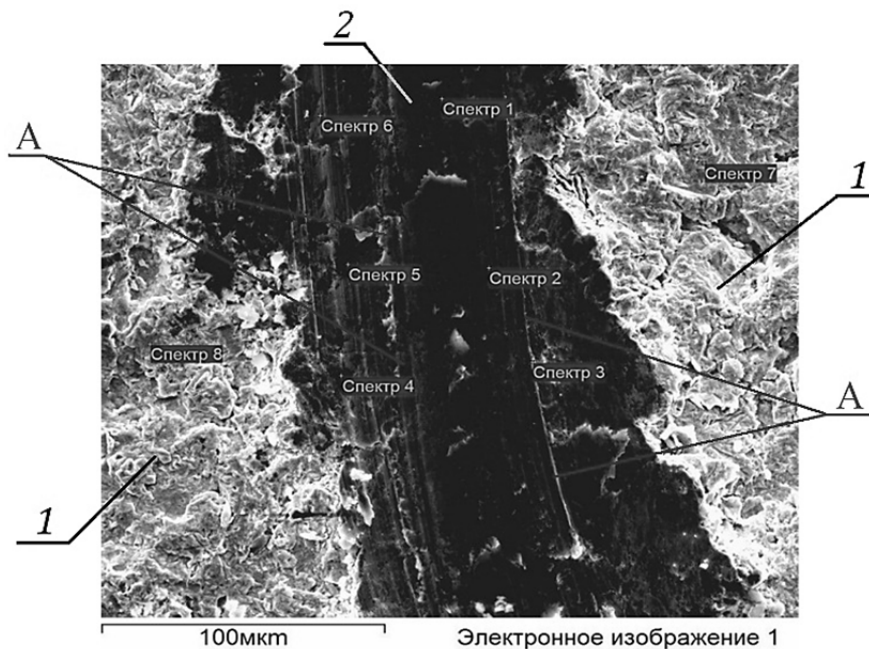
1 — $p_{вх} = 18$ МПа; 2 — $p_{вх} = 23$ МПа; 3 — $p_{вх} = 32$ МПа;
 $K_b = 3$ %; $K_n = 10^{-5}$ %; $K_{к.с} = 2$ %; остальное — вода;
 материал — ВСтЗсп4

Рисунок 6. — Зависимость микротвердости поверхности H_{μ} от расстояния L



1 — $L = 20$ мм; 2 — $L = 70$ мм; 3 — $L = 150$ мм; $K_b = 3\%$;
 $K_n = 10^{-5}\%$; $K_{к.с} = 2\%$; остальное — вода; материал — ВСтЗсп4

Рисунок 7. — Зависимость микротвердости поверхности H_{μ} от скорости струи $V_{стр}$



1 — участки поверхности гребного винта с неразрушенным пленочным покрытием; 2 — вид участка поверхности гребного винта после разрушения индентором пленочного покрытия

Рисунок 8. — Внешний вид защитного пленочного покрытия, разрушенного на очищенной поверхности гребного винта после проведения испытаний на адгезионную прочность

При ширине царапины 105 мкм и критической нагрузке 0,5 Н адгезионная прочность пленочного покрытия составила 28 МПа. Рисунок 8 подтверждает наличие пленочного покрытия на участках 1 обработанной поверхности гребного винта. Здесь же видны следы А, которые образовались при перемещении индентора в процессе разрушения пленочного покрытия на участке 2 поверхности гребного винта.

Эффективность метода гидроабразивной очистки, а также стойкость обработанной поверхности к образованию очагов повторной коррозии была подтверждена с помощью визуального наблюдения. Изменения, происходившие на поверхности обработанного гребного винта во времени, фиксировались последовательным фотографированием (см. рисунок 2, б). Визуальное наблюдение позволило фиксировать изменение внешнего вида поверхности металла, при этом отмечено, что в течение как минимум трех недель после обработки металлическая поверхность гребного винта сохраняла матовый цвет, очаги возникновения повторной коррозии отсутствовали.

Заключение. Проанализированы преимущества и недостатки основных технологий очистки металлических поверхностей от коррозии, применяемых как за рубежом, так и в Республике Беларусь. Проведенный анализ позволил разработать новый отечественный способ борьбы с коррозией.

Приведены результаты очистки поверхности гребного винта от коррозии по новой технологии — ГАО. Установлено наличие защитного пленочного покрытия, в состав которого входят компоненты рабочей жидкости, которой производилась обработка. Защитное покрытие обладает высокой адгезионной прочностью и оптимальным показателем шероховатости поверхности.

Список цитируемых источников

1. Технология судостроения / В. Л. Александров [и др.] ; под общ. ред. А. Д. Гармашева. — СПб. : Профессия, 2003. — 341 с.
2. *Неверов, А. С.* Коррозия и защита материалов : учеб. пособие / А. С. Неверов, Д. А. Родченко, М. И. Цырлин. — Минск : Высш. шк., 2007. — 221 с.
3. *Филипчик, А. В.* Технология струйной гидроабразивной очистки и защиты стальных изделий от коррозии с использованием в составе рабочей жидкости бентонитовой глины : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.07 / А. В. Филипчик ; Белорус. нац. техн. ун-т. — Минск, 2013. — 146 л.
4. Влияние поверхностной пластической деформации, вызванной дробеструйной обработкой, на коррозионное поведение низколегированной стали / Kovaci H. [etc.] // The effect of surface plastic deformation produced by shot peening on corrosion behavior of a low-alloy steel. *Surface and Coat. Technol.* — 2019. — С. 78—86.
5. Itasse Stephane. Международная выставка по промышленной очистке Parts2clean. Dafur lohnt sich die Parts2clean // *Maschinenmarkt.* — 2019. — V. 125. — С. 10—13.
6. *Димов, Ю. В.* Производительность и качество обработки плоскостей торцевыми полимерно-абразивными щетками / Ю. В. Димов, Д. Б. Подашев // *Металлообработка.* — 2019. — № 5. — С. 3—10.
7. Очистка поверхностей деталей. Eine trockene Angelegenheit // *Ind.-Anz.* — 2019. — № 28. — С. 52—55.
8. Станок для гидроабразивной обработки // *Waterjet series bundled with multi-touch software. Mod. Mach. Shop.* — 2019. — V. 92, № 4. — С. 155.
9. Способ создания кавитирующей струи жидкости : пат. 13312 Респ. Беларусь : МКИ В 08В 3/04, В 63В 59/00 / И. В. Качанов, В. Н. Яглов, В. К. Недбальский, А. В. Филипчик ; дата публ.: 30.06.2010.
10. Способ создания кавитирующей струи жидкости : пат. 14239 Респ. Беларусь : МКИ В 08В 3/04, В 63В 59/00 / И. В. Качанов, В. К. Недбальский, И. М. Шаталов, А. В. Филипчик ; дата публ.: 30.04.2011.
11. Способ очистки металлических поверхностей : пат. 21512 Респ. Беларусь : МКИ В 08В 3/02, В 08В 3/04 / И. В. Качанов, А. Н. Жук, А. В. Филипчик, А. С. Исаенко ; дата публ.: 30.12.2017.
12. Состав рабочей жидкости для гидродинамической очистки металлических поверхностей от коррозии перед лазерной резкой : пат. 21455 Респ. Беларусь : МКИ В 08В 3/02, В 08В 3/04 / И. В. Качанов, А. Н. Жук, В. Н. Яглов, А. В. Филипчик ; дата публ.: 30.10.2017.