

ТЕХНОЛОГИЯ СТРУЙНОЙ
ГИДРОАБРАЗИВНОЙ ОЧИСТКИ
И ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ
СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ
С ПРИМЕНЕНИЕМ
БЕНТОНитОВОЙ ГЛИНЫ

Минск
БНТУ
2016

УДК 669: 620.197

Авторы:

И.В. Качанов, А.В. Филипчик, В.Е. Бабич, А.Н. Жук, С.И. Ушев

Технология струйной гидроабразивной очистки и защиты от коррозии стальных изделий с применением бентонитовой глины / И.В. Качанов [и др.] – Минск: БНТУ, 2016. – 167 с. – ISBN 978-985-550-786-5.

Монография содержит результаты теоретических и экспериментальных исследований в области струйной гидроабразивной очистки и защиты стальных изделий от коррозии. Представлены новые способы и режимы обработки материалов с использованием различных составов рабочей жидкости и добавлением в неё бентонитовой глины. Приведены схемы машин и оснастки, спроектированных для реализации новых технологий.

Издание предназначено для ученых, инженерно-технических работников, аспирантов, магистрантов, студентов, специализирующихся в области гидроабразивной обработки материалов и материаловедения.

Табл. 8. Ил. 73. Библиогр. 140 назв.

Рекомендовано научно-техническим советом Белорусского национального технического университета
(протокол № 10 от 23.12.2015)

Рецензенты:

директор ГНУ «Институт технической акустики», чл-корр.
НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф. В.В. Рубаник;
заведующий НИИЛ плазменных и лазерных технологий
БНТУ, д-р техн. наук, проф. О.Г. Девойно

ISBN 978-985-550-786-5

© Белорусский национальный
технический университет, 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	6
ВВЕДЕНИЕ	7
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ПРОЦЕССОВ СТРУЙНОЙ ОЧИСТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОТ КОРРОЗИИ	10
1.1 Анализ математических моделей, разработанных для прогнозирования силового воздействия струи на преграду. Решение задач по оптимизации геометрии струеформирующих устройств.....	10
1.2 Математическая модель расчета минимального давления разрушения поверхностного слоя коррозии от воздействия реверсивной струи рабочей жидкости.....	21
1.3 Коррозия. Механизмы и типы реализации	31
1.4 Анализ современных способов и технологий, используемых для струйной обработки металлических поверхностей	34
1.5 Анализ промышленного оборудования и конструкций струеформирующих устройств, используемых для очистки стальных поверхностей от коррозии	42
1.6 Оценка применимости известных технологий струйной очистки для подготовки стальных листов под лазерную резку	48
2 ОБОРУДОВАНИЕ, ПРИБОРЫ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ	51
2.1 Обоснование составов рабочей жидкости, выбор материалов для проведения исследований	51
2.2 Схема лабораторного стенда, оборудование для проведения исследований	55
2.3 Методика регистрации струйного силового воздействия струи рабочей жидкости на преграду	59
2.4 Методика измерения гидродинамических параметров струйной очистки	64
2.5 Методика измерения вязкости рабочей жидкости	65

2.6 Методика определения морфологии, адгезионной прочности и химсостава защитного пленочного покрытия. Измерение шероховатости и микротвердости обработанной поверхности	66	
2.7 Методика оценки массового уноса и производительности процесса ГАО	67	
2.8 Методика испытаний защитного пленочного покрытия на коррозионную стойкость	69	
3 РАЗРАБОТКА ТЕОРИИ ПРОЦЕССА И ОПТИМИЗАЦИЯ		
КОНСТРУКЦИИ КОНФУЗОРА ДЛЯ СТРУЙНОЙ		
ГИДРОАБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ПЛОСКИХ		
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ.....		70
3.1 Обоснование теоретического метода, основные допущения, схематизация процесса.....	70	
3.2 Разработка математической модели процесса разрушения слоя коррозии от воздействия струи рабочей жидкости	73	
3.3 Расчет оптимального по энергозатратам угла конусности струеформирующего конфузора	82	
4 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СТРУЙНОЙ		
ГИДРОАБРАЗИВНОЙ ОЧИСТКИ И ЗАЩИТЫ СТАЛЬНЫХ		
ПОВЕРХНОСТЕЙ ОТ КОРРОЗИИ		93
4.1 Экспериментальные исследования по определению давления рабочей жидкости на выходе из конфузора	93	
4.2 Определение влияния компонентов рабочих жидкостей на силовое воздействие гидроабразивной струи	95	
4.3 Оценка производительности процесса ГАО	103	
4.4 Влияние режимов струйной обработки на шероховатость и микротвердость поверхности	106	
4.5 Исследование морфологии и химсостава поверхностного пленочного покрытия, сформированного при струйной обработке	113	

4.6 Результаты испытаний стальных образцов на коррозионную стойкость после струйной ГАО	121
5 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СТРУЙНОЙ ОЧИСТКИ И ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СОСТАВЕ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ БЕНТОНИТОВОЙ ГЛИНЫ	128
5.1 Разработка технологии ГАО для подготовки стальных листов под лазерную резку на комплексе TRUMATIC	128
5.2 Рекомендации по подготовке под покраску корпусных деталей судна	132
5.3 Оценка экономической эффективности от использования результатов разработанной технологии ГАО на ОАО «Агат–электромеханический завод»	135
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	140
ПРИЛОЖЕНИЯ	152
ПРИЛОЖЕНИЕ А	152
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	157
ПРИЛОЖЕНИЕ В	162
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	165

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ГАО – гидроабразивная обработка;

ЛР – лазерная резка;

ЗПП – защитное пленочное покрытие;

Ra – параметр шероховатости поверхности по ГОСТ 1643-81, мкм;

$p_{вх}$ – давление на входе в конфузор, МПа;

p – давление на поверхности соударения струи с преградой, МПа;

Q – расход рабочей жидкости, м³/с;

$V_{стр}$ – скорость струи, м/с;

K_b – концентрация бентонита в растворе рабочей жидкости, %;

K_n – концентрация полиакриламида в растворе рабочей жидкости, %;

$K_{к.с.}$ – концентрация кальцинированной соды в растворе рабочей жидкости, %;

$V_{лр}$ – скорость лазерной резки, м/с, м/мин.

ВВЕДЕНИЕ

Отличительной особенностью современного промышленного производства Республики Беларусь является отсутствие собственной сырьевой базы и существенная зависимость от импортных энергоносителей и материальных ресурсов, поставляемых по мировым ценам. При работе в таких условиях эффективность производства в основном может быть достигнута за счет всемерной экономии и использования энерго- и ресурсосберегающих технологий, обеспечивающих получение высококачественной, конкурентоспособной продукции. Эффективность реализации целого ряда струйных технологических процессов напрямую зависит от качества очистки поверхностей от продуктов коррозии [1–27]. Так, например, для подготовки стальной поверхности под лазерную резку (в настоящее время на промышленных предприятиях Республики Беларусь насчитывается порядка 300 комплексов, на которых разрезается ежегодно порядка 50–80 тыс. т. листовой стали) необходимо после очистки от коррозии иметь высококачественную поверхность с шероховатостью $R_a = 0,2–0,4$ мкм с минимальным уровнем упрочнения и низкой отражательной способностью [28, 29]. При использовании в качестве характеристики упрочнения такого параметра, как микротвердость H_{μ} , необходимо, чтобы его величина по отношению к исходному значению $H_{\mu 0}$ ($H_{\mu 0}$ – микротвердость поверхности листового материала применительно к условиям поставки) не выходила за пределы соотношения $H_{\mu} = (1,2–1,4)H_{\mu 0}$, так как превышение указанного диапазона приводит к снижению скорости лазерной резки [28]. Подготовка стальной поверхности под покраску предусматривает получение шероховатости R_a после очистки от коррозии, равную 30–50 мкм, что обеспечивает при соответствующих режимах сушки эффективное схватывание слоев краски с очищенной поверхностью [30]. При этом актуальным является вопрос предотвращения повторной коррозии при значительном по времени (2–5 часов) нахождении очищенной детали под воздействием атмосферной коррозии.

Известные процессы струйной очистки стальных изделий от коррозии (гидродинамические, дробеструйные, пескоструйные и

т.д.), основанные на использовании струй воды или воздуха высокого давления с добавками различных абразивных материалов (песок, корунд, чугунная или стальная дробь, мелкодисперсный лед и т.д.) не отвечает в полной мере указанным требованиям (особенно в части предотвращения повторной коррозии, либо получения матовой поверхностью с низкой отражательной способностью).

Наиболее перспективным способом обеспечения высокого качества обработанной поверхности является технология гидроабразивной обработки, широко применяемая при очистке металлических поверхностей от продуктов коррозии, нагара, окисных пленок.

Основными преимуществами способа гидроабразивной обработки являются [1–27]:

- практическое исключение двух главных факторов, сопутствующих процессу (геометрического и теплового);
- простота реализации схемы и технологии обработки;
- формирование поверхности с заданной топографией;
- отсутствие пылевыведения при обработке.

К рассмотренному способу можно отнести и способ реверсивно-струйной очистки, заключающийся в том, что струя рабочей жидкости подается, в корпус, полотно прилегающий к обрабатываемой поверхности, ударяясь в обрабатываемую поверхность, жидкость разворачивается на 180°, тем самым усиливая силовое воздействие струи в 1,5–2 раза. Разворот жидкости происходит за счет конструкции корпуса.

Предварительными экспериментами установлено, что большими потенциальными возможностями обладает использование бентонитовой глины, полиакриламида, кальцинированной соды [1–А] в качестве компонентов рабочей жидкости в способе гидроабразивной обработки. Использование указанных компонентов в составе рабочей жидкости на основе воды способно привести к повышению производительности и созданию поверхностей с повышенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами, включая даже формирование после обработки матовой поверхности с защитной антикоррозионной пленкой, служащей как для защиты обработанной металлической поверхности от процессов повторной

коррозии, так и для повышения производительности последующих операций, например, лазерной резки (ЛР).

Однако отсутствие сведений о влиянии концентрации компонентов в составе рабочей жидкости на параметры качества поверхности (микротвердость, шероховатость), включая условия создания на этой поверхности защитных пленочных покрытий на основе компонентов рабочей жидкости, противоречивость имеющихся данных по вопросам выбора геометрии конфузоров (сопел), недостаточная изученность теории процесса струйной очистки в части прогнозирования силового режима, при котором происходит разрушение слоя коррозии, создают предпосылки для проведения дальнейших исследований.

В этой связи теоретические и экспериментальные исследования, а также опытно-конструкторские разработки, направленные на решение указанных вопросов, имеют несомненную актуальность и важность.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ПРОЦЕССОВ СТРУЙНОЙ ОЧИСТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОТ КОРРОЗИИ

В данной главе выполнен анализ теоретических и экспериментальных данных, полученных при исследованиях различных струйных технологий и оборудования, используемых на машиностроительных и судоремонтных предприятиях, как за рубежом, так и в Республике Беларусь для очистки металлических поверхностей от продуктов коррозии. Оценена возможность применения метода гидроабразивной обработки для очистки и формирования универсальных защитных покрытий на поверхности стальных изделий.

1.1 Анализ математических моделей, разработанных для прогнозирования силового воздействия струи на преграду. Решение задач по оптимизации геометрии струеформирующих устройств

В настоящее время накоплен определенный опыт по применению струйных технологий для очистки металлических поверхностей от продуктов коррозии, различных загрязнений, окисных пленок, нагара и т.д. Значительный вклад в теорию и практику процесса очистки внесли такие ученые как: Р.Р. Агасарян, Ш.М. Билик, Ю.С. Козлов, А.Е. Проволоцкий и др. [1–27, 30].

Процесс, струйного воздействия характеризуется целым комплексом сложных, взаимосвязанных явлений, обусловленных высокой скоростью взаимодействия струи 2 с преградой 3 (рисунок 1.1), что предусматривает учет динамических составляющих напряжений, механических свойств разрушаемых тел, принятия корректных допущений по граничным условиям при разработке теории и технологии процесса. Однако, проведенный анализ теоретических решений, связанных с прогнозированием силовых параметров струйной обработки, выявил недостатки, которые укрупнено, могут быть представлены следующим образом:

– использование эмпирических зависимостей, которые применимы лишь для конкретных условий, для которых они получены;

- применение теоретических схем взаимодействия струи с преградой, не в полной мере описывающих реальную физическую картину изучаемого процесса струйной очистки;
- отсутствие математических моделей (теории процесса), позволяющих рассчитать минимально необходимое давление разрушения слоя коррозии с учетом физико-механических свойств разрушаемого материала;
- противоречие принятых допущений реальной физической сущности процесса.

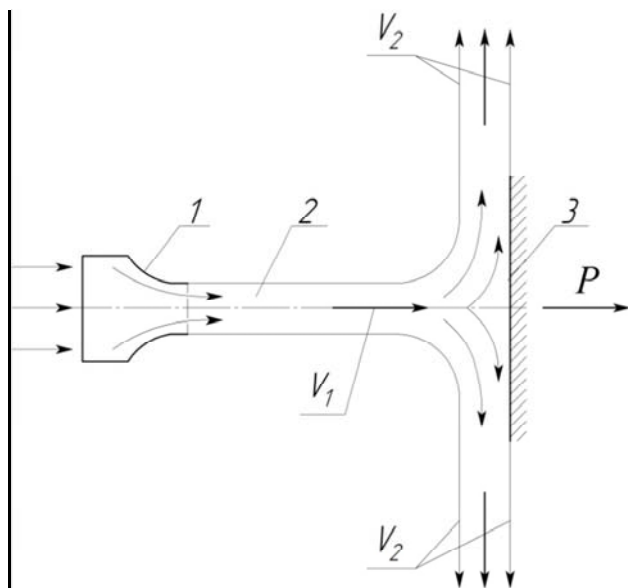


Рис. 1.1. Схема натекания струи со скоростью V и усилием P на плоскую неподвижную преграду [11, 12]:
1 – конфузур; 2 – струя; 3 – плоская преграда

Как уже отмечалось, одним из основных параметров при гидроабразивной обработке является сила воздействия струи на преграду.

В работе [31] предлагается силу удара P в момент соударения струи 2 с преградой 3 (см. рисунок 1.1) оценивать по теореме об изменении количества движения

$$m(V_1 - V_2) = Pt, \quad (1.1)$$

где m – масса жидкости в выбранном отсеке струи;

V_1 и V_2 – скорости струи до и после взаимодействия с преградой;

P – сила воздействия струи на преграду;

t – время процесса.

Однако при использовании указанной теоремы не устанавливается взаимосвязь между действующей силой и механическими свойствами материала, что существенно снижает практическую ценность уравнения (1.1).

В работе [32] предлагается математическая модель для описания процесса очистки отверстий малого диаметра в деталях элементов гидравлического привода. В основе данной математической модели, которая предназначена для расчета величины съема материала, лежит контактная гипотеза Герца. Контактующие поверхности (рисунок 1.2) представлены в виде сферических элементов с радиусами R_1 и R_2 .

Максимальное сближение X_{\max} сферических элементов предлагается рассчитывать по зависимости

$$X_{\max} = \left(\frac{5mV_0}{\frac{8E_1E_2}{3E_1(1-\mu_2^2) + E_2(1-\mu_1^2)} \sqrt{\frac{R_1R_2}{R_1 + R_2}}} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (1.2)$$

где m – масса абразивной частицы, действующей в единицу времени на обрабатываемую поверхность;

V_0 – линейная скорость абразивной частицы;

E_1 и E_2 , μ_1 и μ_2 – модули упругости и коэффициенты Пуассона материалов контактирующих поверхностей;

R_1 и R_2 – радиусы сферических элементов.

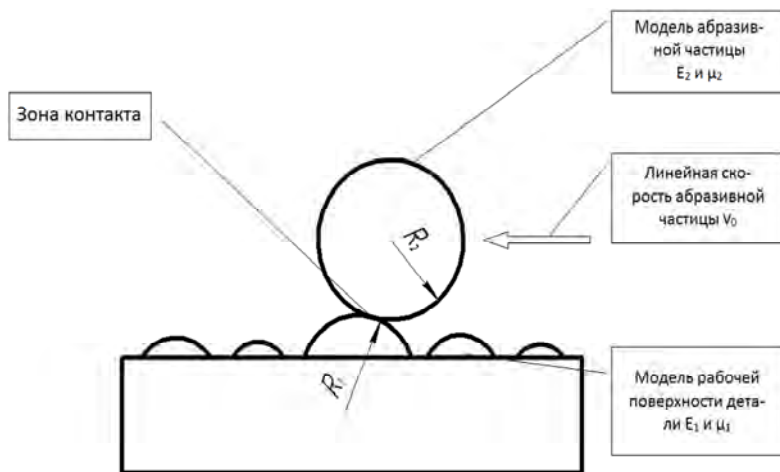


Рис. 1.2. Принципиальная схема контактного взаимодействия абразивной частицы с поверхностью детали [32]

Однако в зависимости (1.2) не представлена схема взаимодействия струи с преградой, не учитываются прочностные свойства разрушаемого материала, не обоснован выбор формы (сферической) частицы, взаимодействующей с выступами обрабатываемой поверхности.

В работе [9] различия в физико-механических свойств металлических окислов на поверхности и основного металла предлагается выразить в виде реологической модели, составленной из элементов Гюка и Кельвина, обладающих упругостью и вязкостью (рисунок 1.3).

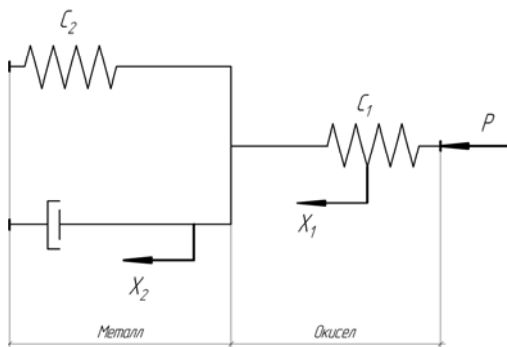


Рис. 1.3. Схема реологической модели из элементов Гука и Кельвина [9]

При этом силовое взаимодействие между струей и обрабатываемой поверхностью предлагается описывать с помощью следующей системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 (x_1 - x_2) &= P \sin(pt + \varphi) \\ m_2 \ddot{x}_2 + \eta \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \dot{x}_2 + c_2 x_2 (1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)) &= P \sin(pt + \varphi) \end{aligned} \right\}, \quad (1.3)$$

где m_1 и m_2 – массы разрушающегося вещества за один акт силового воздействия;

\ddot{x}_1, \ddot{x}_2 – ускорения элементов 1 и 2 соответственно;

c_1 и c_2 – коэффициенты жесткости;

x_1 и x_2 – деформации отдельных элементов системы от действия нагрузки;

P – сила, приложенная к системе;

$\sin(pt + \varphi)$ – закон изменения силы P , выводящей систему из равновесия;

p – частота приложения силы;

- t – время приложения нагрузки;
- η – коэффициент сопротивления деформируемой среды;
- φ – фазовый угол;
- τ – время релаксации;
- $\frac{t}{\tau}$ – коэффициент затухания колебаний;
- \dot{x}_2 – скорость элемента 2.

Однако допущение о том, что окисел представляется лишь как упругая составляющая, будет не корректным, так как противоречит реальной физической сущности процесса, целью которого является разрушение окисла на поверхности металла.

Автором работы [33] предлагается теория струйно-абразивной обработки, которая учитывает помимо сил нормального давления N и трения $F_{тр}$ также силу резания F_p обрабатываемого материала единичной сферической абразивной частицей, имеющей радиусы сферы и режущей части R и ρ соответственно. Схема движения абразивной частицы по поверхности обрабатываемого металла с образованием сферического навала с радиусом r_H представлена на рисунке 1.4.

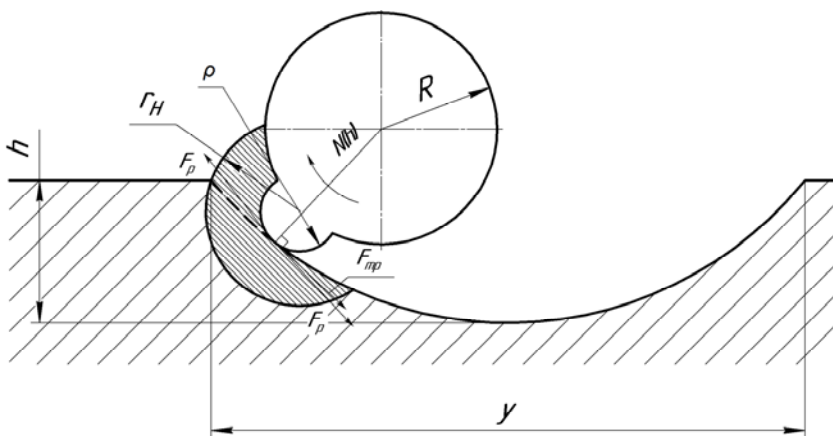


Рис. 1.4. Схема движения абразивной частицы по поверхности обрабатываемого металла с образованием навала [33]

В этой же работе [33] приводится система уравнений, которая описывает взаимодействие абсолютно жесткой частицы с пластичным полупространством при углах падения частиц от 10–90°

$$\left. \begin{aligned} m \frac{d^2 h}{d\tau^2} &= -N(h) \\ m \frac{d^2 y}{d\tau^2} &= -F_p - F_{\text{тр}} \end{aligned} \right\}, \quad (1.4)$$

где m – масса абразивной частицы;

h – текущая глубина лунки;

$N(h)$ – нормальное (к обрабатываемой поверхности) усилие;

$F_p, F_{\text{тр}}$ – силы резания и трения;

τ – время контакта;

y – длина лунки.

Однако, использование зависимостей (1.4) на практике затруднено тем, что в них не представлены прочностные (механические) свойства обрабатываемого материала. К тому же следует знать закон изменения во времени параметров лунки h и y , для чего необходимы дополнительные экспериментальные исследования. Отмеченное обстоятельство показывает, что результаты расчета по уравнениям (1.4) обладают высокой трудоемкостью и недостаточно высокой практической ценностью.

Обобщая изложенное, можно утверждать, что в рассмотренных работах не представлена схема разрушения в точке соударения струи с плоской преградой; нет связи между механическими свойствами обрабатываемого материала, кинематическими и энергосиловыми параметрами струи жидкости, воздействующей на плоскую преграду; отсутствует зависимость для определения минимально допустимого давления разрушения преграды при воздействии на нее струи рабочей жидкости, что затрудняет подбор насосного оборудования, необходимого для реализации струйной технологии.

Одним из основных направлений при разработке гидроабразивных установок следует считать разработку струеформирующих

устройств, обеспечивающих увеличение скорости струи, сокращение технологического цикла, повышение производительности труда.

Аппарат, непосредственно формирующий струю и направляющий ее на обрабатываемую поверхность, является одним из основных элементов гидроабразивной установки, оказывающим существенное влияние на интенсивность процесса и степень использования энергии струи рабочей жидкости. Конструкция и размеры аппарата зависят от характера операции, конфигурации и габаритных размеров обрабатываемой детали [1, 2, 4, 9, 14, 15].

Струя, воздействующая на твердое тело, должна обладать достаточным запасом энергии при выходе из струйного аппарата и достигать обрабатываемой поверхности с минимальными потерями напора (давления) [2, 3, 4, 9, 14, 15].

Одним из основных элементов ГАО являются струеформирующие устройства типа конфузоров. Процесс формирования струи в конфузорах определяется соотношением площадей входного и выходного отверстий и углом конусности α . Так как струеформирующие устройства должны обеспечивать формирование высокоскоростной компактной струи жидкости, то основное внимание должно быть уделено выбору угла конусности конфузоров.

В настоящее время по вопросам определения оптимального угла конусности выполнены широкие исследования, результаты которых позволяют сделать выводы о том, что коэффициент скорости φ с увеличением угла конусности конфузора α от $0-45^\circ$ возрастает от 0,82 до 0,98; коэффициент расхода μ при увеличении угла конусности от $0-13^\circ$ резко возрастает, а при дальнейшем изменении α коэффициент μ медленно убывает (рисунок 1.5) [34]. Из рассмотрения кривых на этом рисунке видно, что зависимость $\varphi = f(\alpha)$ практически становится горизонтальной в диапазоне углов $\alpha = 30-45^\circ$.

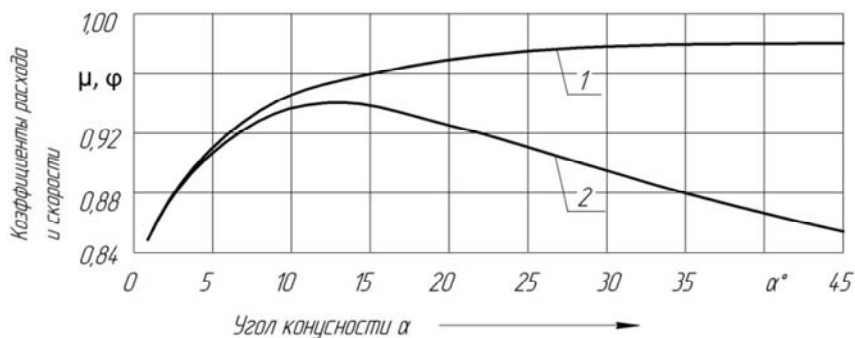


Рис. 1.5. Зависимости коэффициентов расхода μ и скорости φ от изменения угла конусности α [34]:
 1 – $\varphi = f(\alpha)$; 2 – $\mu = f(\alpha)$

Иные значения оптимальных углов конусности $\alpha_{\text{опт}}$ дают результаты автора [35] при использовании рекомендованной им формулы:

$$\alpha_{\text{итд}} = 2 \arcsin \sqrt{\frac{\lambda_{\text{нб}}(1+n_c) + 0,14}{\lambda_{\text{нб}}(1+n_c) + 1,26}}, \quad (1.5)$$

где $\lambda_{\text{сп}}$ – коэффициент потерь на гидравлическое трение;

n_c – отношение площадей выходного и входного отверстий конфузора.

При $n_c = 0,0625$ и $\lambda_{\text{нб}} = 0,018\text{--}0,0020$ результаты расчета по формуле (1.5) дают значения $\alpha_{\text{опт}} = 38\text{--}41^\circ$, что не совсем согласуется с вышеприведенными данными автора [34].

Следует отметить, что допущение о постоянстве коэффициента $\lambda_{\text{сп}}$ является не корректным, так как коэффициент потерь на гидравлическое трение изменяется по всей длине конфузора, что обусловлено изменением средней скорости потока, при движении жидкости по коническому участку.

В соответствии с результатами исследований, приведенными в таблице 1.1 [36], коэффициент скорости φ достигает максимального значения при угле конусности 45° , а максимальный коэффициент расхода μ отмечается при угле конусности, равном 13° .

Однако, данным таблицы 1.1 противоречат утверждения автора [37] о том, что оба коэффициента μ и φ достигают своего максимального значения ($\mu = \varphi = 0,96$) при угле конусности $\alpha = 13^\circ 24'$.

Таблица 1.1 – Значение коэффициентов сжатия ε , скорости φ и расхода μ для конически сходящихся насадков [36]

Угол конусности в градусах	Коэффициент сжатия ε	Коэффициент расхода μ	Коэффициент скорости φ
0	1	0,829	0,829
1	1	0,825	0,852
2	1	0,873	0,873
3	1	0,892	0,892
4	1	0,900	0,909
5	1	0,920	0,920
6	1	0,925	0,925
8	0,998	0,931	0,933
10	0,987	0,937	0,949
12	0,986	0,942	0,955
13	0,983	0,945	0,961
14	0,977	0,943	0,965
15	0,968	0,938	0,969
25	0,932	0,908	0,974
35	0,904	0,883	0,977
45	0,857	0,857	0,983

В работе [38] приводятся зависимости изменения коэффициента сопротивления ξ_1 от угла сужения конфузор α , при различных отношениях длины сужающегося участка l к выходному диаметру D_1

(рисунок 1.6). Исходя из данных рисунка 1.6 можно утверждать, что оптимальный угол конусности α лежит в пределах 40–60°.

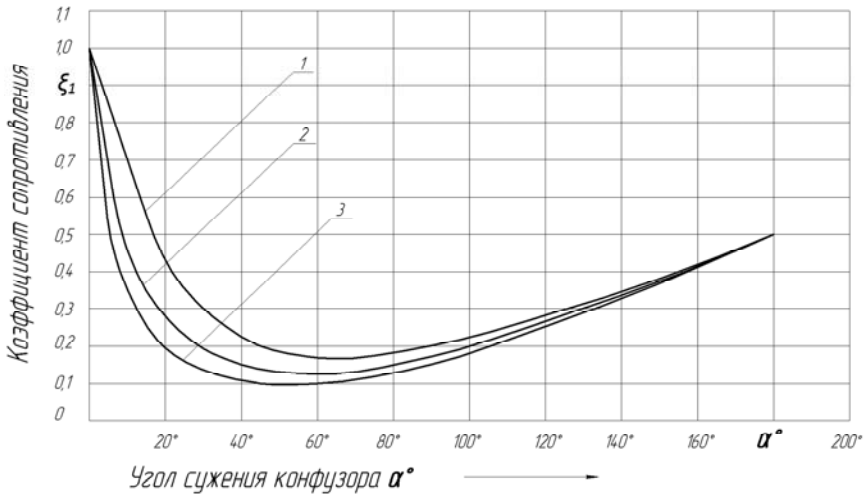


Рис. 1.6. Графики изменения коэффициента сопротивления ξ_1 от угла сужения конфузора α , при различных отношениях длины сужающегося участка l к выходному диаметру D_1 [38]:

$$1 - \frac{\ell}{D_1} = 0,25; 2 - \frac{\ell}{D_1} = 0,60; 3 - \frac{\ell}{D_1} = 1,00$$

Иная точка зрения по этому вопросу приведена в работах [39, 40], авторы которых утверждают, что оптимальный угол конусности для питающего канала струйного элемента находится в диапазоне значений 13,5–15°.

Проанализировав приведенные выше примеры можно сделать вывод, что рекомендации по оптимальному углу конусности носят крайне противоречивый характер, не имеют однозначного математического обоснования, что создает предпосылки для дальнейшего теоретического и экспериментального изучения этого вопроса.

1.2 Математическая модель расчета минимального давления разрушения поверхностного слоя коррозии от воздействия реверсивной струи рабочей жидкости

Результаты последних теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в НИЛ «Водохозяйственные системы» БНТУ, показали высокую эффективность очистки на основе применения реверсивной струи [27, 42]. Эффективность обработки при использовании реверсивной струи повышается за счёт возрастания давления на очищаемую площадку. Это обусловлено дополнительным действием переносных сил инерции, вызванных изменением на противоположное направления движения струи после взаимодействия с очищаемой поверхностью [27, 136–140].

Для расчета минимального давления от воздействия реверсивной струи на плоскую поверхность воспользуемся методом, который в механике сплошной среды известен как метод верхней оценки (приближенный энергетический метод) [11, 13, 27, 41–45].

Сущность метода заключается в том, что объем очага деформации (разрушения) представляется в виде жестких (недеформируемых) блоков, скользящих один относительно другого и по границам с жесткой зоной. Тем самым действительное поле линий скольжения, характеризующее напряженное состояние деформируемого объекта, заменяют кинематически возможным, состоящим из системы прямолинейных отрезков, образующих треугольники. Вдоль границ блоков - сторон треугольников - компоненты скоростей перемещений претерпевают разрывы. Внутри каждого блока поле скоростей однородно, т. е. вектор скорости для всех точек данного блока один и тот же. На этом основании строят поле скоростей, которое при правильном построении всегда является кинематически возможным. Число и размеры треугольных блоков первоначально выбирают произвольно [41–45].

Для проведения расчета используем кинематически возможное поле скоростей (рисунок 1.7, а), состоящее из жестких однородных блоков. Было принято, что корпус прилегает к обрабатываемой поверхности (слою коррозии) и в результате соударения струи с преградой она, разворачиваясь на 180° , уносит блоки вверх (рисунок 1.7, а).

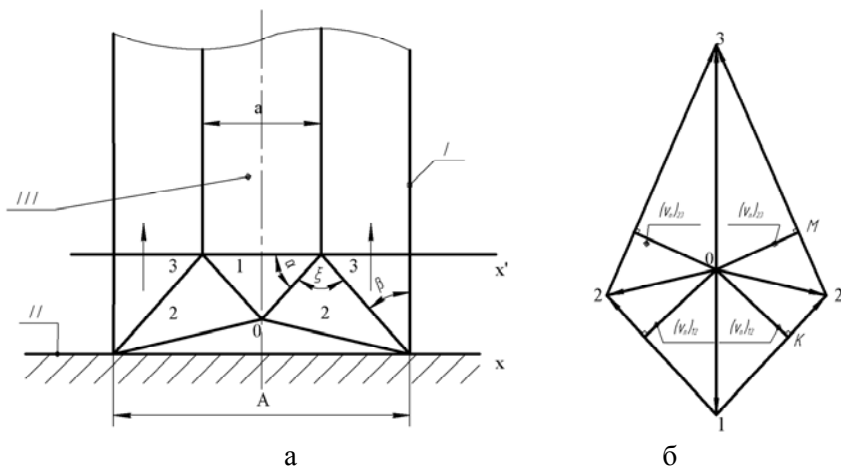


Рис. 1.7. Кинематически возможное поле линий скольжения, принятое для теоретического анализа процесса РСО:
 а – поле линий скольжения; б – годограф скоростей;
 I – корпус, II – обрабатываемая поверхность, III – струя рабочей жидкости

Для описания силового воздействия струи на плоскую преграду на основе использования метода верхней оценки сделаем ряд допущений:

- воздействие струи на обрабатываемый участок поверхности по кинематике формоизменения аналогично действию пуансона при его внедрении в жесткопластичное пространство (струя принимается квазижестким телом);
- скорость струи на выходе из конфузора равна скорости ее внедрения в преграду и как следствие скорости перемещения блока, на который воздействует струйный поток рабочей жидкости;
- обрабатываемая поверхность считается плоским слоем коррозионных отложений, который покрывает основу детали и имеет одинаковую толщину, распространяясь на бесконечную длину влево и вправо от оси симметрии струи;
- материал покрытия считается изотропным, однородным, несжимаемым;

– вдоль границ между блоками касательные напряжения, возникающие при скольжении блоков, являются максимальными

$$\tau_n = k, \quad (1.6)$$

где k – постоянная прочности обрабатываемого материала, рассчитываемая по результатам испытаний на одноосное растяжение (сжатие) по формуле

$$k = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}, \quad (1.7)$$

где σ_s – предел текучести обрабатываемого материала (слоя коррозионных отложений), определяемый по критериальной зависимости Губера-Мизеса [44];

Вид принятого поля линий скольжения не зависит от изменения скорости струи в процессе разрушения слоя коррозионных отложений. Силы инерции не оказывают влияния на кинематику разрушения слоя коррозионных отложений.

Из последнего допущения следует, что принимаемый для расчета и соответствующий данному полю годограф скоростей (рисунок 1.7, б) сохраняет свое первоначальное направление как на начальной, так и на завершающей стадии разрушения слоя коррозионных отложений.

Для построения годографа (рисунок 1.7, б) от центра годографа (точка O) по вертикали вниз откладывается вектор $O1$ скоростей струи (v) и блока 1 (v_{01}). Для построения условно принимается длина вектора $O1$, равная единице. Далее от конца вектора $O1$ проводится линия, параллельная линии 12, а из точки O – линии 20. Пересечение этих линий определяет положение точки 2. Продолжая построение подобным образом, далее получим изображенный на рисунке 1.7, б годограф. Линии годографа 12, 23 обозначают относительные скорости блоков v_{12} , v_{23} вдоль линий разрыва 12, 23 (рисунок 1.7, б).

Для расчета динамических напряжений на поверхностях разрыва 12 и 23 из центра О годографа откладываются отрезки \overline{OK} и \overline{OM} , направленные по нормали к поверхностям 12 и 23 и характеризующие нормальные компоненты скоростей $(v_n)_{12}$ и $(v_n)_{23}$ частиц разрушаемой среды, пересекающих поверхности разрыва скорости.

Для определения величины давления, действующего со стороны струи на поверхность коррозионного слоя и вызывающего его разрушение, воспользуемся уравнением баланса мощностей внешних и внутренних сил [41]

$$W_{г.стр} = W_{вн} , \quad (1.8)$$

где $W_{г.стр}$ – гидравлическая мощность струи, действующей на преграду.

Величина $W_{г.стр}$ определяется следующим образом

$$W_{г.стр} = pQ = pSv, \quad (1.9)$$

где p – гидродинамическое давление, возникающее в точке соударения струи с преградой, Н/м²;

Q – расход жидкости в струе м³/с;

S – площадь живого сечения струи, м;

v – скорость струи (средняя) в момент соударения с преградой.

Мощность внутренних сил $W_{вн}$ в (1.8) представим в виде следующей суммы

$$W_{вн} = W_{раз} + W_{дин} , \quad (1.10)$$

где $W_{раз}$ – мощность внутренних сил сопротивления, действующих на поверхностях разрыва скорости. Для расчета мощности $W_{раз}$ воспользуемся уравнением [41]

$$W_{раз} = \sum \tau_n b l_{rs} v_{rs}, \quad (1.11)$$

где τ_n – касательные напряжений, возникающие вдоль границ блоков при их относительном перемещении. На свободных поверхностях $\tau_n = 0$, а на контактных – τ_n определяется по условию Губера-Мизеса [44]

$$\tau_n = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}, \quad (1.12)$$

где σ_s – предел текучести деформируемого материала, определяемый по результатам испытаний на одноосное растяжение (сжатие). Для хрупких материалов, на основании данных автора [108], вместо σ_s можно взять значение предела прочности σ_b из испытаний на растяжение (сжатие), так как эти величины отличаются незначительно;

l_{rs} – длина границ между блоками r и s , (r, s – номера блоков в принятом поле линий скольжения; $r = 0, 1, 2$; $s = 1, 2, 3$);

v_{rs} – величина разрыва скорости вдоль границ смежных блоков r, s .

