

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 669:620.197

ЖУК
Андрей Николаевич

**ТЕХНОЛОГИЯ АБРАЗИВНОЙ РЕВЕРСИВНО-СТРУЙНОЙ ОБРАБОТКИ
ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЬНОГО ЛИСТОВОГО ПРОКАТА И ЗАЩИТЫ
ОТ КОРРОЗИИ ПЕРЕД ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКОЙ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.02.07 – технология и оборудование механической
и физико-технической обработки

Минск, 2023

Научная работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете.

Научный
руководитель

КАЧАНОВ Игорь Владимирович,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика», Белорусский национальный технический университет

Официальные
оппоненты:

АКУЛОВИЧ Леонид Михайлович,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии металлов, УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»;

ЛЕБЕДЕВ Владимир Яковлевич,
кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»

Оппонирующая
организация

ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»

Защита состоится 17 марта 2023 г. в 14⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.03 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, корп. 1, ауд. 204, тел. ученого секретаря (+375 17) 331 30 58.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «15» февраля 2023 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
доктор технических наук, профессор



О. Г. Девойно

© Жук А. Н., 2023

© Белорусский национальный
технический университет, 2023

ВВЕДЕНИЕ

Успешная реализация целого ряда современных высокоэффективных технологических процессов напрямую зависит от качества очистки и защиты поверхностей от коррозии. Так, например, процесс лазерной резки (в настоящее время в промышленном секторе Республики Беларусь используется порядка 350 лазерных комплексов, обеспечивающих разрезку около 110–140 тыс. т листовой стали), относящийся к числу таких технологических процессов, может быть эффективно реализован только при проведении предварительной обработки поверхности стального листа с целью эффективного использования энергии лазерного луча и предотвращения появления дефектов, характерных для лазерной резки (образование грата, раковин, прожига заготовки и др.). Суть этой обработки сводится к обеспечению высокой производительности труда с одновременным снижением энергетических затрат при формировании очищенной от продуктов коррозии поверхности с низким уровнем упрочнения, высокой светопоглощающей способностью и оптимальной величиной параметра шероховатости R_a , составляющей 0,2–0,4 мкм для современных комплексов лазерной резки. При этом актуальным является вопрос по предотвращению повторной коррозии, которая начинает протекать на очищенной поверхности уже через 2–5 ч под воздействием кислорода из воздушной среды.

Известные процессы струйной очистки стальных листов от продуктов коррозии (гидроабразивные, пескоструйные, дробеструйные), для которых характерно радиальное растекание потоков рабочей суспензии после удара струи в очищаемую поверхность, являются энергозатратными, экономически и экологически неэффективными.

Эти недостатки обусловлены неэффективным использованием мощности насосного оборудования и кинетической энергии высоконапорной струи, содержащей различные абразивные компоненты (мелкодисперсный корунд, бентонитовая глина, песок, мелкодисперсный лед, чугунная или стальная дробь и т. д.). Силовой режим этих процессов характеризуется пониженным (по сравнению с возможно достижимым) струйным давлением, что обусловлено, в соответствии с законом превращения энергии, высокой скоростью радиального растекания струи (РРС) рабочей суспензии после взаимодействия с очищаемой поверхностью.

Результаты, достигнутые в современном промышленном производстве, показывают, что альтернативой известным струйным процессам очистки поверхностей с РРС от продуктов коррозии может быть технология, основанная на реверсивно-струйном воздействии (принцип работы турбины Пелтона) рабочей суспензии на очищаемую поверхность. Существенным отличительным моментом от известных струйных процессов с РРС в такой технологии является разворот относительно начального направления движения струи рабочей суспензии на 180° после соударения с поверхностью, что, по прогнозным расчетам, может обеспечить существенное повышение силового струйного воздействия (теоретически в два раза) на эту поверхность, а также производи-

тельности труда практически при тех же затратах мощности насосного оборудования.

