

Технология реверсивно-струйной очистки стальных листов от коррозии перед лазерной резкой

Инж. А. Н. Жук¹⁾, докт. техн. наук, проф. И. В. Качанов¹⁾, канд. техн. наук А. В. Филипчик¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2017

Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Качество очистки поверхностей от коррозии влияет на эффективность реализации целого ряда технологических процессов. Реверсивно-струйная очистка с использованием в составе рабочей жидкости бентонитовой глины обеспечивает формирование антикоррозионного защитного покрытия со светопоглощающими свойствами на очищенной поверхности и предотвращает образование повторной коррозии. Представлены результаты исследования влияния параметров реверсивно-струйной очистки стальных листов на качество очищенной поверхности перед лазерной резкой. Приведены режимы обработки, используемые составы рабочей жидкости, а также свойства образовавшегося защитного пленочного покрытия на очищенной поверхности. Рассмотрены топография, морфология и химический состав данного покрытия с применением комплексных металлографических, рентгеноструктурных и электронно-микроскопических исследований. Экспериментальные работы для оценки влияния качества сформированной поверхности на эффективность процесса лазерной резки выполняли на комплексе лазерной резки (относится к газовым лазерам) с выходной непрерывной мощностью 2,5/4,0 кВт. Для этого были подготовлены образцы размерами 120×120 мм из стали Ст3пс толщиной от 3 до 10 мм. Анализ результатов показал, что применение реверсивно-струйной очистки обеспечивает повышение скорости лазерной резки в среднем на 10–20 %. В ходе исследований установлены оптимальные режимы очистки: расстояние от сопла до очищаемой поверхности, скорость струи, давление. Выявлено, что на всей очищенной поверхности образцов, обработанных после сушки рабочей жидкостью на основе воды с концентрациями бентонитовой глины и кальцинированной соды, формируется защитное пленочное покрытие толщиной примерно 5–7 мкм. Химическую основу пленочного покрытия составляют элементы, входящие в состав бентонитовой глины, являющейся основной компонентой рабочей жидкости.

Ключевые слова: сталь, поверхность, струя, рабочая жидкость, давление, шероховатость, микротвердость, адгезионная прочность, пленочное покрытие

Для цитирования: Жук, А. Н. Технология реверсивно-струйной очистки стальных листов от коррозии перед лазерной резкой / А. Н. Жук, И. В. Качанов, А. В. Филипчик // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 3. С. 232–241. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-232-241

Technology of Reverse-Blast Corrosion Cleaning of Steel Sheets Prior to Laser Cutting

A. N. Zguk¹⁾, I. V. Kachanov¹⁾, A. V. Filipchik¹⁾

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

Abstract. Quality of surface cleaning against corrosion influences on efficiency in realization of a number of technological processes. While using bentonite clays in power fluid reverse-blast cleaning ensures formation of anticorrosion protective coating with light absorbing properties on the cleaned surface and prevents formation of the repeated corrosion. The paper

Адрес для переписки

Жук Андрей Николаевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-76-77
hidrokaf@bntu.by

Address for correspondence

Zguk Andrey N.
Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-76-77
hidrokaf@bntu.by

presents results of the investigations pertaining to influence of reverse-blast cleaning parameters of steel sheets on quality of the cleaned surface prior to laser cutting. Processing conditions, applied compositions of power fluid and also properties of the protective film coatings on the cleaned surface have been given in the paper. The paper considers topography, morphology and chemical composition of the given coating while applying complex metal micrographic, X-ray diffraction and electronic and microscopic investigations. A complex of laser cutting (refer to gas lasers) with output continuous capacity of 2.5/4.0 kW has been applied for experimental works to evaluate influence of the formed surface quality on efficiency of laser cutting process. Specimens having dimension 120×120 mm, made of steel Ст3пс, with thickness from 3 to 10 mm have been prepared for the experiments. An analysis has shown that the application of reverse-blast cleaning ensures higher speed in laser cutting by a mean of 10–20 %. The investigations have made it possible to determine optimum cleaning modes: distance from a nozzle to the surface to be cleaned, jet velocity, pressure. It has been revealed that after drying of the specimens processed by power fluid based on water with concentrations of bentonite clay and calcined soda a protective film coating with thickness of some 5–7 μm has been formed on the whole cleaned specimen surfaces. Chemical base of the coating has been formed by the elements which are included in the composition of bentonite clay being the basic component of the power fluid.

Keywords: steel, surface, jet, power fluid, pressure, roughness, micro-hardness, adhesion strength, film coating

For citation: Zguk A. N., Kachanov I. V., Filipchik A. V. (2017) Technology of Reverse-Blast Corrosion Cleaning of Steel Sheets Prior to Laser Cutting. *Science and Technique*. 16 (3), 232–241. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-232-241 (in Russian)

Введение

Для современного машиностроительного производства Республики Беларусь характерно отсутствие собственной сырьевой базы, результатом чего является существенная зависимость от импортных материальных ресурсов, поставляемых по мировым ценам. При таких условиях работы эффективность производства может быть достигнута за счет экономии и использования энерго- и ресурсосберегающих технологий, обеспечивающих получение высококачественной и конкурентоспособной продукции [1–10]. Эффективность реализации целого ряда технологических процессов напрямую зависит от качества очистки поверхностей от коррозии. Так, для подготовки стальных листов под лазерную резку (ЛР) (в настоящее время на промышленных предприятиях Беларуси насчитывается порядка 300 комплексов, на которых ежегодно разрезается более 80 тыс. т листовой стали) необходимо после очистки от коррозии иметь высококачественную поверхность с шероховатостью $Ra = 0,4–1,0$ мкм, с минимальным уровнем упрочнения (микротвердость H_{μ} после обработки по сравнению с исходным значением $H_{\mu 0}$ должна находиться в пределах $H_{\mu} = (1,5–1,6)H_{\mu 0}$) и низкой отражательной способностью [11, 12]. Однако обеспечение такого качества поверхности экономически затратно, требует значительного количества расходных материалов (чугунная, стальная дробь), участия в работе высококвалифицированного персонала.