Перемещение частиц деформируемой сферы через поверхность разрыва сопровождается изменением их количества движения. Под действием импульса силы, величина которого определяется указанным изменением количества движения, на поверхности разрыва скорости возникают дополнительные динамические напряжения

$$(q_{\text{дв}})_{rs} = \rho (v_n)_{rs} v_{rs}, \quad (1.13)$$

где ρ – плотность разрушаемого материала, кг/м^3 ;

$(v_n)_{rs}$ – нормальное к поверхности разрыва компонента скорости, определяемая по годографу скоростей из рисунка 1.7, б.

Мощность $W_{\text{дин}}$, затраченная на преодоление напряжений напряжений $(q_{\text{дин}})_{rs}$, составляет

$$W_{\text{дв}} = \rho (v_n)_{rs} v_{12}^2 b l_{rs}. \quad (1.14)$$

Для определения давления струи на преграду необходимо с помощью параметров поля α и β , размеров сечения струи (a, b) выразить длину границ блоков l_{rs} , установить соотношения между кине-

математическими параметрами точек деформируемой среды v_{rs} (v_n)_{rs} и блока 1.

Искомые значения длин граничных поверхностей l_{rs} для блоков поля (рисунок 1.7, а) будут следующие

$$l_1 = \frac{a}{2 \cos \alpha}, \quad l_2 = \frac{a \cos(\alpha - \beta)}{2 \cos \alpha \cdot \sin \xi}, \quad l_3 = \frac{A - a}{2 \sin \beta}. \quad (1.15)$$

Выражения для расчета кинематических параметров разрушаемой среды, полученные на основе годографа скорости (рисунок 1.7, б), имеют вид

$$\begin{aligned} v_{02} &= \frac{va \sin \beta}{(A - a) \sin \xi}, \quad v_{03} = v \frac{a}{A - a}, \\ v_{12} &= \frac{vA \sin \beta}{(A - a) \cos(\alpha - \beta)}, \quad v_{23} = \frac{vA \cos \alpha}{(A - a) \cos(\alpha - \beta)}. \quad (1.16) \\ (v_n)_{12} &= 0, \quad (v_n)_{23} = \frac{vA \sin \beta}{A - a}, \quad (v_n)_{02} = v \sin(\xi + \beta) \end{aligned}$$

Дополнительный угол ξ введен в рассмотрение для упрощения записей. Он однозначно определяется параметрами поля α и β

$$\sin^2 \xi = \frac{\cos^2(\alpha - \beta)}{1 + \frac{\cos^2 \alpha}{\lambda^2 \sin^2 \beta} - \frac{2 \cos \alpha \sin(\alpha - \beta)}{\lambda \sin \beta}}, \quad (1.17)$$

где $\lambda = \frac{a}{A - a}$ – коэффициент обжатия струи.

Зависимость (1.8) с учетом (1.10)–(1.14) представим в виде

$$pabv_{01} = \tau_n b (l_{12} v_{12} + l_{02} v_{02} + l_{23} v_{23}) + \rho b \left((v_n)_{12} v_{12}^2 l_{12} + (v_n)_{02} v_{02}^2 l_{02} + (v_n)_{23} v_{23}^2 l_{23} \right). \quad (1.18)$$

Выражение (1.18) после преобразования с учетом (1.15) и (1.16) представим следующим образом

$$p_{min} = 2\tau_n \left((1+\lambda) \frac{\sin \beta}{\cos(\alpha-\beta)\cos \alpha} + \lambda \frac{\cos(\alpha-\beta)\sin \beta}{\cos \alpha \sin^2 \xi} + \left(1 + \frac{1}{\lambda}\right) \times \frac{\cos \alpha}{\sin \beta \cos(\alpha-\beta)} \right) + \rho v_{01}^2 \times \left(\lambda^2 \frac{\sin^2 \beta \sin(\xi-\beta)\cos(\alpha-\beta)}{\sin^3 \xi \cos \alpha} + (1+\lambda)^2 \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2(\alpha-\beta)} \right). \quad (1.19)$$

В уравнении (1.19) величины p , τ_n , ρ , v_{01} имеют тот же физический смысл, что и в (1.9), (1.11), (1.12).

Запишем выражение (1.19)

$$p = p_{\text{нò}} + p_{\text{äèí}}, \quad (1.20)$$

где $p_{\text{ст}}$ – статическая составляющая давления p , учитывающая действие сил сопротивления и контактного трения на поверхности разрыва скорости

$$p_{\text{нò}} = 2\tau_n \left((1+\lambda) \frac{\sin \beta}{\cos(\alpha-\beta)\cos \alpha} + \lambda \frac{\cos(\alpha-\beta)\sin \beta}{\cos \alpha \sin^2 \xi} + \left(1 + \frac{1}{\lambda}\right) \frac{\cos \alpha}{\sin \beta \cos(\alpha-\beta)} \right), \quad (1.21)$$

где $p_{\text{дин}}$ – динамическая составляющая давления p , учитывающая действие динамических напряжений на поверхностях разрыва скорости и зависящих от плотности материала ρ и скорости v_{01} .

$$p_{\text{äëí}} = \rho v_{01}^2 \left(\lambda^2 \frac{\sin^2 \beta \sin(\xi - \beta) \cos(\alpha - \beta)}{\sin^3 \xi \cos \alpha} + \right. \\ \left. + (1 + \lambda)^2 \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2(\alpha - \beta)} \right) \quad (1.22)$$

Изменяя углы α и β , а так же подставляя коэффициент обжатия струи λ , можно получить различные значения для давления p_{min} . Наиболее правильным и необходимым для разрушения слоя коррозионных отложений, естественно, будет наименьшее значение p_{min} . Для определения минимума выражения (1.19) определим оптимальные величины углов α и β . Для задачи, решаемой в квазистатической постановке (действие динамических напряжений на поверхностях разрыва не приводит к изменению вида принятого кинематически возможного поля и годографа скоростей), оптимальную величину параметров α и β найдем, исследуя на экстремум только статическую составляющую давления $p_{\text{ст}}$. Для этого приравниваем к нулю первую производную от давления $p_{\text{ст}}$ по углу α и β .

$$\begin{cases} \frac{\partial p_{\text{ст}}}{\partial \alpha} = 0 \\ \frac{\partial p_{\text{ст}}}{\partial \beta} = 0 \end{cases} \quad (1.23)$$

Выражение (1.21) с учетом (1.23) представим в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial p_{\text{н0}}}{\partial \alpha} = 2\tau_n \left((1+\lambda) \frac{\sin \beta}{\cos(\alpha-\beta)\cos \alpha} + \lambda \frac{\cos(\alpha-\beta)\sin \beta}{\cos \alpha \sin^2 \xi} + \right. \\ \left. + \left(1 + \frac{1}{\lambda}\right) \frac{\cos \alpha}{\sin \beta \cos(\alpha-\beta)} \right)' = 0 \\ \frac{\partial p_{\text{н0}}}{\partial \beta} = 2\tau_n \left((1+\lambda) \frac{\sin \beta}{\cos(\alpha-\beta)\cos \alpha} + \lambda \frac{\cos(\alpha-\beta)\sin \beta}{\cos \alpha \sin^2 \xi} + \right. \\ \left. + \left(1 + \frac{1}{\lambda}\right) \frac{\cos \alpha}{\sin \beta \cos(\alpha-\beta)} \right)' = 0 \end{array} \right. \quad (1.24)$$

В результате дифференцирования системы уравнений (1.24) получим выражения для расчёта углов α и β , обеспечивающих минимальное значение $p_{\text{ст}}$

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = \beta + \arccos \frac{\sqrt{9\left(\lambda + \frac{1}{\lambda}\right) + 14}}{3\left(\sqrt{\lambda} + \frac{1}{\sqrt{\lambda}}\right)} \\ \beta = \arctg \frac{\sqrt{9\left(\lambda + \frac{1}{\lambda}\right) + 14}}{3\lambda + 5} \end{array} \right. \quad (1.25)$$

Для расчетов по формуле (1.19) принято на основании рекомендаций для цементированного слоя коррозии, имеющего состав 69 % Fe_2O_3 , 5,4 % CaO , 0,17 % MgO , что значения предела текучести $\sigma_s = 2,5$ МПа и плотности $\rho = 2500$ кг/м³ [46–48]. При выводе формулы (1.19) принималось, что в момент соударения струи с преградой скорость блока 1 [45]

$$v_{01} = 0,5v, \quad (1.26)$$

где v – скорость струи при взаимодействии ее с поверхностью.

Особенностью данных расчетных зависимостей (1.25) является то, что при их подстановке в уравнение (1.19) появляется возможность прогнозировать величину минимального давления, вызывающего разрушение слоя коррозии на поверхности корпуса судна, учитывая при этом механические характеристики (ρ , σ_s , σ_b) разрушаемого материала и скорость струи v_{01} , воздействующей на преграду.

На основании теоретических расчетов был построен график, представленный на рисунке 1.8, из которого видно, что в принятом диапазоне скоростей струи v ($v = 80\text{--}140$ м/с) минимальное давление p_{min} , необходимое для разрушения слоя коррозии, отмечается при коэффициенте обжатия струи $\lambda = 0,063$ и изменяется для принятых физико-механических характеристик материала ($\sigma_s = 2,5$ МПа, $\rho = 2500$ кг/м³) в диапазоне 8–17 МПа.

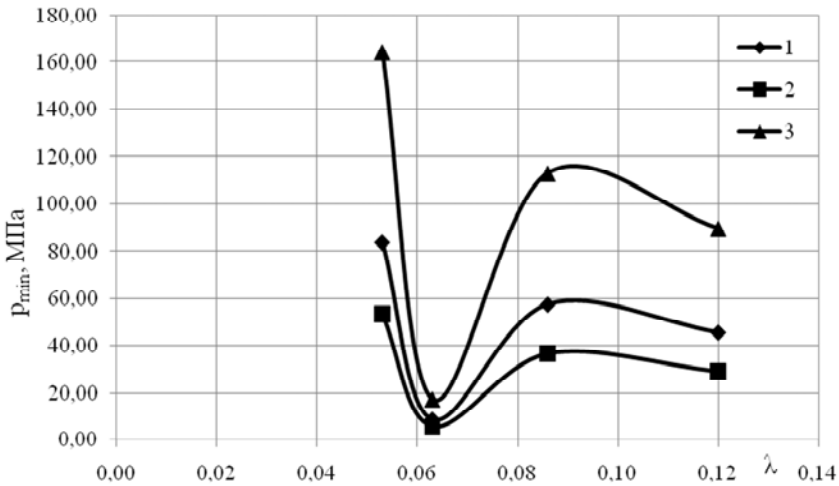


Рис. 1.8. График зависимости $p(\lambda)$, $\tau_n = 1,44$ МПа, $\sigma_s = 2,5$ МПа:
1 – $v = 100$ м/с, 2 – $v = 80$ м/с, 3 – $v = 140$ м/с

1.3 Коррозия. Механизмы и типы реализации

«Коррозия – это самопроизвольное разрушение материалов вследствие их физико-химического взаимодействия с окружающей средой (агрессивной атмосферой, морской водой, растворами кислот, щелочей, солей, различными газами и т.п.)» [49, с. 5].

Ряд авторов [49–79] предлагают разделить коррозию по механизму протекания на химическую и электрохимическую.

Химическая коррозия протекает при воздействии на поверхность металлов и сплавов сухого воздуха, газов, жидкостей, не взаимодействующих с электрическим током, различных нефтепродуктов и расплавленных солей [55–57].

Электрохимическая коррозия протекает с образованием множества мельчайших гальванических элементов (пар) под действием тока, при котором происходит движение электронов металла в электролит и соответственно разрушение этого металла [49–63].

По условиям протекания необходимо различать такие типы коррозии как [49, 50, 55–72]:

- газовая;
- неэлектролитная (происходит при контакте металлов с бензином, дизельным топливом, керосином и т.д.);
- электролитная (происходит при контакте металлов с солями, кислотами, щелочами);
- атмосферная, морская, речная, подземная (протекает в естественных природных условиях);
- электрокоррозионная (протекает под воздействием электрического тока);
- радиохимическая (под воздействием радиоактивного излучения);
- биологическая (под воздействием продуктов жизнедеятельности микроорганизмов);
- фреттинг – коррозия (осуществляется при одновременном воздействии коррозионной среды и сил трения);
- кавитационная (протекает при ударном воздействии кавитирующей среды на металл);
- контактная (осуществляется при контакте металлов, имеющих различные потенциалы);

– щелевая (протекает в узких щелях и зазорах между отдельными деталями);

– структурная (обусловлена структурной неоднородностью частей сплава);

– термоконтактная (возникает за счет температурного градиента, обусловленного неравномерным нагреванием поверхности металла).

По характеру поражений поверхности коррозия бывает:

– равномерная (протекает на всей поверхности с одинаковой скоростью) и неравномерная;

– местная (протекает на отдельных участках).

В процессе эксплуатации, и при изготовлении элементов конструкций, практически невозможно устранить влияние атмосферных факторов коррозии (рисунок 1.9) или специальных агрессивных сред (рисунок 1.10) на металл. В этих случаях процессы коррозии практически неизбежны. Атмосферная коррозия связана с образованием фазовой и адсорбционной пленок влаги на поверхности металла; при этом фазовая пленка формируется при влажности около 100 %, а адсорбционная пленка – при конденсации влаги, когда влажность достигает значений 60–70 % [49, 56, 73–81]. Химический состав продуктов коррозии можно выразить уравнением $n\text{Fe}_2\text{O}_3 + m\text{FeO} + q\text{H}_2\text{O}$ [49].

Следует отметить, что воздействию атмосферной коррозии способствует шероховатость поверхности, наличие микрочастиц пыли и других загрязнений, присутствие некоторых газов (SO_2 , H_2S , Cl_2), микрочастиц солей (NaCl , KCl) [49, 52, 56].



Рис. 1.9. Фотография поверхности стального образца, подвергнутого атмосферной коррозии при хранении в производственных условиях ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, влажность $K = 60\%$) на ОАО «Агат – электромеханический завод»:

1 – технологическое отверстие для крепления образца; 2 – закорродированная в результате атмосферной коррозии поверхность образца; материал – сталь 08кп



Рис. 1.10. Фотография поверхности образца (материал – Ст3), подвергнутого процессом речной и атмосферной коррозии; образец вырезан из обшивки корпуса судна (на уровне ватерлинии), проходящего ремонт на ОАО «Пинский ССРЗ»

В промышленной атмосфере скорость коррозии металлов может достигать в среднем 575 г/м^2 в год. Ежегодные потери такой страны как США от коррозии оцениваются порядка 100 млрд долларов [52]. В мире, по подсчетам специалистов, безвозвратные потери металла вследствие коррозии составляют около 10–15 % мировой продукции стали [49].

Возрастающие требования к качеству очищенной поверхности от коррозии, снижению энергоемкости процесса очистки вызывают необходимость совершенствования существующих технологических процессов и разработке новых способов обработки (очистки).

1.4 Анализ современных способов и технологий, используемых для струйной обработки металлических поверхностей

В настоящее время за рубежом и в Республике Беларусь для очистки металлических поверхностей от коррозии используются в основном способы и технологии, представленные на рисунке 1.11.



Рис. 1.11. Схема применяемых способов для очистки металлических поверхностей от коррозии [1–27, 82–90]

Выбор того или иного способа очистки зависит от объема выполняемых работ, типа коррозии, размеров очищаемых изделий. Рассмотрим краткую характеристику способов, представленных на рисунке 1.11.

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, ша рошки и т.п. [3, 4, 7].

С целью 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 [3, 4, 7].

Производительность очистки металлических поверхностей от коррозии с помощью механизированного инструмента составляет 2–10 м²/ч, а энергоемкость процесса 0,5 кВт·ч/м² [7].

Основными недостатками механических способов являются:

- 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 и следы вибрации (огранка);

Следует также отметить, что при очистке металлических поверхностей от коррозии механизированным инструментом на поверхности очищаемого изделия остается до 250 г продуктов коррозии на 1 м² [3, 7].

Термические способы очистки поверхностей от продуктов коррозии основаны на нагреве пламенем, например из кислородно-ацетиленовой горелки, до температуры их сгорания [63].

Для исключения коробления и температурной деформации данный способ применяется для металлов с толщиной не менее 6 мм. Производительность очистки составляет 1–1,5 м²/ч [57].

Однако 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 [57].

Сложность применяемого оборудования и высокие требования по технике безопасности 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, мелкодисперсный лед и другие материалы [1–30].

Принцип действия аппаратов струйно-абразивной очистки основан на сообщении кинетической энергии частицам абразива и их направленной подаче на очищаемое изделие. Это достигается за счет энергии струи сжатого воздуха. При ударе о преграду частицы благодаря запасенной энергии вызывают поверхностное разрушение и деформацию материала, следствием чего является удаление продуктов коррозии, загрязнений с поверхности изделий [3, 4, 7].

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

Пескоструйная очистка металлических поверхностей от коррозии осуществляется либо с использованием пескоструйного аппарата с пневматическим приводом и специальными соплами, либо с помощью пескочмета, который бросает песок вращающимися лопатками на обрабатываемую поверхность. Для пескоструйной обработки может использоваться неочищенный песок любого состава, а также чистый кварцевый песок определенной зернистости: а) крупный 1–2 мм; б) средний 0,6–0,8 мм; в) мелкий 0,2–0,4 мм [3, 4, 7, 57]. Производительность при пескоструйной очистке составляет 2–3 м²/ч [3, 57].

Лучшие результаты при пескоструйной очистке получаются при давлении воздуха на выходе из струеформирующего устройства 0,3–0,35 МПа, а при повышении давления до 0,4–0,5 МПа происходит резкое увеличение пылеобразования и превращение песка в

мелкие фракции. Значительная запыленность, которая может приводить к заболеванию силикозом у рабочего персонала, засорение близлежащего оборудования, повышенный износ струеформирующих устройств, сопровождающих работу пескоструйных аппаратов, ограничивают применение данного способа на промышленных предприятиях [7, 57].

Дробеструйная очистка отличается от пескоструйной тем, что в качестве абразива используется чугунная или стальная дробь. Конструкции аппаратов дробеструйной очистки существенно не отличаются от пескоструйных. При работе с дробью требуется давление порядка 0,6–0,7 МПа. Размеры частиц составляют 0,6–0,8 мм. Производительность дробеструйной очистки составляет 5–8 м²/ч [3, 4, 7, 57].

Однако при контакте частиц дроби с обрабатываемой поверхностью возникает высокая температура в зоне обработки. Повышенный износ струеформирующего устройства является негативным фактором, сопутствующим дробеструйной очистке [3, 7, 57].

Основными преимуществами струйно-абразивных способов очистки являются: высокая производительность процесса, возможность очистки изделий сложной конфигурации, простота схемы обработки, формирование поверхности с характерной только для данного процесса топографией, образование на поверхности обработки микроуглублений, служащих для размещения смазки, предохраняющей изделие от преждевременного и интенсивного износа [3, 4, 7].

Одной из основных проблем при струйно-абразивной обработке поверхности является запыленность воздуха, что требует специальных средств защиты для персонала. Также негативным моментом является отсутствие на очищенной поверхности защитного антикоррозионного покрытия [3, 4], что требует значительного сокращения промежутка времени на межоперационный период из-за опасности повторного коррождения только что очищенной поверхности.

В нашей стране и за рубежом применяются гидравлические способы очистки, исключаящие запыленность воздуха, температуру в зоне обработки. Гидравлические способы очистки металлических поверхностей от продуктов коррозии можно разделить на три группы: гидроабразивный; гидродинамический; кавитационный (очист-

ка струей жидкости с использованием эффекта кавитации в струйном потоке) [3, 4, 7, 9].

Гидроабразивная очистка (ГАО) предусматривает использование в струйном потоке жидкости таких абразивных материалов как стекло, пемза, кварц, гранит, тальк, известняк [3, 4]; бентонитовая глина [91–110]. При ГАО длительность работоспособности абразивной частицы обратно пропорциональна ее диаметру [3, 4].

При гидроабразивной обработке 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 и поэтому эффективность их воздействия невелика. Вследствие этого происходит постепенное уменьшение шероховатости обрабатываемой поверхности до $Ra = 0,05\text{--}1$ мкм [3, 4, 9]. Производительность гидроабразивной обработки составляет $5\text{--}6$ м²/ч [57].

К числу достоинств гидроабразивного способа можно отнести:

- повышение культуры производства за счет отсутствия пылевыделения;
- устранение проблемы разупрочнения поверхности за счет теплоотвода повышенной температуры в зоне обработки посредством воды, входящей на 95–97 % в состав рабочей жидкости;
- 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.

Для реализации способа ГАО используется сравнительно недорогое оборудование, состоящее из насоса, бункера, шланга и насадка; к тому же не требуется персонал высокой квалификации [3, 4, 9].

Гидродинамический способ очистки предусматривает использование струй воды низкого (до 1 МПа), среднего (1–5 МПа) и высокого давления (5–60 МПа) [7].

Преимуществом способа гидродинамической очистки является то, что при ее проведении не повреждаются поверхности самих очищае-

мых металлических изделий, для её реализации не требуется высококвалифицированный персонал. Вода хорошо проникает в микротрещины продуктов коррозии и отделяет их от поверхности металла. Очищенная поверхность получается более высокого качества, чем после механической обработки фрезами, шарошками, дробью. Универсальность водоструйных установок и возможность их применения в труднодоступных местах стимулировали быстрое развитие промышленности, производящей такие установки. На рисунке 1.12 показано проведение гидродинамической очистки металлической трубы. Скорость и качество гидродинамической очистки зависят от правильного выбора величины давления и производительности водоструйной установки для очистки, а также от характеристик самих отложений – химического состава, толщины сечения, сил адгезионного взаимодействия с очищенной поверхностью [90].



Рис. 1.12. Проведение гидродинамической очистки внутренней поверхности металлической трубы [90]

В соответствии с рекомендациями [111–113] повысить скорость и качество гидродинамической очистки можно за счет добавления в воду хорошо растворимых высокомолекулярных полимеров, таких как полиоксиден, полиакриламид и др., при этом производительность процесса очистки металлических поверхностей от коррозии возрастет до 35 % за счет структурного ориентирования молекул полимеров при высоких скоростях истечения струи из конфузора.

Основным препятствием на пути применения высоконапорных гидродинамических установок является их высокая стоимость,

большие габариты, значительные энергозатраты. Для создания высокого давления приходится использовать дорогое, громоздкое энергоёмкое оборудование.

Кавитационный способ очистки основан на эффекте создания в струе рабочей жидкости кавитационных парогазовых микропузырьков и их схлопывания в процессе изменения параметров давления в жидкости при её течении по каналам с переменным сечением. Струйное зарождение парогазовых пузырьков схематично показано на рисунке 1.13 на примере течения жидкости через сужение типа сопла Лавала [114–116].

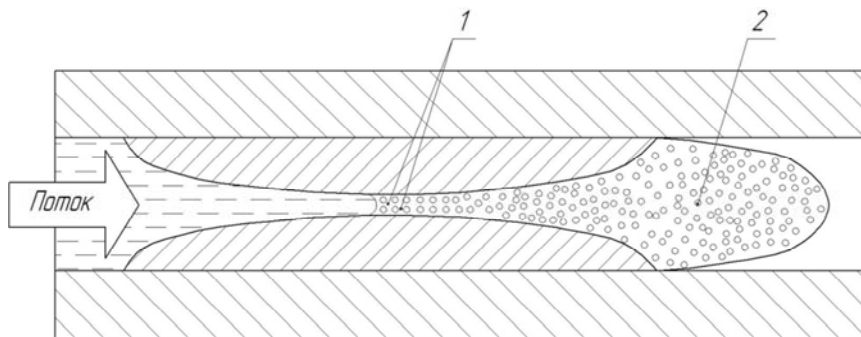


Рис. 1.13. Принципиальная схема зарождения парогазовых пузырьков в узком сечении сопла Лавала [90]:

1 – зоны зарождения парогазовых пузырьков; 2 – движение парогазовых пузырьков по соплу

При схлопывании кавитационного микропузырька [116] в локальном объеме вблизи и внутри него возникают поля высоких давлений (до 1000 МПа) и температур (до 1000–2000 °С). При коллапсе пузырька в жидкости генерируются волны разрежения-сжатия, способные на обработанной поверхности сформировать кумулятивные микроструйки со скоростями движения в 100–520 м/с. Кинетикой воздействия кумулятивных микроструй в большой степени объясняется кавитационная эрозия. Причиной эрозии является динамическое воздействие отдельного кавитационного пузырька на поверхность тела. Величина динамического импульса определяется механизмом замыкания кавитационной полости, зависящим от внешних условий, в которых существует пузырек. К таким условиям следует

отнести физические свойства жидкости, давление в окрестности пузырька, поверхностные свойства твердой стенки, а также условия, определяемые характером кавитации (размер и форма пузырька, близость соседних пузырьков и т.п.) [115, 116].

Как показали проведенные исследования, образование кавитационных пузырьков происходит при относительно небольшом снижении давления относительно давления насыщенных паров, что приводит к формированию в воде так называемых ядер кавитации [116].

В настоящее время предложены две модели образования ядер кавитации. В одном случае ядрами являются микрообъемы воздуха, содержащиеся в трещинах поверхностей тел, не смачиваемых водой, а во втором – пузырьки воздуха, окруженные оболочкой из органических примесей. Реальность обеих моделей подтверждается опытами. Если воду, содержащую ядра кавитации, предварительно обжечь при большом давлении, то можно добиться разрушения этих микрообъемов воздуха, после чего кавитационные явления значительно ослабляются [115, 116].

Вода обладает объемной прочностью, характеризующей способность сопротивляться разрыву. Но объемная прочность находится в прямой зависимости от степени очистки воды: чем чище вода, тем больше ее объемная прочность и тем труднее получить кавитационную полость. В связи с этим возникли теории «слабых пятен» жидкости или «зародышей» возможной кавитации.

Можно сказать, что вода, несущая различные твердые частицы, как бы перенасыщена этими зародышами возможной кавитации и, следовательно, наиболее предрасположена к ее проявлению. Установлено, что добавление 0,5 г угольного порошка на литр воды ведет к более раннему развитию кавитации, при этом давление в потоке в момент образования кавитационной каверны на 10–15 % выше, чем в чистой воде.

В кавитационном методе очистки поверхностей используется эрозионная способность гидравлических струй при кавитационных режимах излучения, развивающаяся при схлопывании кавитационных пузырьков, а также происходящее при этом местное ослабление прочности материала, которое затем используется для его разрушения гидродинамическим воздействием струи [90].

Очистка от коррозии кавитационными струями является эффективным способом обработки поверхностей, а присутствие кавитационных пузырьков усиливает эрозионное воздействие струи [90].

Существенными недостатками рассмотренных гидравлических способов очистки являются:

- быстрая повторная коррозия очищенных влажных поверхностей;
- необходимость обязательного пассивирования поверхности;
- повышенный износ струеформирующих устройств.

1.5 Анализ промышленного оборудования и конструкций струеформирующих устройств, используемых для очистки стальных поверхностей от коррозии

Результаты, достигнутые на ряде машиностроительных и судоремонтных заводов стран СНГ (Новороссийский, Николаевский, Мурманский, Ильичевский, Находкинский, Астраханский и т.д.), а также ведущими европейскими и японскими фирмами (Woma, Paul Hammelmann (ФРГ); Kuna (Англия); Yamada Industrial Co (Япония) и др.) свидетельствуют о высокой эффективности метода гидроабразивной обработки (ГАО) [9, 111–113, 117–121].

Однако оборудование, предлагаемое зарубежными фирмами, не решает проблему повышенного износа струеформирующих устройств, к тому же при работе на нем предъявляются высокие требования к качеству рабочей жидкости.

Для более полного анализа существующих установок рассмотрим ряд принципиальных схем гидроабразивных установок различных конструкций.

По способу подачи рабочей среды к струйному аппарату и на обрабатываемую поверхность можно выделить установки со всасыванием (эжекцией) рабочей среды в струйный аппарат и последующим ускорением ее воздухом или водой; установки с нагнетанием рабочей среды воздухом или водой с помощью насосов и последующим ускорением ее через сопло; установки с нагнетанием рабочей среды воздухом, водой или насосом и последующим ускорением ее лопастями ротора, воздухом или водой. В промышленности встре-

чаются гидроабразивные установки с разнообразными сочетаниями систем, подающих рабочую среду к струйному аппарату и ускоряющих ее. Ниже рассматриваются принципиальные схемы и конструктивные особенности таких установок [3, 4, 9].

Установка со всасыванием рабочей среды в струйный аппарат и последующим ускорением ее воздушным потоком показана на рисунке 1.14.

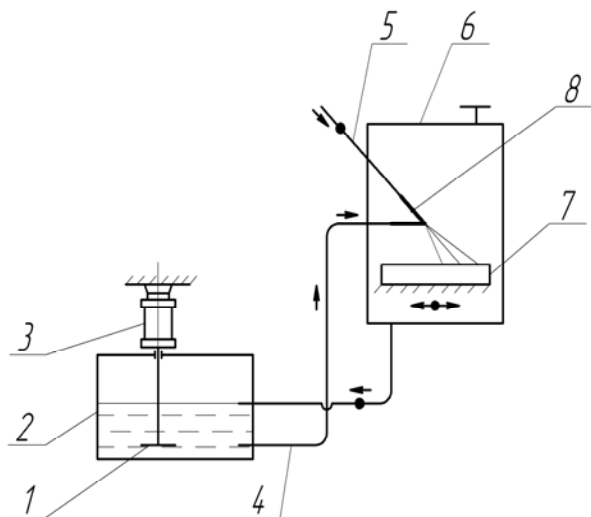


Рис. 1.14. Схема установки с эжекцией суспензии потоком воздуха [4]:
1 – пропеллерная мешалка; 2 – бак; 3 – электродвигатель; 4 – трубопровод подачи рабочей среды; 5 – трубопровод подачи сжатого воздуха; 6 – рабочая камера; 7 – обрабатываемая деталь; 8 – струйный пистолет

В баке 2 пропеллерной мешалкой 1, вращающейся от электродвигателя 3, абразив поддерживается в жидкости во взвешенном состоянии. Рабочая среда по трубопроводу 4 засасывается в струйный пистолет 8 и при помощи сжатого воздуха, поступающего по трубопроводу 5, направляется на обрабатываемую поверхность детали 7. После этого она стекает в нижнюю часть рабочей камеры 6 и самотеком возвращается в бак. Основным недостатком данной установки является низкая производительность процесса [3, 4].

Широкое распространение в промышленности получили установки с нагнетанием рабочей среды и последующим ускорением ее лопастями ротора, газом, водой или импульсными разрядами [9].

На рисунке 1.15 приведена схема такой установки. Рабочая среда из резервуара 6, расположенного в нижней части камеры, засасывается насосом 5 и нагнетается по барботажной и очистной трубам 3,4 соответственно.

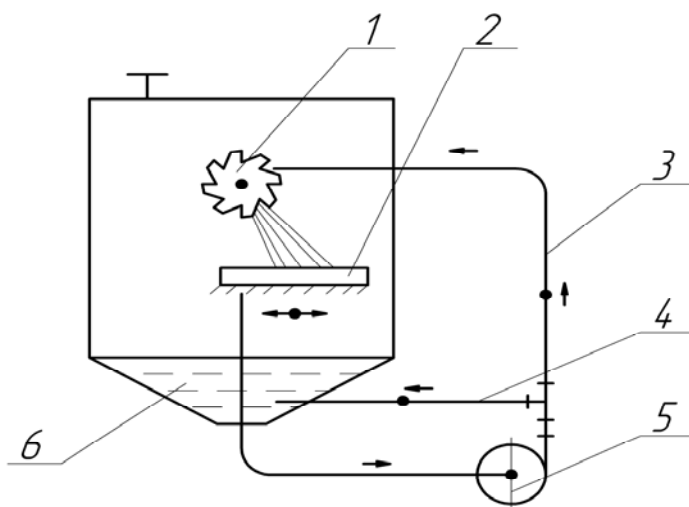


Рис. 1.15. Схема установки с подачей рабочей среды насосом на лопасти ротора [4]:

- 1 – ротор; 2 – обрабатываемая поверхность; 3 – очистная труба;
4 – барботажная труба; 5 – насос; 6 – резервуар

Рабочая среда, поступающая по барботажной трубе 4 в резервуар, служит для барботирования абразива в жидкости, а рабочая среда, поступающая по очистной трубе 3, попадает на лопасти ротора 1, которые направляют ее на обрабатываемую поверхность детали 2. Недостатками таких установок являются большой износ роторов и нерациональные затраты мощности при прокачке рабочей жидкости по барботажной трубе 4 [3, 4, 9].

Хорошо зарекомендовала себя в эксплуатации установка, схема которой показана на рисунке 1.16.

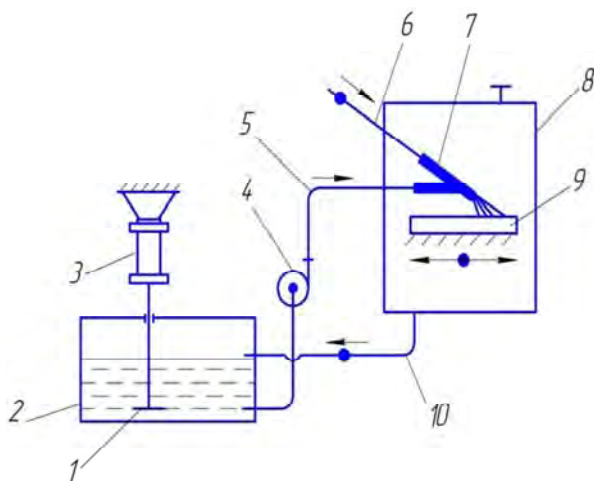


Рис. 1.16. Схема установки с подачей рабочей среды насосом и ускорением сжатым воздухом [4]:

- 1 – пропеллерная мешалка; 2 – бак; 3 – электродвигатель; 4 – насос;
 5 – гидравлический трубопровод; 6 – пневматический трубопровод; 7 – струйный пистолет; 8 – рабочая камера; 9 – обрабатываемая поверхность;
 10 – сливной трубопровод

Для поддержания частиц абразива в воде во взвешенном состоянии в баке 2 вращается от электродвигателя 3 пропеллерная мешалка 1. Рабочая среда засасывается насосом 4 и подается по гидравлическому трубопроводу 5 к струйному аппарату 7. Сжатый воздух, поступающий по пневматическому трубопроводу 6, выбрасывает на обрабатываемую поверхность детали 9, рабочую среду, которая стекает из рабочей камеры 8 и по сливному трубопроводу 10 возвращается в бак 2. Такие установки являются высокопроизводительными по расходу рабочей среды, но имеют существенный недостаток, как впрочем, и указанные выше, выражающийся в наличии пропеллерной мешалки, которую можно устанавливать только в небольших баках. Детали мешалки имеют большой износ, а замена их требует остановки всего рабочего комплекса [9].

На рисунке 1.17 представлена схема установки, которая широко используется на промышленных предприятиях Республики Беларусь.

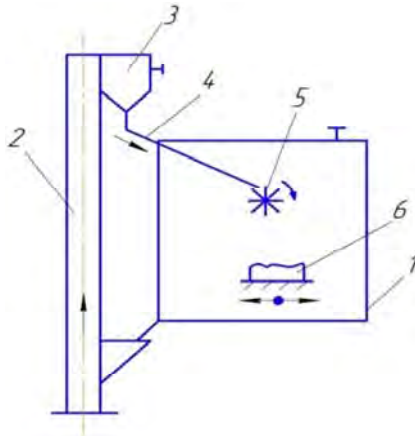


Рис. 1.17. Схема установки с подачей абразива элеватором на лопасти ротора [4]:
 1 – рабочая камера; 2 – элеватор; 3 – сепаратор; 4 – склиз;
 5 – центробежный аппарат; 6 – обрабатываемая поверхность

Абразив из рабочей камеры 1 поступает в элеватор 2, затем в сепаратор 3, в котором происходит отделение абразива от отходов, поступающих по патрубку в очистные устройства. Абразив по склизу 4 попадает в приемную воронку центробежного аппарата 5 и направляется на обрабатываемую поверхность детали 6 [3, 4, 9].

В данной установке рабочая среда подается на лопасти колеса при помощи специального элеватора, однако наличие ротора в конструкции установки вызывает частые ремонты из-за его износа.

На рисунке 1.18 представлена гравитационная установка, где в качестве активного носителя абразива используется вода.

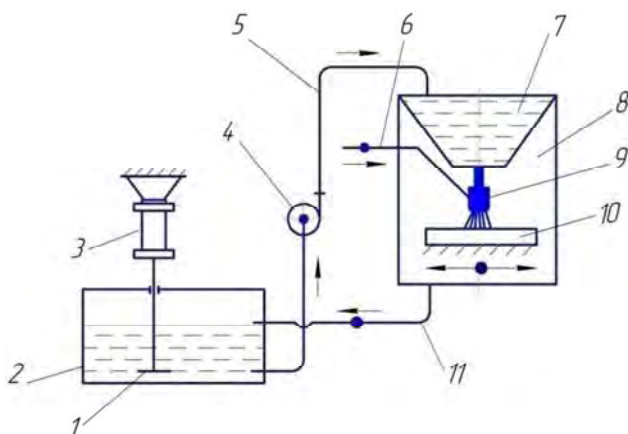


Рис. 1.18. Схема установки с подачей рабочей среды самотеком и ускорением сжатым воздухом [9]:

- 1 – пропеллерная мешалка; 2 – бак; 3 – электродвигатель; 4 – насос;
 5 – гидравлический трубопровод; 6 – пневматический трубопровод; 7 – резервуар;
 8 – рабочая камера; 9 – струйный аппарат; 10 – обрабатываемая поверхность;
 11 – сливная труба

В баке 2 пропеллерной мешалкой 1, приводимой во вращение электродвигателем 3, абразив поддерживается в жидкости во взвешенном состоянии. При помощи насоса 4 рабочая среда по гидравлическому трубопроводу 5 подается в резервуар 7, расположенный в верхней части рабочей камеры 8, из которого стекает к струйному аппарату 9 и сжатым воздухом, поступающим по пневматическому трубопроводу 6, выбрасывается на обрабатываемую поверхность детали 10, после чего по сливной трубе 11 возвращается в бак. Однако гравитационные установки получили ограниченное распространение из-за малой кинетической энергии, сообщаемой абразиву, и недостаточной гибкости управления струйным аппаратом [3, 4, 9].