Однако к настоящему времени теоретические и экспериментальные исследования процесса с реверсивно-струйным воздействием струи рабочей суспензии на обрабатываемую поверхность отсутствуют, что является сдерживающим фактором на пути создания технологии реверсивно-струйной обработки (РСО) различных металлов перед их последующей лазерной резкой, сваркой, покраской, газоплазменным напылением и т. д.

Учитывая сказанное, в диссертационной работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, а также опытно-конструкторских разработок, связанных с изучением воздействия реверсивно-струйного потока на обрабатываемую поверхность, что позволило разработать технологию РСО листового стального проката перед лазерной резкой.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Исследования и результаты, положенные в основу диссертации, соответствуют перечню приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы, утвержденных постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12 марта 2015 года № 190, в частности п. 8 «Многофункциональные материалы и технологии», а также Указу Президента Республики Беларусь № 166 от 22 апреля 2015 года «О приоритетных направлениях научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 годы» по п. 3. «Промышленные и строительные технологии и производство», Указу Президента Республики Беларусь № 156 от 7 мая 2020 года «О приоритетных направлениях научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы» по п. 4. «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы».

Исследования, приведенные в диссертации, выполнены в соответствии с грантом Министерства образования Республики Беларусь ГБ 12–12 «Разработка технологии реверсивно-струйной очистки судовых поверхностей от коррозии» 2012 года, № ГР 20120807.

Цель и задачи исследования

Целью работы является разработка технологии абразивной реверсивно-струйной обработки поверхности стального листового проката, обеспечивающей формирование коррозионностойкой поверхности стального листового проката с учетом требований по качеству последующей лазерной резки.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработать физико-математическую модель процесса реверсивно-струйной обработки стальных листов от продуктов коррозии, учитывающую влияние скорости $v_{стр}$, коэффициента обжатия струи λ , физико-механических свойств разрушаемого материала (предел прочности σ_b , плотность ρ_m) на силовой режим процесса и позволяющую определить минимальное давление раз-

рушения p_{\min} слоя продуктов коррозии на очищаемой поверхности и рассчитать основные параметры насосного оборудования (давление, подача, мощность), предназначенного для реализации технологии РСО.

2. Провести теоретические и экспериментальные исследования по установлению диапазона оптимальных по потерям напора углов конусности струеформирующего сопла, учитывающих влияние свойств рабочей суспензии (плотность ρ , динамическая μ и кинематическая ν вязкости), средней скорости движения струи $v_{\text{стр}}$, степени сужения конического сопла n в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 4 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^6$, характеризующем реальные условия реализации технологии РСО.

3. Провести экспериментальные исследования, учитывающие влияние технологических параметров процесса РСО (коэффициент обжатия струи λ , расстояние от торца выходного сечения конического сопла до очищаемой поверхности L , давление на входе в коническое сопло $p_{\text{вх}}$, концентрация компонентов в составах рабочих суспензий, скорость струи $v_{\text{стр}}$, воздействующей на поверхность) на силовой режим процесса, параметры качества поверхности, производительность труда, с определением оптимальных диапазонов, указанных технологических параметров по силовому режиму и качеству обработанной поверхности.

4. Провести экспериментальные исследования, учитывающие влияние режимов процесса РСО на микроструктуру поверхностного слоя, морфологию и трибологические характеристики, параметры коррозионной стойкости, толщину и состав сформированного на очищенной поверхности покрытия с низкой отражательной способностью, и на основе установленных оптимальных параметров процесса разработать технологию РСО стального листового проката перед его последующей лазерной резкой и внедрить результаты исследований в производство и учебный процесс.