Исследования, проведенные в лаборатории кафедры «Кораблестроение и гидравлика» БНТУ, показали, что весьма экономично и с гораздо меньшими затратами мощности можно подготовить листовые стальные материалы к последующей ЛР, применяя для удаления продуктов коррозии реверсивно-струйную очистку (РСО), основанную на струйном воздействии рабочих жидкостей на обрабатываемую поверхность. При этом в качестве рабочих жидкостей используются водные составы с добавками речного песка – на начальном этапе очистки и бентонитовой глины – на завершающем. При такой последовательности обработки листовых материалов на очищенной поверхности формируется микронеровность порядка 2–4 мкм, покрытая антикоррозионным защитным слоем, который имеет химсостав бентонитовой глины и характеризуется низкой отражательной способностью, что актуально при ЛР. Испытания на лазерных комплексах, относящихся по типу к газовым лазерам, показали повышение скорости ЛР для образцов, обработанных по указанной технологии, на 10–20 % по сравнению, например, с материалами, очищенными традиционными (дробе- и пескоструйными) способами.

Основная часть

Как уже отмечалось, для подготовки стальных листов к ЛР использовали технологию РСО, основанную на струйном воздействии рабочей жидкости на обрабатываемую поверхность. Схематично струйное устройство, предназ-

наченное для реализации РСО, представлено на рис. 1 [13]. В нем имеется конусное сопло 1, установленное соосно в стакане 2, который через уплотнение 3 плотно прижимается к обрабатываемой поверхности 4. Расстояние L между поверхностью и соплом регулируется путем перемещения последнего в радиальных опорах 5.

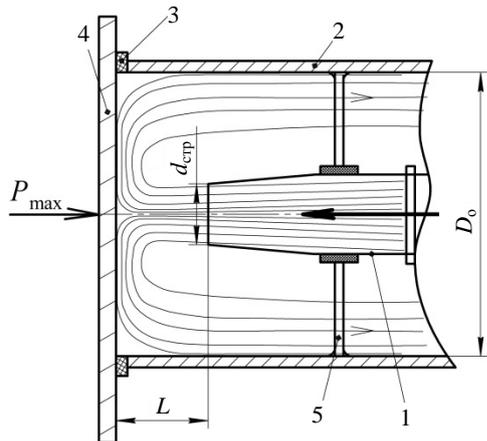


Рис. 1. Схема струйного устройства для реализации процесса реверсивно-струйной очистки

Fig. 1. Scheme of blast device for realization of reverse-blast cleaning

При подключении данного устройства к насосной установке струйный поток рабочей жидкости, проходящий через сопло, после взаимодействия с обрабатываемой поверхностью разворачивается на 180° относительно своего первоначального движения. Этот разворот обуславливает возникновение реактивной силы, которая, складываясь с силой от воздействия струи, приводит к увеличению максимальной силы струйного воздействия P_{\max} в 1,5–1,75 раза (теоретически – в два раза) по сравнению с традиционной схемой очистки, когда струя после взаимодействия с поверхностью растекается под углом 90° по отношению к последней. За счет повышенного силового воздействия при неизменной подаче для данной конструкции РСО [13] характерны снижение мощности на 30–50 % и увеличение производительности на 30–40 % по сравнению с традиционными струйными методами очистки.

В [14, 15] в результате решения вариационной задачи по установлению минимальной мощности обработки определено, что минимальная сила разрушения слоя коррозии на обрабатываемой поверхности отмечается (при прочих равных параметрах – давлении на входе

в сопло p_c , расстоянии L от сопла до обрабатываемой поверхности) при коэффициенте обжатия струи $\lambda = 0,063$. Коэффициент обжатия струи характеризует оптимальные соотношения (с точки зрения мощности, затраченной на обработку) между диаметром полости D_o и диаметром струи $d_{\text{стр}}$ на выходе из сопла (рис. 1) и определяется по формуле

$$\lambda = \frac{d_{\text{стр}}}{D_o - d_{\text{стр}}}, \quad (1)$$

где $d_{\text{стр}}$ – диаметр струи, принятый равным диаметру сопла, мм; D_o – то же цилиндрической полости, используемой для прохода реверсивной струи, мм.

Для проведения экспериментальных исследований процесса РСО стальных листовых материалов был разработан экспериментальный стенд, представленный на рис. 2.

Работа на стенде осуществлялась следующим образом. При включении насосов высокого давления 3 рабочая жидкость (вода) из бака 1 через фильтры 2 по напорным линиям 4 подавалась в сопло 9, смонтированное в стакане 8. С помощью эффекта эжекции по линиям 31 либо 24 в сопло подавалась рабочая жидкость, состав которой подбирали с учетом требований для определенного этапа очистки. Так, исследованиями установлена целесообразность проведения очистки в три этапа. При этом на первом этапе для обеспечения повышенной производительности из рабочего бака 30 рабочая жидкость в сопло подавалась с высокой степенью абразивного воздействия на обрабатываемую поверхность. В качестве такой рабочей жидкости использовали воду, содержащую речной песок с размером фракций 0,10–0,63 мм и полиакриламид. Концентрации речного песка $K_{p,n}$ и полиакриламида K_n в баке 30 составляли соответственно 8–10 % и 10^{-6} – 10^{-2} % от общего объема рабочей жидкости. Предварительную подготовку речного песка по фракционному составу осуществляли в устройстве гравитационного типа действия [16].

На втором этапе РСО использовали чистую воду, подаваемую насосами из бака 1 на обрабатываемую поверхность по линиям 4 с целью полной промывки ее от мелкодисперсных фракций речного песка, что необходимо для проведения третьего этапа очистки.