Следует отметить, что представленные установки имеют существенный недостаток – наличие устройства (пропеллерной мешалки) для поддержания абразива во взвешенном состоянии в рабочей жидкости, что приводит к дополнительным энергозатратам и удорожанию процесса обработки.

1.6 Оценка применимости известных технологий струйной очистки для подготовки стальных листов под лазерную резку

Развитие лазерной техники и технологии является сегодня важным фактором современного развития, как машиностроительной, так и других отраслей промышленности Республики Беларусь. Наряду с увеличением производительности труда лазерные технологии (резка, сварка, упрочнение, легирование и т.д.) дают принципиально новые результаты обработки материалов (точность, время изготовления, минимизация технологических операций). Достижения в области лазерных технологий интенсифицируются на основе разработки новой лазерной техники. В последние годы в мире созданы простые и надежные промышленные лазеры с большим ресурсом работы и управляемыми параметрами излучения [83].

На ряде современных производственных предприятиях РБ очистка листовых металлических материалов от продуктов коррозии, с последующим использованием их при лазерной резке осуществляется с помощью дробеструйного или пескоструйного способов очистки.

Одним из показателей эффективности лазерной резки является ее скорость. Способность поверхности поглощать энергию луча зависит от длины волны излучения, свойств и состояния поверхностей заготовок, условий лазерного нагрева. Одним из основных методов повышения скорости лазерной резки является нанесение на обрабатываемую поверхность заготовок поглощающих покрытий. Следует отметить, что в авторемонтном производстве для увеличения скорости резки используют покрытия из сажи [82].

Весьма актуальной является операция очистки металлической поверхности, как от продуктов коррозии, так и от различного рода загрязнений (грязь, остатки смазки и т.д.) с приданием ей заданного размера, оптимального параметра шероховатости $R_a = 0,2-0,4$ мкм [29] перед такой технологической операцией как лазерная резка.

Способы очистки, рассмотренные в п. 1.3, 1.4, не характеризуются должной эффективностью в части формирования поверхности, обладающей низкой отражательной способностью и требуемой величиной выступов микронеровностей, что особенно актуально для

газовых установок лазерной резки, например, типа TRUMATIC (рисунк 1.19). Весьма существенным моментом для эффективного использования установок лазерной резки является требование по минимизации наследственного наклепа поверхностных слоев после проведения предварительных операций по их очистке от коррозии.



Рис. 1.19. Установка лазерной резки TRUMATIC с ОАО «Агат – электромеханический завод»

В результате предварительных производственных испытаний на установке TRUMATIC установлена необходимость после очистки от коррозии иметь высококачественную поверхность с шероховатостью $R_a = 0,2-0,4$ мкм с минимальным уровнем упрочнения (наклепа) и низкой отражательной способностью [28, 29]. При использовании в качестве характеристики упрочнения такого параметра, как микротвердость H_{μ} , необходимо, чтобы ее величина по отношению к исходному значению $H_{\mu 0}$ ($H_{\mu 0}$ – микротвердость поверхности листового материала применительно к условиям поставки) не выходила за пределы диапазона $H_{\mu} = 1,2-1,4 H_{\mu 0}$, при превышении которого происходит снижение скорости лазерной резки листовых материалов [28].

По результатам предварительных производственных испытаний была установлена низкая эффективность (в части получения минимального наклепа обработанной поверхности) от применения дробеструйной обработки материалов, предназначенных под после-

дующую лазерную резку. Как правило, обработанная после дробеструйной очистки поверхность имеет более высокий уровень упрочнения, существенно превышающий рекомендуемый диапазон, что является причиной снижения впоследствии скорости ЛР и, как следствие, производительности труда. В тоже время лабораторные эксперименты показали, что имеет место повышение скорости лазерной резки после предварительной струйной обработки с применением в составе рабочей жидкости такой компоненты как бентонитовая глина. Однако для выяснения причин этого эффекта, установления оптимальных режимов обработки (давления и скорости струи) необходимо проведение теоретических и экспериментальных исследований, которые входят в круг задач, решаемых в данной работе.

2 ОБОРУДОВАНИЕ, ПРИБОРЫ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В данной главе дается описание разработанной лабораторной установки для проведения экспериментальных исследований ГАО [2, 11, 12], которая обеспечивает достижение максимальных давлений на входе в конфузур ($p_{\text{вх, max}} = 40$ МПа), а также проведение экспериментов при переменных давлениях на входе в сопло $p_{\text{вх}} = 15\text{--}30$ МПа со скоростями вытекающей струи в диапазоне 150–300 м/с.

Приводится описание методики регистрации струйного давления на преграду, основанной на применении датчика давления ЭДП-30. Приводится методика тарировки этого датчика. Построена тарировочная кривая $R = f(p)$ «Сопротивление в цепи цифрового омметра Щ 4313 – давление струи».

Дается обоснование выбору материалов, а также методик для измерения вязкости рабочей жидкости, шероховатости и микротвердости обработанной поверхности, адгезионной прочности и коррозионной стойкости защитного пленочного покрытия, сформированного после ГАО на поверхности стальных образцов.

Дается обоснование выбору состава рабочей жидкости [5, 6] (полиакриламид, бентонит, кальцинированная сода, остальное вода), обладающего способностью находиться 2–3 месяца в рабочем (взвешенном) состоянии без выпадения в осадок и обеспечивать достижение заданных параметров качества на обработанной поверхности.

2.1 Обоснование составов рабочей жидкости, выбор материалов для проведения исследований

Состав жидкости для реализации процесса ГАО подбирался в зависимости от качества поверхности до и после обработки. При этом учитывались также механические свойства обработанного материала, условия обработки и схема подачи рабочей жидкости в зону обработки.

При очистке металлических поверхностей от продуктов коррозии в качестве инструмента очистки использовалась многокомпонентная струя жидкости. Выбор состава рабочей жидкости, установление оптимальных концентраций компонентов являются одними из основных

вопросов, которые необходимо решить при разработке технологического процесса очистки того или иного обрабатываемого материала. Рабочая жидкость, используемая для очистки, должна иметь вязкость, обеспечивающую малые потери мощности в потоке жидкости при прохождении через конфузур; минимальную агрессивность по отношению к металлическим деталям установки; невысокую токсичность, т.е. жидкость не должна оказывать раздражающего действия на кожу и глаза оператора, осуществляющего процесс очистки. Выбирая состав рабочей жидкости, следует учитывать дефицитность и стоимость компонентов. Обладая этими свойствами, рабочая жидкость должна способствовать получению оптимальных гидродинамических параметров струи высокого давления, обеспечивать максимальную производительность, необходимое качество обработки поверхности с наименьшими энергетическими затратами.

Для осуществления процесса очистки металлических поверхностей от продуктов коррозии в качестве рабочей жидкости использовалась простая водопроводная вода, которая является самой доступной и дешевой жидкостью. Как уже отмечалось в главе 1, прохождение воды по конфузору сопровождается понижением давления до значения меньшего или равного давлению насыщенного пара, что приводит к возникновению эффекта *кавитации*, т. е. к выделению из воды растворенных в ней газов. Использование воды в процессе очистки поверхностей имеет существенный недостаток, обусловленный возникновением процесса повторной коррозии на очищенной металлической поверхности [1, 8, 14, 15, 90].

Для затормаживания процессов повторной коррозии на основании патентных исследований использовалась добавка *кальцинированной соды* Na_2CO_3 (ГОСТ 5100-85), которая при соединении с водой позволяет получить пассивирующий раствор с кислотностью $\text{pH} > 12$, позволяющий существенно затормаживать коррозию [9].

Одним из факторов повышения производительности процесса очистки за счет увеличения силового воздействия струи является добавка абразивных частиц бентонитовой глины с начальной зернистостью частицы 300–400 мкм (после отсева на сите).

Широкое применение бентонитовой глины (Al_2 $[\text{Si}_4\text{O}_{10}]$ $(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) ГОСТ 28177-89 [110], обусловлено такими ее физико-

механическими свойствами как высокая дисперсность в водной среде с образованием частиц наноразмерного диапазона 0,1–1,5 мкм. Обладая однородностью, агрегативной и кинетической устойчивостью (способность частиц не слипаться) частицы бентонита могут удерживаться во взвешенном состоянии в течение многих месяцев, а иногда и лет [93, 94]. Бентонит характеризуется высокой набухаемостью и водопоглощаемостью. Например, при впитывании десятикратного количества воды увеличение в объеме составляет свыше 15–20 раз против первоначального. Существующая связь между частицами бентонита и молекулами воды настолько прочная, что для их разрыва используют либо центрифугу с оборотами ротора порядка $(30–50) \cdot 10^3$ мин⁻¹, либо химреагенты. При высушивании (удалении воды) наступает прочное сцепление частиц бентонита, как между собой, так и с поверхностью обработанного материала. При нагревании до температуры 600–700 °С происходит ослабление кристаллической решетки, а при 800–900 °С отмечается полное ее разрушение [92–95].

Следует отметить, что при проведении опытов, взаимодействие кальцинированной соды и бентонита способствовало повышению дисперсности последнего и поддержанию его во взвешенном состоянии от 2–3 месяцев до 1 года.

Согласно данным Козырева С.П. [90] вода, несущая различные твердые частицы, в нашем случае частицы бентонита, наиболее предрасположена к возникновению кавитации.

Ряд исследователей [112] указывают на повышение эффективности обработки материалов при использовании в рабочей жидкости водорастворимого полимера *полиакриламида* (ТУ 6-01-1049-92), имеющего состав $C_nH_{2n+1}CONH_2$ (n – показатель углерода в молекулярной цепи). Так как скорость потока в конфузоре определяется в основном степенью турбулентности пристенного слоя, которая, в свою очередь, зависит от шероховатости внутренней поверхности канала конфузора, то наличие в пристенном слое раствора полиакриламида приводит к ламинизации потока. При движении через конфузор пограничный слой потока раствора полиакриламида обволакивает микронеровности на внутренней поверхности конфузора, задерживается их выступами, что обуславливает защиту стенки конфузора от взаимодействия с потоком жидкости. Слои раствора

скользят уже не по неровностям поверхности конфузора, а по поверхностному слою полимера и беспрепятственно, с меньшими трением и турбулентностью, с большей относительной скоростью проходят через конфузор, в результате чего конфузор обеспечиваются меньший износ конфузора и повышенная компактность струи.

Однако при применении водорастворимого полимера полиакриламида следует обратить внимание на возможность его распада при разогреве рабочей жидкости до 90 °С, а также учитывать способность полиакриламида осаждать частицы, которые находятся во взвешенном состоянии в растворе рабочей жидкости [122].

Принимая во внимание относительно невысокую стоимость добавки полиакриламида и его значительный объем промышленного производства, было признано целесообразным применение его для гидроабразивной обработки поверхностей.

Предварительные эксперименты показали, что в основном указанным требованиям очистки стальных поверхностей под лазерную резку и покраску отвечают составы рабочей жидкости, содержащие бентонитовую глину, кальцинированную соду и полимеры, например полиакриламид [2].

Отдельные эксперименты показали эффективность использования на завершающей стадии очистки порошков канальной сажи вместо полиакриламида. Применение мелкодисперсных порошков канальной сажи [123, 124] в составе рабочей жидкости совместно с бентонитом и кальцинированной содой создает предпосылки для дополнительного формирования на уже очищенной поверхности защитного пленочного покрытия с низкой отражательной способностью. Формирование таких покрытий является эффективным средством как защиты очищенной поверхности от повторной коррозии, так и повышения эффективности проведения последующих операций, например, лазерной резки.

Необходимость выполнения указанных выше требований, предъявляемых к составу рабочей жидкости при очистке металлических поверхностей от продуктов коррозии, обуславливает применение различных по составу рабочих жидкостей с такими модифицирующими добавками к воде, которые придавали бы струе наибольшую компактность, увеличивали бы скорость истечения

жидкости через конфузор, повышали силовое воздействие струи, образовывали покрытие на поверхности после струйной обработки.

Для проведения исследований использовались рабочие жидкости, составы которых обладают патентной новизной [1, 8, 10].

В качестве материалов для обработки использовались стали 08 кп и Ст3 (группа углеродистых сталей), широко используемые в машино- и судостроительном производстве Республики Беларусь для производства корпусов судов, деталей машин, конструкций и сооружений. Из материала Ст3 были изготовлены образцы размерами 100x100 мм (образцы вырезались из покрытой продуктами речной и атмосферной коррозии бортовой обшивки теплохода ПР730, проходящего ремонт в условиях ОАО «Пинский ССРЗ», г. Пинск).

Кроме этого, для проведения исследований были использованы образцы аналогичных размеров из стали 08кп, покрытые продуктами атмосферной коррозии (образцы из номенклатуры листовых материалов, используемых для лазерной резки на комплексе TRUMATIC на ОАО «Агат–электромеханический завод», г. Минск) [11, 16, 18, 20].

2.2 Схема лабораторного стенда, оборудование для проведения исследований

Для исследования струйных технологий в НИИЛ БНТУ «Водохозяйственные системы» (ВХС) был разработан стенд, представленный на рисунке 2.1. Он состоит из бака 1 объемом 200 л; трех мембранных насосов 3 марки 7000 НА с номинальной мощностью на валу 2,2 кВт и рабочим давлением на входе в конфузор до 30 МПа [2]. При кратковременном режиме нагружения (10–50 с) с помощью данного стенда создавались максимальные давления до 40 МПа.

Параллельное соединение насосов дает возможность изменять подачу в диапазоне от 5,6 до 16,8 л/мин. Стенд содержит напорные линии 4 с регулируемыми дросселями 5, тройник 6 со штуцерным соединением, манометр 7 для измерения давления на входе в конфузор 8. Для того чтобы изменять расход жидкости и режимы обработки используются кавитирующие конфузоры с различной площадью выходного сечения. С целью обеспечения детального исследования обработки металлическая пластина 9 может приводиться во вращение

при помощи электродвигателя 11. Бак 10 используется для измерения расхода объемным способом, а регулировочное устройство 13 для изменения расстояния от обрабатываемой пластины до конфуззора.

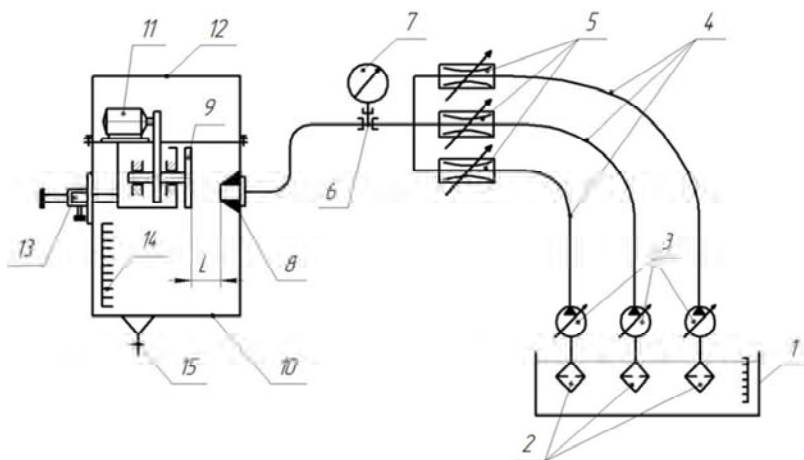


Рис. 2.1. Схема экспериментального стенда:

- 1 – бак; 2 – фильтры; 3 – мембранные насосы высокого давления; 4 – напорные линии; 5 – регулирующие дроссели; 6 – тройник со штуцерным соединением; 7 – манометр; 8 – конфуззор; 9 – обрабатываемая пластина; 10 – мерный бак; 11 – электродвигатель; 12 – крышка бака; 13 – регулировочное устройство для изменения расстояния L от сопла до обрабатываемой поверхности; 14 – мерная шкала; 15 – сливной кран

При включении насосов высокого давления 3 рабочая жидкость из бака 1 через фильтрующие элементы 2 по напорным линиям 4 подается к конфуззору 8. Образцы конфуззоров, использованных в работе, представлены на рисунке 2.2.

Давление на входе в конфуззор регистрировалось образцовым манометром 7, при этом для гашения пульсаций в струе рабочей жидкости были установлены регулирующие дроссели 5. Из конфуззора струя подается на очищаемую металлическую пластину 9, которая приводится во вращение электродвигателем 11. Расстояние L от конфуззора 8 до обрабатываемой поверхности пластины 9 устанавливалось с точностью до 0,1 мм устройством 13 которое было оснащено

мерной шкалой. Очистка поверхностей происходит в баке 10, в котором установлена мерная шкала 14, сливной кран 15 и крышка 12.

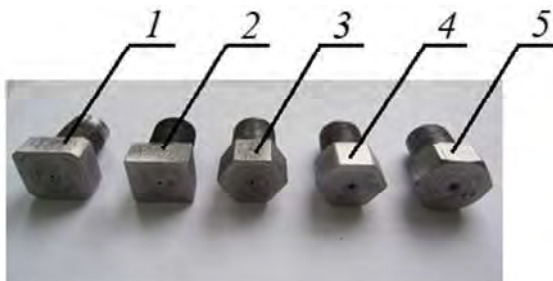


Рис. 2.2. Образцы конических конфузоров, использованных для струйной обработки металлических поверхностей:
1–5 конфузоры с выходными диаметрами 0,8; 1; 1,2; 1,5; 2 мм соответственно

На рисунке 2.3 представлен фрагмент работы в НИИЛ ВХС на экспериментальном стенде, предназначенном для реализации процесса струйной очистки.



Рис. 2.3. Фотография экспериментального стенда, разработанного для осуществления процесса очистки металлических поверхностей:
1 – рабочий резервуар; 2 – насосы высокого давления; 3 – мерный бак; 4 – тройник;
5 – манометр; 6 – струя рабочей жидкости; 7 – защитная пленка

Наряду с лабораторной базой БНТУ для проведения исследований использовалось высоконапорное насосное оборудование ряда промышленных предприятий Республики Беларусь.

Так, например, отдельные эксперименты проводились на опытном участке в ОАО «Слуцкий сахарорафинадный комбинат», где была использована очистная установка высокого давления «КАМАТ К451А – Е45В» (ФРГ), создающая диапазон давлений на входе в конфузор $p_{\text{вх}} = 63\text{--}117$ МПа, подачу $Q = 20\text{--}37$ л/мин при мощности $N = 45$ кВт.

В ОАО «Пинский ССРЗ» для проведения экспериментов по очистке судовых поверхностей от продуктов коррозии использовалась очистная машина высокого давления «KRAENZLE quadro 1000 TST» (ФРГ) (рисунок 2.4) с давлениями на входе $p_{\text{вх}} = 20\text{--}40$ МПа, подачей $Q = 16,6$ л/мин и мощностью $N = 7,5$ кВт.



Рис. 2.4. Очистная машина высокого давления «KRAENZLE quadro 1000 TST» (ФРГ) на участке ГАО в ОАО «Пинский ССРЗ» (г.Пинск):

1 – насос высокого давления; 2 – трубопровод высокого давления подачи рабочей жидкости; 3 – струя рабочей жидкости

2.3 Методика регистрации струйного силового воздействия струи рабочей жидкости на преграду

Для измерений давления при воздействии струи на преграду использовался датчик давления ЭДП-30 (рисунок 2.5), с максимальным пределом измерения 30 МПа. В качестве регистрирующей аппаратуры использовался комбинированный цифровой омметр Щ4313 с погрешностью измерений до 2 %.

Электрический датчик ЭДП-30 (производство ОАО «РПЗ» Раменский приборостроительный завод, РФ), предназначен для измерения давления жидких и газообразных сред (пресная вода, морская вода, водяной пар, масло, дизельное топливо, мазут и т.д.); путем выдачи электрического сигнала, пропорционального измеряемому давлению.

Датчик предназначен для эксплуатации в условиях корабельной вибрации, наклонов, качки и возможных ударных сотрясений, в окружающей среде воздуха с парами морской воды и масла при воздействии температур в диапазоне от минус 50 °С до плюс 70 °С и относительной влажности до 100 %.

Датчик выполнен во взрывозащищенном исполнении и допускается в эксплуатацию во взрывоопасных зонах, также имея при этом вздозащищенное исполнение.



Рис. 2.5. Фотография электронного датчика разности (перепада) давления ЭДП – 30

Датчик ЭДП-30 (рисунок 2.6) состоит из корпуса 1, соединительного штуцера 2, электроразъема 3, реостата 4, штока реостата 5, трубки жидкостного давления 6, электропроводов 7, 8, поворотной пластины 9, пружины 10, крепления 11.

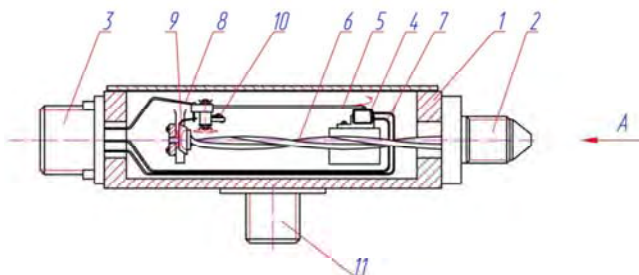


Рис. 2.6. Схема электронного датчика разности давления ЭДП-30:

А – направление подачи жидкости; 1 – корпус датчика; 2 – соединительный штуцер; 3 – электроразъем; 4 – реостат; 5 – шток реостата; 6 – трубка жидкостного давления; 7, 8 – электропровод; 9 – поворотная пластина; 10 – пружина; 11 – крепление (заземление)

Принцип работы датчика основан на использовании тензорезистивного эффекта изменения удельного электросопротивления проводника в результате его деформации. Входным сигналом для датчика является давление измеряемой рабочей жидкости, которое изгибает трубный элемент 6, в результате чего приходит в движение пластина 9, закрепленная на конце трубного элемента 6, посредством которой происходит перемещение подпружиненного штока реостата 5. При изменении давления и перемещении штока реостата 5 меняется величина сопротивления, создаваемого реостатом 4, тем самым увеличивается или уменьшается сигнал на выходе из датчика.

Для определения давления струи на преграду были проведены эксперименты по тарировке датчика давления ЭДП-30. Для этого на основе лабораторного стенда (см. рисунок 2.1) была разработана схема тарировки датчика ЭДП-30, приведенная на рисунке 2.7. Схема содержит приемный бак 1, насосы 2 типа 7000НА, образцовый манометр 3 (ГОСТ 2405–88), перепускной вентиль 4, датчик давления ЭДП-30 5, комбинированный цифровой прибор 6 марки Щ4313.

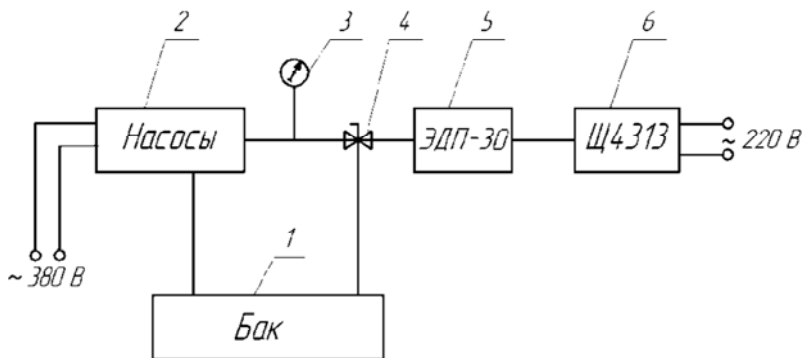


Рис. 2.7. Тарировочная схема электронного датчика разности (перепада) давления ЭДП-30:

- 1 – приемный бак; 2 – насосы; 3 – образцовый манометр; 4 – перепускной вентиль; 5 – датчик давления ЭДП-30; 6 – комбинированный цифровой прибор Щ4313

Из приемного бака 1 рабочая жидкость с помощью насосов 2 подавалась на датчик 5 марки ЭДП-30, при этом давление подаваемой жидкости регулировалось с помощью перепускного вентиля 4 и регистрировалось образцовым манометром 3. Сигнал с датчика 5 регистрировался комбинированным цифровым омметром 6 марки Щ4313.

В результате тарировки была получена линейная зависимость $R = f(p)$ «Соппротивление R в цепи цифрового омметра Щ4313 – давление струи на преграду p », представленная на рисунке 2.8, и подтверждающая работу чувствительных элементов датчика в зоне упругих деформаций.

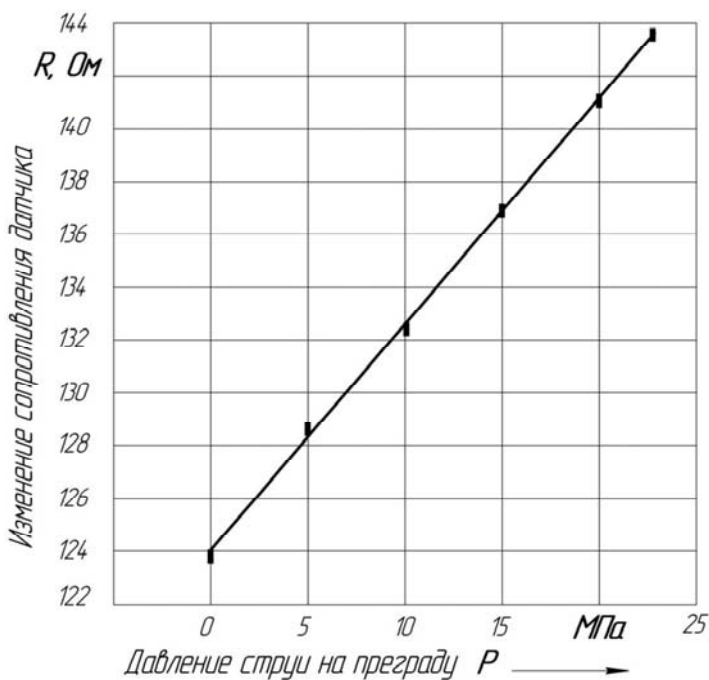


Рис. 2.8. График зависимости изменения сопротивления R в цепи датчика ЭДП-30 от давления p струи на преграду

Из рисунка 2.9, на котором представлена схема натекания струи на преграду, видно, что для определения давления струи на преграду в пластине 3 выполнялось отверстие А диаметром 1мм. При натекании струи 2, выходящей из конфузора 1, на пластину 3 происходит передача струйного давления по закону Паскаля через отверстие А на жидкость, находящуюся в трубке 4. При этом, как уже отмечалось, происходит изгиб трубного элемента в ЭДП-30, сопровождаемый изменением сопротивления в цепи реостата, которое фиксирует цифровой омметр 6 марки Щ4313.

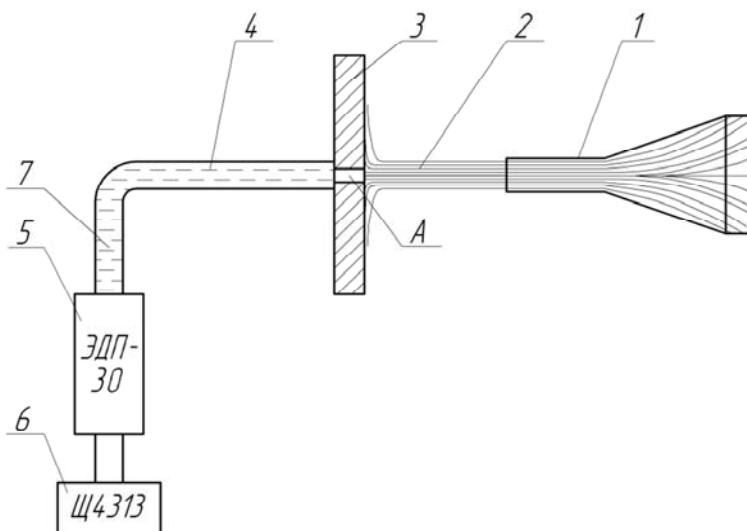


Рис. 2.9. Схема натекания струи на преграду при тарировке датчика давления ЭДП-30:

1 – конфузор; 2 – струя; 3 – пластина (преграда); 4 – трубка; 5 – датчик давления ЭДП-30; 6 – комбинированный цифровой омметр Щ4313; 7 – жидкость для передачи давления на датчик; А – отверстие для передачи давления струи на жидкость, взаимодействующую с трубным элементом датчика ЭДП-30

На рисунке 2.10 представлена фотография элементов (пластины 1 с отверстием «А», соединительной трубкой 2, датчика давления ЭДП-30), используемых в разработанной методике для определения силового воздействия струи на преграду.

Максимальная погрешность при измерении струйного давления на преграду в разработанной методике не превышает 2 % (паспортная величина абсолютной погрешности цифрового омметра Щ4313), что является вполне допустимой величиной для исследования процессов высоконапорного струйного воздействия потока рабочей жидкости на преграду.

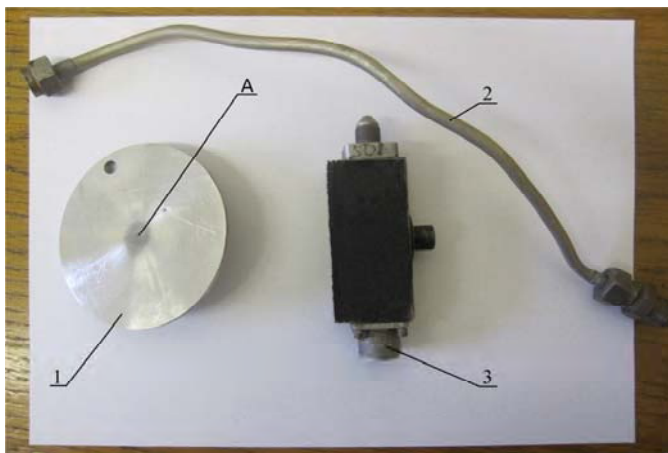


Рис. 2.10. Фотография элементов, используемых в методике для измерения давления струи на преграду:

- 1 – пластина; 2 – соединительная трубка; 3 – датчик давления ЭДП-30;
 А – отверстие для передачи давления жидкости на датчик

2.4 Методика измерения гидродинамических параметров струйной очистки

Одними из основных гидродинамических параметров исследуемого процесса являются расход рабочей жидкости Q и скорость струи на выходе из конфузора $V_{\text{стр}}$. Важным параметром для контроля значений Q и $V_{\text{стр}}$ является давление на входе в конфузор $p_{\text{вх}}$.

Расход рабочей жидкости определялся с погрешностью до 2% объемным способом [37, 38, 40, 125] по формуле

$$Q = \frac{W_{\text{ж}}}{t}, \quad (2.1)$$

где $W_{\text{ж}}$ – измеренный объем жидкости в мерном баке, м³;

t – время заполнения мерного бака, с.

Средняя скорость струи на выходе из конфузора $V_{\text{стр}}$ определялась из уравнения неразрывности потока [112, 126–128]

$$V_{\text{п\oд}} = \frac{Q}{S} = \frac{4Q}{\pi d^2}, \quad (2.2)$$

где S – площадь поперечного сечения конфузора, м²;

d – диаметр выходного сечения конфузора, м.

Для измерения давления на входе в конфузор использовался образцовый манометр (ГОСТ 2405-88), который рассчитан на предел измерения до 40 МПа с погрешностью измерений до 2,5 %, равной половине цены деления на шкале манометра.

Наличие эффекта кавитации в струе жидкости устанавливалось из условия, что

$$p_c \leq p_{\text{н.п.}}, \quad (2.3)$$

где p_c – абсолютное давление в сечении струи перед выходом из конфузора, Па;

$p_{\text{н.п.}}$ – давление насыщенных паров, для рабочих жидкостей на основе воды принималось 2,3–2,5 кПа при температуре 20 °С [34, 35, 36].

2.5 Методика измерения вязкости рабочей жидкости

В соответствии с СТБ 1798-2007, ГОСТ 33-2000 и рекомендациями [129] кинематическая вязкость определялась с помощью вискозиметра Энглера, при этом сначала устанавливалась вязкость в градусах Энглера (условная вязкость) по формуле

$$E^0 = \frac{t_{\text{ж}}}{t_{\text{в}}}, \quad (2.4)$$

где $t_{\text{ж}}$ – время истечения 200 см³ исследуемой жидкости через калиброванный насадок при заданной температуре, с;

$t_{\text{в}}$ – время истечения того же объема дистиллированной воды при $T = 20$ °С; величина $t_{\text{в}}$ называется водным числом ($t_{\text{в}} \cong 50 - 52$ с).

После определения условной вязкости в градусах Энглера осуществлялся переход к кинематическому коэффициенту вязкости V по эмпирической формуле Уббелюде [129]

$$v = 0,0731E - \frac{0,0631}{E^0}. \quad (2.5)$$

Наряду с кинематической вязкостью, для рабочей жидкости (по ГОСТ 18481-81) определялась плотность $\rho_{\text{ж}}$ (кг/м³) с помощью ареометра с погрешностью до 2 %, равной половине цены деления на шкале ареометра.

2.6 Методика определения морфологии, адгезионной прочности и химсостава защитного пленочного покрытия. Измерение шероховатости и микротвердости обработанной поверхности

При струйной обработке стальных поверхностей составами на основе бентонитовой глины на очищенной поверхности образуется защитное пленочное покрытие. Исследование морфологии поверхности покрытий проводили в ГНУ ИПМ (г. Минск) на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) «Cam Scan» (Великобритания, фирма «Oxford Instruments») в режиме отраженных электронов при ускоряющем напряжении 20 кВт и увеличениях 50–5000 крат.

Для определения химического состава покрытия в комплекте с СЭМ в данной работе использовался рентгеновский энергодисперсионный спектрометр «Inca 360» (Великобритания, фирма «Oxford Instruments»). «Inca 360» позволяет регистрировать рентгеновское излучение элементов, начиная с $z = 5$ (бор). Погрешность при работе в режиме количественного анализа составляет 3–5 %. Ошибка определения элементов с атомным номером от 12 до 30 – 4–8 %. Количественный анализ выполняется при ускоряющем напряжении 10 кВт.

Адгезионную прочность покрытий определяли в испытательном центре ГНУ ИПМ методом склерометрии (царапания). Метод заключается в движении нагруженного алмазного индентора по поверхности образца. Та величина нормальной нагрузки, при которой происходит

срыв покрытия, называется критической. Царапание поверхности образцов с покрытиями осуществляли алмазным индентором типа Роквелл с радиусом закругления 200 мкм. Скорость перемещения индентора по поверхности образца составила 10 мм/с. Испытания проводились при постоянной нагрузке в царапине. Нагрузка изменялась ступенчато от царапины к царапине с интервалом 0,5 Н.

Адгезионная прочность покрытий определялась по формуле

$$HG = \frac{P_{\text{оао}}^{\text{max}}}{0,5F_{\text{аіе}}} = \frac{2P_{\text{оао}}^{\text{max}}}{\pi b^2}, \quad (2.6)$$

где HG – адгезионная прочность (контактная нагрузка), МПа;

$P_{\text{оао}}^{\text{max}}$ – максимальная нормальная нагрузка на индентор, при которой отсутствует разрушение покрытия;

$F_{\text{бок}}$ – площадь следа индентора, контактирующего с покрытием;

b – полуширина следа индентора при $P_{\text{оао}}^{\text{max}}$.

Шероховатость поверхности образца по параметру Ra измерялась в соответствии с ГОСТ 2789-73 на профилометре – профилографе модели 252 типа А1. Погрешность измерений на профилометре – 5 %.

Измерение микротвердости проводилось на микротвердомере «Microscromet – 2» с нагрузкой на индентор, равной 0,5Н (ГОСТ 9450-76).

2.7 Методика оценки массового уноса и производительности процесса ГАО

В соответствии с ГОСТ 9.908-85 потерю массы на единице площади поверхности определяют по формуле

$$M = \frac{m_0 - m_1}{S}, \quad (2.7)$$

где m_0 – масса образца до испытаний, кг;

m_1 – масса образца после испытаний, кг;

S – площадь поверхности образца, м².

Взвешивание производилось на электронных весах «Jurgens» (ФРГ) (рисунок 2.11) с точностью до 10^{-4} г в лаборатории кафедры «Экология» (БНТУ).



Рис. 2.11. Электронные весы марки «Jurgens» (ФРГ), используемые для оценки массового уноса обработанных образцов

При ГАО производительность процесса очистки определяют временем, необходимым для удаления коррозии с обрабатываемой поверхности, или временем, в течение которого достигается требуемое состояние поверхностного слоя. Для количественной оценки производительности струйной ГАО принималась величина массового съема материала в единицу времени [3, 4].

Так как при ГАО в съеме металла принимает участие многочисленная совокупность вершин абразивных зерен, то в связи с этим оценку производительности ГАО проводят по массовому съему удаляемого материала. Для этого производилось взвешивание образцов до и после обработки на электронных весах марки «Jurgens» (ФРГ) (см. рисунок 2.11). Перед измерениями производили калибровку электронных весов, используя эталонные образцы. Производительность процесса П определялась по зависимости

$$\Pi = dm/t, \quad (2.8)$$

где dm – изменение массы образца за время опыта, кг;
 t – время обработки, с.

2.8 Методика испытаний защитного пленочного покрытия на коррозионную стойкость

Коррозионную стойкость обработанных материалов и эффективность метода защиты определялась с помощью визуального наблюдения [51, 57]. Визуальное наблюдение позволило фиксировать изменение внешнего вида поверхности металла, при этом отмечено время появления продуктов коррозии, их распределение по поверхности, цвет. Изменение характера распределения продуктов коррозии во времени фиксировалось последовательным фотографированием поверхности образца [51, 57]. После этого по ГОСТ 9.908-85 определялась степень поражения поверхности металла коррозионными пятнами, путем очерчивания зоны поражения прямоугольниками.

Степень поражения G в процентах определяется по формуле

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{S} 100, \quad (2.9)$$

где S_i – площадь i -го пятна, m^2 ;

n – количество пятен;

S – площадь поверхности образца, m^2 .