Научная новизна

1. На основании разработанной физико-математической модели процесса РСО установлено, что при переходе от очистки с РРС ($\lambda = 0$) к РСО ($\lambda > 0$) в диапазоне скоростей $v_{\text{стр}} = 100 - 195$ м/с струйное давление на очищенную поверхность при неизменной мощности насосного оборудования возрастает в 1,37–1,71 раза, доходя до значений $p_{\min} = 18 - 50$ МПа. При этом достижение в указанном диапазоне заданного давления p_{\min} при переходе от РРС ($\lambda = 0$) к РСО ($\lambda > 0$) обеспечивается за счет снижения скорости $v_{\text{стр}}$ и мощности насосного оборудования в 1,2–1,4 раза.

2. Установлен с учетом влияния плотности, вязкости, скорости струи $v_{\text{стр}}$ и степени сужения конического сопла n диапазон оптимальных углов конусности выходного сопла реверсивно-струйного устройства $\alpha_{\text{опт}} = 39 - 43^\circ$, обеспечивающий при минимальных потерях напора в потоке рабочей суспензии формирование максимальной скорости струи на выходе из конического сопла в интервале чисел Рейнольдса $Re = 4 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^6$, в рамках которого обеспечивается РСО с максимальным струйным воздействием на очищаемую поверхность.

3. По результатам экспериментальных исследований влияния концентрации компонентов и составов рабочих суспензий на силовой режим, производительность процесса и качество очищенной поверхности установлена целесообразность проведения процесса РСО в три этапа с применением на каждом из них следующих составов рабочих суспензий, содержащих: для начального этапа – речной песок ($K_{р.п.} = 8-10\%$), полиакриламид ($K_{п.} = 10^{-5}\%$), техническую воду (остальное); для второго – техническую воду ($K_{тв} = 100\%$); для третьего этапа – бентонитовую глину ($K_{б} = 2,7-4,2\%$), кальцинированную соду ($K_{к.с.} = 1\%$), техническую воду (остальное).

4. Установлены рациональные значения технологических параметров (коэффициента обжатия $\lambda = 0,05-0,08$, расстояния от торца выходного сечения конического сопла до очищаемой поверхности $L = 8-30$ мм, скорости реверсивной струи $v_{стр} = 175-202$ м/с, давления на входе в сопло $p_{вх} = 20-23$ МПа, микротвердости поверхностного слоя ($H_{\mu} = 2580-2720$ МПа), параметра шероховатости очищенной поверхности $Ra = 2-4$ мкм), при которых обеспечивается эффективная реализация процесса РСО с повышением силового воздействия в 1,3–1,65 раза, производительности процесса – в 1,3–1,6 раза, получением относительного упрочнения $H_{\mu}/H_{\mu 0} = 1,32-1,39$, не превышающего допустимых значений, отвечающих требованиям обработки стальной поверхности перед последующей лазерной резкой.

5. Установлено, что проведение процесса РСО в три этапа с применением разработанных составов рабочих суспензий обеспечивает при скоростях реверсивной струи $v_{стр} = 180-195$ м/с и давлениях $p_{вх} = 20$ МПа высокое качество очистки без очагов коррозии до параметра шероховатости $Ra = 2-4$ мкм (при исходных значениях $Ra = 20-30$ мкм) с формированием на очищенной поверхности защитного пленочного покрытия (ЗПП) с высокими антикоррозионными (9 баллов по 10-балльной шкале), трибологическими (износ поверхности ЗПП на 14–17 % ниже, чем у поверхности стальных образцов в состоянии поставки) характеристиками, с толщиной покрытия $\delta \geq (1,1-1,2)Ra$, что обеспечивает повышение скорости лазерной резки в 1,2–1,3 раза за счет исключения взаимодействия лазерного луча с выступами профиля и послужило основой для разработки технологии РСО стального проката перед его последующей лазерной резкой.