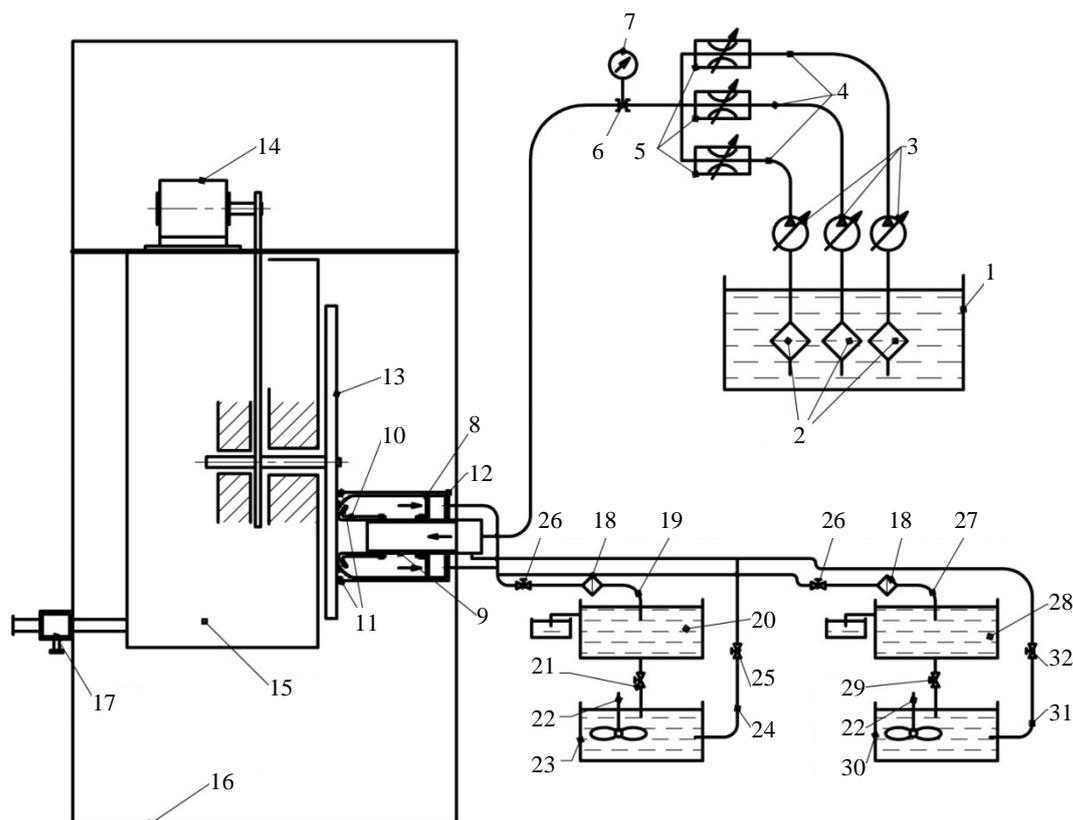


Рис. 2. Схема экспериментального стенда для исследования процесса реверсивно-струйной очистки

Fig. 2. Scheme of test stand for investigation of reverse-blast cleaning process

На третьем этапе осуществления РСО из бака 23 по линии 24 эжектировалась рабочая жидкость, содержащая воду, в которой были размешаны бентонитовая глина и кальцинированная сода с концентрациями соответственно $K_b = 5-20\%$ и $K_{к.с} = 2-10\%$ от общего объема. Указанные концентрации после эжектирования в струйном сопле снижались в струе, действующей на обрабатываемую поверхность, до значений $K_{б,с} = 2-5\%$ и $K_{к.с,с} = 0,2-1,0\%$. Указанные диапазоны были установлены как оптимальные при подготовке очищенной поверхности под ЛР.

При этом отличительным моментом реализации третьего этапа РСО является операция сушки образцов при комнатной температуре ($T = 20\text{ }^\circ\text{C}$) в течение 20–24 ч. Указанная операция позволяет сформировать на обработанной поверхности за счет заполнения впадин микронеровностей антикоррозионный защитный слой толщиной δ , составляющий не менее $1,1-1,2$ от максимальной высоты выступов микронеровностей Ra_{\max} ($\delta > (1,1-1,2)Ra_{\max}$).

Регулирование подачи на различных этапах РСО в сопле осуществляли с помощью кранов 32 и 25, установленных соответственно на линиях 31 и 24, связанных с баками 30 и 23, заполненными рабочей жидкостью, необходимой для отработки первого и третьего этапов процесса. Регулирование подачи и давления воды, поступающей из бака 1 в сопло, на всех трех этапах РСО осуществляли с помощью дросселей 5. Контроль давления на линиях 4 и на входе в сопло выполняли с помощью образцового манометра 7. Для регенерации отработанных составов путем отстоя использовали баки 20, 28, связанные трубопроводами с кранами 21, 29 с основными баками 30, 23, оснащенными для поддержания во взвешенном состоянии соответственно песка и бентонита барботажными устройствами (импеллерными мешалками) 22. Очистка стальных пластин 13 осуществлялась в баке 16. Плотное прилегание пластин 13 к стакану 8 и уплотнительным элементам 11 обеспечивалось с помощью фиксаторного устройства 17. При необходимости для повышения площади обработки пластина 13

приводилась во вращательное движение через ременную передачу, связанную с электродвигателем 14.

В качестве силового оборудования в экспериментальном стенде использовали три мембранных насоса 3 марки 700А с номинальной мощностью на валу 2,0 кВт, которые обеспечивали с помощью дросселей 5 переменное давление $p_c = 15\text{--}29$ МПа на входе в сопло и скорость реверсивной струи, взаимодействующей с заготовкой 13, в диапазоне 150–350 м/с. Указанные скорости струи $v_{стр}$ определяли через отношение объемного расхода к площади выходного сечения сопла. При проведении исследований по РСО использовали сопла диаметром $d_c = 1$ мм, устанавливаемые на различном расстоянии L от обрабатываемой поверхности. Для струйной обработки брали образцы из стали Ст3пс с исходной шероховатостью $Ra = 15\text{--}20$ мкм. Шероховатость поверхности Ra исходного и обработанного образцов измеряли на профилометре-профилографе модели 252 типа А1 в соответствии с ГОСТ 2789–73. Погрешность измерений составила 4–5 %.

Некоторые результаты по влиянию расстояния от торца сопла до очищаемой поверхности L на качество обработанной поверхности применительно к третьему этапу процесса РСО приведены на рис. 3.