Визуальные наблюдения дополнялись испытаниями на коррозионную стойкость в соответствии с рекомендациями [49]. Образцы по этим рекомендациям в течение 15 минут кипятились в 3, 5, 10, 15, 20%-х растворах NaCl с последующей 15 минутной выдержкой их в этих же растворах при комнатной температуре. Далее производился анализ состояния обработанной металлической поверхности путем определения степени поражения поверхности металла коррозионными пятнами.

3 РАЗРАБОТКА ТЕОРИИ ПРОЦЕССА И ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ КОНФУЗОРА ДЛЯ СТРУЙНОЙ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ПЛОСКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В данной главе на основе метода верхней оценки и принятых допущений разработана математическая модель, удовлетворяющая кинематике и динамике процесса силового взаимодействия струи с преградой, состоящей из слоя коррозионных отложений [13, 16, 27].

На основе решения вариационной задачи [16], связанной с нахождением минимального давления разрушения, получена теоретическая зависимость для расчета давления в точке соударения струи с преградой, учитывающая механические свойства разрушаемого материала, а также кинематические параметры струи. Установлено определяющее влияние скорости струи на величину минимального давления разрушения.

Приводится решение вариационной задачи по установлению оптимального угла конусности (по потерям напора) для конфузора, предназначенного для формирования высоконапорной струи рабочей жидкости с минимальными потерями напора, что обеспечивает получение максимальной скорости струи и, как следствие, максимального силового воздействия на очищаемую поверхность [13, 16].

3.1 Обоснование теоретического метода, основные допущения, схематизация процесса

Для теоретического описания процесса струйной ГАО плоских стальных поверхностей воспользуемся методом, который в механике деформируемого твердого тела известен как метод верхней оценки (приближенный энергетический метод) [41–44].

Сущность метода заключается в том, что объем очага деформации (разрушения) представляется в виде жестких (недеформируемых) блоков, скользящих один относительно другого и по границам с жесткой зоной. Тем самым действительное поле линий скольжения, характеризующее напряженное состояние деформируемого объекта (слоя коррозии), заменяют кинематически возможным, со-

стоящим из системы прямолинейных отрезков, образующих треугольники. Вдоль границ блоков – сторон треугольников – компоненты скоростей перемещений претерпевают разрывы. Внутри каждого блока поле скоростей однородно, т.е. вектор скорости для всех точек данного блока один и тот же. На этом основании строят поле скоростей, которое при правильном построении всегда является кинематически возможным. Число и размеры треугольных блоков первоначально выбирают произвольно [41–44].

Для проведения расчета используем кинематически возможное поле скоростей (рисунок 3.1, а), состоящее из жестких однородных блоков. Аналогичное поле для анализа процесса внедрения плоского пуансона в жесткопластическую среду использовалось автором работы [44].

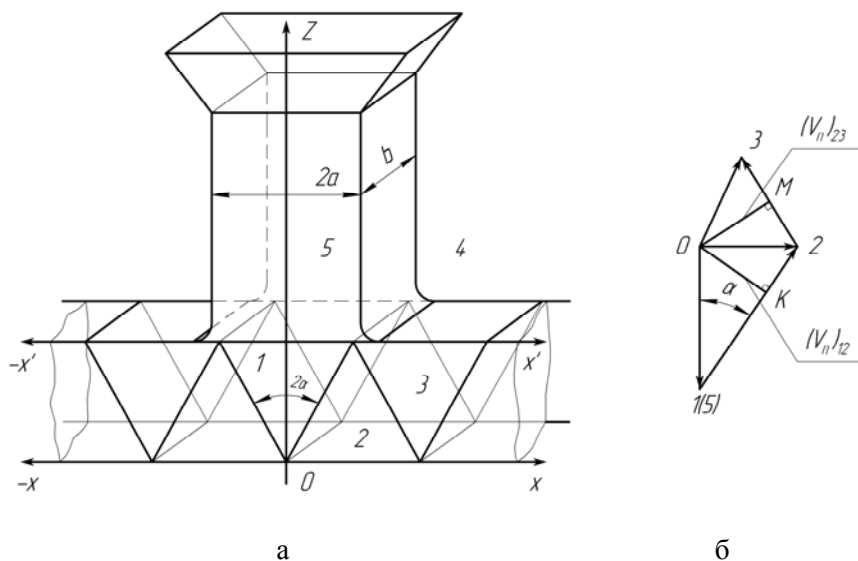


Рис. 3.1. Кинематически возможное поле линий скольжения, принятое для теоретического анализа процесса ГАО:
 а – поле линий скольжения, б – годограф скоростей

Для описания силового воздействия струи на плоскую преграду на основе использования метода верхней оценки сделаем ряд допущений:

- воздействие струи на обрабатываемый участок поверхности по кинематике формоизменения аналогично действию пуансона при его внедрении в жесткопластичное пространство (струя принимает-ся квазижестким телом);

- скорость струи на выходе из конфузора равна скорости ее внедрения в преграду и, как следствие, равна скорости перемещения блока, на который воздействует струйный поток рабочей жидкости;

- обрабатываемая поверхность считается плоским слоем коррозионных отложений, который покрывает основу детали и имеет одинаковую толщину, распространяясь на бесконечную длину влево и вправо от оси симметрии струи;

- материал разрушаемого слоя считается изотропным, однородным, несжимаемым;

- вдоль границ между блоками касательные напряжения τ_n , возникающие при скольжении блоков, являются максимальными: $\tau_n = k$ (k – постоянная прочности обрабатываемого материала, определяемая по условию Мизеса [44])

$$k = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}, \quad (3.1)$$

где σ_s – предел текучести обрабатываемого материала (слоя коррозионных отложений), определяемый по результатам испытаний на одноосное растяжение (сжатие);

- вид принятого поля линий скольжения не зависит от изменения скорости струи в процессе разрушения слоя коррозионных отложений;

- силы инерции не оказывают влияния на кинематику разрушения слоя коррозионных отложений.

Из последнего допущения следует, что принимаемый для расчета и соответствующий данному полю годограф скоростей (см. рисунок 3.1, б) сохраняет свое первоначальное направление, как на

начальной, так и на завершающей стадии разрушения слоя коррозионных отложений.

3.2 Разработка математической модели процесса разрушения слоя коррозии от воздействия струи рабочей жидкости

Для расчетного случая, характеризуемого воздействием струи на коррозионный слой, находящийся на поверхности основного металла, используем кинематически возможное поле, приведенное на рисунке 3.1, а, и предложенное впервые Р. Хиллом для решения задачи о внедрении плоского пуансона в полупространство [41–44]. Цифрами обозначены: 0 – жесткая неподвижная зона (основной металл, на поверхности которого между осями x и x' находится слой коррозионных отложений); 1, 2, 3 – блоки; 4 – свободная поверхность; 5 – струя жидкости, действующая на слой коррозионных отложений. Границы между зонами и блоками обозначаются двумя цифрами, например 12 – граница между блоками 1 и 2; 34 – граница между блоком 3 и свободной поверхностью 4. Длину соответствующих границ (линий) будем обозначать l_{12} , l_{23} , l_{02} и т.п. На рисунке 3.1, б приведена диаграмма относительных скоростей, называемая годографом скоростей.

Для построения годографа (рисунок 3.1, б) от центра годографа (точка O) по вертикали вниз откладывается вектор $O5$ ($O1$) скоростей струи (V_{05}) и блока 1 (V_{01}). Для построения условно принимается длина вектора $O5$ ($O1$) равной единице. Равенство векторов $O5$ и $O1$ обуславливается допущением о том, что в момент соударения струи с преградой скорость блока 1 (V_{01}) мгновенно становится равной скорости струи V_{05} . Далее от конца вектора $O5$ ($O1$) проводится линия, параллельная линии 12, а из точки O – линии 20. Пересечение этих линий определяет положение точки 2. Продолжая построение подобным образом, далее получим изображенный на рисунке 3.1, б годограф. Линии годографа 12, 23 обозначают относительные скорости блоков V_{12} , V_{23} вдоль линий разрыва 12, 23 (см. рисунок 3.1, б).

Для расчета динамических напряжений, действующих на поверхностях разрыва 12 и 23, из центра O годографа откладываются отрезки \widehat{IK} и \widehat{IM} , направленные по нормали к поверхностям 12 и

23 и характеризующие нормальные компоненты скоростей $(V_n)_{12}$ и $(V_n)_{23}$ частиц разрушаемой среды, пересекающих поверхности разрыва скорости.

Для определения величины давления, действующего со стороны струи на поверхность коррозионного слоя и вызывающего его разрушение, воспользуемся уравнением баланса мощностей внешних и внутренних сил

$$W_{г.стр} = W_{вн}, \quad (3.2)$$

где $W_{г.стр}$ – гидравлическая мощность струи, действующей на преграду;

$W_{вн}$ – мощность внутренних сил сопротивления.

Величина $W_{г.стр}$ определяется из выражения

$$W_{г.стр} = pQ = pS_5V_5, \quad (3.3)$$

где p – искомое гидродинамическое давление, возникающее в точке соударения струи с преградой;

Q – расход жидкости в струе;

S_5 – площадь живого сечения струи, для плоской струи $S_5 = 2ab$ ($2a$ и b (см. рисунок 3.1, а) ширина и толщина струи соответственно);

V_5 – скорость струи (средняя) в момент соударения с преградой.

Мощность внутренних сил сопротивления $W_{вн}$ представим в виде следующей суммы [13, 16]

$$W_{вн} = W_{раз} + W_{дин}, \quad (3.4)$$

где $W_{раз}$ – мощность внутренних сил сопротивления, действующих на поверхностях разрыва скорости;

$W_{дин}$ – мощность, затраченная на преодоление динамических напряжений, действующих на поверхностях разрыва скорости.

Для расчета мощности $W_{раз}$ воспользуемся уравнением [41]

$$W_{раз} = \sum \tau_n b l_{rs} V_{rs}, \quad (3.5)$$

где τ_n – касательные напряжений, возникающие вдоль границ блоков при их относительном перемещении. На свободных поверхностях $\tau_n = 0$, а на контактных – τ_n определяется по условию Губера-Мизеса [44]

$$\tau_n = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}, \quad (3.6)$$

где σ_s – предел текучести деформируемого материала, определяемый по результатам испытаний на одноосное растяжение (сжатие). Для хрупких материалов допустимо принимать вместо σ_s значение предела прочности σ_B из испытаний на растяжение (сжатие), так как для хрупких материалов значения σ_s и σ_B отличаются незначительно [41];

b – ширина струи;

l_{rs} – длина границ между блоками r и s (r и s – номера блоков в принятом поле линий скольжения; $r = 0, 1, 2$; $s = 1, 2, 3$);

V_{rs} – величина разрыва скорости вдоль границ смежных блоков r, s .

Перемещение частиц деформируемой сферы через поверхность разрыва сопровождается изменением их количества движения.

На рисунке 3.2 показана линия разрыва l_{rs} , разделяющая области r и s , скорости внутри которых равны \vec{V}_r и \vec{V}_s соответственно. При переходе через линию разрыва происходит мгновенное изменение скорости частиц на величину тангенциального разрыва, равного

$$\vec{V}_{rs} = \vec{V}_s - \vec{V}_r. \quad (3.7)$$

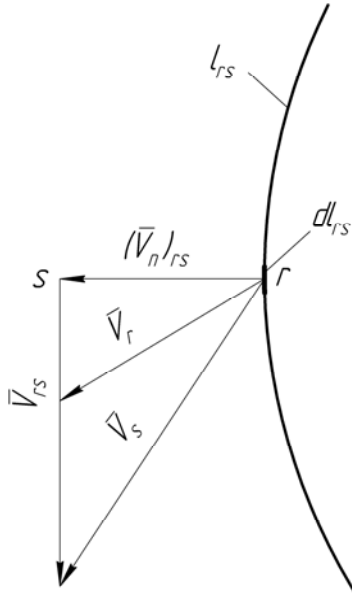


Рис. 3.2. Схема для расчета динамических напряжений на линии l_{rs} разрыва скорости

Элементарный импульс силы $(q_{\text{дин}})_{rs} dl_{rs} b dt$ на линии разрыва скорости l_{rs} за элемент времени dt равен изменению количества движения элементарной массы dm , пересекающей поверхность разрыва. Тогда

$$(q_{\text{дин}})_{rs} dl_{rs} b dt = dm V_{rs}, \quad (3.8)$$

где $(q_{\text{дин}})_{rs}$ – динамическое напряжение, возникающее на поверхности разрыва скорости, за счет изменения скорости частицы на величину тангенциального разрыва;

dl_{rs} – элементарная длина на линии разрыва скорости;

b – размер деформируемой области, равный ширине струи в направлении перпендикулярном плоскости движения.

Элементарная масса dm элемента, проходящего за время dt через поверхность разрыва, определяется из выражения

$$dm = \rho(V_n)_{rs} dl_{rs} b dt , \quad (3.9)$$

где ρ – плотность;

$(V_n)_{rs}$ – нормальная компонента на линии разрыва скорости;

dt – элементарный промежуток времени, за который частица массой dm переходит из области r область s .

Под действием импульса силы, величина которого определяется указанным изменением количества движения, на поверхности разрыва скорости возникают дополнительные динамические напряжения, определяемые по уравнению [42]

$$(q_{\text{дин}})_{rs} = \rho(V_n)_{rs} V_{rs} , \quad (3.10)$$

где ρ – плотность разрушаемого материала;

$(V_n)_{rs}$ – нормальная к поверхности разрыва компонента скорости, определяемая по годографу скорости из рисунка 3.1, б.

Мощность $W_{\text{дин}}$, затраченная на преодоление напряжений $(q_{\text{дин}})_{rs}$, рассчитывается по уравнению [41]

$$W_{\text{дин}} = \rho(V_n)_{rs} V_{rs}^2 b l_{rs} . \quad (3.11)$$

Для определения давления струи на преграду необходимо с помощью параметров поля α , размеров сечения струи (a , b) выразить длину границ блоков l_{rs} , установить соотношения между кинематическими параметрами точек деформируемой среды V_{rs} , $(V_n)_{rs}$ и блока 1 (V_{01}).

Искомые значения длин граничных поверхностей l_{rs} для блоков поля (см. рисунок 3.1, а) будут следующими:

$$l_{03} = l_{12} = l_{23} = a/\sin\alpha; \quad l_{02} = 2a. \quad (3.12)$$

Выражение для расчета кинематических параметров разрушаемой среды, полученные на основе годографа скорости (см. рисунок 3.1, б) имеют вид

$$\left. \begin{aligned} V_{12} &= V_{01}/\cos\alpha; V_{02} = V_{01}\operatorname{tg}\alpha; \\ V_{23} &= V_{02}/2\sin\alpha; V_{03} = V_{01}/2\cos\alpha; \\ (V_n)_{12} &= (V_n)_{23} = V_{01}\sin\alpha. \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$

Зависимость (3.2) с учетом (3.3)–(3.11) представим в виде

$$\begin{aligned} p a V_{01} &= (l_{12} V_{12} + l_{23} V_{23} + l_{02} V_{02} + l_{03} V_{03}) \cdot \tau_n + \\ &+ \rho [(V_n)_{12} V_{12}^2 l_{12} + (V_n)_{23} V_{23}^2 l_{23}]. \end{aligned} \quad (3.14)$$

Выражение (3.14) после преобразований с учетом (3.12) и (3.13) представим в виде

$$p = 2\tau_n \left(\frac{1}{\sin\alpha \cos\alpha} + \operatorname{tg}\alpha \right) + \rho V_{01}^2 \frac{5}{4\cos^2\alpha}. \quad (3.15)$$

В уравнении (3.15) величины p , τ_n , ρ , V_{01} имеют тот же физический смысл, что и в выражениях (3.3), (3.5), (3.6).

Выражение (3.15) запишем в виде

$$p = p_{\text{ст}} + p_{\text{дин}}, \quad (3.16)$$

где $p_{\text{ст}}$ – статическая составляющая давления p , учитывающая действие сил сопротивления и контактного трения на поверхности разрыва скорости

$$p_{\text{ст}} = 2\tau_n \left(\frac{1}{\sin\alpha \cos\alpha} + \operatorname{tg}\alpha \right), \quad (3.17)$$

$p_{\text{дин}}$ – динамическая составляющая давления p , учитывающая действие динамических напряжений на поверхностях разрыва скорости и зависящая от плотности материала ρ и скорости блока V_{01}

$$p_{\text{дин}} = \rho V_{01}^2 \frac{5}{4 \cos^2 \alpha}. \quad (3.18)$$

Изменяя угол α в выражении (3.15), можно получить различные значения для давления p . Наиболее правильное, естественно, будет то значение, которое будет наименьшим. Для отыскания минимума выражения (3.15) определим оптимальную величину угла α . Для задачи, решаемой в квазистатической постановке (действие динамических напряжений на поверхностях разрыва не приводит к изменению вида принятого кинематически возможного поля и годографа скоростей), оптимальную величину параметра поля α найдем, исследуя на экстремум только статическую составляющую давления $p_{\text{ст}}$. Для этого приравняем нулю первую производную от давления $p_{\text{ст}}$ по углу α

$$\frac{dp_{\text{ст}}}{d\alpha} = 0. \quad (3.19)$$

Выражение (3.19) с учетом (3.17) представим в виде

$$\frac{dp_{\text{ст}}}{d\alpha} = 2\tau_n \left(\frac{1}{\sin \alpha \cos \alpha} + \text{tg} \alpha \right)' = 0. \quad (3.20)$$

В результате решения (3.20) находим, что

$$\text{tg} \alpha = 0,707 \Rightarrow \alpha_{\text{опт}} = 35^\circ 26'. \quad (3.21)$$

Таким образом, минимум функции (3.15), т. е. величины давления p будет при оптимальном угле поля $\alpha_{\text{опт}} = 35^\circ$. Подставляя данное значение угла в выражение (3.15) и принимая случай предельного трения ($\tau_n = \sigma_S/2$) [41] получим

$$p_{\text{min}} = 2,83\sigma_S + 1,86\rho V_{01}^2, \quad (3.22)$$

где p_{min} – минимальное давление, которое необходимо создать путем струйного воздействия на поверхности для разрушения слоя коррозии.

Для дальнейших расчетов по (3.22) на основании рекомендаций [46–48] для цементированного слоя коррозии, имеющего состав 69 % Fe_2O_3 , 5,4 % CaO , 0,17 % MgO , примем значение предела текучести σ_S и плотности ρ равными соответственно $\sigma_S = \sigma_B = 2,5$ МПа и $\rho = 2500$ кг/м³.

Отличительной особенностью полученного выражения (3.22) является то, что оно позволяет прогнозировать величину минимального давления p_{min} , вызывающего разрушение слоя коррозии на поверхности металла, учитывая при этом механические характеристики (σ_S , σ_B) разрушаемого материала, его плотность ρ , а также скорость струи рабочей жидкости, воздействующей на преграду.

Для практического использования формулы (3.22) необходимо уточнить вопрос, касающийся определения скорости V_{01} . При выводе (3.22) принималось, что в момент соударения струи с преградой последняя, точнее блок 1, сразу же принимает скорость потока равную V_{05} . Однако, такое допущение ($V_{01} = V_{05}$) приводит к тому, что гидравлическая мощность струи, расходуемая на разрушение слоя коррозии, будет равна нулю. Рекомендации по данному вопросу, приведенные в работе [130] показывают, что максимальная гидравлическая мощность струи, затраченная на разрушение преграды, будет реализована в случае, когда

$$V_{01} = 0,5V_{05} = 0,5 V_{стр}, \quad (3.23)$$

где $V_{стр}$ – скорость струи при взаимодействии ее с поверхностью.

Из выражения (3.23) видно, что в результате взаимодействия струи с преградой используется только часть гидравлической энергии, которой обладает струя, вытекающая из сопла, что совпадает с выводами работы [130].

С учетом выражения (3.23) и принимая во внимание, что $\sigma_S = \sigma_B$, формула (3.22) примет следующий вид

$$p_{min} = 2,83\sigma_B + 0,465\rho V_{стр}^2. \quad (3.24)$$

Формула (3.24) позволяет определять минимально необходимое давление разрушения в зависимости от скорости струи [16].

Характер зависимости $p_{min} = f(\rho; V_{05}, \sigma_B)$ приведен на рисунках 3.3, 3.4.

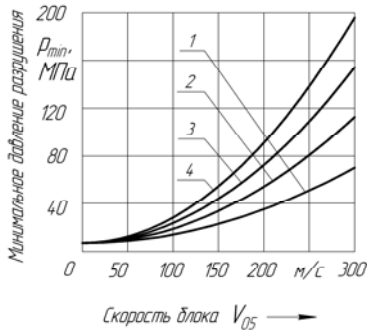


Рис. 3.3. Влияние скорости блока V_{05} на величину минимального давления разрушения p_{min} слоя коррозионных отложений:
 1 – $\rho = 1500 \text{ кг/м}^3$; 2 – $\rho = 2522 \text{ кг/м}^3$; 3 – $\rho = 3500 \text{ кг/м}^3$; 4 – $\rho = 4500 \text{ кг/м}^3$;
 1–4 – теория по формуле (3.24); $\sigma_B = 2,5 \text{ МПа}$

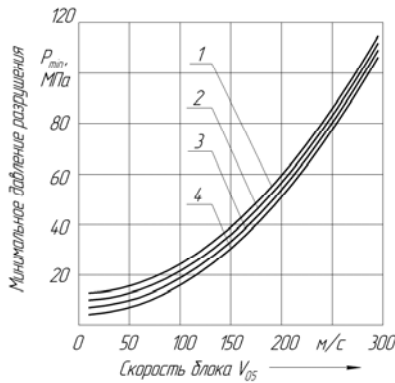


Рис. 3.4. Влияние скорости блока V_{05} на величину минимального давления разрушения p_{min} слоя коррозионных отложений:
 1 – $\sigma_B = 4,5 \text{ МПа}$; 2 – $\sigma_B = 3,5 \text{ МПа}$; 3 – $\sigma_B = 2,5 \text{ МПа}$; 4 – $\sigma_B = 1,5 \text{ МПа}$;
 1 – 4 теория по формуле (3.24); $\rho = 2522 \text{ кг/м}^3$

Из анализа кривых на рисунках 3.3 и 3.4 видно, что значительное влияние скорости блока 5 на величину давления p_{min} начинает проявляться со значений более 50 м/с; влияние плотности разрушаемой среды на давление p_{min} начинает убывать при значениях скоростей блока 5 более 200 м/с. Существенным практическим аспектом зависимости (3.24) является то, что при известных значениях давления p_{min} и характеристик материала σ_B и ρ она позволяет определить минимальную скорость струи $V_{стр}$, которая обеспечивает разрушение слоя коррозии на поверхности обработанного материала.

3.3 Расчет оптимального по энергозатратам угла конусности струеформирующего конфузора

Как видно из проведенного литературного обзора задача, связанная с определением оптимального угла конусности до настоящего времени не получила корректного решения.

В данном разделе приводится решение вариационной задачи по минимизации потерь напора в потоке жидкости, проходящем через конфузор [13, 16]. Очевидно, что минимизировать потери, можно за счет использования оптимального угла конусности конфузора $\alpha_{i\delta}$. При расчете конфузора (рисунок 3.5), в соответствии с рекомендациями [126–128], полную потерю напора \dot{h} будем рассматривать как сумму двух слагаемых:

$$\dot{h} = \dot{h}_{\delta\delta} + \dot{h}_{i.\dot{n}}, \quad (3.25)$$

где $\dot{h}_{\delta\delta}$ – потери напора на трение;

$\dot{h}_{i.\dot{n}}$ – потери напора на сужение.

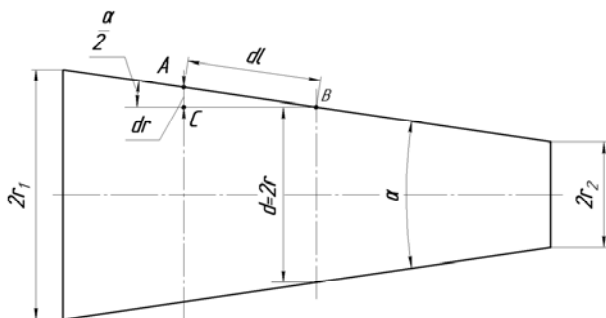


Рис. 3.5. Расчётная схема конфузора, принятая для определения оптимального угла конусности $\alpha_{\text{опт}}$

Потерю напора на трение рассчитаем следующим образом. Рассмотрим цилиндрический конфузор с прямолинейной образующей и с углом α при вершине. Пусть радиус входного отверстия конфузора равен r_1 , выходного r_2 (см. рисунок 3.5). Так как радиус сечения и средняя скорость движения жидкости являются величинами переменными вдоль конфузора, то следует взять элементарный отрезок конфузора длиной dl вдоль образующей и для него выразить элементарную потерю напора на трение по формуле Дарси-Вейсбаха [130]

$$d\hat{h}_{\text{от}} = \lambda \frac{dl}{2r} \cdot \frac{V^2}{2g}, \quad (3.26)$$

где λ – коэффициент потерь на гидравлическое трение;

V – значение средней скорости в произвольно взятом сечении;

r – радиус расчетного сечения.

Из треугольника ABC (см. рисунок 3.5) следует

$$dl = \frac{dr}{\sin \frac{\alpha}{2}}, \quad (3.27)$$

где dr – приращение радиуса конфузора на бесконечно малом расстоянии dl между его живыми сечениями.

На основании уравнения постоянства расхода можно записать

$$V = V_2 \left(\frac{r_2}{r} \right)^2, \quad (3.28)$$

где V_2 – скорость на выходе из конфузора.

Формулу для определения числа Рейнольдса запишем в виде

$$\text{Re} = \frac{Vd}{\nu}, \quad (3.29)$$

где ν – кинематический коэффициент вязкости;

d – диаметр, взятый в произвольном сечении конфузора ($d = 2r$).

В работах [126–128] на основании обработки многочисленных опытов по исследованию движения жидкости в круглых гидравлически гладких трубах при числах Рейнольдса $4000 < \text{Re} < 100000$ рекомендовано коэффициент гидравлического трения рассчитывать по зависимости

$$\lambda = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}}. \quad (3.30)$$

Запишем выражение (3.30) с учетом выражений (3.28), (3.29)

$$\lambda = 0,316 \frac{\sqrt[4]{r} \sqrt[4]{\nu}}{\sqrt[4]{2V_2} \sqrt{r_2}}. \quad (3.31)$$

Подставив выражения (3.27), (3.31) в формулу (3.26) получим

$$dh_{\text{од}} = 0,158 \frac{\sqrt[4]{V} V_2^2 r_2^{3,5}}{g \sqrt[4]{2V_2} \sin \frac{\alpha}{2} r^{\frac{19}{n}}} dr = f(r) dr . \quad (3.32)$$

Выполнив интегрирование по длине образующей вдоль всего конфузора, получим

$$\hbar_{\text{тр}} = \int_{r_2}^{r_1} f(r) dr = 0,03543 \frac{\sqrt[4]{V} V_2^{1,75}}{g \sin \frac{\alpha}{2}} r^{-0,25} (1 - n^{3,75}) , \quad (3.33)$$

где $n = \frac{r_2}{r_1}$ – характеристика сужения конфузора;

α – угол конусности конфузора.

При расчете потерь напора на сужение используем зависимость

$$\hbar_{n.c} = \zeta_{n.c} \frac{V_2^2}{2g} , \quad (3.34)$$

где $\zeta_{i.\bar{n}}$ – коэффициент постепенного сужения конфузора.

На основании рекомендаций, приведенных в работе [126], выражим коэффициент постепенного сужения зависимостью

$$\zeta_{i.\bar{n}} = k_{i.\bar{n}} \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2 , \quad (3.35)$$

где $k_{i.\bar{n}}$ – коэффициент смягчения;

ε – коэффициент сжатия струи, $\varepsilon < 1$.

На основании данных [126] коэффициент сжатия струи рассчитывается по формуле

$$\varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - n^2}. \quad (3.36)$$

По графической зависимости (рисунок 3.6) для коэффициента $k_{\text{н.н}}$ от угла конусности α [126], полученной А.Д.Альтшулем и А.И.Калицуном, используя метод наименьших квадратов, получим

$$k_{\text{н.с}} = 0,6 \sin^{3,45} \frac{\alpha}{2} + \frac{0,0138}{\sin \frac{\alpha}{2}} + 0,13. \quad (3.37)$$

Выражение (3.25) с учетом формул (3.33), (3.34), (3.35), (3.37) запишем в следующем виде:

$$\begin{aligned} h = & 0,03543 \frac{\sqrt[4]{V} V_2^{1,75}}{g \sin \frac{\alpha}{2}} r_2^{-0,25} (1 - n^{3,75}) + \\ & + \left(0,6 \sin^{3,45} \frac{\alpha}{2} + \frac{0,0138}{\sin \frac{\alpha}{2}} + 0,13 \right) \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2 \frac{V_2^2}{2g}. \end{aligned} \quad (3.38)$$

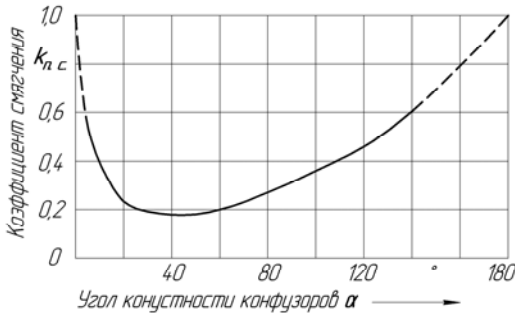


Рис. 3.6. Зависимость коэффициента смягчения $k_{\text{н.с}}$ конфузоров от угла конусности α [126]

Анализ расчетов по формуле (3.38) показывает, что минимальные потери напора h ($h = 90\text{--}110$ м) и, как следствие, максимальное струйное воздействие, будут отмечаться при значениях угла конусности $\alpha = 45\text{--}50^\circ$ (рисунок 3.7).

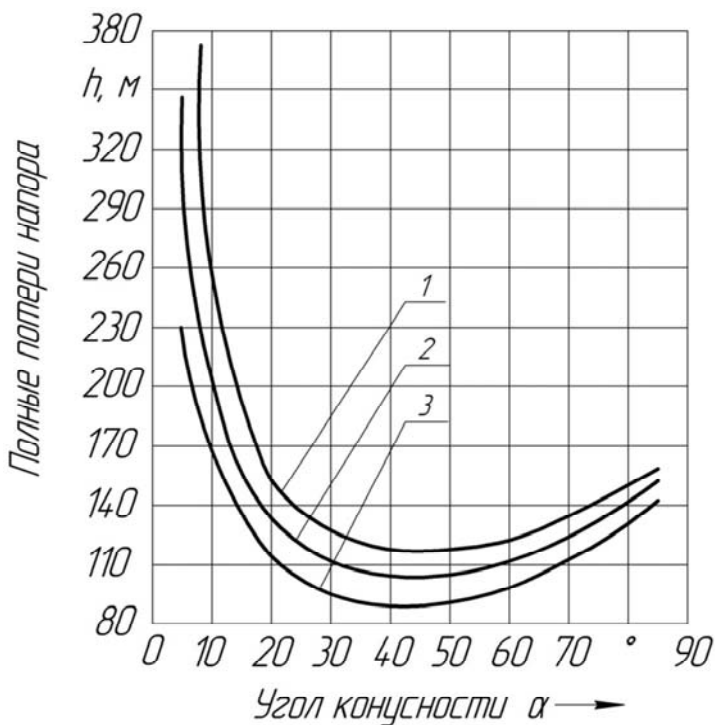


Рис. 3.7. Зависимость полных потерь напора h от угла конусности конфузора $\alpha_{\text{опт}}$:
 1 – $\nu = 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; 2 – $\nu = 4,33 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; 3 – $\nu = 3,10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$

Для определения оптимального угла конусности $\alpha_{\text{опт}}$ исследуем на экстремум (минимум) выражение 3.38. Для этого приравняем нулю первую производную от потерь напора h по углу α .

$$\frac{d\hbar}{d\alpha} = 0 . \quad (3.39)$$

Выражение (3.39) с учетом (3.38) представим в виде

$$\begin{aligned} \frac{d\hbar}{d\alpha} = & \left(0,03543 \frac{\sqrt[4]{v} V_2^{1,75}}{g \sin \frac{\alpha}{2}} r_2^{-0,25} (1-n^{3,75}) + \right. \\ & \left. + \left(0,6 \sin^{3,45} \frac{\alpha}{2} + \frac{0,0138}{\sin \frac{\alpha}{2}} + 0,13 \right) \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2 \frac{V_2^2}{2g} \right) . \end{aligned} \quad (3.40)$$

В результате дифференцирования (3.40) с учетом, что $\alpha \in (0;180)$, $n < 1$, $\varepsilon < 1$ получим

$$\alpha_{\text{опт}} = 2 \arcsin \left(\frac{0,03423 (1-n^{3,75})}{\left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2} \sqrt[4]{\frac{v}{V_2 r_2}} + 0,0067 \right)^{\frac{1}{4,45}} . \quad (3.41)$$

Существенным отличительным моментом зависимости (3.41), следует считать то, что она впервые учитывает влияние средней скорости движения жидкости на выходе из конфузора V_2 , кинематической вязкости ν и радиуса конфузора r_2 на величину оптимального угла конусности конфузора $\alpha_{\text{опт}}$.

На рисунке 3.8 представлены графики зависимости оптимального угла конусности $\alpha_{\text{опт}}$ от изменения скорости V_2 на выходе из конфузора.

Из приведенных графиков (рисунок 3.8) видно, что начальные значения оптимальных углов при скорости $V_2 = 10$ м/с находятся в диапазоне $\alpha_{\text{опт}} = 47,5\text{--}50^\circ$. Наиболее резкое уменьшение оптималь-

ного угла конусности $\alpha_{\text{опт}}$ на $3\text{--}4^\circ$ происходит в диапазоне скоростей $V_2 = 10\text{--}60$ м/с. Дальнейшее увеличение скорости в диапазоне скоростей $V_2 = 60\text{--}170$ м/с, сопровождается более плавным уменьшением угла конусности $\alpha_{\text{опт}}$ на $1,5\text{--}2,5^\circ$, доходя до значений $44,5\text{--}45,5^\circ$ при скорости $V_2 = 170$ м/с.

На рисунке 3.9 представлены графики зависимости оптимального угла конусности $\alpha_{\text{опт}}$ от величины кинематического коэффициента вязкости ν .

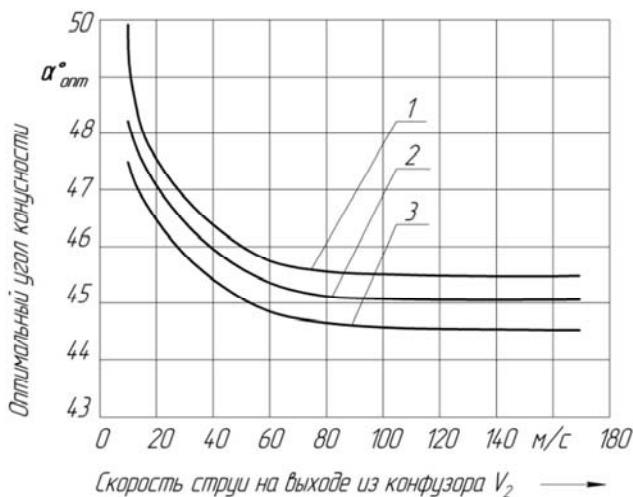


Рисунок 3.8 – Зависимость оптимального угла конусности $\alpha_{\text{опт}}$ от изменения скорости V_2 на выходе из конфузора:

$$1 - \nu = 5,65 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с} ; 2 - \nu = 4,33 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с} ; 3 - \nu = 3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с} \\ (r_2 = 0,001 \text{ м} ; \varepsilon = 0,61 ; n = 0,1429)$$

Из приведенных зависимостей (рисунок 3.9) видно, что изменение величины $\alpha_{\text{опт}}$ от вязкости рабочей жидкости имеет практически линейную зависимость. Причем, существенное изменение вязкости от 3,5 до 5,5 сантистоксов (сСт) весьма незначительно влияет

на величину $\alpha_{\text{опт}}$, которая в диапазоне скоростей $V_2 = 100\text{--}200$ м/с незначительно изменяется в диапазоне значений $45\text{--}46,5^\circ$.

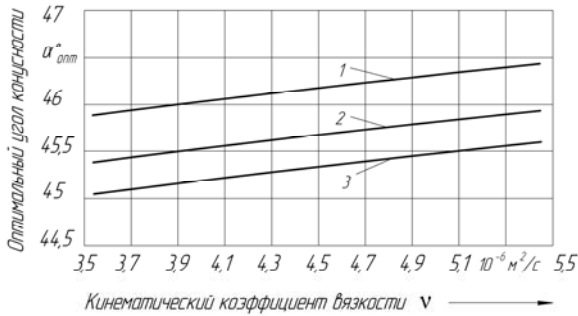


Рис. 3.9. Зависимость оптимального угла конусности α_{opt} от изменения кинематического коэффициента вязкости ν :
 1 – $V_2 = 100$ м/с 2 – $V_2 = 150$ м/с; 3 – $V_2 = 200$ м/с
 $r_2 = 0,001$ м, $\varepsilon = 0,61$, $n = 0,1429$

На рисунке 3.10 представлены зависимости оптимального угла конусности α_{opt} от изменения входного радиуса отверстия конфузора r_1 .

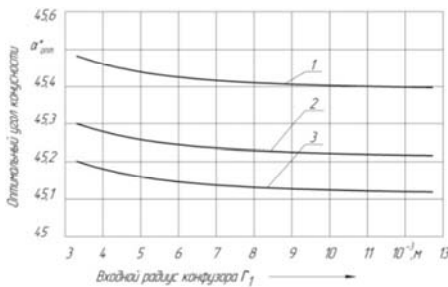


Рис. 3.10. Зависимость оптимального угла конусности $\alpha_{\text{опт}}$ от изменения входного радиуса отверстия конфузора r_1 :
 1 – $\nu = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; 2 – $\nu = 4,33 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; 3 – $\nu = 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$
 $V_2 = 100$ м/с, $r_2 = 0,001$ м

Из приведенных зависимостей (см. рисунок 3.10) видно, что изменение оптимального угла конусности $\alpha_{i\dot{\delta}}$ имеет плавно убывающий характер в диапазоне значений $45,1-45,5^\circ$ на протяжении всего интервала входных радиусов конфузора r_1 от 0,003 м до 0,013 м.