Положения, выносимые на защиту

1. Физико-математическая модель процесса реверсивно-струйной обработки (очистки), разработанная на основе метода верхней оценки, учитывающая влияние скорости $v_{стр}$, коэффициента обжатия реверсивной струи λ и физико-механических свойств разрушаемого материала (предела прочности σ_b , плотности ρ_m) на силовые параметры процесса и позволившая определить минимально необходимое давление для разрушения $p_{мин}$ слоя продуктов коррозии на очищаемой поверхности от воздействия реверсивной струи, что послужило основой для расчета параметров насосного оборудования (давление, подача, мощность), необходимого для реализации технологии реверсивно-струйной обработки.

2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния угла конусности сопла реверсивно-струйного устройства на потери напора рабочей струи при различных показателях ее плотности (ρ), вязкости (μ , ν) и скорости движения струи $v_{\text{стр}}$, что позволило установить значения оптимальных углов конусности, обеспечивающих минимальные потери напора и, следовательно, максимальную скорость струи в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 4 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^6$, характеризующем реальные условия реализации технологии реверсивно-струйной обработки с максимальным силовым воздействием на очищаемую поверхность.

3. Результаты экспериментальных исследований влияния технологических параметров процесса реверсивно-струйной обработки (коэффициент обжатия струи λ , расстояние L от торца выходного сечения конического сопла до очищаемой поверхности, давление на входе в коническое сопло $p_{\text{вх}}$, концентрация компонентов в составах рабочих суспензий при трехэтапной обработке, скорость струи $v_{\text{стр}}$, воздействующей на очищаемую поверхность) на параметры силового режима (сила F и давление p от воздействия реверсивной струи), параметры шероховатости (Ra) и упрочнения (H_{μ}) поверхности, производительность реверсивно-струйной обработки, что позволило установить оптимальные диапазоны указанных технологических параметров, обеспечивающих реализацию процесса реверсивно-струйной обработки с повышенным силовым воздействием, производительностью и получением требуемого качества очищенной поверхности.

4. Результаты экспериментальных исследований влияния режимов реализации реверсивно-струйной обработки в три этапа на формирование качественной очищенной поверхности (микроструктуры поверхностного слоя) металла, морфологию, трибологические и антикоррозионные характеристики защитного пленочного покрытия, что в сочетании с оптимальными диапазонами технологических параметров процесса послужило основой для разработки технологии РСО, обеспечивающей наряду с очисткой поверхности формирование на ней антикоррозионного покрытия с требуемой толщиной $\delta \geq (1,1-1,2)Ra$, для реализации последующей технологии лазерной резки с повышенной скоростью.

Личный вклад соискателя ученой степени

Автором разработана технология абразивной РСО поверхности стального листового проката и защиты от коррозии перед лазерной резкой с использованием рабочих суспензий, содержащих речной песок, бентонитовую глину, полиакриламид, кальцинированную соду, а совместно с соавторами написаны монография, большинство научных статей, тезисов докладов.

Научным руководителем доктором технических наук, профессором Качановым И. В. оказывалась научно-консультационная и практическая помощь на всех этапах выполнения диссертационной работы. Основные положения, выносимые на защиту, цель и задачи исследований сформулированы автором совместно с научным руководителем.

Другим соавторам научных публикаций принадлежат результаты, не вошедшие в положения, выносимые на защиту и заключительные выводы.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты исследований доложены на следующих международных научно-технических конференциях: «Наука – образованию, производству, экономике», (г. Минск, 2007, 2013, 2016, 2017 гг.); «Форум проектов программ Союзного государства» (г. Минск, 2018); «XIII International scientific and practical Conference» (Sheffield, 2018); «XIV Miedzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji» (Przemyśl, 2018); «Белорусско-Китайский молодежный инновационный форум» (Минск, 2021).

Результаты работы внедрены в учебный процесс по дисциплине «Технологии судостроения» на кафедре «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика» БНТУ. Планируется, что разработанная конструкция центробежного пульпогустителя будет использована в ОАО «Белсудопроект» при разработке проекта модернизации белорусских земснарядов.