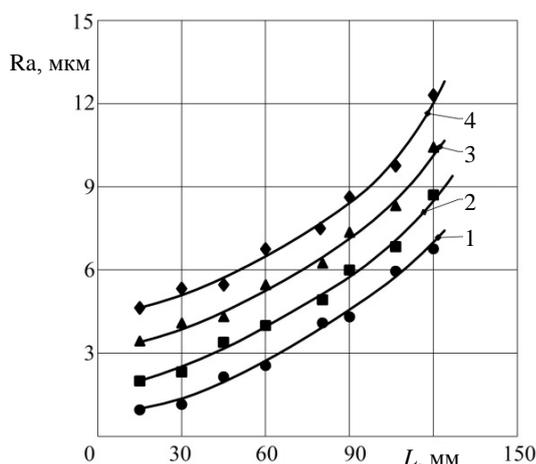


Рис. 3. Зависимость шероховатости Ra обработанной поверхности от расстояния L : 1 – $p_c = 29$ МПа; 2 – 22; 3 – 18; 4 – 15 МПа; $v_{стр} = 203$ м/с; $\lambda = 0,063$; $d_c = 1 \cdot 10^{-3}$ м; $K_{б.с} = 5$ %; $K_{к.с.с} = 1$ %

Fig. 3. Dependence of machined surface roughness Ra on distance L : 1 – $p_c = 29$ МПа; 2 – 22; 3 – 18; 4 – 15 МПа; $v_{стр} = 203$ м/с; $\lambda = 0,063$; $d_c = 1 \cdot 10^{-3}$ м; $K_{б.с} = 5$ %; $K_{к.с.с} = 1$ %

Образцы на этом этапе обработки (после применения состава с концентрациями в струе бентонита и кальцинированной соды $K_{б.с} = 5$ % и $K_{к.с.с} = 1$ %, остальное – вода) высушивали для формирования защитного покрытия на очищенной поверхности. Обработку осуществляли при реверсивно-струйном течении с коэффициентом обжатия струи $\lambda = 0,063$ и при переменных давлениях на входе в сопло $p_c = 15\text{--}29$ МПа.

Согласно рис. 3, шероховатость очищенной поверхности Ra увеличивается от 1,0 до 14,0 мкм при изменении расстояния L от 15 до 120 мм, кроме того, при давлении на входе в сопло $p_c = 22$ МПа (кривая 2) для $L = 15\text{--}60$ мм значения шероховатости на очищенной поверхности находятся в диапазоне 2,0–4,0 мкм, который вполне (при данной технологической обработке) может быть использован для проведения ЛР.

Влияние скорости струи на выходе из сопла при РСО на шероховатость обработанной поверхности показано на рис. 4.

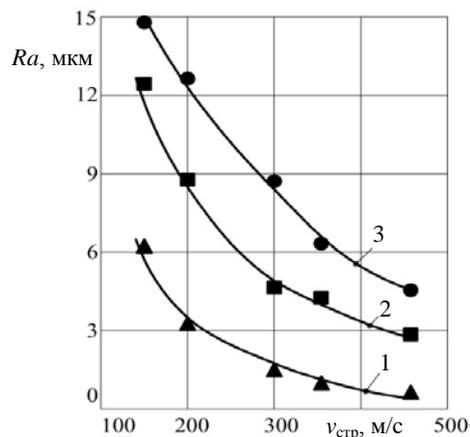


Рис. 4. Влияние скорости струи $v_{стр}$ на шероховатость обработанной поверхности Ra :

1 – $L = 50$ мм; 2 – 100; 3 – 130 мм; $\lambda = 0,063$; $d_c = 1 \cdot 10^{-3}$ м; $K_{б.с} = 5$ %; $K_{к.с.с} = 1$ %

Fig. 4. Influence of jet speed $v_{стр}$ on machined surface roughness Ra :

1 – $L = 50$ мм; 2 – 100; 3 – 130 мм; $\lambda = 0,063$; $d_c = 1 \cdot 10^{-3}$ м; $K_{б.с} = 5$ %; $K_{к.с.с} = 1$ %

Из анализа рис. 4 видно, что при увеличении скорости струи от 150 до 350 м/с шероховатость поверхности Ra уменьшается в среднем в 2–2,5 раза, достигая, например, значений 1,8–3,5 мкм в диапазоне скоростей 200–300 м/с при $L = 50$ мм. Отмеченное уменьшение величины Ra объясняется существенным воздействием реактивной силы при развороте струи на высокой скорости в реверсивном сопле.

Отдельные эксперименты в этой серии проводили на опытном участке в ОАО «Слущкий сахарорафинадный комбинат» на установке «КАМАТ К451А-Е45В» (ФРГ) (рис. 5), способной развивать давление на входе в сопло $p_c = 63\text{--}120$ МПа, что обеспечивало скорость струи $v_{стр}$ на выходе из сопла в пределах $350\text{--}550$ м/с.



Рис. 5. Очистная установка высокого давления «КАМАТ К451А-Е45В» (ФРГ), обеспечивающая реверсивно-струйную очистку со скоростью струи $v_{стр} = 350\text{--}550$ м/с

Fig. 5. High-pressure cleaning unit “КАМАТ К451А-Е45В” (Germany) ensuring reverse-blast cleaning with jet speed $v_{стр} = 350\text{--}550$ m/s

Наряду с шероховатостью исследовали влияние РСО на микротвердость поверхности H_{μ} . Измерение микротвердости осуществляли по ГОСТ 9450–76 на микротвердомере Micromet-2 с нагрузкой на индентор $0,5$ Н.

Влияние расстояния L от сопла до очищаемой поверхности на микротвердость H_{μ} при изменении входного давления p_c представлено на рис. 6. Из рисунка видно, что в диапазоне $L = 15\text{--}120$ мм для всех исследованных давлений p_c , равных $15, 18, 22, 29$ МПа, имеет место уменьшение значений H_{μ} . Следует отметить, что максимальная величина H_{μ} , равная 2750 МПа, зафиксирована для $p_c = 29$ МПа. При этом для исходной микротвердости $H_{\mu 0} = 1950$ МПа значение отношения $H_{\mu}/H_{\mu 0}$ не превышает допустимой величины $H_{\mu}/H_{\mu 0}$ ($H_{\mu}/H_{\mu 0} =$

$= 2750/1950 = 1,41$), равной $1,5\text{--}1,6$ и отвечающей требованиям, которые предъявляются к стальной поверхности, прошедшей предварительную очистку перед ЛР.