На рисунке 3.11 представлены зависимости оптимального угла конусности $\alpha_{i\dot{\delta}}$ от изменения выходного радиуса отверстия конфузора r_2 .

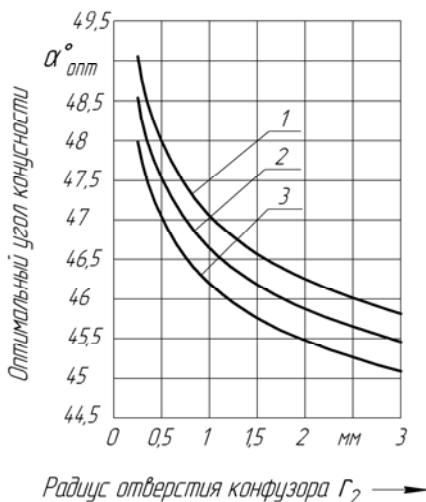


Рис. 3.11. График зависимости оптимального угла конусности α_{opt}

от изменения выходного радиуса отверстия конфузора r_2 :

$$1 - v = 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; 2 - v = 4,33 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; 3 - v = 3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$$

$$V_2 = 100 \text{ м/с}, v = 4,33 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}, r_1 = 0,007 \text{ м}$$

Из приведенных графиков (см. рисунок 3.11) видно, что изменение оптимального угла конусности $\alpha_{i\dot{\delta}}$ имеет плавно убывающий характер в диапазоне значений $45-48,5^\circ$ на протяжении всего интервала r_2 от 0,0003 м до 0,003 м.

Следует отметить, что результаты, приведенные на графиках 3.8–3.11, удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными авторов [35, 126] и показывают, что оптимальные значения углов $\alpha_{\text{опт}}$, которые можно принять для расчета параметров течения рабочей жидкости в конфузорах находятся в диапазоне значения равном 45–50°. Указанный диапазон может быть рекомендован как оптимальный по потерям напора и обеспечивающий, как следствие, максимальную скорость струи и соответствующее силовое воздействие при очистке стальной поверхности от коррозии.

4 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СТРУЙНОЙ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ ОЧИСТКИ И ЗАЩИТЫ СТАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОТ КОРРОЗИИ

В данной главе приводятся результаты экспериментальных исследований процесса ГАО. Приводятся данные по расхождению между теорией и экспериментом в части определения силового воздействия на обрабатываемую поверхность. Анализируется влияние гидродинамических параметров разработанного процесса ГАО на параметры шероховатости Ra , микротвердости, адгезионной прочности, коррозионной стойкости, параметры сформированного защитного покрытия. Устанавливается влияние защитного покрытия, сформированного на основе использования новых рабочих растворов для очистки стальных поверхностей, на скорость лазерной резки [1, 10, 16].

4.1 Экспериментальные исследования по определению давления рабочей жидкости на выходе из конфузора

Для установления давления на выходе из конфузора (рисунок 4.1) были проведены предварительные эксперименты на лабораторном стенде. При этом использовались составы рабочих жидкостей [1, 10] плотностью $\rho = 1020, 1040, 1050 \text{ кг/м}^3$. Расходы Q при проведении экспериментов изменялись в диапазоне $(123-151,5) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$. Результаты проведенных экспериментов представлены в таблице 4.1. При этом для расчета потерь напора использовались данные графиков на рисунке 3.7. Расчет производился с использованием уравнения Бернулли для входного и выходного сечений конфузора (рисунок 4.1)

$$\frac{p_{\text{вх}}}{\rho g} + \alpha \frac{V_{\text{вх}}^2}{2g} = \frac{p_{\text{вых}}}{\rho g} + \alpha \frac{V_{\text{вых}}^2}{2g} + h, \quad (4.1)$$

где $p_{\text{вх}}$ – давление на входе в конфузор, МПа;
 ρ – плотность рабочей жидкости, кг/м^3 ;
 g – ускорение силы тяжести, м/с^2 ;

α – безразмерный коэффициент Кориолиса;
 $V_{\text{вх}}$ – скорость на входе в конфузор, м/с;
 $p_{\text{вых}}$ – давление на выходе из конфузора, МПа;
 $V_{\text{вых}}$ – скорость на выходе из конфузора, м/с;
 h – потери напора, м.

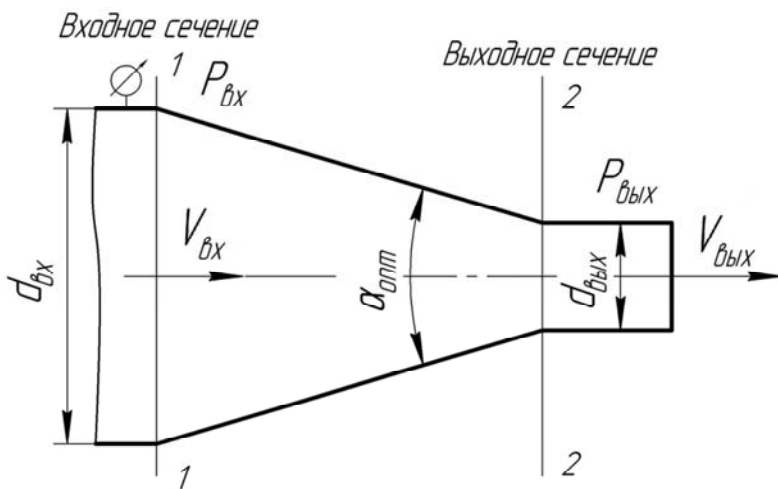


Рис. 4.1. Схема для экспериментального исследования давления на выходе из конфузора

Как видно из таблицы 4.1, значения давления на выходе из конфузора в сечении 2–2 $p_{\text{вых}}$ ниже, чем 2,3–2,5 кПа, что указывает на кавитационный процесс течения рабочей жидкости через выходное сечение конфузора. При таких параметрах течения за счет кавитационного вскипания по всему объему рабочей жидкости в сечении 2–2 обеспечивается эффективное перемешивание всех компонентов в потоке, сопровождаемое при соударении струи с преградой полным снятием продуктов коррозии с очищаемой поверхности образца.

Таблица 4.1 – Определение параметров кавитирующего режима струи для рабочей жидкости, проходящей через конфузор

№ п/п	Q см ³ /с	ρ кг/м ³	$d_{вх}$ м	$d_{вых}$ м	$V_{вх}$ м/с	$V_{вых}$ м/с	$p_{вх}$ МПа	$p_{вых}$ кПа
1	123,659	1040	0,008	0,001	2,46	157,527	20	2,16
2	138,259	1040	0,008	0,001	2,75	176,126	25	1,50
3	151,457	1040	0,008	0,001	3,015	192,938	30	1,20
4	124,866	1020	0,008	0,001	2,485	159,064	20	2,13
5	137,599	1050	0,008	0,001	2,739	175,285	25	1,47

4.2 Определение влияния компонентов рабочих жидкостей на силовое воздействие гидроабразивной струи

Определение влияния компонентов рабочих жидкостей на процесс очистки проводилось на основе оценки силового воздействия струи на обрабатываемую поверхность. При этом оценивалось влияние каждого из компонентов, входящих в состав рабочей жидкости и определялась их оптимальная концентрация. Результаты струйного воздействия на обрабатываемую поверхность при изменении концентрации кальцинированной соды, полиакриламида и бентонита в составе рабочей жидкости, полученные на основе использования разработанной методики измерения струйного давления с применением датчика давления ЭДП-30 (раздел 2.3, стр. 45–48), приведены на рисунке 4.2.

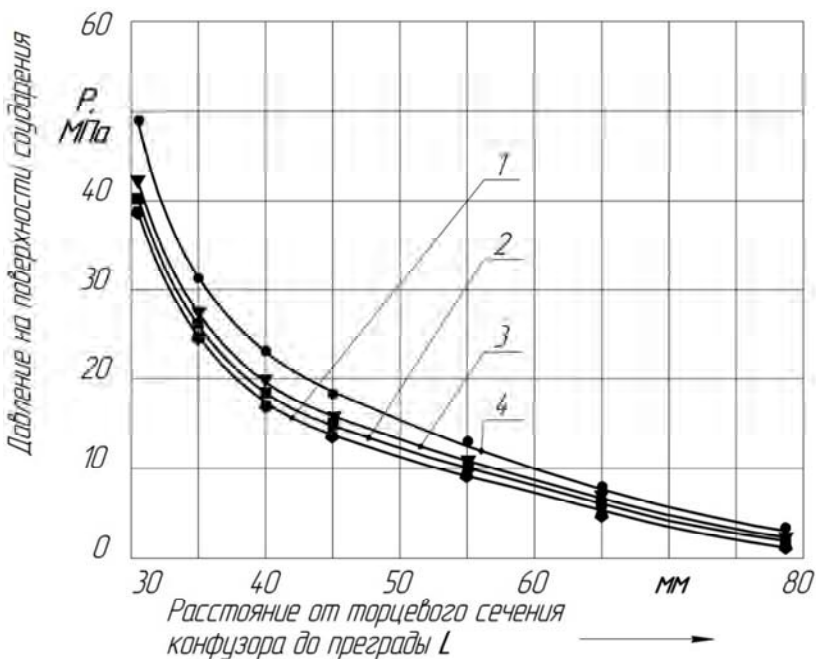


Рис. 4.2. Зависимость давления p на поверхности соударения струи с преградой от расстояния L , при использовании различных составов рабочей жидкости: 1 – вода; 2 – вода + кальцинированная сода ($K_{к.с.} = 1\%$); 3 – вода + полиакриламид ($K_{п} = 10^{-5}\%$); 4 – вода + бентонит ($K_{б} = 1,2\%$)
 $d_k = 1$ мм., $p_{вх} = 20$ МПа, $\rho = 1,02 \times 10^3$ кг/м³

Из рисунка 4.2 видно, что наибольшее увеличение силового воздействия (на 20 %) происходит при добавке бентонита в состав рабочей жидкости ($K_{б} = 1,2\%$), полиакриламид увеличивает силовое воздействие на 3–5 %, а при добавке кальцинированной соды увеличение силового воздействия практически не происходит. Полученные результаты удовлетворительно согласуются с результатами ряда исследователей [112, 131].

Отмеченное существенное повышение силового воздействия при использовании бентонита, очевидно, следует объяснить эффектом пластической деформации каждой частицы при ее соударении с преградой. При этом вытянутые по оси струи частицы в результате

соударения с преградой получают значительные деформации в радиальном направлении, что сопровождается локальным повышением давления на поверхности соударения частицы с преградой. В процессе растекания частицы по преграде ее передний фронт проникает в микротрещины коррозионных отложений, что способствует ускорению процесса отделения продуктов коррозии от очищаемой поверхности.

Исходя из анализа графика, представленного на рисунке 4.2, установим максимальное силовое воздействие, которое оказывает добавка различных концентраций бентонита в состав рабочей жидкости (рисунок 4.3).

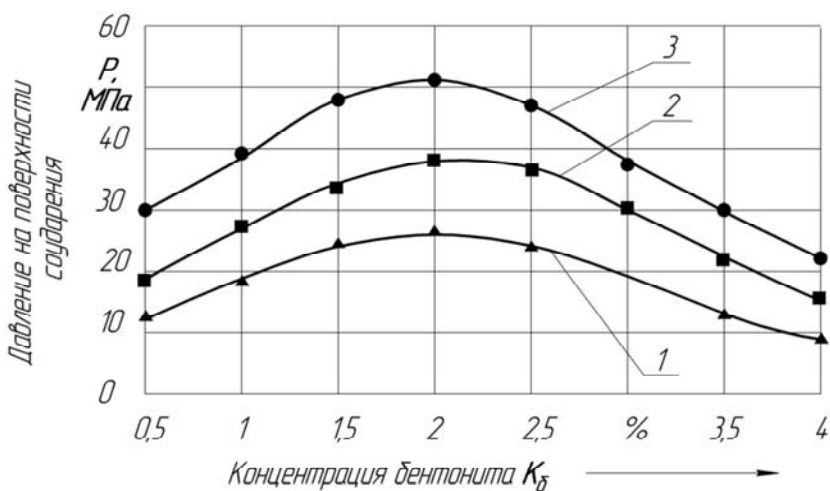


Рис. 4.3. Зависимость давления p на поверхности соударения струи с преградой от концентрации бентонита K_b :
 1 — $p_{вх} = 10$ МПа; 2 — $p_{вх} = 15$ МПа; 3 — $p_{вх} = 20$ МПа;
 $d_k = 1$ мм, $L = 30$ мм

Из анализа рисунка 4.3 видно, что оптимальная концентрация бентонита находится в пределах 1–3 % от общей массы раствора. При увеличении концентрации бентонита более 3 % силовое воздействие начинает падать, что можно объяснить перекрытием проходного сечения всасывающего и нагнетательного клапанов насоса,

что сопровождается ростом потерь давления и, как следствие, приводит к снижению давления на поверхности, подвергнутой струйной обработке.

На рисунке 4.4 видно, что максимальные давления на поверхности соударения достигаются при концентрациях полиакриламида $K_n = (10^{-7} - 10^{-3}) \%$. При увеличении K_n более $10^{-3} \%$ происходит осаждение частиц бентонита в растворе рабочей жидкости, что приводит к снижению давления на поверхности соударения струи с преградой. При значениях K_n менее $10^{-7} \%$ также отмечается снижение давления, что можно объяснить раскрытием факела струи из-за малой концентрации полимера, которое сопровождается соответствующим увеличением живого сечения площади струи и, как следствие, снижением давления.

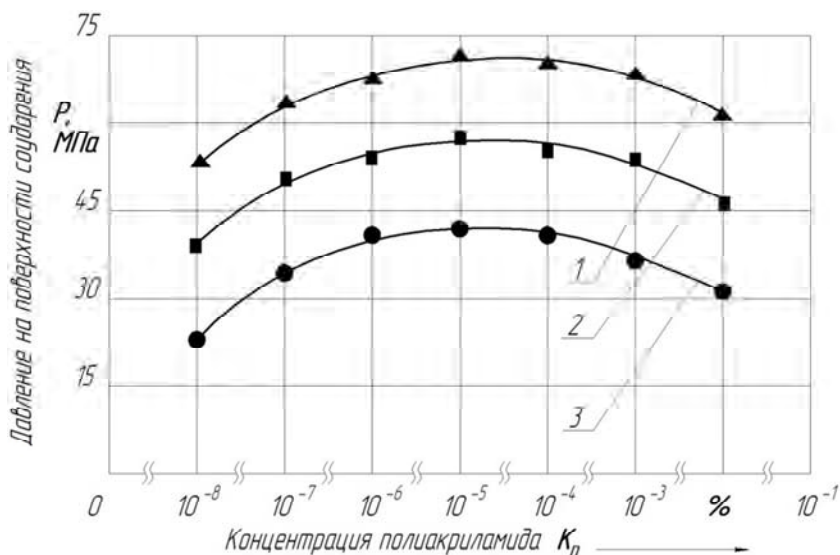


Рис. 4.4. Зависимость давления p на поверхности соударения струи с преградой от концентрации полиакриламида K_n :

1 — $p_{вх} = 35$ МПа; 2 — $p_{вх} = 30$ МПа; 3 — $p_{вх} = 20$ МПа;

$d_k = 1$ мм, $L = 50$ мм

Как можно видеть из рисунка 4.2, добавка кальцинированной соды не оказывает существенного влияния на увеличение силового воздействия струи рабочей жидкости на очищаемую поверхность. В связи с этим оценим влияние добавки Na_2CO_3 на антикоррозионные свойства поверхности металла из стали 08 кп с толщиной 4 мм, подвергшейся атмосферной коррозии и очищенной от продуктов коррозии в лабораторных условиях (рисунок 4.5).

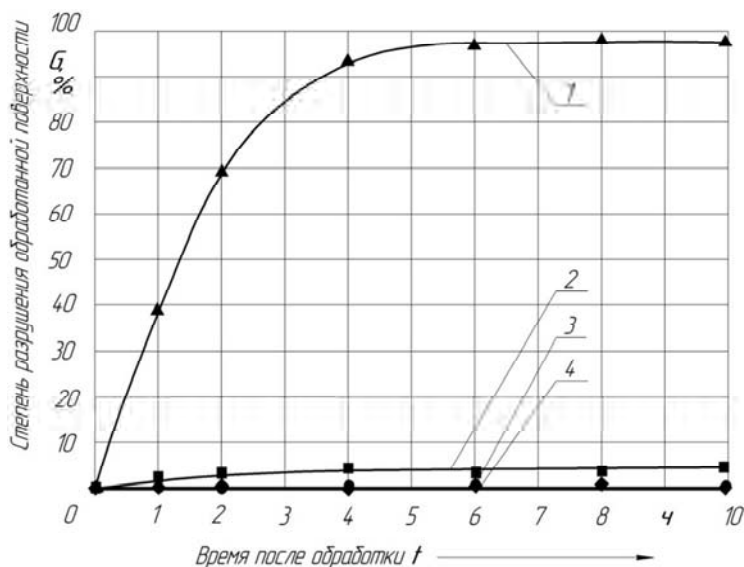


Рис. 4.5. Влияние концентрации кальцинированной соды в составе рабочей жидкости на степень коррозионного поражения обработанной поверхности
 1 - $K_{\text{к.с.}} = 0 \%$; 2 - $K_{\text{к.с.}} = 0,5 \%$; 3 - $K_{\text{к.с.}} = 2 \%$; 4 - $K_{\text{к.с.}} = 3 \%$.

Материал сталь 08кп; $d_k = 1$ мм, $L = 50$ мм

Из рисунка 4.5 видно влияние концентрации кальцинированной соды на степень поражения ранее обработанной металлической поверхности продуктами атмосферной коррозии. Рассмотрение кривых на этом рисунке показывает, что отсутствие Na_2CO_3 в составе рабочей жидкости приводит к практически полному (95 %) поражению G ранее очищенной поверхности продуктами повторной кор-

розии уже через 5–6 часов после проведения ГАО. Из рассмотрения кривых 2, 3, 4 на этом же рисунке видно, что добавка в состав рабочей жидкости Na_2CO_3 в количестве 0,5–2 % практически полностью блокирует процессы повторной коррозии на ранее очищенной поверхности стального образца, что подтверждают и данные, приведенные в приложении А.

Для наиболее эффективного применения гидроабразивной обработки в качестве инструмента очистки поверхностей от продуктов коррозии необходимо знать оптимальные значения основных параметров, определяющих процесс очистки, т.е. значения давления p на площадке соударения струи с очищаемой поверхностью и скорости струи $V_{\text{стр}}$. На рисунке 4.6 представлены теоретические значения давления p_t , определенные по формуле (3.24), экспериментальные величины p_3 в исследованном диапазоне изменения скоростей струи $V_{\text{стр}}$. Экспериментальная скорость струи определялась с учетом давления на входе в конфуззор по формуле (2.2).

Из анализа данных на рисунке 4.6 видно, что имеются три, экспериментально установленные, зоны очистки для исследованного процесса. Зона I – отсутствие эффекта очистки из – за недостаточного силового воздействия струи; зона II – зона гарантированного процесса очистки до момента начала процесса резки обрабатываемого материала; III – зона, в которой рабочая струя воздействует на металлическую основу с силой, при которой происходит микроотрыв поверхностных частиц металла (стружки) от его основы. При этом кинетическая энергия струи является достаточной для совершения механической работы резания непосредственно в зоне обработки металлической поверхности (начало процесса резки).

На рисунке 4.6 видно, что экспериментальная кривая 2 расположена ниже теоретической кривой 1. Сравнение экспериментальных величин давления воздействия на поверхность материала, полученных при разной скорости истечения струи, с теоретическими величинами показывает, что с увеличением скорости истечения струи разница между этими величинами возрастает. Так, при изменении скорости струи $V_{\text{стр}}$ от 153,4 м/с до 190 м/с $p_3 = (0,8–0,9)p_t$, расхождение между теорией и экспериментом составляет 15–19 %.

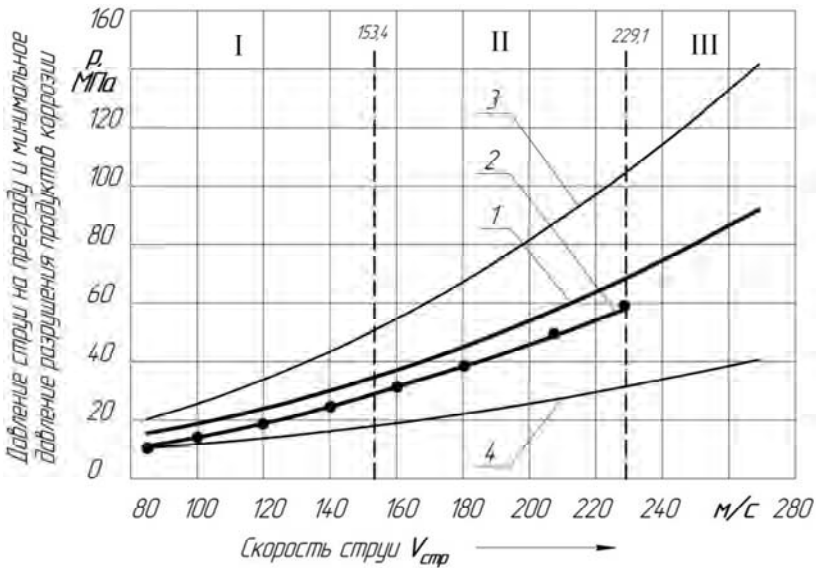


Рис. 4.6. Зависимость давления на преграду от скорости струи:

I – зона отсутствия эффекта очистки; II – зона гарантированного процесса очистки;
 III – зона микропластических деформаций на поверхности.

- 1 – теоретическая кривая по уравнению (3.24) $\rho = 2,5 \times 10^3$ кг/м³, $\sigma_S = \sigma_B = 2,5$ МПа;
 2 – экспериментальная кривая с рабочей жидкостью при $\rho = 1,04 \times 10^3$ кг/м³;
 3 – теоретическая кривая по уравнению (3.24), $\rho = 4 \times 10^3$ кг/м³, $\sigma_S = \sigma_B = 2,5$ МПа;
 4 – теоретическая кривая по уравнению (3.24), $\rho = 1 \times 10^3$ кг/м³, $\sigma_S = \sigma_B = 2,5$ МПа;
 $d_k = 1 \cdot 10^{-3}$ м, $\rho = 1,04 \cdot 10^3$ кг/м³, $K_6 = 3$ %, $K_n = 10^{-5}$ %, $K_{к.с} = 2$ %, остальное – вода;
 материал – сталь 08кп

Особенность струйной гидроабразивной обработки заключается в сочетании процессов съема материала, смазки и охлаждения обрабатываемой поверхности. При ГАО рабочая жидкость должна обладать следующими качествами: высокой эффективностью силового воздействия на обрабатываемую поверхность, не быть слишком вязкой во избежание неравномерного распределения абразивных частиц в потоке, не иметь большого сопротивления при прохождении по трубопроводам и через конфузторы [4]. На рисунке 4.7 представлены зависимости числа Re от кинематического коэффициента вязкости ν , перемен-

ные значения которого в диапазоне 2,8–4,2 Ст, соответствуют концентрациям бентонита $K_6 = 1-5\%$.

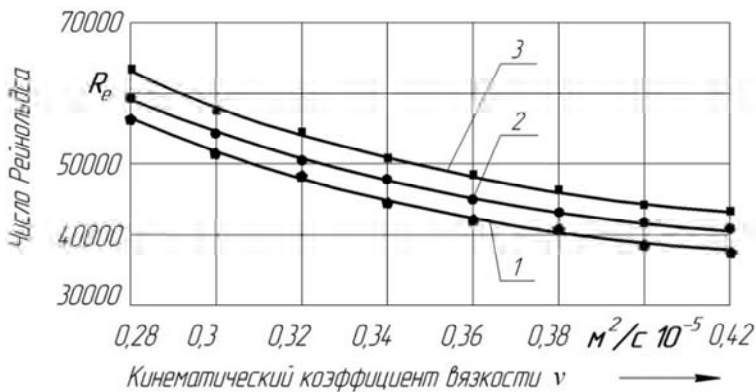


Рис. 4.7. Зависимость числа Рейнольдса R_e от кинематического коэффициента вязкости ν в рабочих жидкостях:
 1 – $V_{\text{стр}} = 160$ м/с; 2 – $V_{\text{стр}} = 180$ м/с; 3 – $V_{\text{стр}} = 200$ м/с;
 $d_k = 1 \cdot 10^{-3}$ м

Проанализировав рисунок 4.7 можно сделать вывод, что число Рейнольдса Re при движении рабочей жидкости со скоростями струи $V_{\text{стр}} = 160-200$ м/с гарантированно находится в пределах от 4000 до 100000, что позволяет нам использовать формулу (3.41) для корректного расчета оптимального угла конусности $\alpha_{\text{опт}}$.

На компактность струи, величину ее нераспавшейся части и скорость истечения, кроме вязкости, большое влияние оказывают размеры внутреннего профиля конфузора (оптимальный угол конусности). Зависимость оптимального угла конусности от скорости струи представлена на рисунке 4.8.

Из анализа кривых на рисунке 4.8, видно, что в исследованном диапазоне скоростей расхождение расчетных (получены при использовании уравнения (3.41) и экспериментальных данных составляет 10–12 %, что свидетельствует о корректности разработанной модели для расчета оптимального угла конусности конфузора.

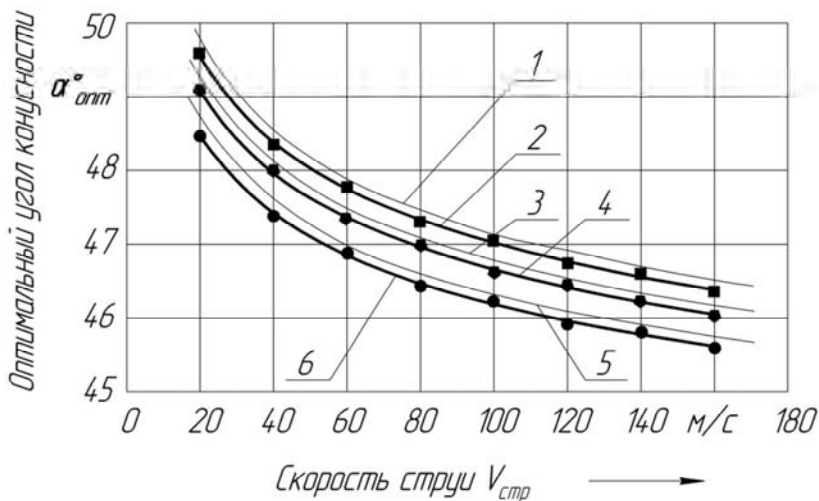


Рис. 4.8. Зависимость оптимального угла конусности α_{opt} от скорости $V_{стр}$

на выходе из конфузора:

1, 3, 5 – расчет по уравнению (3.41); 2, 4, 6 – эксперимент

1, 2 – $v = 5,65 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; 3, 4 – $v = 4,33 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; 5, 6 – $v = 3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$

4.3 Оценка производительности процесса ГАО

Как уже отмечалось важным показателем процесса очистки металлических поверхностей от продуктов коррозии является его производительность. Производительность процесса ГАО оценивалась по величине массового съема материала в единицу времени. Закорродированные образцы при этом подвергались очистке до значений параметра шероховатости $Ra = 30\text{--}50$ мкм.

На рисунке 4.9 видно, что с увеличением времени обработки и давления на входе в конфузор массовый съем материала увеличивается, что обусловлено увеличением скорости струи, приводящей к более интенсивному воздействию на обрабатываемую поверхность. Причем с ростом давления от 22 до 32 МПа время выхода на указанные параметры шероховатости сокращается с 50 до 40 с.

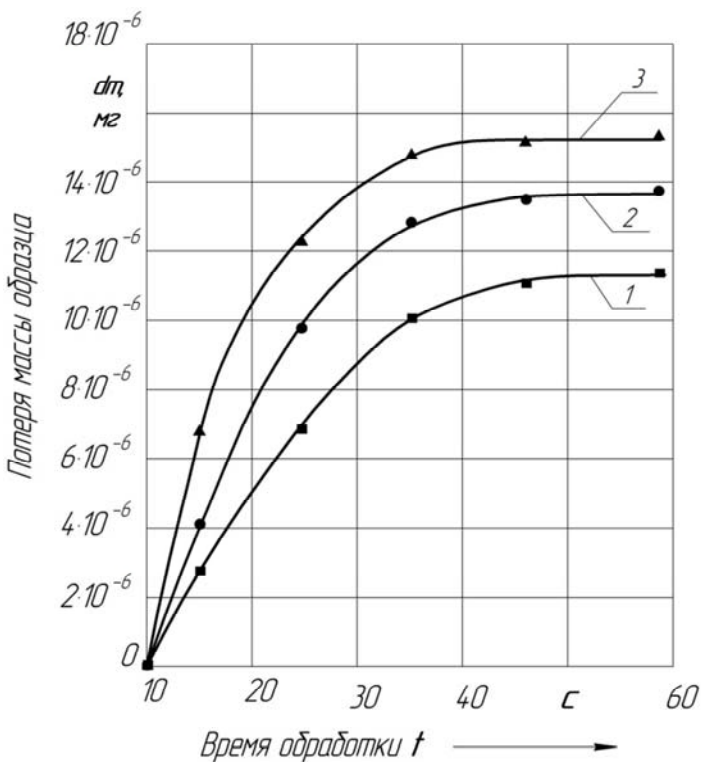


Рис. 4.9. Зависимость потери массы образца от времени обработки:
 1 – $p_{вх} = 22$ МПа; 2 – $p_{вх} = 27$ МПа; 3 – $p_{вх} = 32$ МПа;
 $L = 40$ мм, $K_6 = 3\%$, $K_{II} = 10^{-5}\%$, $K_{к.с.} = 2\%$, остальное – вода; материал – Ст 3

Влияние концентрации бентонита K_6 в составе рабочей жидкости на потерю массы образца можно установить в результате рассмотрения кривых на рисунке 4.10.

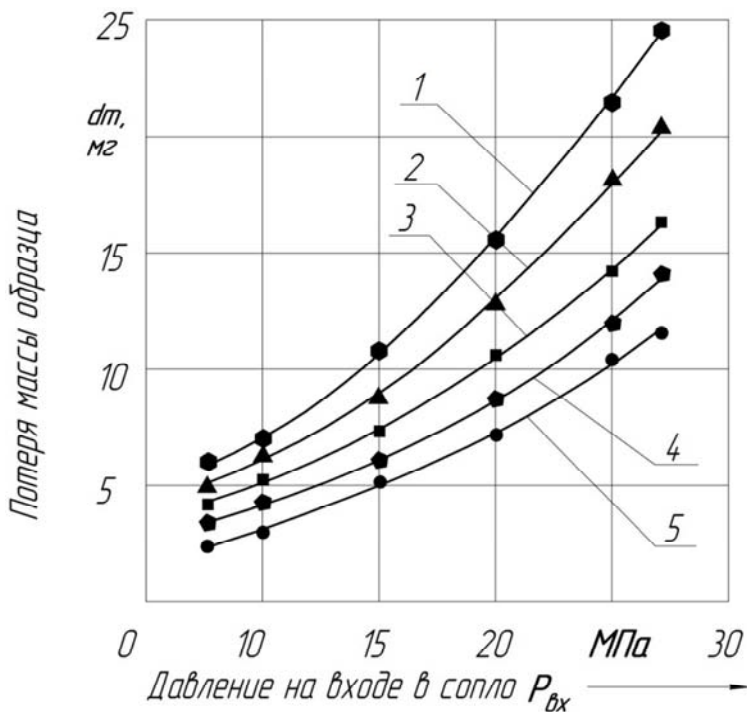


Рис. 4.10. Зависимость потери массы образца dm от давления на входе в конфузор:

1 – $K_б = 3\%$; 2 – $K_б = 1\%$; 3 – $K_б = 0,5\%$; 4 – $K_б = 4\%$; 5 – $K_б = 5\%$;
 $L = 30$ мм; $K_{п} = 10^{-5}\%$, $K_{к.с.} = 2\%$, остальное – вода; материал – Ст 3;
 время обработки $t = 60$ с

Проанализировав рисунок 4.10, видим, что при одинаковом времени обработки $t = 60$ с массовый съем dm имеет максимальные значения при концентрации бентонита от 1 до 3 %, что можно объяснить максимальным силовым воздействием струи рабочей жидкости на очищаемую поверхность при данных концентрациях (см. рисунок 4.2).

4.4 Влияние режимов струйной обработки на шероховатость и микротвердость поверхности

Шероховатость и микротвердость относятся к важным параметрам поверхности, которые необходимо обеспечивать для качественного проведения последующих операций (лазерной резки, покраски, сварки и т.д.).

Оценка шероховатости и микротвердости производилась по методике, описанной в главе 2. Для проведения исследований использовались образцы из сталей Ст 3 и 08 кп, рекомендованные техбюро заводов ОАО «Агат – электромеханический завод» и ОАО «Пинский ССРЗ» для очистки от продуктов коррозии.

На рисунке 4.11 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.

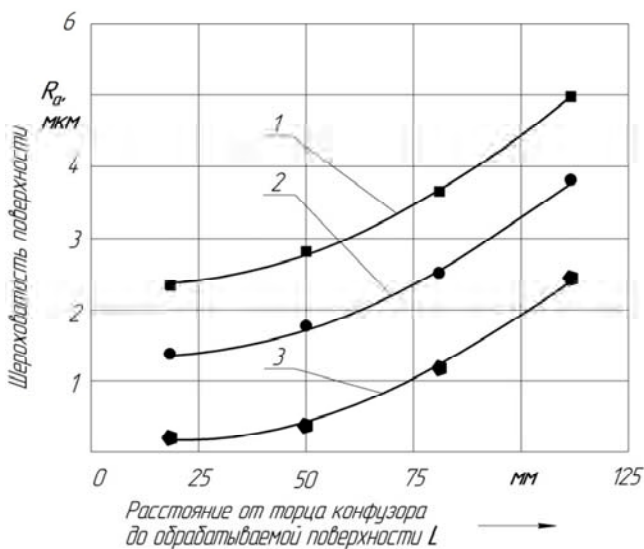


Рис. 4.11. Зависимость шероховатости Ra от расстояния L :
1 – $p_{вх} = 17$ МПа; 2 – $p_{вх} = 22$ МПа; 3 – $p_{вх} = 30$ МПа
 $K_б = 3 \%$, $K_{п} = 10^{-5} \%$, $K_{к.с} = 2 \%$, остальное – вода, $d_k = 1 \cdot 10^{-3}$ м;
материал – сталь 08кп

Как следует из рисунка 4.11, 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 (см. рисунок 4.2) уменьшается по мере удаления обрабатываемой поверхности от выходного сечения конфузора за счет раскрытия факела струи.

На рисунке 4.11 видно, что при давлении на входе в конфузор $p_{вх} = 30$ МПа и расстоянии L от 15 до 50 мм значения шероховатости $Ra = 0,2-0,4$ мкм, что является оптимальным значением для поверхности, предназначенной, например, под последующую операцию ЛР [29].

На рисунке 4.12 представлена зависимость изменения шероховатости поверхности Ra от скорости струи рабочей жидкости $V_{стр}$.

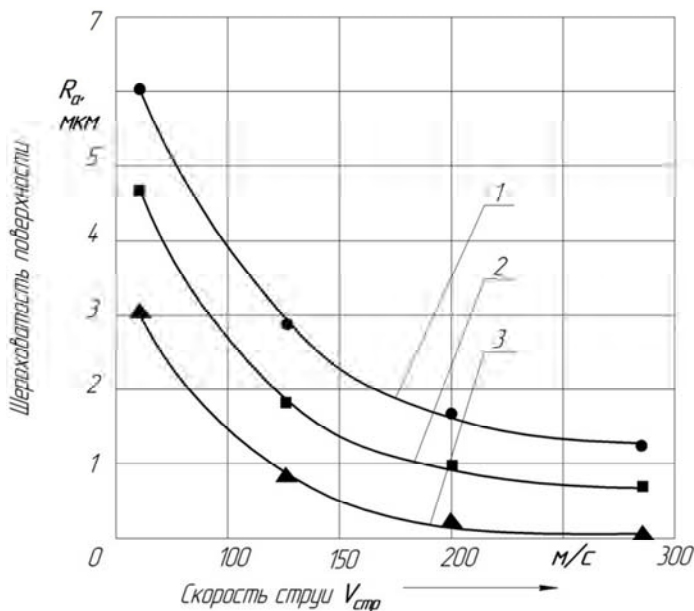


Рис. 4.12. Зависимость шероховатости поверхности Ra от скорости струи $V_{стр}$:
 1 – $L = 150$ мм; 2 – $L = 100$ мм; 3 – $L = 20$ мм;
 $K_{\delta} = 3\%$, $K_{п} = 10^{-5}\%$, $K_{к.с} = 2\%$, остальное вода, $d_k = 1 \cdot 10^{-3}$ м;
 материал – сталь 08кп

Из анализа кривых на рисунке 4.12 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 $Ra = 0,2-0,4$ мкм, что является оптимальным значением для поверхности, подготовленной под ЛР [29].

На рисунке 4.13 представлена зависимость изменения шероховатости поверхности Ra от концентрации бентонита в растворе рабочей жидкости $K_б$.

Как следует из рисунка 4.13, шероховатость обработанной поверхности $Ra = 0,2-0,4$ мкм формируется при режиме обработки с входным давлением конфузора, равным 40 МПа. При этом указанная шероховатость поверхности соответствует режимам обработки с концентрацией бентонита $K_б = 1-3$ %, при которых, как уже отмечалось выше, имеет место максимальное силовое воздействие струи на преграду.