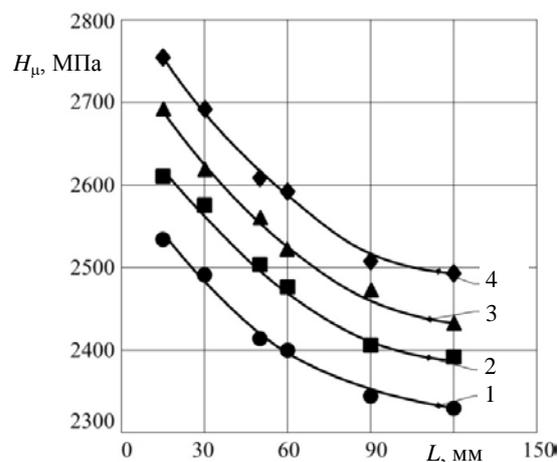


Рис. 6. Влияние расстояния от сопла до очищаемой поверхности L на ее микротвердость H_{μ} : 1 – $p_c = 15$ МПа; 2 – 18; 3 – 22; 4 – 29 МПа (состав рабочей жидкости: $K_{б.с} = 5\%$; $K_{к.с.с} = 1\%$; остальное – вода; $d_c = 1 \cdot 10^{-3}$ м)

Fig. 6. Influence of distance L from nozzle up to cleaned surface on its micro-hardness H_{μ} : 1 – $p_c = 15$ МПа; 2 – 18; 3 – 22; 4 – 29 МПа (composition of power fluid: $K_{б.с} = 5\%$; $K_{к.с.с} = 1\%$; the rest – water; $d_c = 1 \cdot 10^{-3}$ m)

Влияние концентрации бентонитовой глины $K_{б.с}$ на микротвердость очищенной поверхности H_{μ} показано на рис. 7. Из анализа зависимостей на рис. 7 видно, что величина H_{μ} достигает максимальных значений при концентрациях бентонита $K_{б.с}$ в составе рабочей жидкости, равных $4\text{--}5\%$. При $L = 50$ мм превышение максимальной величины H_{μ} относительно исходного значения $H_{\mu 0}$ ($H_{\mu} = 2480$ МПа; $H_{\mu 0} = 1950$ МПа) составляет 27% , что в полной мере отвечает требованиям к стальной поверхности, подготовленной для ЛР.

Существенным эффектом РСО с использованием бентонитовой глины является формирование защитного пленочного покрытия на очищенной поверхности после сушки образцов. Для исследования топографии, морфологии и химсостава пленочного покрытия были подготовлены образцы из стали СтЗпс, обработанные реверсивной струей рабочей жидкости ($K_{б.с} = 5\%$; $K_{п.с} = 10^{-5}\%$; $K_{к.с.с} = 1\%$; остальное – вода) при $L = 50$ мм; $d_c = 1$ мм; $p_c = 22$ МПа.

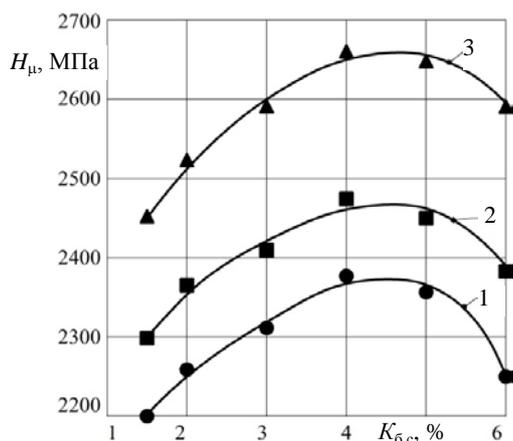


Рис. 7. Зависимость микротвердости поверхности H_{μ} от концентрации бентонитовой глины в составе рабочей жидкости: 1 – $L = 15$ мм; 2 – 50; 3 – 120 мм; $p_c = 22$ МПа; $d_c = 1 \cdot 10^{-3}$ м

Fig. 7. Dependence of H_{μ} -surface micro-hardness on bentonite clay concentration in power fluid: 1 – $L = 15$ mm; 2 – 50; 3 – 120 mm; $p_c = 22$ MPa; $d_c = 1 \cdot 10^{-3}$ m

Съемку и анализ топографии шлифов с пленочным покрытием проводили на сканирующем электронном микроскопе Mira фирмы Tescan (Чехия) с использованием ускоряющего напряжения 20 кВ. Морфологию образцов изучали на этом же электронном микроскопе. Исследование элементного состава проводили на микрорентгеноспектральном анализаторе INCA 350 фирмы Oxford Instruments (Великобритания). Этот прибор позволяет определить

элементы с их минимальным пределом обнаружения ($-0,5\%$) и погрешностью $0,05-0,15\%$.

Внешний вид покрытия, сформированного на поверхности образцов после РСО, показан на рис. 8. Из рисунка видно, что на поверхности при РСО формируется защитное, равномерно распределенное, плотное покрытие, состоящее из «волнообразных» чешуек 1–4 со средним размером фракций 50–70 мкм, имеющих четкие граничные очертания, входящие в зацепление у смежных чешуек.

Фотографии поперечных сечений шлифов, представленные на рис. 9, дают представление о качестве поверхности после РСО и толщине сформированного на ней защитного покрытия. Из фотографий видно, что после РСО поверхность металла имеет плавный волнистый профиль $abcd$ со средней высотой выступов шероховатости $2,0-4,0$ мкм. Вся очищенная поверхность полностью изолирована от окружающей среды защитным пленочным покрытием, средняя толщина δ которого составляет $5-7$ мкм (рис. 9b). Из рис. 9 видно, что пленочное покрытие, расположенное между отвердителем шлифа и основным металлом, полностью повторяет микрогеометрию (шероховатость $abcd$) обработанной поверхности, что позволяет сделать вывод об эффекте граничного склеивания, которое является предпосылкой для обеспечения прочной связи между покрытием и основным металлом.

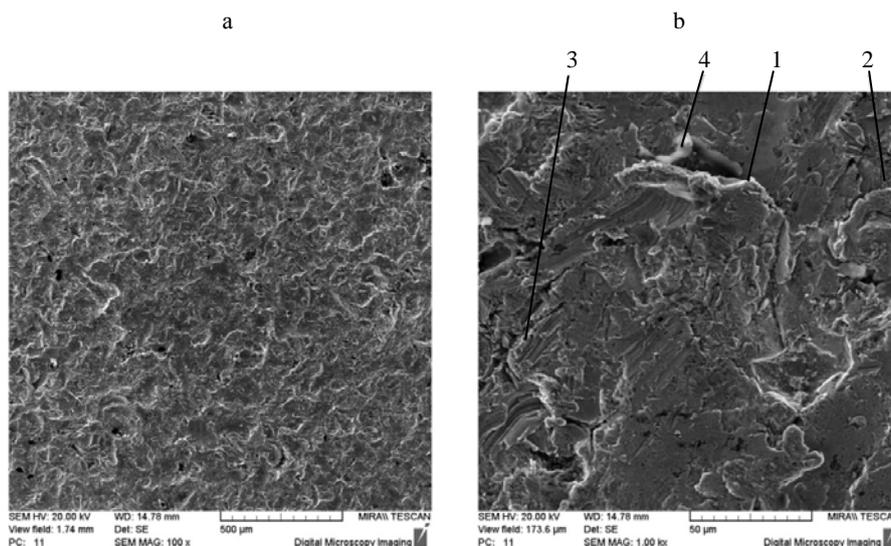


Рис. 8. Внешний вид покрытия, сформированного на поверхности образцов после реверсивно-струйной очистки: а – $\times 25$; б – $\times 250$; 1–4 – «волнообразные» чешуйки

Fig. 8. External view of coating formed on specimen surfaces after reverse-blast cleaning: а – $\times 25$; б – $\times 250$; 1–4 – “wavelike” scales

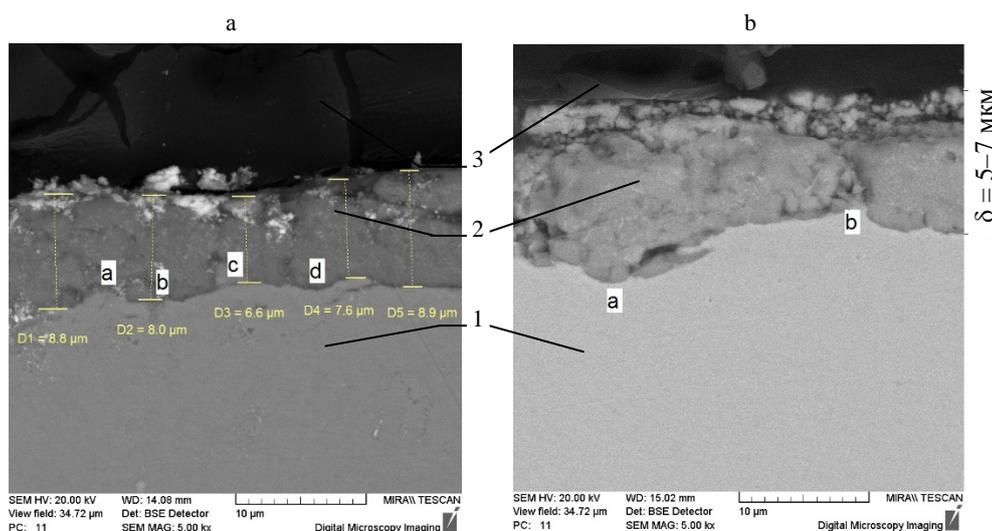


Рис. 9. Внешний вид поперечного сечения обработанных реверсивно-струйной очисткой заготовок: а – поперечное сечение с указанием толщины пленочного покрытия ($\times 1350$); б – структура поперечного сечения ($\times 2500$); 1 – основной металл сталь СтЗпс; 2 – защитное пленочное покрытие на основе бентонитовой глины; 3 – отвердитель шлифа (эпоксидная смола); $p_c = 22$ МПа

Fig. 9. External view of cross sections in blanks treated by reverse-blast cleaning: а – cross section with indication of film coating thickness ($\times 1350$); б – cross section structure ($\times 2500$); 1 – basic metal – steel СтЗпс; 2 – protective film coating on the basis of bentonite clay; 3 – hardener for metallographic specimen (epoxide resin); $p_c = 22$ МПа

Химический состав защитного покрытия в спектрах 1–4, приведенных на рис. 10, и установленный путем точечного микрорентгено-спектрального анализа (сталь СтЗпс) после РСО составом рабочей жидкости ($K_{б.с} = 5\%$; $K_{п.с} = 10^{-5}\%$; $K_{к.с.с} = 1\%$; остальное – вода) представлен в табл. 1.

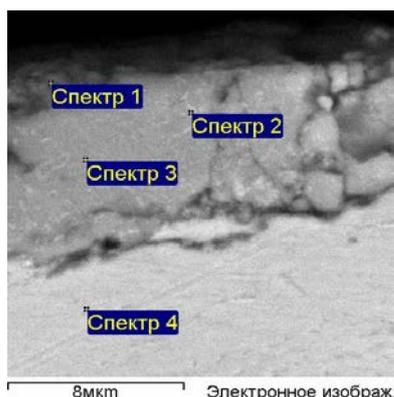


Рис. 10. Участок поперечного сечения шлифа, используемый для анализа химического состава пленочного покрытия (спектры 1–3) и основного металла (спектр 4) ($\times 10000$)

Fig. 10. Area of cross section in metallographic specimen used for analysis of chemical composition of film coating (spectra 1–3) and basic metal (spectrum 4) ($\times 10000$)

Таблица 1

Химический состав покрытия, сформированного на поверхности образца (сталь СтЗпс) после РСО составом рабочей жидкости ($K_{б.с} = 5\%$, $K_{п.с} = 10^{-5}\%$, $K_{к.с.с} = 1\%$, остальное – вода)
 Chemical composition of coating on specimen surface (steel СтЗпс) formed after reverse-blast cleaning while using the following composition of power fluid ($K_{б.с} = 5\%$, $K_{п.с} = 10^{-5}\%$, $K_{к.с.с} = 1\%$, the rest – water)

Спектр	Al, %	Si, %	Ca, %	Fe, %	O, %
Спектр 1	0,31	0,15	0,33	28,24	Остальное
Спектр 2	0,12	0,14	0,28	40,29	
Спектр 3	0,07	0,08	0,15	50,56	
Спектр 4	0,01	0,01	0,00	81,23	

Из анализа данных табл. 1 видно, что химическую основу пленочного покрытия составляют элементы, входящие в состав бентонитовой глины, являющейся основной компонентой рабочей жидкостью на третьем этапе реализации технологии РСО.