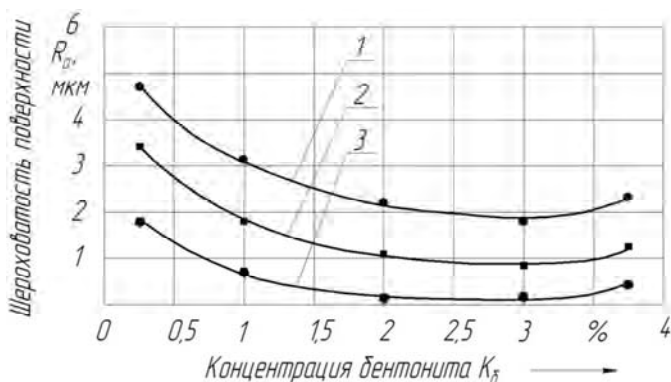


Рис. 4.13. Зависимость шероховатости поверхности Ra от концентрации бентонита $K_б$:

1 — $p_{вх} = 30$ МПа; 2 — $p_{вх} = 35$ МПа; 3 — $p_{вх} = 40$ МПа;
 $K_{п} = 10^{-5}$ %, $K_{к.с} = 2$ %, остальное — вода, $L = 40$ мм, $d_к = 1 \cdot 10^{-3}$ м;
 материал — сталь 08кп

Исходя из графиков, представленных на рисунках 4.11–4.13, видно, что шероховатость обработанных поверхностей Ra на образцах, взятых с ОАО «Агат – электромеханический завод», находится в пределах 0,2–0,4 мкм при различных режимах обработки, что позволяет их использовать, например, в последующей операции ЛР [29].

При очистке образцов из Ст3 (рисунок 4.14) в диапазоне давлений 20–25 МПа и скоростей струи 153–200 м/с установлено, что величина Ra находится в диапазоне 30–50 мкм, что является оптимальным диапазоном по шероховатости поверхности, подготовленной для нанесения грунтовых, лакокрасочных покрытий [30].

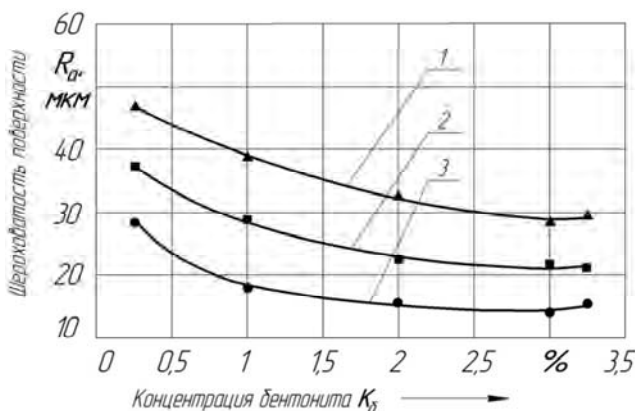


Рис. 4.14. Зависимость шероховатости поверхности Ra от концентрации бентонита K_b :

1 – $p_{вх} = 20$ МПа, $V_{стр} = 153$ м/с; 2 – $p_{вх} = 22$ МПа, $V_{стр} = 180$ м/с;

3 – $p_{вх} = 25$ МПа, $V_{стр} = 200$ м/с,

$K_{п} = 10^{-5}$ %, $K_{к.с} = 2$ %, остальное – вода, $d_k = 1 \cdot 10^{-3}$ м; материал – Ст 3

Наряду с шероховатостью при проведении исследований изучалось влияние струйной обработки на микротвердость H_u (МПа) поверхности.

На рисунке 4.15 представлена зависимость влияния расстояния L от конфузора до обрабатываемой поверхности на микротвердость поверхности H_u при изменении давления на входе в конфузор.

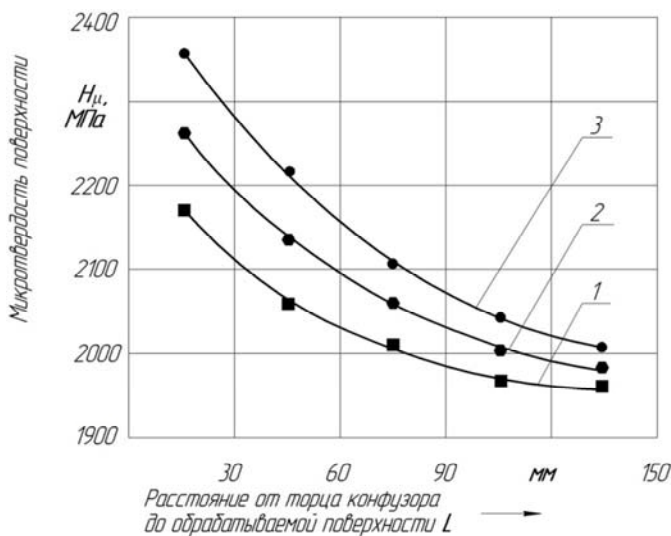


Рис. 4.15. Зависимость микротвердости поверхности H_{μ} от расстояния L :
 1 - $p_{\text{вх}} = 18$ МПа; 2 - $p_{\text{вх}} = 23$ МПа; 3 - $p_{\text{вх}} = 32$ МПа
 $K_{\text{б}} = 3\%$, $K_{\text{ц}} = 10^{-5}\%$, $K_{\text{к.с}} = 2\%$, остальное – вода, $d_{\text{к}} = 1 \cdot 10^{-3}$ м;
 материал – сталь 08кп

Как следует из рисунка 4.15, микротвердость обработанной поверхности H_{μ} уменьшается от 2350 до 1950 МПа при изменении L от 15 до 135 мм. Уменьшение H_{μ} объясняется тем, что силовое воздействие, согласно рисунку 4.2, уменьшается по мере удаления обрабатываемой поверхности от конфузора.

На рисунке 4.16 представлена зависимость изменения микротвердости от скорости струи рабочей жидкости $V_{\text{стр}}$.

Из анализа данных рисунка 4.16 видно, что микротвердость обработанной поверхности увеличивается от 1970 до 2360 МПа при увеличении скорости струи от 70 до 270 м/с. Микротвердость возрастает в среднем на 25–30 % по отношению к исходной величине ($H_{\mu 0} = 1800\text{--}1900$ МПа), характеризующей материал в состоянии поставки. Увеличение H_{μ} объясняется увеличением наклепа обработанной поверхности, что связано с ростом кинетической энергии струи рабочей жидкости при возрастании скорости $V_{\text{стр}}$. 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 2000 до 1960 МПа. При скоростях 250–270 м/с снижение микротвердости с ростом расстояния L отмечается более существенное от 2320 до 2140 МПа, т.е. в среднем на 10–12 %.

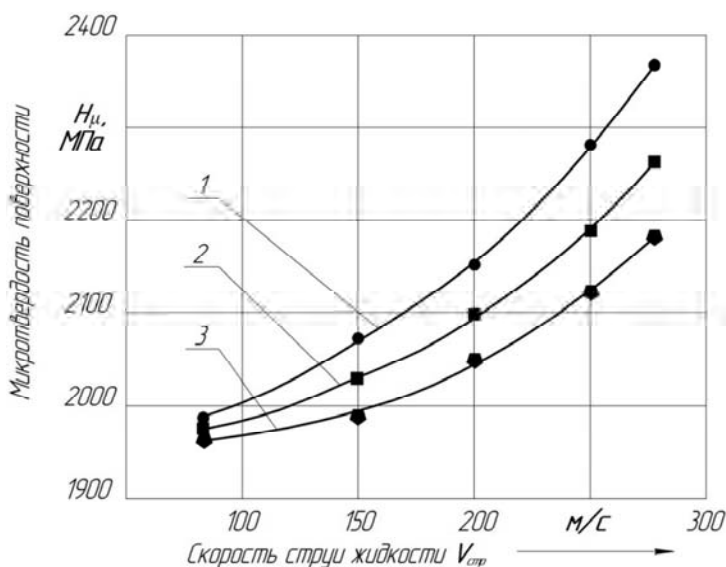


Рис. 4.16. Зависимость микротвердости поверхности H_{μ} от скорости струи $V_{стр}$
 1 – $L = 20$ мм; 2 – $L = 70$ мм; 3 – $L = 150$ мм;
 $K_{\delta} = 3\%$, $K_{\Pi} = 10^{-5}\%$, $K_{\kappa.с} = 2\%$, остальное – вода, $d_{\kappa} = 1 \cdot 10^{-3}$ м;
 материал – сталь 08кп

На рисунке 4.17 представлена зависимость изменения микротвердости поверхности H_{μ} при различных концентрациях бентонита K_{δ} в составе рабочей жидкости.

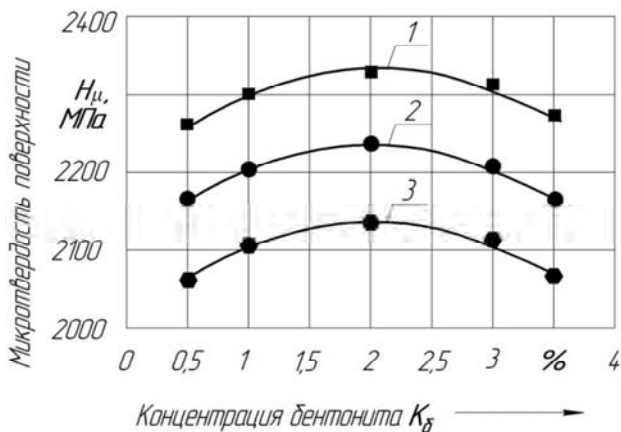


Рис. 4.17. Зависимость микротвердости поверхности H_μ от концентраций бентонита K_b :

1 - $L = 20$ мм; 2 - $L = 70$ мм; 3 - $L = 150$ мм;

$K_{п} = 10^{-5}$ %, $K_{к.с} = 2$ %, остальное - вода, $d_k = 1 \cdot 10^{-3}$ м, $p_{вх} = 40$ МПа; материал - сталь 08кп

Как следует из рисунка 4.17, микротвердость обработанной поверхности достигает максимальных значений при диапазоне концентраций бентонита в составе рабочей жидкости 1–3 %. Указанное увеличение H_μ объясняется тем, что в данном диапазоне значений $K_b = 1–3$ % происходит максимальное увеличение силового воздействия струи рабочей жидкости, сопровождаемое соответствующим повышением наклепа обработанной поверхности.

Как видно из графиков, представленных на рисунках 4.15–4.17, величину микротвердости можно регулировать с помощью изменения режимных факторов (скорости струи, давления на входе в конфузур, расстояния до обрабатываемой поверхности). При этом оптимальные значения режимов обработки по параметрам шероховатости и упрочнения поверхности образцов, предназначенных под последующую лазерную резку, составляют $p_{вх} = 25–40$ МПа и $V_{стр} = 200–250$ м/с. Оптимальные режимы под последующую операцию покраски ($Ra = 30–50$ мкм) находится в пределах $V_{стр} = 153–200$ м/с, $p_{вх} = 20–25$ МПа, $L = 50–90$ мм.

4.5 Исследование морфологии и химсостава поверхностного пленочного покрытия, сформированного при струйной обработке

Как уже отмечалось в главе 2 и как подтверждают проведенные исследования, добавка бентонитовой глины в рабочую жидкость обеспечивает формирование на обработанной поверхности пленочного покрытия (приложение Б). Исследование морфологии и химического состава пленочного покрытия на обработанных поверхностях проводилось в НИИ «Порошковой металлургии» по методике, описанной в разделе 2.6.

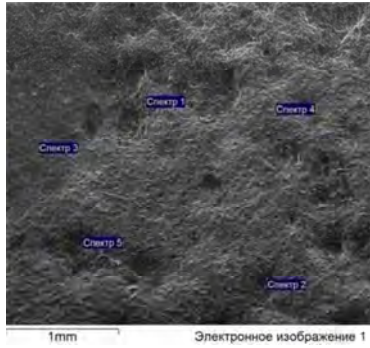
Для исследования были взяты образцы размером 100x100 мм из сталей 08кп и Ст 3, обработанные струей рабочей жидкости ($K_6 = 3 \%$, $K_{п} = 10^{-5} \%$, $K_{кс} = 2 \%$, остальное – вода), при $L = 50$ мм, $V_{стр} = 185$ м/с, $d_k = 1$ мм.

Время сушки образцов на открытом воздухе после обработки составляло 20–24 часа при температуре $T = 20$ °С.

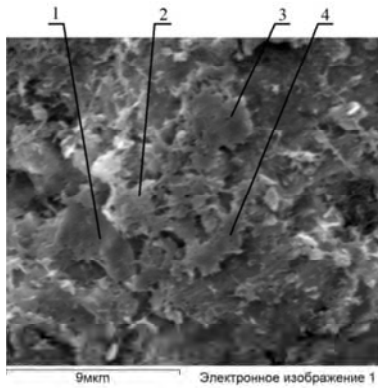
На рисунке 4.18 (а, б) представлены фотографии участков поверхности, пленочные покрытия которых (приложение Б) исследовались на морфологию и химсостав.

Из рассмотрения рисунка 4.18, а видно, что на поверхности стального образца после струйной обработки образуется плотное, покрытие (точки 1–5), состоящее из отдельных чешуек (позиции 1–4 на рисунке 4.18 б).

Для установления химического состава покрытия производился анализ в точках 1–5 (рисунок 4.18 а) без учета Fe (таблица 4.2) и с учетом Fe (таблица 4.3).



а



б

Рис. 4.18. Внешний вид защитного пленочного покрытия, сформированного на поверхности образцов, после ГАО рабочей жидкостью на основе бентонитовой глины [1]:

1, 2, 3, 4 – чешуйки – основная структурная составляющая сформированного защитного покрытия:

а – $\times 40$; б – $\times 5000$

$K_0 = 3\%$, $K_{II} = 10^{-5}\%$, $K_{K.C} = 2\%$,

остальное – вода, $V_{стр} = 185$ м/с; материал – Ст 3

Таблица 4.2 – Химический состав покрытия, сформированного на поверхности из Ст 3 после ГАО составом рабочей жидкости [1] (без учета Fe)

Спектр	C	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	O
Спектр 1	17,44	0,00	1,80	3,11	11,57	0,86	1,03	64,19
Спектр 2	20,04	0,60	1,20	2,11	7,92	0,62	1,50	66,01
Спектр 3	18,82	0,70	1,30	2,63	9,06	0,72	1,95	64,82
Спектр 4	15,48	0,62	1,87	3,98	13,60	1,01	1,08	62,36
Спектр 5	17,02	0,00	1,69	2,60	11,78	1,17	2,37	63,37
Среднее	17,76	0,38	1,57	2,88	10,79	0,88	1,59	64,15

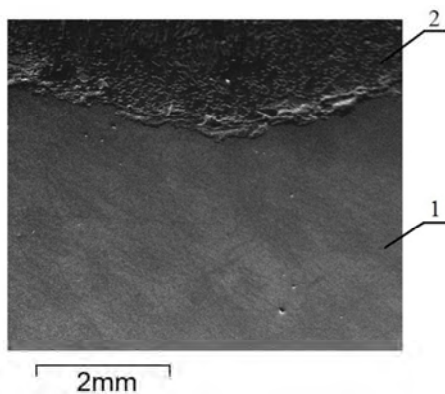
Таблица 4.3 – Химический состав покрытия, сформированного на поверхности из Ст 3 после ГАО составом рабочей жидкости [1] (с учетом Fe)

Спектр	C	Na	Mg	O	Al	Si	K	Ca	Fe
Спектр 1	10,67	0,10	1,48	13,87	2,29	7,55	0,41	0,48	63,25
Спектр 2	11,48	0,60	0,86	10,62	1,32	4,40	0,25	0,57	70,51
Спектр 3	8,57	0,30	0,81	9,37	1,40	4,24	0,24	0,61	74,77
Спектр 4	7,54	0,52	1,39	16,56	2,57	7,70	0,42	0,43	63,40
Спектр 5	4,62	0,40	0,69	7,13	0,91	3,54	0,23	0,45	82,44
Среднее	8,57	0,38	1,05	11,51	1,70	5,49	0,31	0,51	70,88

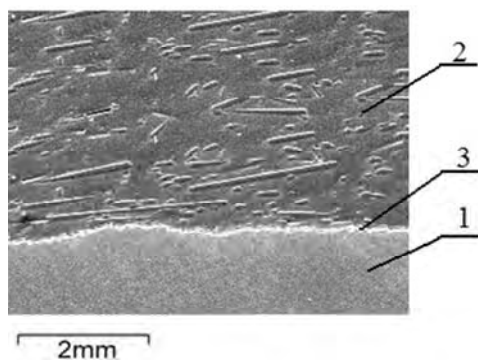
Из анализа полученных данных (таблица 4.2, 4.3) видно, что в состав пленочного покрытия входят те же элементы, которые составляют химическую основу компонентов рабочей жидкости (бентонитовая глина, кальцинированная сода, полиакриламид).

На рисунке 4.19 приведены фотографии поперечных шлифов образцов из Ст 3, обработанных: а) струей воды при $p_{вх} = 30$ МПа, $d_k = 1$ мм, $T = 20$ °С, $L = 50$ мм; б) струей рабочего раствора жидкости с концентрациями $K_6 = 3$ %, $K_{п} = 10^{-5}$ %, $K_{к.с} = 2$ %, остальное – вода, при $p_{вх} = 30$ МПа, $d_k = 1$ мм, $T = 20$ °С, $L = 50$ мм [1].

Из анализа представленных фотографий на рисунке 4.19 видно, что кроме позиций 1 (металлическая основа) и 2 (эпоксидная смола черного цвета) на рисунке 4.19, б видна позиция 3 волнистого белого цвета, которая характеризует пленочное покрытие на очищенной от продуктов коррозии поверхности при использовании состава рабочей жидкости [1].



а)



б)

Рисунок 4.19 – Фотографии поперечных шлифов после струйной обработки рабочей жидкостью различного состава:

а – 1– материал основы; 2 – эпоксидная смола;

б – 1– материал основы; 2 – эпоксидная смола; 3 – пленочное покрытие;

а – обработка струей воды, х20; б – ГАО, х20; материал основы – Ст3

Для определения толщины пленочного покрытия изготавливались поперечные шлифы. Фотография поперечного шлифа, использованная для определения толщины пленочного покрытия, представлена на рисунке 4.20.

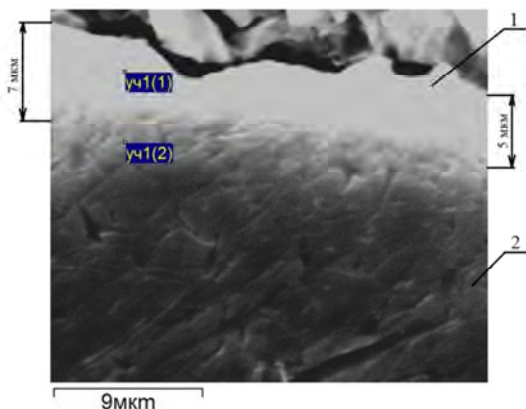


Рис. 4.20. Внешний вид поперечного шлифа, использованного для оценки толщины пленочного покрытия на поверхности образцов после ГАО:
1 – пленочное покрытие; 2 – основа образца
материал – Ст3, x5000

Измерение толщины пленочного покрытия 1 (участок 1(1) на рисунке 4.20), сформированного на поверхности материала основы 2 (участок 1(2) на рисунке 4.20), проводилось на инструментальном микроскопе МИМ-8. Из рассмотрения данных на фотографии (рисунке 4.20) видно, что после обработки составом [1] ($K_{\delta} = 3\%$, $K_{п} = 10^{-5}\%$, $K_{к.с} = 2\%$, остальное – вода) при $p_{вх} = 30$ МПа, $d_{к} = 1$ мм, $T = 20^{\circ}\text{C}$, $L = 50$ мм средняя толщина δ покрытия, сформированного на обработанной поверхности, составляет 5–7 мкм.

На рисунке 4.21 представлена зависимость изменения толщины пленочного покрытия от концентрации бентонита в растворе рабочей жидкости при различных величинах времени сушки t_c обработанных образцов.

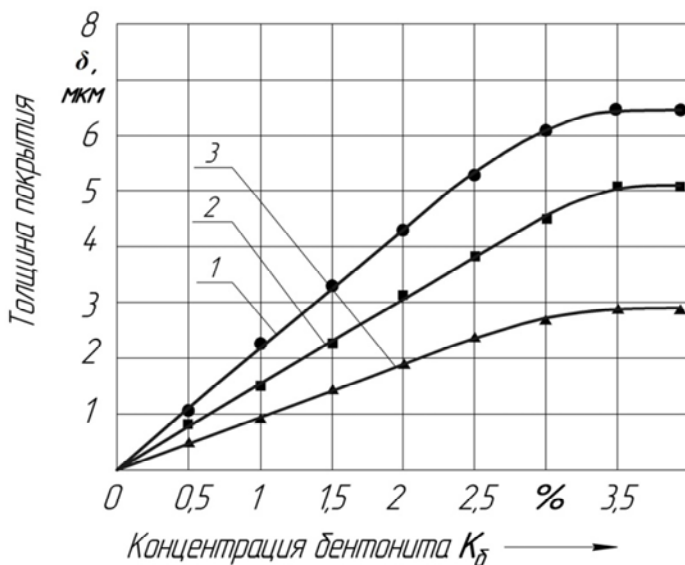


Рис. 4.21. Зависимость толщины пленочного покрытия δ от концентрации бентонита K_δ :

1, 2, 3 – время сушки обработанных образцов $t_c = 3, 12, 24$ ч соответственно $d_k = 1$ мм, $L = 30$ мм, $p_{вх} = 30$ МПа: $K_{п} = 10^{-3}$ %, $K_{к.с} = 2$ %, остальное – вода; Ст3

Установленную закономерность изменения кривых (см. рисунок 4.21) можно объяснить тем, что по мере высыхания пленочного покрытия происходит снижение в нем содержания воды, что сопровождается уменьшением его толщины практически в 2 раза.

Одним из основных параметров при исследовании пленочного покрытия является его адгезионная прочность (АП), определяемая в момент разрушения индентором (рисунок 4.22) по методике, приведенной в разделе 2.6.

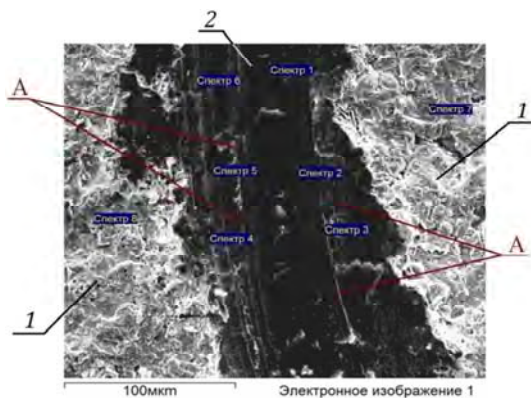


Рис. 4.22. Внешний вид защитного пленочного покрытия, разрушенного на очищенной поверхности стального образца после проведения испытаний на адгезионную прочность:

1 – участки поверхности образца с неразрушенным пленочным покрытием;

2 – вид участка поверхности образца после разрушения индентором пленочного покрытия;

материал – Ст 3, состав рабочей жидкости ($K_6 = 3\%$, $K_H = 10^{-5}\%$, $K_{K.C} = 2\%$, остальное – вода), $L = 50$ мм, $V_{стр} = 210$ м/с, $p_{вх} = 26$ МПа

Таблица 4.4 – Концентрация химических элементов на поверхностях царапины (спектры 1–6) и неповрежденной части пленочного покрытия (спектры 7–8)

№ спектра	C	Na	O	Mg	Al	Si	Fe
Спектр 1	4,49	0	2,51	0,00	0,00	0,00	93,00
Спектр 2	3,74	0	3,34	0,36	0,00	0,00	92,56
Спектр 3	4,66	0	2,61	0,00	0,00	0,00	92,73
Спектр 4	3,19	0	3,26	0,44	0,00	0,66	92,45
Спектр 5	4,10	0	3,64	0,00	0,31	0,58	91,38
Спектр 6	3,25	0	2,13	0,00	0,00	0,61	94,01
Спектр 7	5,18	0,3	4,91	0,69	1,38	0,47	87,07
Спектр 8	5,11	0,38	3,89	0,57	1,70	0,19	88,16

Химсостав пленочного покрытия в зоне разрушения его индентором (см. рисунок 4.22; спектры 1–6) и в неповрежденной части (см. рисунок 4.22; спектры 7, 8) представлен в таблице 4.4. Из анализа табличных данных видно, что в состав покрытия входят те же химические элементы, что и в состав бентонитовой глины. При этом примечательным является факт наличия в спектрах 7,8 элемента Na, входящего в состав рабочей жидкости, используемой для ГАО. И также следует быть отмеченным отсутствие элемента Na на поверхности царапины в спектрах (точках) 1, 6.

По формуле 3.6 при ширине царапины 105 мкм и критической нагрузке 0.5 Н адгезионная прочность пленочного покрытия составила 28 МПа. Рисунок 4.22 подтверждает наличие пленочного покрытия на участках 1 обработанной поверхности образца. Здесь же видны следы А, которые образовались при перемещении индентора в процессе разрушения пленочного покрытия на участке 2 поверхности образца.

На рисунке 4.23 представлены зависимости адгезионной прочности пленки от концентрации бентонита в растворе рабочей жидкости при различных значениях времени сушки t_c обработанных образцов.

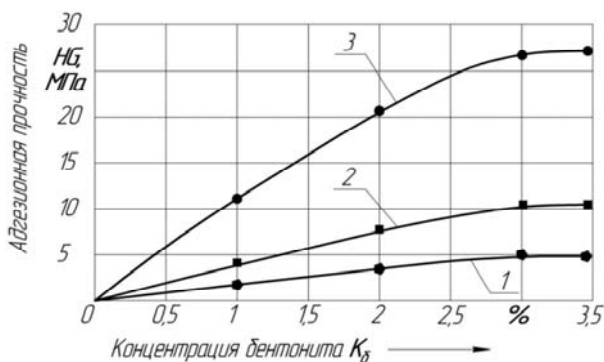


Рисунок 4.23 – Зависимость адгезионной прочности пленочного покрытия от концентрации бентонита K_b :

1 – $t_c = 3$ ч; 2 – $t_c = 12$ ч; 3 – $t_c = 24$ ч

$d_k = 1$ мм, $L = 30$ мм, $p_{вх} = 30$ МПа; $K_{п} = 10^{-5}$ %, $K_{к.с} = 2$ %, остальное – вода

Закономерность изменения кривых на рисунке 4.23 можно объяснить тем, что по мере увеличения времени высыхания обработанной поверхности происходит удаление воды, приводящее к усилению адгезионной прочности соединения пленочного покрытия с обработанной поверхностью и молекулярных связей внутри самого покрытия.

4.6 Результаты испытаний стальных образцов на коррозионную стойкость после струйной ГАО

Большинство изделий в машиностроении на завершающем этапе их изготовления покрывают эмалями, красками которые предохраняют их от действия коррозии и улучшают внешний вид. Изоляция металлической поверхности от воздействия окружающей среды достигается в том случае, когда покрытие обладает хорошей адгезией с защищаемой поверхностью, не имеет пор и по своей природе хорошо противостоит действию агрессивной среды [57].

Для установления влияния нанесенного лакокрасочного покрытия на коррозионную стойкость образцов, обработанных по технологии ГАО, были проведены испытания по методике, изложенной в разделе 2.8.

На рисунке 4.24 представлен стальной образец, который до испытаний был очищен от коррозии струей рабочей жидкости под давлением $p_{вх} = 30$ МПа с применением водного состава рабочей жидкости с концентрациями $K_6 = 3$ %, $K_{п} = 10^{-5}$ %, $K_{к.с} = 2$ %, остальное – вода. После проведения ГАО образец покрывался лакокрасочным покрытием МЛ-158 белого цвета и подвергался испытаниям на коррозионную стойкость в течение 30 минут в кипящем растворе 20 % NaCl при температуре $T_p = 100$ °С.

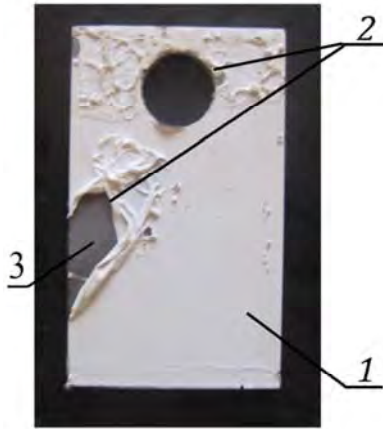


Рис. 4.24. Фотография образца после испытаний на коррозионную стойкость в кипящем растворе 20 % NaCl:

1 – вид неразрушенного лакокрасочного покрытия;

2 – вид разрушенного лакокрасочного покрытия;

3 – вид неразрушенного пленочного покрытия на основе бентонитовой глины с отсутствием очагов коррозии;

материал – сталь 08кп; режим ГАО: $K_G = 3\%$, $K_{II} = 10^{-5}\%$, $K_{K.C} = 2\%$,
остальное – вода, $p_{вх} = 30$ МПа, $d_k = 1$ мм, $L = 50$ мм

Визуальный контроль образца (см. рисунок 4.24) после испытаний на коррозионную стойкость показал, что защитная бентонитовая пленка, в отличие от лакокрасочного покрытия, в процессе 30-ти минутного кипячения в 20%-м растворе NaCl не разрушилась. Разрушение лакокрасочного покрытия на участках 2 образца (см. рисунок 4.24) можно объяснить тем, что его сцеплению с поверхностью препятствует защитная бентонитовая пленка 3, которая, как уже отмечалось выше, формируется после струйной очистки с использованием состава рабочей жидкости [1] (приложение В).

На рисунке 4.25 представлена зависимость площади разрушенной поверхности окраски G от времени кипения $t_{кип}$ стальных образцов, в растворах NaCl различной концентрации.

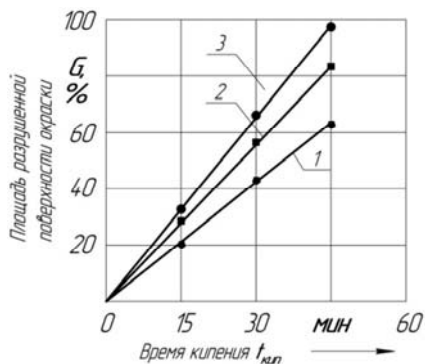


Рис. 4.25. Зависимость площади разрушенной поверхности G лакокрасочного покрытия от времени кипения образцов в растворах NaCl различной концентрации:

1 – 3 % раствор NaCl; 2 – 10 % раствор NaCl; 3 – 20 % раствор NaCl, $K_6 = 3 \%$, $K_{п.} = 10^{-5} \%$, $K_{к.с.} = 2 \%$, остальное – вода; $P_{вх} = 30$ МПа, $d_k = 1$ мм, $T = 20$ °С, $L = 50$ мм

Из рассмотрения данных, представленных на рисунке 4.25, видно, что площадь разрушенной поверхности G практически по линейному закону зависит от времени кипения в растворе NaCl, при этом, при увеличении концентрации раствора от 3–20%-м (примерно в 7 раз), площадь разрушенной поверхности G , при данном времени кипения $t_{кип}$, увеличивается в 2–2,5 раза.

Для проведения дальнейших исследований на коррозионную стойкость использовались две группы образцов в количестве по 10 штук каждая. При этом в первую группу вошли образцы (рисунок 4.26, а), для очистки которых в составе рабочей жидкости использовался бентонит с концентрацией $K_6 = 3 \%$. Для очистки образцов второй группы использовался речной песок с концентрацией $K_{р.п.} = 4 \%$. После очистки образцы были обезжирены с помощью растворителя Р-4 (ГОСТ 7827-74) и затем окрашены (рисунок 4.26).

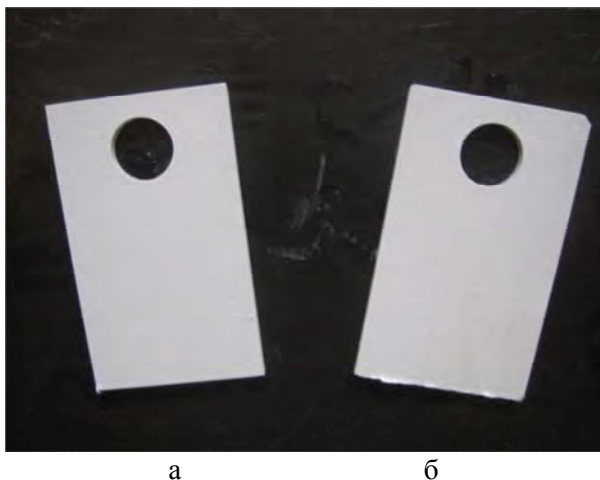


Рис. 4.26. Фотография образцов, прошедших струйную обработку и последующую покраску, перед испытаниями на коррозионную стойкость: а – вид образца после ГАО ($K_6 = 3\%$) [1] и последующей покраски; б – вид образца после струйной обработки составом рабочей жидкости на основе речного песка ($K_{р.п.} = 4\%$, остальное – вода) и последующей покраски; $p_{вх} = 30$ МПа, $d_k = 1$ мм, $L = 30$ мм, материал – сталь 08 кп

Фотография образцов после испытаний на коррозионную стойкость, которые осуществлялись путем кипячения образцов в 10%-м растворе NaCl, представлена на рисунке 4.27. Рассмотрение образца «а» (рисунок 4.27) показывает, что лакокрасочное покрытие после кипячения в 10%-м растворе NaCl практически не имеет очагов поражения. Отмеченный факт объясняется отсутствием защитной бентонитовой пленки, удаленной растворителем перед покраской, что обеспечило последующее эффективное прочное сцепление слоя краски с поверхностью металла.

Образец, очищенный от коррозии рабочей жидкостью на основе речного песка, после 25 минут кипячения в 10%-м растворе NaCl с последующей 15 минутной выдержкой в этом же растворе NaCl при комнатной температуре представлен на рисунке 4.27, б.

Кратеры, которые образовались на поверхности свидетельствуют о том, что частицы песка, состоящие в основном из оксидов крем-

ния SiO_2 , которые остались на очищенной поверхности во впадинах микронеровностей, служат концентраторами возникновения коррозии и подвергают деструкции лакокрасочное покрытие изнутри, так как коэффициент температурного расширения у Fe почти в 20 раз выше, чем у SiO_2 (приложение Г).



а

б

Рис. 4.27. Фотография образцов, обработанных после ГАО растворителем Р-4 и подвергнутых последующему испытанию на коррозионную стойкость: Время испытания на коррозионную стойкость образцов а и б в кипящем растворе NaCl (10 %) – 15 минут. Время выдержки в растворе NaCl после кипения – 15 минут; а – образец обработан рабочей жидкостью на основе бентонита ($K_6 = 3\%$); б – образец обработан рабочей жидкостью на основе речного песка ($K_{р.п.} = 4\%$).
Материал – сталь 08кп

На рисунке 4.28 представлены графики, отражающие зависимость площади разрушенной поверхности окраски от времени кипения образцов растворе NaCl различной концентрации.

Из рассмотрения данных на рисунке 4.28 видно, что струйная обработка с применением речного песка $K_{р.п.} = 4\%$ (кривые 1–3) сопровождается при испытаниях на коррозионную стойкость существенным разрушением окрашенной поверхности, достигающим значений 82–90 %, что можно объяснить, как уже отмечалось выше,

различными значениями коэффициента температурного расширения оксида кремния SiO_2 и железа.

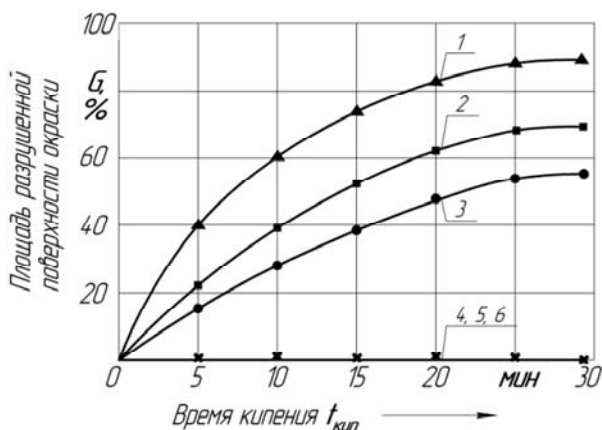


Рис. 4.28. Зависимость площади разрушенной поверхности окраски G от времени кипения образцов в растворе NaCl :
 1 – 20 % NaCl ; 2 – 10 % NaCl ; 3 – 5 % NaCl ; 4,5,6 – 20 % NaCl ;
 1 – 6 – $p_{\text{вх}} = 25$ МПа; 1, 2, 3 – $K_{\text{р.п.}} = 4$ %, остальное – вода; 4, 5, 6 – $K_6 = 3$ %, $K_{\text{п}} = 10^{-5}$ %, $K_{\text{к.с}} = 2$ %, остальное – вода; материал – сталь 08кп

Отсутствие разрушения окраски (кривые 4, 5, 6 совпадают с осью абсцисс), нанесенной на поверхность образца после ГАО с применением состава [1], можно объяснить отсутствием на обработанной поверхности, после очистки ее растворителем Р-4, оксидов кремния и железа, а также полным отсутствием защитной бентонитовой пленки, которая препятствует соединению слоя окраски с очищенной от продуктов коррозии поверхностью.

Весьма существенной характеристикой защитного покрытия является его коррозионная стойкость. Эксперименты, проведенные на образцах из стали Ст3, показали, что после 42 суток хранения в производственных условиях их матовая поверхность осталась без изменения и на ней (поверхности) практически не возникло ни единого участка, покрытого продуктами коррозии. Отмеченное обстоятельство приобретает значительную практическую ценность в усло-

виях судостроительно-судоремонтных предприятий, для которых характерно значительное время (2–3 месяца), затраченное, например, на строительство (ремонт) корпуса судна. При этом отпадает необходимость (за счет формирования защитного покрытия) в дополнительной очистке корпусных деталей судна от продуктов коррозии перед их покраской. При наличии защитной бентонитовой пленки достаточно обезжирить поверхность растворителем типа Р–4 и затем осуществить ее покраску по заводской технологии.

5 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СТРУЙНОЙ ОЧИСТКИ И ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СОСТАВЕ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ БЕНТОНитОВОЙ ГЛИНЫ

В данной главе на основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований приводятся данные по разработке новых наукоемких, ресурсосберегающих технологий гидроабразивной обработки поверхностей стальных изделий с использованием составов на основе бентонитовой глины. Разработанные технологии позволили модернизировать технологический процесс изготовления деталей ЦИКС.745422.057 кронштейн в производственных условиях ОАО «Агат – электромеханический завод» и, как следствие, получить повышение производительности труда на 10–20 %. Приводятся сведения о внедрении результатов работы на ОАО «Пинский ССРЗ» для очистки корпусных деталей судов, работающих в условиях интенсивного коррозионного воздействия.

5.1 Разработка технологии ГАО для подготовки стальных листов под лазерную резку на комплексе TRUMATIC

Современный этап развития машиностроения характеризуется применением на стадии заготовительного производства операций лазерной резки листового материала на высокотехнологичных комплексах типа TRUMATIC (рисунок 5.1).

Для процесса лазерной резки металлов можно выделить основные факторы, определяющие производительность и качественные показатели процесса. Среди них основными являются скорость лазерной резки $V_{\text{др}}$, светопоглолительная способность поверхности материала, отсутствие (наличие) грата на вырезанных деталях [82–85, 115–135].



Рис. 5.1. Внешний вид комплекса лазерной резки TRUMATIC:
 1 – задвижная крышка; 2 – панель управления; 3 – паллета;
 4 – устройство подачи листов

Для оценки влияния режимов ГАО на подготовку поверхности под лазерную резку на машиностроительном предприятии ОАО «Агат–электромеханический завод» были проведены производственные испытания по ЛР для четырех сравнительных групп стальных образцов из стали 08кп с линейными размерами 100x100 мм и толщиной $S = 1–20$ мм, покрытые продуктами коррозии с двух сторон. Предварительно образцы были очищены с одной стороны по различным технологиям.

Первую группу составили образцы, очистка которых производилась по новой разработанной технологии с применением запатентованных составов, содержащих в качестве основного компонента бентонитовую глину ($K_6 = 2–3$ %) [1]. Подача рабочей жидкости осуществлялась в конфузор новой конструкции с углом конусности $\alpha_{\text{опт}} = 45–50^\circ$ [14, 15], под давлением на входе $p_{\text{вх}} = 30$ МПа, $d_k = 1$ мм, $L = 50$ мм, $V_{\text{стр}} = 250$ м/с.

После очистки время сушки составляло 15–20 часов, что обеспечивало формирование на очищенной до $Ra = 0,25–0,5$ мкм поверхности защитного пленочного покрытия (ЗПП) толщиной $\delta = 3–5$ мкм. При обработке поверхности составом [1] отмечается низкий уровень упрочнения очищенной поверхности. Так, например, величина микротвердости $H_\mu = 2000–2400$ МПа превышает исходное значение $H_{\mu 0} = 1900–2000$ МПа всего лишь в 1,1–1,3 раза. Полученное незначительное упрочнение поверхности перед осуществ-

лением процесса ЛР в полной мере отвечает правилам эксплуатации лазерного комплекса TRUMATIC L2530, приведенным в работе [28].

Вторую группу для сравнительных испытаний составили образцы, очищенные по заводской технологии (дробеструйная очистка) до шероховатости $Ra = 0,25-0,5$ мкм и микротвердости $H_{\mu} = 3100-3200$ МПа.

Третью группу составили образцы, изготовленные из листового металла (сталь 08кп) в состоянии поставки ($Ra = 12-14$ мкм и микротвердость $H_{\mu 0} = 1900-2000$ МПа).

Четвертую группу составили образцы, не очищенные от коррозии с величиной $Ra = 70-80$ мкм и микротвердостью $H_{\mu 0} = 1900-2000$ МПа.

Указанные образцы разрезались на комплексе TRUMATIC L2530. Результаты резки образцов приведены на рисунке 5.2.

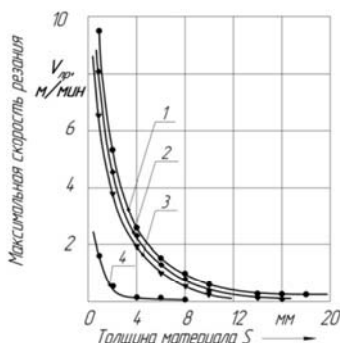


Рис. 5.2. Зависимость максимальной скорости лазерной резки от толщины материала:

- 1 – $Ra = 0,25 - 0,5$ мкм, образец после ГАО ($K_6 = 3\%$, $K_{11} = 10^{-5}\%$, $K_{к.с} = 2\%$, остальное – вода), $p_{вх} = 30$ МПа; $d_k = 1$ мм; $L = 50$ мм;
- 2 – материал в состоянии поставки, $Ra = 12-14$ мкм;
- 3 – дробеструйная обработка образца по заводской технологии, $Ra = 0,25 - 0,5$ мкм;
- 4 – отсутствие очистки образца от продуктов коррозии, 1–4 – сталь 08кп

Из анализа проведенных испытаний было установлено, что для исследованных образцов, в частности, с толщиной $S = 2$ мм отмечалось увеличение скорости лазерной резки с 0,4 м/мин (резка образца № 4), до 5,0 м/мин (резка образца № 1). Отмеченные скорости были получены из условия отсутствия грата на боковой поверхности реза.

При равной скорости резки (5,0 м/мин) на 1-ом образце грат отсутствует, в результате чего технологическая операция по зачистке грата нецелесообразна, а например на 4-ом образце длина грата составляет 2 мм.

При сопоставлении образцов первой и второй группы по такому параметру как скорость ЛР видно, что применение ГАО с рабочей жидкостью на основе бентонитовой глины для предварительной очистки поверхности обеспечивает, в конечном счете, повышение скорости ЛР в среднем на 10–20 %. Установленное увеличение скорости на первом образце можно объяснить снижением эффекта упрочнения поверхности после ГАО по сравнению, например, с заводской дробеструйной обработкой в 1,3–1,5 раза и наличием после ГАО на поверхности требуемой шероховатости $Ra = 0,2–0,4$ мкм, покрытой ЗПП, обеспечивающей за счет низкой отражательной способности усиление мощности светового излучения и, как результат, повышение скорости ЛР.

Следует быть отмеченным и то обстоятельство, что по результатам производственных испытаний была установлена более эффективная композиция компонентов в составе рабочей жидкости для осуществления процесса подготовки поверхности под ЛР. Указанная композиция компонентов, представленная в таблице 5.1, характеризуется патентной новизной [10], которая обеспечивается за счет включения в состав рабочей жидкости наночастиц (размер фракций частиц $\delta = 0,03–0,05$ мкм), канальной сажи (ГОСТ 7885-86) вместо полиакриламида. Эффективность указанной замены компонентов в составе рабочей жидкости иллюстрируют данные таблицы 5.1.

Таблица 5.1 – Новый состав рабочей жидкости для ГАО и значения скорости ЛР, полученные при его использовании [10]

Номер состава рабочей жидкости	Бентонит, %	Сажа (от общей массы раствора), %	Кальцинированная сода, %	Вода, %	Скорость ЛР, м/мин
1	0,5	4	0,1	Остальное	5,9
2	1	5	0,5	Остальное	5,8
3	1,5	8	1	Остальное	6,5
4	3	12,5	1,5	Остальное	7,0
5	5	13	2	Остальное	6,4

Из анализа данных таблицы 5.1 видно, что при прочих равных условиях за счет замены полиакриламида на канальную сажу с концентрацией, равной 5–12,5 %, скорость ЛР возрастает на 7–9 %. Отмеченное дополнительное повышение скорости обеспечивается, по нашему мнению, за счет дополнительного снижения отражательной способности поверхности, покрытой защитной пленкой, содержащей в своем составе наночастицы канальной сажи, указанной концентрации (5–12,5 %). Указанная концентрация канальной сажи в составе рабочей жидкости обеспечивает необходимое силовое воздействие на поверхность, аналогично воздействию полиакриламида, исключенного из состава рабочей жидкости, осуществляя при этом формирование защитного покрытия с более оптимальными светопоглощительными свойствами, при которых было отмечено повышение скорости ЛР.

Однако для более эффективного использования нового состава [10], предназначенного для подготовки поверхности под ЛР нужны более глубокие экспериментальные и теоретические исследования, которые позволят определить наиболее рациональные области его применения и оптимальные режимы ГАО, основанные на его использовании.

5.2 Рекомендации по подготовке под покраску корпусных деталей судна

В судостроении отмечается значительный рост потерь от коррозионных разрушений, что требует резкого улучшения мер противокоррозионной защиты. Результаты исследований, приведенных в диссертационной работе, показывают, что весьма эффективно для борьбы с коррозией в судостроении может быть использована технология ГАО, обеспечивающая наряду с очисткой формирование ЗПП с достаточно высокой адгезионной прочностью.

Использование полученных результатов для подготовки ряда корпусных деталей под покраску осуществлялось в ОАО «Пинский ССРЗ». В производственных условиях были очищены образцы, вырезанные с бортовой поверхности теплохода ПР730А на уровне ватерлинии, с линейными размерами 200 x 200 мм и толщиной $S = 4$ мм, с

последующим их использованием под покраску. Образцы были покрыты продуктами коррозии с двух сторон. Для проведения испытаний образцы были очищены по различным технологиям:

1-й образец был очищен по заводской технологии с помощью ручного механизированного инструмента (пневматическая машинка типа ИП-2203);

2-й образец был очищен при рабочем давлении $p_{вх} = 30$ МПа и расходе 13–17 л/мин по новой технологии составом рабочей жидкости [1], содержащим в качестве основного компонента бентонитовую глину ($K_6 = 2,0–3,0$ %). Обработка поверхности при этом сопровождалась формированием защитного покрытия $\delta = 5–7$ мкм на поверхности, очищенной до $Ra = 30–50$ мкм. Установка конфузоров с углом конусности $\alpha = 45–50^\circ$ производилась на фиксированном расстоянии $L = 50–100$ мм до обрабатываемой поверхности образца (материал Ст3).

Указанные образцы, очищенные по заводской и технологии ГАО испытывались в цеховых условиях с целью определения коррозионной стойкости при температуре воздуха $T = 15–25$ °С и относительной влажности $K = 58–81$ % на протяжении 42-х дней ремонта судна.

На образце №1 уже после первого дня пребывания в указанных цеховых условиях визуально были отмечены очаги поражения очищенной поверхности продуктами повторной коррозии. На момент окончания испытания, площадь поражения поверхности первого образца продуктами повторной коррозии составила 85 %. На образце №2 на момент окончания производственных испытаний продолжительностью 42 дня не было отмечено поражения очищенной поверхности продуктами коррозии, что объясняется наличием на этой поверхности ЗПП на основе бентонитовой глины, сформированного после ГАО.

Учитывая достигнутый эффект в части предотвращения повторной коррозии на ОАО «Пинский ССРЗ» для внедрения технологии ГАО была задействована струйная установка «KRANZLE quadro 1000TS» (ФРГ). На данной установке при использовании рабочих жидкостей [10, 16, 18] при рабочих давлениях $p_{вх} = 30$ МПа и расходе 13–17 л/мин были обработаны

детали № 570А – 31 – 197 фланец (10 шт.); № 570А – 31 – 212 шайба стопорная (50 шт.); № 570А – 31 – 191 кольцо (50 шт.); № 570А – 31 – 243 кожух (8 шт.); № 730А – 31 – 163 тяга датчика рулевого указателя (5 шт.); № 730А – 31 – 60 кница (80 шт.), входящие в номенклатуру корпуса судна.

За счет снижения трудоемкости обработки в 4–6 раз, устранения эффекта повторной коррозии, вызванного формированием ЗПП на очищенной поверхности, повышения производительности труда на 10–20 %, сокращения расхода лакокрасочных материалов на 15–20 %, экономический эффект от внедрения результатов НИР, составил 6,4 млн. руб. на 1 корпус судна в ценах на 28 сентября 2011 года. Для 10-ти корпусов судов, проходящих ремонт на заводе в течении года, экономический эффект составляет 64 млн. руб.

Приведенные выше технологические исследования послужили основой для создания конструктивной схемы опытной установки (рисунок 5.3), которая может быть использована на судостроительных предприятиях РБ для очистки и защиты корпусных поверхностей, предназначенных под покраску.

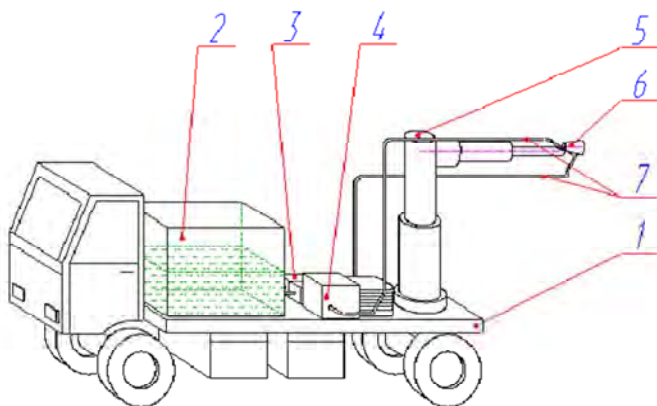


Рис. 5.3. Схема опытного образца установки для реализации технологии ГАО в условиях ОАО «Пинский ССРЗ»:

- 1 – платформа; 2 – бак с рабочей жидкостью; 3 – фильтрующий элемент; 4 – насос;
- 5 – гидроцилиндр; 6 – конфузор; 7 – нагнетающий и сливной контуры

Установка, представленная на рисунке 5.3, состоит из платформы 1, бака с рабочей жидкостью 2, фильтрующего элемента 3, насоса 4, гидроцилиндра 5, конфузора 6, нагнетательного и сливного контуров 7.

Установка закреплена на платформе 1, которая предназначена для транспортировки и крепления всех узлов и механизмов. Рабочая жидкость из бака 2 объемом 500 литров подается на обрабатываемую поверхность с помощью насоса 4 мощностью $N = 3$ кВт, соединенного с конфузуром 6 через нагнетательный контур 7. Отвод рабочей жидкости после взаимодействия ее с обрабатываемой поверхностью осуществляется через сливной контур 7. До поступления обратно в бак рабочая жидкость, которая уже включает в себя очищенный материал, проходит через фильтрующий элемент 3.

На предлагаемой схеме (см. рисунок 5.3) видно отсутствие пропеллерной мешалки, что стало возможным благодаря использованию бентонитовой глины, которая может находиться во взвешенном состоянии от нескольких часов до нескольких недель. За счет этого происходит экономия энергозатрат на поддержание рабочей жидкости во взвешенном состоянии, упрощение конструктивной схемы и снижение материалоемкости установки. Чертежи опытного образца установки переданы на ОАО «Пинский ССРЗ» для изготовления и последующей эксплуатации при ремонте и строительстве судов.

5.3 Оценка экономической эффективности от использования результатов разработанной технологии ГАО на ОАО «Агат–электромеханический завод»

Для оценки экономической эффективности проведенных исследований были проведены промышленные испытания деталей, обработанных с применением технологии ГАО на ОАО «Агат–электромеханический завод», г. Минск которые имели цель:

- подтвердить эффективность подготовки поверхностей под лазерную резку, под покраску, оценить стойкость антикоррозионного покрытия;
- отработать предлагаемую технологию в промышленных условиях;

– получить данные для технико-экономического обоснования процесса ГАО.

В настоящее время на ОАО «Агат–электромеханический завод» для очистки металлических поверхностей от продуктов коррозии и подготовки их под лазерную резку или лакокрасочные покрытия используется дробеструйная обработка. Для оценки экономической эффективности сопоставим две технологии (дробеструйная очистка и очистка по новой технологии на основе ГАО).

Технико-экономическая эффективность, как гидроабразивной обработки, так и дробеструйной зависит от ряда основных факторов: требуемого качества обработки, расхода абразива, производительности труда, стоимости ремонта оборудования [3, 4, 7, 9].

Технологическую эффективность от использования процесса ГАО рассмотрим на примере изготовления детали ЦИКС.745422.057 кронштейн (таблица 5.2) из номенклатуры ОАО «Агат–электромеханический завод» на лазерном комплексе TRUMATIC (рисунок 5.4).



Рис. 5.4. Фрагмент работы лазерного комплекса TRUMATIC по резке стального листа, обработанного по новой технологии струйной ГАО [10]:

1 – лист, очищенный от коррозии; 2 – вырезанные детали из номенклатуры завода

Таблица 5.2 – Базовый технологический процесс
имодернизированный технологический процесс с использованием
новой технологии ГАО

Номер операции	БАЗОВЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС	МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ГАО
010	КОМПЛЕКТОВАНИЕ (получить материал на заказ)	КОМПЛЕКТОВАНИЕ (получить материал на заказ)
015	ДРОБЕСТРУЙНАЯ ОЧИСТКА (очистка металлической поверхности от продуктов коррозии)	ГАО (очистка металлической поверхности от продуктов коррозии с одновременным покрытием очищенной поверхности защитно-поглощительной пленкой)
020	ПРОГРАММНАЯ (лазерная резка очищенной поверхности согласно эскизу и чертежу)	ПРОГРАММНАЯ (лазерная резка очищенной поверхности согласно эскизу и чертежу)
030	СЛЕСАРНАЯ (перемещение деталей на слесарный участок, зачистка грата, правка детали)	–
040	ГИБКА (гнуть деталь, выдерживая размеры чертежа)	ГИБКА (гнуть деталь, выдерживая размеры чертежа)
050	ОБЕЗЖИРИВАНИЕ (подготовить поверхность по инструкции ЦИКС 55273.00009)	ОБЕЗЖИРИВАНИЕ (подготовить поверхность по инструкции ЦИКС 55273.00009)
060	ПОЛУЧЕНИЕ ПОКРЫТИЙ ОРГАНИЧЕСКИХ (Покрыть грунтом, покрыть эмалью)	ПОЛУЧЕНИЕ ПОКРЫТИЙ ОРГАНИЧЕСКИХ (Покрыть грунтом, покрыть эмалью)
070	ПЕРЕМЕЩЕНИЕ (склад готовых деталей)	ПЕРЕМЕЩЕНИЕ (склад готовых деталей)

Из анализа таблицы 5.2 видно, что использование модернизированного техпроцесса (основанного на применении ГАО вместо дробеструйной очистки) приводит к исключению операции 030, связанной с зачисткой детали от грата. Отсутствие грата на поверхности детали с одновременным повышением скорости лазерной резки является следствием предварительной обработки детали ЦИКС.745422.057 кронштейн методом ГАО с применением состава [1]. Наряду с получением благоприятно ориентированного микро рельефа поверхности с $Ra = 0,2-0,4$ мкм, ГАО обеспечивает формирование пленочного покрытия, которые исключает рассеивание энергии лазерного луча и повышает скорость лазерной резки на 10–20 %.

Для оценки эффективности использования процесса ГАО, в условиях ОАО «Агат–электромеханический завод», на основании производственных испытаний был произведен расчет экономической эффективности изготовления детали ЦИКС.745422.057 кронштейн (рисунок 5.5).



Рис. 5.5. Кронштейн ЦИКС.745422.057, изготовленный с применением ГАО в условиях ОАО «Агат–электромеханический завод»

Экономический эффект от использования результатов исследований составил 222772,7 руб. за 1 смену лазерной резки серии деталей ЦИКС.745422.057 кронштейн на ОАО «Агат–электромеханический завод» в ценах на 15 июля 2011 года.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. 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; заявитель Белорус. нац. техн. ун-т. – № а 20081284; заявл. 14.10.2008; опубл. 30.06.2010 // Официальн. бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2010. – № 3. – С. 70.
2. Качанов, И.В. Установка для обработки металлических поверхностей кавитирующими водополимерными струями /И.В. Качанов, И.В. Карпенчук, В.К. Недбальский, А.В. Филипчик // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 2-й Международ. науч.-техн. конф.: в 2 т. / Бел. нац. техн. ун-т.; редкол.: Б.М. Хрусталев [и др.]. – Минск, 2004. – Т. 1. – С. 101–103.
3. Агасарян, Р.Р. Струйно-абразивная обработка металлов / Р.Р. Агасарян, Р.Т. Дохикян. – Ереван: АрмНИИНТИ, 1990. – 49 с.
4. Билик, Ш.М. Абразивно-жидкостная обработка металлов / Ш.М. Билик. – М.: Машгиз, 1960. – 198 с.
5. Филипчик, А.В. Новая технология очистки поверхности металла от коррозии /А.В. Филипчик // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 8-й Международ. науч.-техн. конф.: в 4 т. / Бел. нац. техн. ун-т.; редкол.: Б.М. Хрусталев [и др.]. – Минск, 2010. – Т. 2. – С. 131.
6. Филипчик, А.В. Технология гидроабразивного воздействия /А.В. Филипчик // Чрезвычайные ситуации: предупреждения и ликвидация: материалы 4-й Международ. науч.-техн. конф.: в 2 т. / МЧС Республики Беларусь. – Минск, 2011. – Т. 2. – С. 291–292.
7. Козлов, Ю.С. Очистка автомобилей при ремонте / Ю.С. Козлов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1981. – 151 с.
8. 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; заявитель Белорус. нац. техн. ун-т. – № а 20090681; заявл. 12.05.2009; опубл. 30.04.2011 // Официальн. бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2011. – № 2. – С. 70.

9. Проволоцкий, А.Е. Исследование процесса гидроабразивной обработки сложнопрофильных поверхностей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / А.Е. Проволоцкий; Одесский политехнический институт. – Одесса, 1975. – 24 с.

10. Состав для подготовки металлических поверхности под лазерную резку: пат. 17688 Респ. Беларусь., МКИ В 08В 3/04 / И.В. Качанов, А.В. Филипчик, А.С. Мойса, В.Н. Яглов, Я.В. Филипчик, В.В. Шаповалов; заявитель Белорус. гос. аграрн. техн. ун-т. – № а 20111188; заявл. 12.09.2011; опубл. 30.10.2013 // Официальн. бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2013. – № 5. – С. 80.

11. Качанов, И.В. Прогнозирование оптимальных кинематических и силовых параметров струйной очистки стальных поверхностей от коррозии / И.В. Качанов, А.В. Филипчик // Гидропневмосистемы мобильных и технологических машин: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 25-летию кафедры «Гидропневоавтоматика и гидропневопривод» БНТУ, Минск, 17-19 ноября 2010 г. / БНТУ. – Минск, 2010. – С. 94–100.

12. Качанов, И.В. Экспериментальный стенд для струйной обработки металлических поверхностей / И.В. Качанов, В.К. Недбальский, И.В. Карпенчук, А.В. Филипчик // Агропанорама. – 2005. – № 1. – С. 22–23.

13. 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.

14. Устройство для формирования многокомпонентной кавитирующей струи жидкости: пат. 6833 Респ. Беларусь, МКИ В 08В 3/02, МКИ В 08В 3/04, В 63В 59/00 / И.В. Качанов, В.В. Веремеенюк, А.С. Мойса, А.В. Филипчик; заявитель Белорус. гос. аграрн. техн. ун-т. – № и 20100406; заявл. 23.04.2010; опубл. 30.12.2010 // Официальн. бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2010. – № 6. – С. 159–160.

15. Устройство для формирования многокомпонентной кавитирующей струи жидкости: пат. 7969 Респ. Беларусь, МКИ В 08В 3/02, МКИ В 08В 3/04, В 63В 59/08 / И.В. Качанов, В.В. Веремеенюк, А.В. Филипчик, С.И. Ушев, А.А. Рубченя; заявитель Белорус. нац. техн. ун-т. – № и 20110544; заявл. 04.07.2011; опубл. 28.02.2012 //

Официальн. бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2011. – № 1. – С. 214.

16. Качанов, И.В. Применение струйной обработки под давлением более 15 МПа для подготовки стальных поверхностей под лазерную резку / И.В. Качанов, А.В. Филипчик // Современные проблемы гидропневмосистем машин: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 60-летию создания автотракторного факультета БНТУ, Минск, 24-28 октября 2011 г. / БНТУ. – Минск, 2011. – С. 28–34.

17. Филипчик, А.В. Новая технология струйной очистки и защиты стальных поверхностей от коррозии / А.В. Филипчик // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 9-й Междунар. науч.-техн. конф.: в 4 т. / Бел. нац. техн. ун-т.; редкол.: Б.М. Хрусталев [и др.]. – Минск, 2010. – Т. 2. – С. 150.

18. Филипчик, А.В. Подготовка стальных листов под лазерную резку на основе использования гидроабразивной обработки / А.В. Филипчик, А.А. Рубчя, С.И. Ушев // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 10-й Междунар. науч.-техн. конф.: в 4 т. / Бел. нац. техн. ун-т.; редкол.: Б.М. Хрусталев [и др.]. – Минск, 2012. – Т. 2. – С. 173.

19. Филипчик, А.В. Технично-экономическое обоснование для применения ГАО на некоторых промышленных предприятиях Республики Беларусь / А.В. Филипчик, С.И. Ушев, А.А. Рубчя // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 10-й Междунар. науч.-техн. конф.: в 4 т. / Бел. нац. техн. ун-т.; редкол.: Б.М. Хрусталев [и др.]. – Минск, 2012. – Т. 2. – С. 174.

20. Технология струйной гидроабразивной очистки от коррозии стальных листов, предназначенных под лазерную резку / И.В. Качанов, А.В. Филипчик, А.М. Шейко, А.А. Рубчя, С.И. Ушев // Наука и техника. – 2013. – № 2. – С. 7–14.

21. Акулович, Л.М. Ферроабразивный порошок для магнитно-абразивной обработки на основе аморфных металлических сплавов / Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев, В.Е. Бабич // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. – 2006. - №12. С. 89–92.

22. Ящерицын, П.И. Финишная магнитно-абразивная обработка деталей с коническими поверхностями. Часть 2 / П.И. Ящерицын,

А.П. Ракомсин, Л.Е. Сергеев, М.И. Сидоренко, В.Е. Бабич // «Инструментальный свет». – Киев, 2006. – № 4. – С. 8–10.

23. Ящерицын, П.И. Магнитно-абразивная обработка прядильных колец / П.И. Ящерицын, А.П. Ракомсин, Л.Е. Сергеев, М.И. Сидоренко, В.Е. Бабич // Технология машиностроения. – 2007. – № 1. – С. 19–21.

24. Лебедев, В.Я. Магнитно-абразивная обработка резцов проходческих комбайнов / В.Я. Лебедев, В.Е. Бабич // Материалы научно-технической конференции «Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении». – Киев, 2008. – С. 68–71.

25. Материал для магнитно-абразивной обработки: пат. 11082 Респ. Беларусь / Ракомсин А.П., Сидоренко М.И., Бабич В.Е., Сергеев Л.Е.; заявитель РУП «МАЗ» – № а 2006156, заявлено 27.10.2006; опубликовано 06.06.2008 // Официальн. бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2008. – № 4. – С. 174.

26. Лебедев, В.Я. Исследование стойкости резцов РКС после магнитно-абразивной обработки / В.Я. Лебедев, В.Е. Бабич, С.П. Адарич, С.П. Лобач // «Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин». Материалы VII Международной научно-технической конференции. Новополоцк: ПГУ. – 2009. – С. 249–251.

27. Устройство для очистки от коррозии плоской стальной поверхности: 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; заявитель Белорус. нац. техн. ун-т. – № а 20100719; заявл. 12.05.2010; опубл. 30. 10. 2012 // Официальн. бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2012. – № 5. – С. 60.

28. Bimberg, D. und vier Mitautoren: Materialbearbeitung mit Lasern, (Kontakt & Studium, Band 343), Expert Verlag, Ehningen bei Boblingen, 1991. – 384 p.

29. Памфилов, Е.А. Формирование качества поверхностей при лазерной обработке / Е.А. Памфилов, В.Д. Северин // Вестник машиностроения. – 1982. – № 4. – С. 46–48.

30. Искра, Е.В. Справочник по окраске судов и металлических конструкций / Е.В. Искра, Е.П. Куцевалова. – Л.: Судостроение, 1980. – 263 с.

31. Козырев, С.П. Гидроабразивный износ металлов при кавитации / С.П. Козырев. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение, 1971. – 240 с.
32. Спиридонов, Н.В. Система математического моделирования технологической оснастки для очистки отверстий малого диаметра в деталях элементов гидравлического привода / Н.В. Спиридонов, А.Г. Ясев. // Вестник БНТУ. – 2009. – № 5. – С. 44–49.
33. Исупов, М.Г. Прогнозирование съема металла при струйно – абразивной обработке / М.Г. Исупов // Вестник машиностроения. – 2005. – № 3. – С. 58–62.
34. Задачник по гидравлике / И.И. Куколевский [и др.]; под ред. И.И. Куколевского. – Л., М.: Госэнергоиздат., 1956. – 344 с.
35. Медведев, В.Ф. Гидравлика и гидравлические машины: учеб. пособие / В.Ф. Медведев. – Минск: Вышэйшая школа, 1998. – 310 с.
36. Вилькер, Д.С. Лабораторный практикум по гидромеханике / Д.С. Вилькер. – М.: Физматгиз, 1959. – 352 с.
37. Маковозов, М.И. Гидравлика и гидравлические машины: учеб. пособие / М.И. Маковозов. – М.: Машгиз, 1962. – 427 с.
38. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1975. – 559 с.
39. Бадах, В.Н. Особенности гидродинамики проточной части гидравлических струйных усилителей и их влияние на выходные характеристики: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.02.03 / В.Н. Бадах; Киевский институт инженеров гражданской авиации им. 60-летия СССР. – Киев, 1984. – 18с.
40. Расчет и проектирование устройств гидравлической струйной техники / В.П. Бочаров [и др.]. – Киев: Техника, 1987. – 125 с.
41. Качанов, И.В. Скоростное горячее выдавливание стержневых изделий / И.В. Качанов. – Минск: УП «Технопринт», 2002. – 327 с.
42. Качанов, И.В. Математическая модель расчета минимального давления разрушения поверхностного слоя коррозии от воздействия реверсивной струи рабочей жидкости / И.В. Качанов, В.В. Веременик, А.Н. Жук // Наука и техника. – 2014. – № 2. – С. 46–51.

43. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
44. Работнов, Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела: учеб. пособие / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1988. – 712 с.
45. Томленов А.Д. Теория пластического деформирования металлов / А.Д. Томленов. – М.: Металлургия, 1972. – 408 с.
46. Ивашечкин, В.В. Газоимпульсная технология восстановления пропускной способности фильтров водозаборных скважин / В.В. Ивашечкин. – Минск: БНТУ, 2005. – 268 с.
47. Специальные работы при бурении и оборудовании скважин на воду / Д.Н. Башкатов [и др.]. – М.: Недра, 1988. – 267 с.
48. Гаврилко, В.М. Фильтры буровых скважин / В.М. Гаврилко, В.С. Алексеев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1985. – 334 с.
49. Неверов, А.С. Коррозия и защита материалов: учеб. пособие / А.С. Неверов, Д.А. Родченко, М.И. Цырлин – Минск: Вышэйшая школа, – 2007. – 221 с.
50. Коррозия и защита материалов и изделий от коррозионного повреждения: учеб. пособие / В.А. Струк [и др.]. – Гродно: ГрГУ, 2005. – 193 с.
51. Русин, В.Н. Коррозия и защита металлов / В.Н. Русин. – М.: МГОУ, 1993. – 164 с.
52. Ржевская, С.В. Материаловедение / С.В. Ржевская. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Логос, 2006. – 420 с.
53. Моряков, О.С. Материаловедение / О.С. Моряков. – М.: Академия, 2008. – 238 с.
54. Uhlig, H.H. Corrosion Control – An Introduction to Corrosion Science and Engineering / H.H. Uhlig, R.W. Revie – New York.: John Wiley and sons, 1985. – 458 p.
55. Елисеев, Б.М. Коррозия и методы защиты химических машин и аппаратов: учеб. пособие / Б.М. Елисеев, В.Я. Кершенбаум. – М.: М-во хим. и нефт. машиностроения СССР, Ин-т повышения квалификации руководящих работников и специалистов, 1984. – 114 с.
56. Шлугер, М.А. Коррозия и защита металлов: учеб. пособие / М.А. Шлугер, Ф.Ф. Ажогин, Е.А. Ефимов. – М.: Металлургия, 1981. – 215 с.

57. Красноярский, В.В. Коррозия и защита металлов: учеб. пособие / В.В. Красноярский, Г.Я. Френкель, Р.П. Носов. – М.: Металлургия, 1969. – 301 с.
58. Бусел, А.В. Коррозия и несиловые факторы разрушения дорожно – строительных материалов. Способы защиты / А.В. Бусел, Н.П. Матвейко. – Минск: БНТУ, 2009. – 213 с.
59. Друцца, П.И. Коррозия и защита металлов в судостроении: учеб. пособие / П.И. Друцца, М.А. Настийчук, Ж.Ф. Соловьева. – Николаев: кораблестроит. ин-т им. адм. С.О. Макарова, 1974. – 54 с.
60. Фаличева, А.И. Коррозия металлов и противокоррозионная защита / А.И. Фаличева, Ю.М. Водянов. – Воронеж: Центр. Чернозем. кн. изд-во, 1981. – 111 с.
61. Кравцов, В.В. Коррозия конструкционных материалов и способы защиты / В.В. Кравцов. – Уфа: УНИ, 1982. – 80 с.
62. Афанасьев, П.С. Коррозия металлов и меры борьбы с ней / П.С. Афанасьев; под ред. А.Ф. Богоявленского. – Казань: Таткнигоиздат, 1959. – 83 с.
63. Помазан, О.К. Коррозия – враг металла: О вреде коррозии, ее видах, способах борьбы / О.К. Помазан, Ю.Н. Попов, В.В. Симонов. – Донецк: Донбас, 1983. – 126 с.
64. Розенфельд, И.Л. Атмосферная коррозия металлов / И.Л. Розенфельд. – М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1960. – 372 с.
65. Абрамсон, Д.С. Борьба с коррозией в вагоностроении / Д.С. Абрамсон. – М.: ГосИНТИ, 1959. – 67 с.
66. Бару, Р.Л. Борьба с коррозией – важная народнохозяйственная задача / Р.Л. Бару. – М.: о-во «Знание» РСФСР, 1978. – 40 с.
67. Защита от коррозии конструкций и оборудования металлургических цехов / В.П. Фишман [и др.]. – Киев: Техника, 1983. – 216 с.
68. Защита от коррозии оборудования предприятий агропромышленного комплекса / Л.Г. Ворошнин [и др.]; под общ. ред. Л.Г. Ворошнина – Кишинев: Штиинца, 1992. – 236 с.
69. Севернев, М.М. Защита от коррозии при хранении сельскохозяйственных машин, работающих в агрессивных средах / М.М. Севернев [и др.]. – Мн.: Урожай, 1979. – 39 с.

70. Матошко, И.В. Защита от коррозии сельскохозяйственных машин и оборудования / И.В. Матошко. – Минск: БелНИИТИ и техн–экон. исслед. Госплана БССР, 1984. – 48 с.

71. Защита от коррозии сельскохозяйственного оборудования / И.В. Селиванова [и др.]. – М.: Гос. Ком. СССР по науке и технике, Всесоюз. науч.-техн. информ. центр, 1985. – 146 с.

72. Гуляев, А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1986. – 541 с.

73. Чумаченко, Ю.Т. Материаловедение и слесарное дело: учеб. пособие / Ю.Т. Чумаченко. – 5-е изд. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2010. – 395 с.

74. Колесник, П.А. Материаловедение на автомобильном транспорте / П.А. Колесник, В.С. Кланица. – 5-е изд., испр. – М.: Академия, 2012. – 317 с.

75. Материаловедение и технология конструкционных материалов / В.Б. Арзамасов [и др.]; под общ. ред. В.Б. Арзамасова, А.А. Черепахина. – 3-е изд. – М.: Академия, 2011. – 446 с.

76. Технология машиностроения: учеб. пособие / М.Ф. Пашкевич [и др.]; под общ. ред. М.Ф. Пашкевича. – Минск: Новое знание, 2008. – 477 с.

77. Мосталыгин, Г.П. Технология машиностроения / Г.П. Мосталыгин, Н.Н. Толмачевский. – М.: Машиностроение, 1990. – 287 с.

78. Лахтин, Ю.М. Материаловедение / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Эколит, 2011. – 527 с.

79. Чумаченко, Ю.Т. Материаловедение для автомехаников / Ю.Т. Чумаченко, Г.В. Чумаченко, А.И. Герасименко; под ред. А.С. Трофименко. – 5-е изд. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2008. – 479 с.

80. Вишневецкий Ю.Т. Материаловедение для автослесарей / Ю.Т. Вишневецкий. – 2-е изд. – М.: Дашков и К, 2009. – 411 с.

81. Широкий, Г.Т. Материаловедение в санитарно-технических системах: учеб. пособие / Г.Т. Широкий, П.И. Юхневский, М.Г. Бортницкая. – Минск: Вышэйшая школа, 2009. – 301 с.

82. Ярошевич, В.К. Технология производства и ремонта автомобилей / В.К. Ярошевич, А.С. Савич, В.П. Иванов. – Мн.: «Адукацыя і выхаванне», 2011. – 591 с.