Эксперименты для оценки влияния качества сформированной поверхности на эффективность процесса ЛР проводили на комплексе Hyper Gear 510 корпорации Yamazaki Mazak Optonics Corp. (Япония). Комплекс расположен на производственной базе СООО «Элзеср», г. Минск. Он относится к газовым лазерам с выходной непрерывной мощностью 2,5/4,0 кВт.

Максимальный размер обрабатываемой заготовки составляет 1525×3050 мм. Для процесса ЛР металлов на данном комплексе основным эксплуатационным параметром является максимальная скорость лазерной резки $v_{лр}$, определяющая производительность и качественные показатели процесса ЛР, исходя из условия отсутствия грата на вырезанных деталях [5–7].

Для проведения исследований были подготовлены образцы размерами 120×120 мм из стали Ст3пс толщиной 3–10 мм. Заготовки разбили на три группы: 1-ю группу обработали по технологии РСО; 2-ю оставили в условиях поставки, без дополнительной обработки поверхности; 3-я группа образцов прошла механическую обработку – дробеструйную, согласно технологической карте.

Образцы подвергали ЛР на различных режимах резки, с увеличением скорости резки от 2,5 до 4,0 м/мин (рис. 11). По результатам проведенных испытаний установлено, что для образцов 1-й группы при увеличении $v_{лр}$ до 4,0 м/мин грат отсутствовал. Из этого следует, что технологическая операция по зачистке грата не требуется и исключается из дополнительной операции. Для образцов 2-й и 3-й групп выявлено, что при увеличении $v_{лр}$ до 3,2 м/мин (для 2-й) и до 3,5 м/мин (для 3-й) образуется грат длиной до 2,0 и 1,5 мм соответственно.

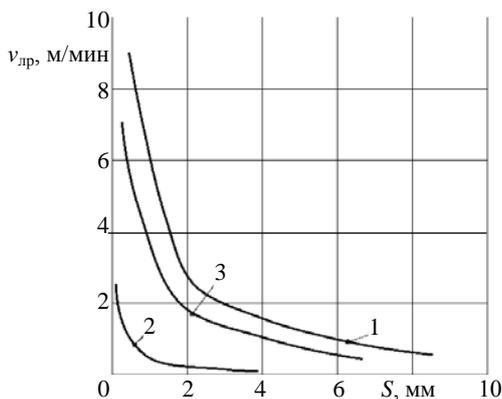


Рис. 11. Зависимость максимальной скорости резания от толщины материала: 1, 2, 3 – номер группы образцов

Fig. 11. Dependence of maximum cutting speed on material thickness: 1, 2, 3 – numbers of specimen groups

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что применение РСО обеспечивает повышение скорости ЛР в среднем на 10–20 %. Отмеченное увеличение скорости ЛР для 1-й группы образцов можно объяснить малой величиной упрочнения поверхностного

слоя, отсутствием эффекта рассеяния энергии лазерного луча от существенно шероховатой поверхности ($Ra = 2–4$ мкм) за счет того, что на этой поверхности в результате РСО формируется защитное пленочное покрытие. Последнее на основании экспериментальных данных характеризуют светопоглощающими свойствами, которые исключают отражение лазерного луча от поверхности разрезаемого материала.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально установлены оптимальные режимы очистки: расстояние от сопла до очищаемой поверхности $L = 15–60$ мм; скорость струи $v_{стр} = 150–200$ м/с; давление $p_c = 18–23$ МПа. При обработке с указанными параметрами обеспечивается формирование шероховатости Ra на поверхности образцов из стали Ст3пс в диапазоне значений 2–4 мкм. Установлено, что на всей очищенной поверхности образцов формируется (после высыхания рабочей жидкости на основе воды с концентрациями бентонитовой глины и кальцинированной соды соответственно $K_{б.с} = 2,0–5,0$ % и $K_{к.с.с} = 0,2–1,0$ %) защитное пленочное покрытие со средней толщиной 5–7 мкм, которая в 1,5–2 раза превышает среднюю высоту выступов микрошероховатости Ra поверхности при обработке ее с использованием оптимальных параметров реверсивно-струйной очистки.

2. Проведен анализ образовавшегося на поверхности очищенного образца пленочного покрытия с определением его химического состава и толщины. Установлено, что химическую основу пленочного покрытия составляют элементы, входящие в бентонитовую глину, являющуюся основной компонентой рабочей жидкости на третьем этапе реализации технологии реверсивно-струйной очистки.

3. Проведены производственные испытания очищенных образцов, в результате которых установлена эффективность реверсивно-струйной очистки при подготовке стальных поверхностей под лазерную резку. В частности, для очищенных образцов из стали Ст3пс выявлено повышение скорости лазерной резки на 10–20 %, что было достигнуто за счет устранения эффекта рассеяния лазерного луча от существенно шероховатой поверхности ($Ra = 2–4$ мкм) при формировании на ней защитного пленочного покрытия толщиной 5–7 мкм, которое исключает отражение лазерного луча от поверхности разрезаемого материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Банников, И. И. Механизация очистки и окраски подводной части судов / И. И. Банников, Г. Н. Финкель, В. Л. Хейфец. Л.: Судостроение, 1980. 116 с.
2. Агасарян, Р. Р. Струйно-абразивная обработка металлов / Р. Р. Агасарян. Ереван: АрмНИИНТИ, 1990. 51 с.
3. Меркулов, В. Н. Перспективные процессы гидрообработки материалов в машиностроении / В. Н. Меркулов. Киев: УкрНИИНТИ, 1987. 10 с.
4. Тихомиров, Г. А. Гидрорезание судостроительных материалов / Г. А. Тихомиров. Л.: Судостроение, 1987. 164 с.
5. Крайко, А. Н. Механика жидкости и газа. Избранное / под общ. ред. А. Н. Крайко, ред.-сост. А. Н. Крайко, А. Б. Ватажий, Г. А. Любимов. М.: Физматлит, 2003. 752 с.
6. Вилькер, Д. С. Лабораторный практикум по гидромеханике / Д. С. Вилькер. М.: Физматгиз, 1959. 351 с.
7. Гибсон, А. Гидравлика и ее приложения / А. Гибсон; пер. с 6-го англ. изд. А. Е. Стратоницкой и С. С. Соколова; под ред. М. В. Потапова. М.; Л.: Гос. энергетич. изд-во, 1934. 610 с.
8. Френкель, Н. З. Гидравлика / Н. З. Френкель. М.; Л.: Госэнергиздат, 1956. 456 с.
9. Кудинов, В. А. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование / В. А. Кудинов, Г. В. Бобров. М.: Металлургия, 1992. 432 с.
10. Комов, В. А. Гидравлика / В. А. Комов. М.; Л.: Гос. изд-во сельскохоз. лит-ры, 1951. С. 230–233.
11. Качанов, И. В. Теоретические и экспериментальные исследования по определению струйного давления рабочей жидкости на обрабатываемую плоскую поверхность / И. В. Качанов, А. В. Филипчик // Наука и техника. 2012. № 1. С. 79–85.
12. Памфилов, Е. А. Формирование качества поверхностей при лазерной обработке / Е. А. Памфилов, В. Д. Северин // Вестник машиностроения. 1982. № 4. С. 46–48.
13. Устройство для очистки от коррозии плоских стальных поверхностей: пат. № 16526 Респ. Беларусь, МПК В 08В 3/00, В63В 59/08 / И. В. Качанов, А. Н. Жук, И. М. Шаталов, В. Н. Шарий, С. О. Мяделец; дата публ.: 30.10.2012.
14. Технология струйной гидроабразивной очистки и защиты от коррозии стальных изделий с применением бентонитовой глины / И. В. Качанов [и др.]. Минск: БНТУ, 2016. 167 с.
15. Качанов, И. В. Математическая модель расчета минимального давления разрушения поверхностного слоя коррозии от воздействия реверсивной струи рабочей жидкости / И. В. Качанов, В. В. Веремениук, А. Н. Жук // Наука и техника. 2014. № 2. С. 46–51.
16. Устройство для отбора осветленной гидросмеси на земснаряде: пат. № 14172 Респ. Беларусь, МПК Е 02F 3/88 / И. В. Качанов, А. Н. Жук, Г. В. Песцов, А. Н. Чернобылец; заявитель Белор. нац. техн. ун-т. № а20081686; заявл. 24.12.2008; опубл. 30.04.2010.

Поступила 27.01.2017

Подписана в печать 29.03.2017

Опубликована онлайн 30.05.2017

REFERENCES

1. Bannikov I. I., Finkel G. N., Kheifits V. L. (1980) *Mechanization of Ship Bottom Cleaning and Painting*. Leningrad, Sudostroenie Publ. 116 (in Russian).
2. Agasarian R. R. (1990) *Abrasive jet Machining of Metal*. Erevan, [Armenian Scientific-Research Institute of Scientific and Technical Information. 51 (in Russian).
3. Merkulov V. N. (1987) *Prospective Material Hydro-processing in Mechanical Engineering*. Kiev, Ukrainian Scientific-Research Institute of Scientific and Technical Information. 10 (in Russian).
4. Tikhomirov G. A. (1987) *Hydraulic Cutting of Shipbuilding Materials*. Leningrad, Sudostroenie. 164 (in Russian).
5. Kraiko A. N. (ed.), Vatazhnyy A. B., Liubimov G. A. (2003) *Fluid Mechanics. Selected Works*. Moscow, Fizmatlit Publ. 752 (in Russian).
6. Vilker D. S. (1959) *Laboratory Course for Hydromechanics*. Moscow, Fizmatgiz Publ. 351 (in Russian).
7. Gibson A. (1923) *Hydraulics and its Applications*. New York, Van Nostrand Company. 813 (Russ. ed.: Gibson A. (1934). *Gidravlika i ee Prilozheniia*. Moscow, Leningrad: State Power Engineering Publishing House. 610).
8. Frenkel N. Z. (1956) *Hydraulics*. Moscow, Leningrad: State Power Engineering Publishing House. 456 (in Russian).
9. Kudinov V. A., Bobrov G. V. (1992) *Application of Spray Coating. Theory, Technology and Equipment*. Moscow, Metallurgiya Publ. 432 (in Russian).
10. Komov V. A. (1951) *Hydraulics*. Moscow, Leningrad, State Publishing House of Agricultural Literature, 230–233 (in Russian).
11. Kachanov I. V., Filipchik A. V. (2012) Theoretical and Experimental Investigations on Determination of Power Fluid Jet Pressure on Treated Flat Surface. *Nauka i Tekhnika* [Science and Technique], (1), 79–85 (in Russian).
12. Pamfilov E. A., Severin V. D. (1982) Formation of Surface Quality in Case of Laser Processing. *Vestnik Mashinostroyeniya* [Mechanical Engineering Bulletin], (4), 46–48 (in Russian).
13. Kachanov I. V., Zhuk A. N., Shatalov I. M., Shariy V. N., Myadelets S. O. (2012) *Device for Corrosion Removal from Flat Steel Surfaces*. Patent Republic of Belarus No 16526 (in Russian).
14. Kachanov I. V., Filipchik A. V., Babich V. E., Zhuk A. N., Ushev S. I. (2016) *Technology of Jet Hydro-Abrasive Cleaning and Protection of Steel Products Against Corrosion While Using Bentonite Clays*. Minsk, Belarusian National Technical University. 167 (in Russian).
15. Kachanov I. V., Veremeniuk V. V., Zhuk A. N. (2014) Mathematical Model for Calculation of Minimum Pressure Pertaining to Destruction of Surface Corrosion Layer Due to Impact of Working Liquid Reversible Stream. *Nauka i Tekhnika* [Science and Technique], (2), 46–51 (in Russian).
16. Kachanov I. V., Zhuk A. N., Pestsov G. V., Tchernobylets A. N. (2010) *Device for Extraction of Clarified Hydraulic Fluid from a Dredge*. Patent Republic of Belarus No 14172 (in Russian).

Received: 27.01.2017

Accepted: 29.03.2017

Published online: 30.05.2017