83. Григорьянц, А.Г. Основы лазерной обработки материалов / А.Г. Григорьянц. – М.: Машиностроение, 1989. – 300 с.
84. Григорьянц, А.Г. Лазерная резка металлов / А.Г. Григорьянц, А.А. Соколов. – Минск: Вышэйшая школа, 1988. – 126 с.
85. Рыкалин, Н.Н. Лазерная обработка материалов / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, А.Н. Кокора. – М.: Машиностроение, 1975. – 296 с.
86. Верезуб, В.Н. Шлифование абразивными лентами / В.Н. Верезуб. – М.: Машиностроение, 1972. – 104 с.
87. Лурье, Г.Б. Шлифование абразивными лентами: учеб. пособие / Г.Б. Лурье. – Минск: Вышэйшая школа, 1980. – 47 с.
88. Способ создания кавитирующей струи жидкости: пат. 2155104 Российская Федерация, МКИ 7 В 08 В 3/02, 3/04, В 63 В 59/08 / А.И. Харламов, П.А. Стунжас, Р.И. Гуськина; заявитель Институт океанологии им. П.П. Ширшова. – № а 99106091/28; заявл. 25.03.1999; опубл. 27.08.2000 // бюл. № 24.
89. Способ создания кавитирующей струи жидкости: пат. 2155105 Российская Федерация, МКИ 7 В 08 В 3/02, 3/04, В 63 В 59/08 / А.И. Харламов, П.А. Стунжас, А.Я. Кондрашов, А.В. Фомин; заявитель Институт океанологии им. П.П. Ширшова. – № а 99106092/28; заявл. 25.03.1999; опубл. 27.08.2000 // бюл. № 24.
90. Омелянюк, М.В. Разработка технологии гидродинамической кавитационной очистки труб от отложений при ремонте скважин: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.02.13 / М.В. Омелянюк; Кубанский государственный технологический университет. – Краснодар, 2004. – 23 с.
91. Технология литейного производства / Г.С. Саначева [и др.]. – Красноярск: СФУ, 2008. – 86 с.
92. Технология литейного производства / А.П. Трухов [и др.]; под ред. А.П. Трухова. – М.: Академия, 2005. – 523 с.
93. Мерабишвили, М.С. Бентонитовые глины: Состав, свойства, исслед., пр-во, использ. / М.С. Мерабишвили. – 2-е изд. – Тбилиси: Мецниереба, 1979. – 308 с.
94. Мерабишвили, М.С. Бентонитовые глины: Природные особенности, физико-химические свойства, области применения, основные месторождения СССР / М.С. Мерабишвили. – М.: Госгеолтехиздат, 1962. – 128 с.

95. Пичхадзе, Ш.В. Применение бентонитовых глин при приготовлении печатных красок / Ш.В. Пичхадзе, С.М. Сошина, М.С. Мерабишвили. – М.: Центр. науч.-исслед. ин-т информации и техн.-экон. исследований легкой пром-сти, 1971. – 30 с.

96. Формовочные материалы и смеси / С.П. Дорошенко [и др.] – Киев: Вища школа, 1990. – 415 с.

97. Калашникова, А.Я. Формовочные материалы и смеси для прогрессивных технологических процессов изготовления форм и стержней / А.Я. Калашникова, Г.П. Галкин. – М.: НИИмаш, 1976. – 60 с.

98. Сварика, А.А. Формовочные материалы и смеси / А.А. Сварика. – Киев: Техника, 1983. – 144 с.

99. Степанов, Ю.А. Формовочные материалы: учеб. пособие / Ю.А. Степанов, В.И. Семенов; под ред. Г.Ф. Баландина. – М.: Машиностроение, 1969. – 157 с.

100. Титов, Н.Д. Технология литейного производства / Н.Д. Титов, Ю.А. Степанов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – 400 с.

101. Литейные формовочные материалы / А.Н. Болдин [и др.]. – М.: Машиностроение, 2006. – 506 с.

102. Разумова, М.С. Формовочные материалы и смеси / М.С. Разумова. – Свердловск; М.: Машгиз, 1962. – 48 с.

103. Нилов, В.И. Бентониты в виноделии / В.И. Нилов, Л.У. Ниязбекова, Г.Г. Еременко. – Киев: Ин-т техн. информации, 1965. – 34 с.

104. Туманский, А.Л. Формовочные глины / А.Л. Туманский. – М.: Машгиз, 1957. – 150 с.

105. Сосненко, М.Н. Приготовление формовочных и стержневых смесей: учебное пособие / М.Н. Сосненко. – Минск: Вышэйшая школа, 1972. – 255 с.

106. Исследование глин и новые рецептуры глинистых растворов / В.Д. Городнов [и др.]. – М.: Недра, 1975. – 271 с.

107. Бречко, А.А. Формовочные и стержневые смеси с заданными свойствами / А.А. Бречко, Г.Ф. Великанов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1982. – 216 с.

108. Боровский, Ю.Ф. Формовочные и стержневые смеси / Ю.Ф. Боровский, М.И. Шацких; под ред. А.М. Липницкого. – Л.: Машиностроение; Ленингр. отд-ние, 1980. – 86 с.
109. Гуляев, Б.Б. Формовочные процессы / Б.Б. Гуляев, О.А. Корнюшкин, А.В. Кузин. – Л.: Машиностроение; Ленингр. отд-ние, 1987. – 262 с.
110. Баландин, Г.Ф. Физико-химические основы литейного производства / Г.Ф. Баландин, В.А. Васильев; под ред. Г.Ф. Баландина. – М.: Машиностроение, 1971. – 223 с.
111. Технология судостроения / В.Л. Александров [и др.]; под общ. ред. А.Д. Гармашева. – СПб.: Профессия, 2003. – 341 с.
112. Гидрорезание судостроительных материалов / Р.А. Тихомиров [и др.]. – Л.: Судостроение, 1987. – 163 с.
113. Тихомиров, Р.А. Гидрорезание неметаллических материалов / Р.А. Тихомиров, В.С. Гуенко. – Киев: Техника, 1984. – 150 с.
114. Гидрокавитационный генератор: пат. 2034640 Российская Федерация, МКИ 6 В 01 F 5/00 / О.Н. Крысанов; заявитель акционерное общество закрытого типа «Нортэкс». – № а 92011206/26; заявл. 11.12.1992; опубл. 10.05.1995 // бюл. № 13.
115. Pearsall, I.S. Cavitation / I.S. Pearsall. – London.: Mills and Boon Limited, 1972. – 80 p.
116. Knapp, R.T. Cavitation / R.T. Knapp, J.W. Daily, F.G. Hammitt. – New York.: McGraw Hill Book Company, 1970. – 578 p.
117. Machining double. Amer. Mach. – 2008. – Vol. 152, no 5. – P. 76.
118. AGTOS – Muldenband – Strahlanlagen für den flexiblen Einsatz. Werkst. Fertig. – 2007 – no 3. – P. 14.
119. Digital readout and seale. MAN: Mod. Appl. News. – 2008. – Vol. 42, № 3. – P. 32.
120. NASCAR team intensifies waterjet cutting. Amer. Mach. – 2009. – Vol. 153, no 1. – P. 53.
121. Waterjet reduces setup time. Mod. Mach. Shop. – 2010. – Vol. 82, no 10. – P. 126.
122. Савицкая, М.Н. Полиакриламид / М.Н. Савицкая, Ю.Д. Холодова. – Киев: Техника, 1969. – 187 с.
123. Кельцев, В.В. Сажа: Свойства, производство и применение / В.В. Кельцев, П.А. Теснер. – Л., М.: Гостоптехиздат, 1952. – 172 с.

124. Печковская, К.А. Сажа как усилитель каучука / К.А. Печковская. – М.: Химия, 1968. – 215 с.

125. Желтовский, Б.Ю. Исследования и испытания гидропневмосистем машин: учеб. пособие / Б.Ю. Желтовский, М.Г. Халамонский, В.С. Шевченко. – Мн.: Технопринт, 2004. – 203 с.

126. Альтшуль, А.Д. Гидравлика и аэродинамика / А.Д. Альтшуль, Л.С. Животовский, Л.П. Иванов. – М.: Стройиздат, 1987. – 413 с.

127. Гидравлика, гидравлические машины и гидравлические приводы / Т.М. Башта [и др.]; под ред. Т.М. Башты. – М.: Машиностроение, 1970. – 504 с.

128. Чугаев, Р.Р. Гидравлика / Р.Р. Чугаев. – 4-е изд., доп. и перераб. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 672 с.

129. Лабораторный практикум по гидравлике, гидромашинам и гидроприводу: учеб. пособие / Я.М. Вильнер [и др.]; под ред. Я.М. Вильнера. – 3-е изд., перераб. и доп. – Минск: Вышэйшая школа, 1980. – 224 с.

130. Френкель, Н.З. Гидравлика / Н.З. Френкель. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л., М.: Госэнергоиздат, 1956. – 456 с.

131. Котоусов, Л.С. Исследование скорости водяных струй на выходе сопел с различной геометрией / Л.С.Котоусов // Журнал технической физики. – 2005. – Т. 75. – № 9. – С. 8–14.

132. Меркулов, В.Н. Опыт применения лазерной обработки металлов на промышленных предприятиях / В.Н. Меркулов. – Киев: УкрНИИНТИ, 1983. – 68 с.

133. Крылов, К.И. Применение лазеров в машиностроении и приборостроении / К.И. Крылов, В.Т. Прокопенко, А.С. Митрофанов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1978. – 335 с.

134. Проворов, А.С. Применение лазеров в науке, технике и технологии: учеб. пособие / А.С. Проворов, А.Г. Сизых, А.В. Сорокин. – Красноярск: Краснояр. гос. ун – т, 1988. – 84 с.

135. Коваленко, В.С. Применение лазеров в машиностроении / В.С. Коваленко, В.П. Котляров, В.П. Дятел. – Киев, 1988. – 160 с.

136. Качанов, И.В. К вопросу определения геометрических параметров струйного аппарата для гидроабразивной очистки корпусов судов от коррозии / И.В. Качанов, В.Н. Яглов, В.Ф. Клищевский, А.В. Филипчик, А.Н. Жук, А.Н. Щерба // Наука – образова-

нию, производству, экономике: материалы 5-й Междунар. науч.-техн. конф.: в 2 томах. / Бел. нац. тех. ун-т; редкол.: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2007. – Т. 1. – С. 343–347.

137. Способ определения предела прочности металла: пат. 11520 Респ. Беларусь, МПК G 01N 3/30/ И.В. Качанов, Л.А. Исаевич, В.Н. Ковалевский, В.Н. Шарий, А.Н. Жук, заявитель Белорус. нац. техн. ун-т. – № а 20061194; заявл. 28.11.2006; опубл. 28. 02. 2009 // Официальн. бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2009. – №.5 – С. 173.

138. Устройство для отбора осветленной гидросмеси на земснаряде: пат. 14172 Респ. Беларусь, МПК E 02F 3/88/ И.В. Качанов, Г.В. Песцов, А.Н. Чернобылец, А.Н. Жук, заявитель Белорус. нац. техн. ун-т. – № а 20081686; заявл. 24.12.2008; опубл. 30. 04. 2011 // Официальн. бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2011. – № 2 – С. 172.

139. Устройство для очистки от коррозии плоской стальной поверхности: пат. 19543 Респ. Беларусь, МПК B63B 59/08/ И.В. Качанов, А.Н. Жук, И.М. Шаталов, В.Н. Шарий, С.И. Ушев, А.А. Рубчeня; заявитель Белорус. нац. техн. ун-т. – № а 20120857; заявл. 31.05.2012; опубл. 30. 10. 2015 // Официальн. бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2015. – № 5. – С. 55.

140. Качанов, И.В. Экспериментальные исследования по определению силы давления струи рабочей жидкости на плоские поверхности заготовок-препятствий различной формы / И.В. Качанов, А.Н. Жук // Наука и техника. – 2015. – № 3. – С. 30–35.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Влияние концентрации Na_2CO_3 в составе рабочей жидкости на коррозионную стойкость очищенных образцов

На рисунке А1 представлена фотография образцов, которые прошли испытания на коррозионную стойкость от воздействия атмосферной коррозии при температуре $T = 20^\circ\text{C}$ и относительной влажности $K = 60\%$ в условиях ОАО «Агат–электромеханический завод». Перед коррозионными испытаниями поверхность образцов очищалась струей рабочей жидкости, не содержащей в своем составе Na_2CO_3 .

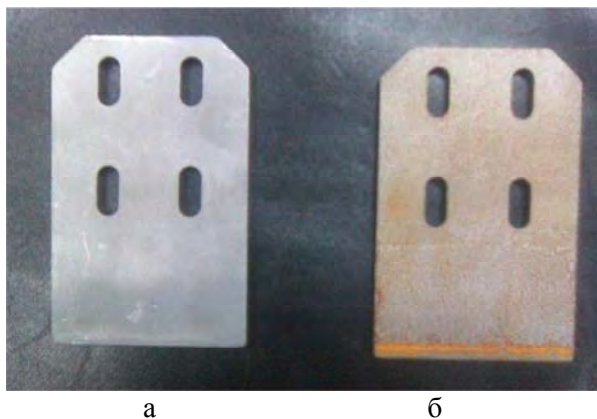


Рис. А1. Фотография образцов, прошедших ГАО и последующее испытание на коррозионную стойкость от воздействия повторной атмосферной коррозии в условиях ОАО «Агат–электромеханический завод»:

- а – вид очищенной металлической поверхности через 30 с после струйной ГАО при концентрации Na_2CO_3 в составе рабочей жидкости $K_{\text{к.с.}} = 0\%$;
 - б – вид очищенной металлической поверхности через 10 ч после струйной ГАО при концентрации Na_2CO_3 в составе рабочей жидкости $K_{\text{к.с.}} = 0\%$;
- материал – сталь 08кп, $p_{\text{ex}} = 25$ МПа, $L = 25$ мм, $K_{\sigma} = 2\%$, $K_n = 10^{-5}\%$,
остальное – вода; температура воздуха $T = 20^\circ\text{C}$ и относительная влажность воздуха $K = 60\%$

Как видно из рисунка А1 степень поражения обработанной металлической поверхности G составляет 95 % через 10 часов после ГАО.

На рисунке А2 представлена фотография внешнего вида очищенной поверхности образца, обработанного по технологии ГАО с концентрацией 0,5 % Na_2CO_3 в составе рабочей жидкости, и подвергнутого затем воздействию атмосферной коррозии при температуре воздуха $T = 20^\circ\text{C}$ и относительной влажности $K = 60\%$.

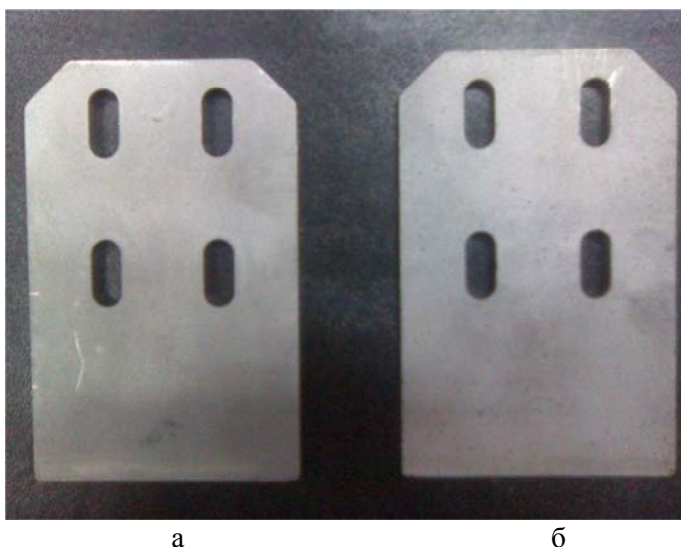


Рис. А2. Фотография образцов, прошедших после ГАО с применением 0,5 % Na_2CO_3 испытания на коррозионную стойкость от воздействия атмосферной коррозии в условиях ОАО «Агат–электромеханический завод»:
а – вид очищенной металлической поверхности через 30 с после обработки при концентрации Na_2CO_3 в рабочем растворе $K_{\text{к.с.}} = 0,5\%$;
б – вид очищенной металлической поверхности через 72 ч после ГАО с концентрацией Na_2CO_3 в рабочем растворе $K_{\text{к.с.}} = 0,5\%$, материал – сталь 08кп, $p_{\text{ex}} = 25$ МПа, $L = 25$ мм, $K_6 = 2\%$, $K_n = 10^{-5}\%$, остальное – вода; температура воздуха $T = 20^\circ\text{C}$ и относительная влажность воздуха $K = 60\%$

Как видно из рисунка А2 степень поражения обработанной металлической поверхности G продуктами атмосферной коррозии составляет 2–3 % через 72 часа после обработки.

На рисунке А3 представлена фотография внешнего вида образцов, обработанных по технологии ГАО с концентрацией 2 % Na_2CO_3 в составе рабочей жидкости и подвергнутых воздействию атмосферной коррозии в условиях ОАО «Агат–электромеханический завод».

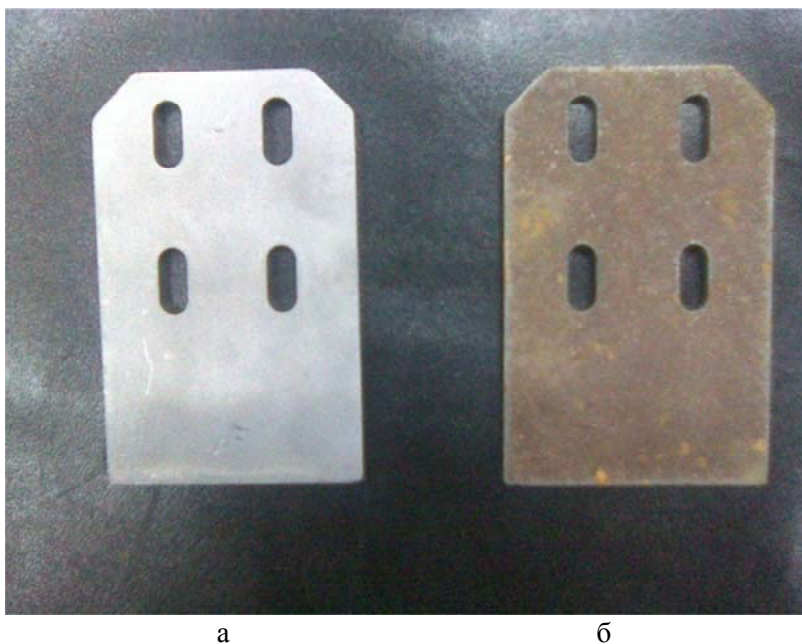


Рис. А3. Внешний вид образцов, использованных для проведения испытания на коррозионную стойкость от воздействия атмосферной коррозии:

- а – вид очищенной металлической поверхности через 180 ч после ГАО при концентрации Na_2CO_3 в рабочем растворе $K_{\text{к.с.}} = 2 \%$;
- б – вид неочищенной поверхности образца материал – сталь 08кп, $p_{\text{ex}} = 25$ МПа, $L = 25$ мм, $K_6 = 2\%$, $K_n = 10^{-5}\%$, остальное – вода

Как видно из рассмотрения фотографии внешнего вида образца, представленного на рисунке А3, степень поражения коррозией об-

работанной поверхности G составляет 0 % через 180 часов после ГАО с применением 2 % Na_2CO_3 в составе рабочей жидкости.

На рисунке А4 представлена фотография внешнего вида образца, обработанного по технологии ГАО с концентрацией 3% Na_2CO_3 в составе рабочей жидкости и подвергнутого воздействию атмосферной коррозии в условиях ОАО «Агат – электромеханический завод».



Рисунок А4 – Фотография образца, прошедшего после ГАО с применением 3 % Na_2CO_3 испытания на коррозионную стойкость от воздействия атмосферной коррозии ($T = 20^0 \text{ C}$ и $K = 60 \%$) в условиях ОАО «Агат – электромеханический завод»

Очищенная металлическая поверхность через 180 ч после обработки при концентрации Na_2CO_3 в рабочем растворе $K_{\text{к.с.}} = 3 \%$;
материал – сталь 08кп, $p_{\text{ex}} = 25 \text{ МПа}$, $L = 25 \text{ мм}$, $K_{\sigma} = 2\%$, $K_n = 10^{-5}\%$, остальное вода

Как видно из рассмотрения фотографии на рисунке 4 степень поразения обработанной металлической поверхности G составляет 0 %

через 180 ч после обработки, при концентрации Na_2CO_3 $K_{\text{к.с.}} = 3$ % в составе рабочей жидкости.

Из рассмотрения фотографий образцов на рисунках 1–4, характеризующих стойкость очищенной поверхности по отношению к процессам повторной коррозии видно, что оптимальная концентрация компонента Na_2CO_3 в составе рабочей жидкости вполне обоснованно была принята в диапазоне значений $K_{\text{к.с.}} = 0,5\text{--}2$ %, который характеризуется патентной новизной [1, 10].

Внешний вид покрытия на очищенной поверхности образца при обработке его составом рабочей жидкости, содержащим бентонитовую глину [1]

На рисунке Б1 представлены фотографии защитного пленочного покрытия, сформированного на очищенной поверхности образца при обработке составом, содержащим бентонитовую глину [1].

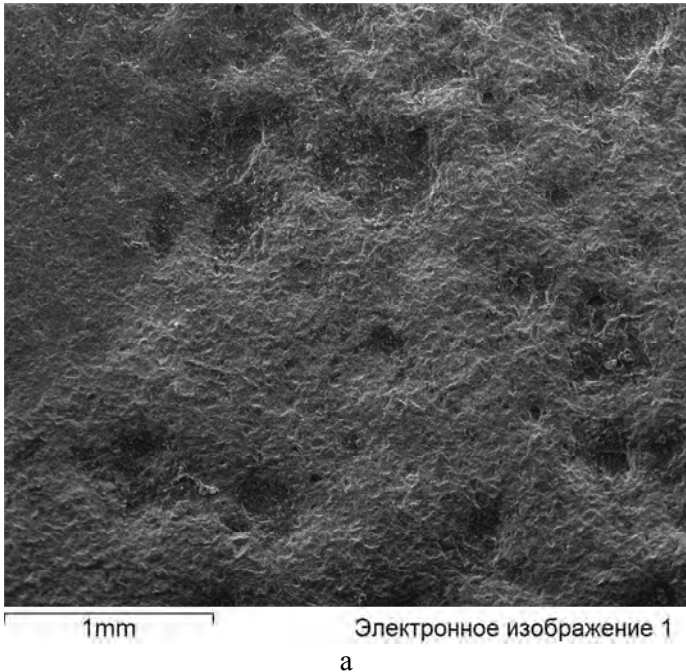
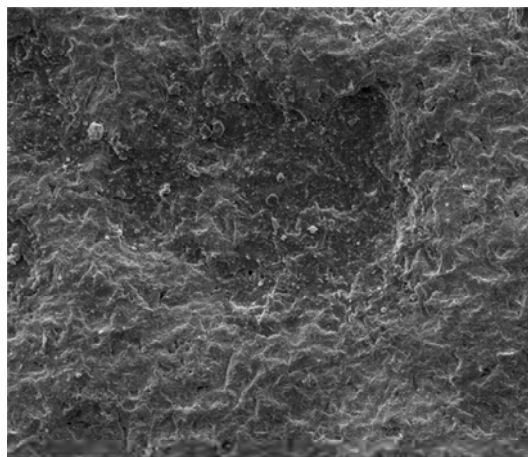


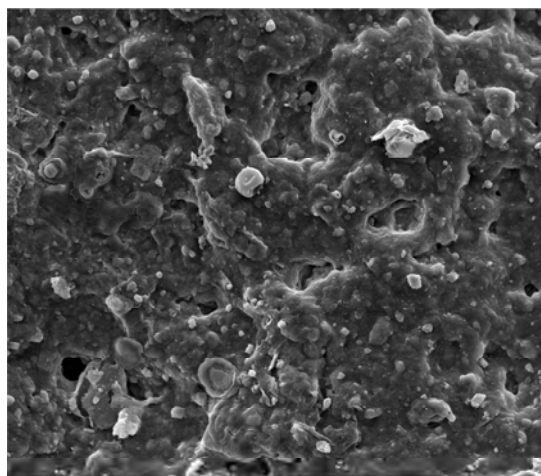
Рис. Б1. Фотографии покрытия, сформированного на очищенной поверхности при обработке ее составом рабочей жидкости на основе бентонитовой глины [1]: а – х40; б – х125; в – х500; г – х1000; д – х5000; е – х500; ж – х1000; з – х5000; материал – сталь 08кп, $p_{ex} = 25$ МПа, $L = 25$ мм, $K_G = 3\%$, $K_n = 10^{-5}\%$, остальное – вода



400мкм

Электронное изображение 1

б

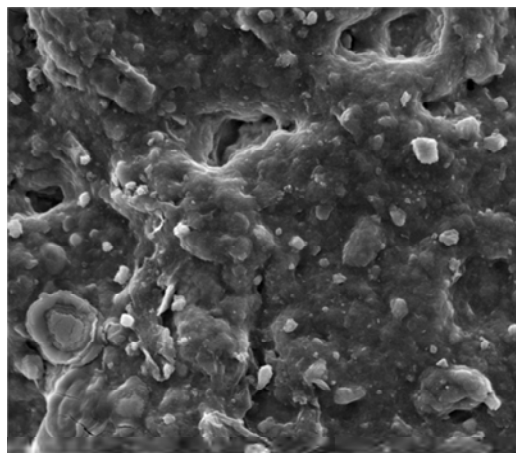


90мкм

Электронное изображение 1

в

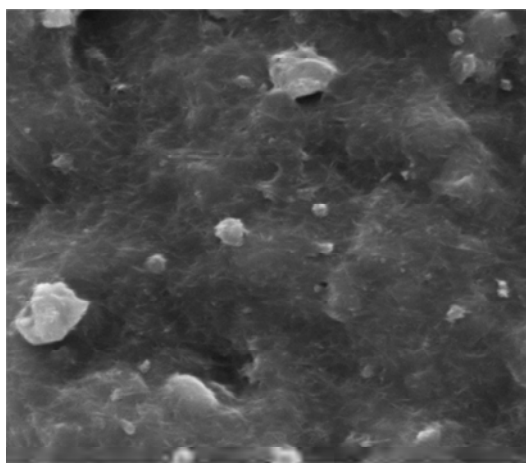
Рис. Б1 (продолжение)



40мкм

Электронное изображение 1

Г

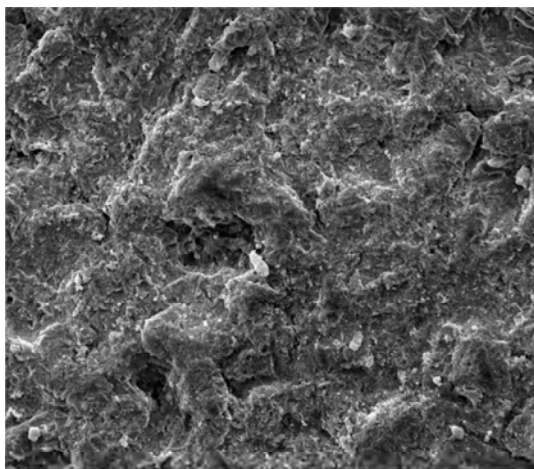


9мкм

Электронное изображение 1

Д

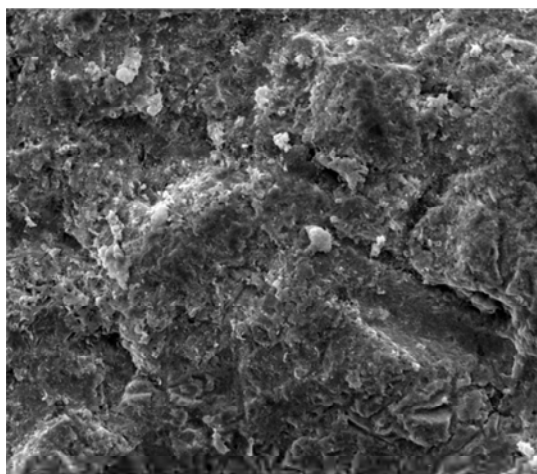
Рис. Б1 (продолжение)



90мкм

Электронное изображение 1

е

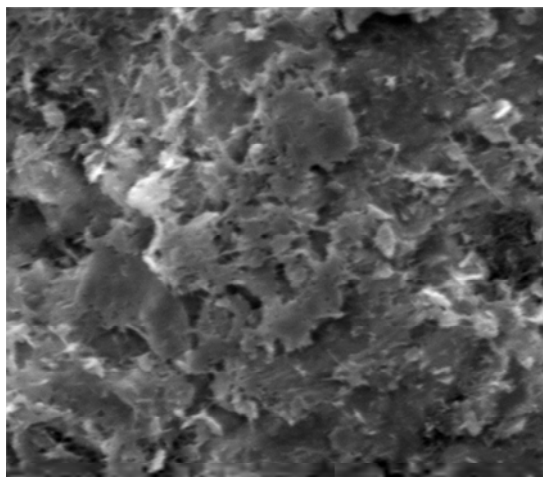


40мкм

Электронное изображение 1

ж

Рис. Б1 (продолжение)



9мкм

Электронное изображение 1

3

Рис. Б1 (окончание)

Результаты испытаний образцов на коррозионную стойкость в растворе NaCl

Для установления влияния лакокрасочного покрытия, нанесенного на очищенную поверхность (рисунок В1), на коррозионную стойкость были проведены испытания, по методике, представленной в разделе 2.8.



Рис. В1. Фотография образца после проведения операций ГАО и окраски
 материал – сталь 08кп, $p_{ex} = 25$ МПа, $L = 25$ мм, $K_6 = 3\%$, $K_n = 10^{-3}\%$,
 остальное – вода

На рисунке В1 представлена фотография образца, поверхность которого была очищена по технологии ГАО и затем после сушки ($t_c = 6$ ч, $T = 20$ °С) покрыта лакокрасочным покрытием белого цвета.

Фотография этого образца после испытаний на коррозионную стойкость, которые производились в течение 30 минут в кипящем 20%-м растворе NaCl с последующей 15 минутной выдержкой их в 20% -м растворе NaCl показана на рисунке В2.

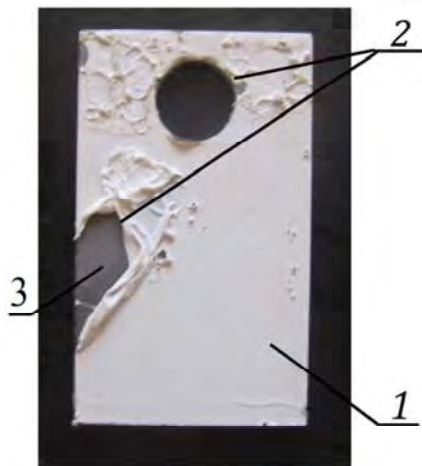


Рис. В2. Фотография образца после испытаний на коррозионную стойкость в кипящем растворе 20-м % NaCl:

1 – вид неразрушенного лакокрасочного покрытия; 2 – вид разрушенного лакокрасочного покрытия; 3 – вид неразрушенного пленочного покрытия на основе бентонитовой глины с отсутствием очагов коррозии;
 материал – сталь 08кп; режим ГАО: $K_0 = 3 \%$, $K_{II} = 10^{-5} \%$, $K_{к.с} = 2 \%$,
 остальное – вода, $p_{вх} = 30$ МПа, $d_k = 1$ мм, $L = 50$ мм

Анализ состояния поверхности образца на рисунке В2 показывает, что около 30 % лакокрасочного покрытия разрушилось и отделилось от основы на участках 2 образца. Однако защитная бентонитовая пленка, представленная на участке 3, в отличие от лакокрасочного покрытия, в процессе этого испытания на коррозионную стойкость не разрушилась, что подтверждается отсутствием очагов коррозии на поверхности образца, покрытой этой пленкой.

При увеличении времени испытаний в том же растворе NaCl до 35 минут с последующей 15 минутной выдержкой их в 20%-м растворе NaCl при комнатной температуре общая площадь разрушенного лакокрасочного покрытия увеличилась до 70 % (рисунок В3). При этом поверхность защитного пленочного покрытия не подверглась разрушению в результате воздействия агрессивной среды – кипящего раствора 20%-м NaCl.



Рис. В3. Фотография поверхности образца после 35 минут кипячения в 20% -м растворе NaCl с последующей 15 минутной выдержкой их в 20%-м растворе NaCl при комнатной температуре:
материал – сталь 08кп, $p_{ax} = 25$ МПа, $L = 25$ мм, $K_{\sigma} = 3\%$, $K_n = 10^{-5}\%$,
остальное – вода

Анализ фотографий, представленных на рисунках 2 и 3, позволяет сделать вывод о том, что разрушение лакокрасочного покрытия нанесенного на поверхность стальных образцов, обусловлено наличием защитного пленочного покрытия, которое, благодаря своим высоким антикоррозионным свойствам, препятствует сцеплению нанесенного слоя краски с металлической поверхностью, обработанной по технологии ГАО с применением запатентованного состава [1].

**Результаты испытаний на коррозионную стойкость
стальных образцов, обработанных составами [1] и на основе
речного песка с концентрацией $K_{р.п.} = 4 \%$**

Для проверки вывода о влиянии защитного пленочного покрытия на коррозионную стойкость слоя краски, нанесенного на поверхность очищенных образцов, были проведены дополнительные эксперименты с применением в составе рабочей жидкости бентонитовой глины (рисунок Г1, а) и речного песка (рисунок Г1, б). После очистки поверхности образцы были обезжирены с помощью растворителя Р-4, а затем окрашены.

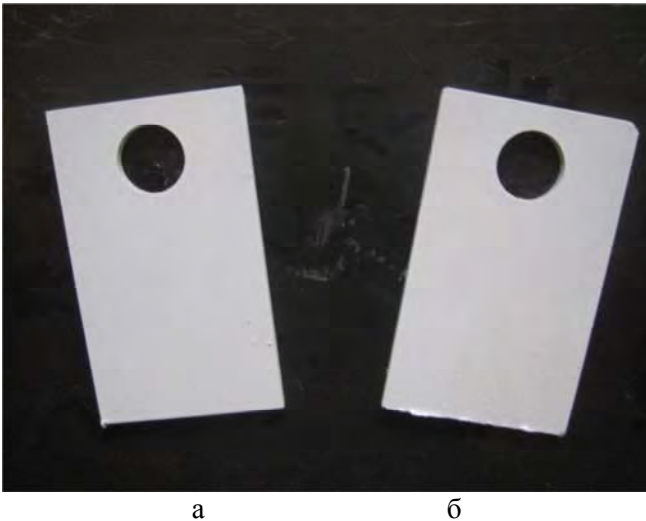


Рис. Г1. Фотография образцов, прошедших ГАО и последующую покраску перед проведением испытаний на коррозионную стойкость:
а – обработка образца перед покраской составом с использованием бентонита ($K_б = 3 \%$) [1]; б – обработка образца составом рабочей жидкости на основе использования речного песка ($K_{р.п.} = 4 \%$, остальное – вода); $p_{вх} = 30$ МПа, $d_k = 1$ мм, $L = 30$ мм, материал – сталь 08 кп

Внешний вид образцов после 15 минут кипячения в 10%-м растворе NaCl с последующей 15 минутной выдержкой их в 10%-м растворе NaCl при комнатной температуре представлен на рисунке Г2.

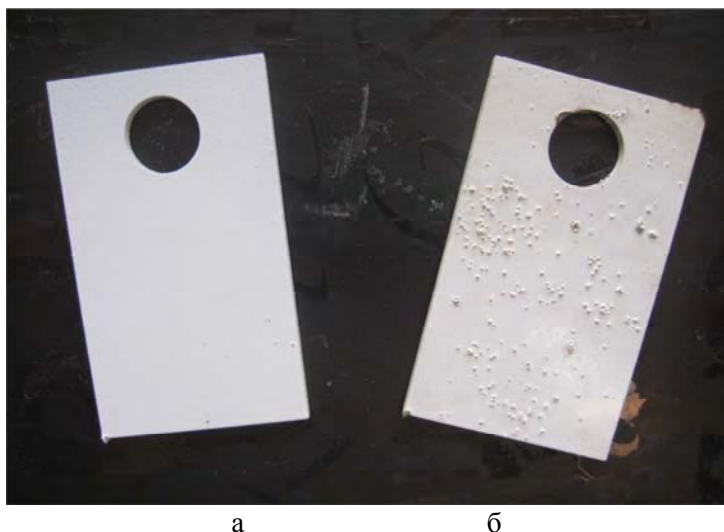


Рис. Г2. Фотография образцов, обработанных после ГАО растворителем Р-4 и подвергнутых последующему испытанию на коррозионную стойкость:
Время кипячения $t_{\text{кип}}$ образцов а и б в растворе NaCl (10 %) – 15 минут. Время выдержки в растворе NaCl после кипячения – 15 минут;
а – образец обработан рабочей жидкостью на основе бентонита ($K_6 = 3 \%$);
б – образец обработан рабочей жидкостью на основе речного песка ($K_{\text{р.п.}} = 4 \%$), материал – сталь 08кп

Учитывая то, что бентонитовая пленка с обработанной поверхностью может быть удалена химическим способом, и фотографии на рисунке Г2 подтверждают предположение о том, что бентонитовая пленка мешает сцеплению краски с поверхностью металла, оказывается верным.

Из рассмотрения фотографий образцов на рисунке Г2 видно отсутствие поражения лакокрасочного покрытия после коррозионных испытаний образца «а», обработанного по технологии ГАО составом рабочей жидкости на основе бентонитовой глины [1]. Одновре-

менно с этим лакокрасочное покрытие на поверхности образца «б», обработанного составом с концентрацией речного песка $K_{р.п.} = 4\%$, оказалось разрушенным на 80–90 %.



Рис. Г3. Фотография образца, обработанного рабочей жидкостью с содержанием речного песка $K_{р.п.} = 4\%$ после испытаний на коррозионную стойкость: время кипения $t_{кип}$ образца в растворе NaCl (10 %) – 15 минут. Время выдержки в растворе NaCl после кипения – 15 минут

Кратеры (см. рисунок Г2, б; рисунок Г3), которые образовались на поверхности свидетельствуют о том, что частицы песка, состоящие, в основном, из оксидов кремния SiO_2 , которые остались на очищенной поверхности во впадинах микронеровностей, служат концентраторами возникновения коррозии и подвергают деструкции лакокрасочное покрытие изнутри, так как коэффициент температурного расширения у Fe почти в 20 раз выше, чем у SiO_2 .

Отсутствие разрушения окраски (см. рисунок Г2, а), нанесенной на поверхность образца после ГАО с применением состава [1], можно объяснить отсутствием на обработанной поверхности, после очистки ее растворителем Р-4, оксидов кремния и железа, а также полным отсутствием защитной бентонитовой пленки.

Научное издание

КАЧАНОВ Игорь Владимирович
ФИЛИПЧИК Алексей Вячеславович
БАБИЧ Виталий Евгеньевич и др.

**ТЕХНОЛОГИЯ СТРУЙНОЙ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ ОЧИСТКИ
И ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ
С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕНТОНИТОВОЙ ГЛИНЫ**

Подписано в печать 14.04.2016. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 9,76. Уч.-изд. л. 7,64. Тираж 100. Заказ 268.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.