Опубликование результатов диссертации

По теме диссертации опубликованы 17 научных работ, в том числе в соавторстве 1 монография, 5 статей в изданиях, включенных в перечень ВАК (2,69 авторского листа), 11 статей, тезисов и докладов в сборниках материалов международных научных конференций. Получены 6 патентов на изобретения.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав с выводами к каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений. Полный объем диссертационной работы составляет 202 страницы, она содержит 171 страницу основного текста, 81 рисунок на 69 страницах, 14 таблиц на 15 страницах, 5 приложений, библиографический список из 128 источников, список публикаций соискателя из 17 научных работ и 6 патентов на изобретения.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе выполнен анализ современного состояния вопроса в области очистки металлических изделий под последующую лазерную резку от продуктов коррозии, окалина и жировых отложений. Рассмотрены наиболее распространенные абразивные материалы, которые могут входить в состав рабочей суспензии. Произведена оценка возможности применения технологии РСО стальных листов от продуктов коррозии, способной повысить силовое воздействие и производительность труда. В основу РСО положен физический принцип, используемый в турбинах Пелтона, заключающийся в том, что струя рабочей суспензии после соударения с очищаемой поверхностью разворачивается на 180°. Этот разворот обеспечивает формирование реактивной силы, которая, складываясь с силой от воздействия струи, может привести к увеличению давления струйного воздействия по сравнению с традиционной схемой

РРС, при которой струя после взаимодействия с поверхностью растекается под углом 90° относительно своего первоначального направления движения.

Проведен анализ современных теоретических решений, прогнозирующих силовые параметры струйной обработки, определены основные критерии подготовки листового материала для последующего процесса ЛР.

На основании проведенного анализа были сформулирована цель и поставлены задачи исследования.

Во второй главе приводится описание основного оборудования, приборов, устройств, материалов и методик проведения экспериментальных исследований.

Для исследований в лабораторных условиях использовался стенд, содержащий мембранные насосы 7000 НА, которые обеспечивали переменные давления на входе в коническое сопло (КС) $p_{вх} = 10\text{--}45$ МПа со скоростями струи на выходе из сопла $v_{стр} = 100\text{--}350$ м/с. Для отдельных экспериментов и промышленных испытаний использовалась очистная установка высокого давления «КАМАТК451А – Е45В» (ФРГ), способная развивать давление на входе в КС $p_{вх} = 63\text{--}120$ МПа, что обеспечивало скорости струи $v_{стр} = 350\text{--}550$ м/с.

Описана разработанная методика измерения давления при реверсивно-струйном воздействии на очищаемую поверхность с помощью датчика перепада давления ЭДП-30. Методика обеспечивает экспериментальное определение струйного давления до 25 МПа. Для измерения струйного давления, превышающего 25 МПа, разработана методика регистрации силового реверсивно-струйного воздействия на заготовки-препятствия с помощью пружинного динамометра.

Разработана конструкция центробежного пульпогустителя (ЦБП), предназначенного для получения в промышленных объемах товарного речного песка с размером фракции 0,16–0,63 мм, необходимого для реализации процесса РСО и рекомендованного к использованию в ООО «Белсудопроект».

Разработана и создана конструкция устройства для реализации процесса РСО листовых стальных материалов, характеризуемая патентной новизной, повышенной производительностью и снижением мощности насосного оборудования по сравнению с обычными (нереверсивными) устройствами для реализации процессов струйной очистки (рисунок 1).

Устройство работает следующим образом. По подводящему патрубку 12 соплового блока 5 подается абразивосодержащая суспензия, которая за счет эжекции захватывается из кольцевой полости 17 подаваемой под давлением по каналу 14 струей воды, смешивается с ней и поступает в КС 13. В результате на выходе из КС формируется многокомпонентная струя рабочей суспензии, которая с высокой скоростью подается на обрабатываемую поверхность 9 и путем абразивно-ударного воздействия обеспечивает разрушение и последующее удаление с нее продуктов коррозии.

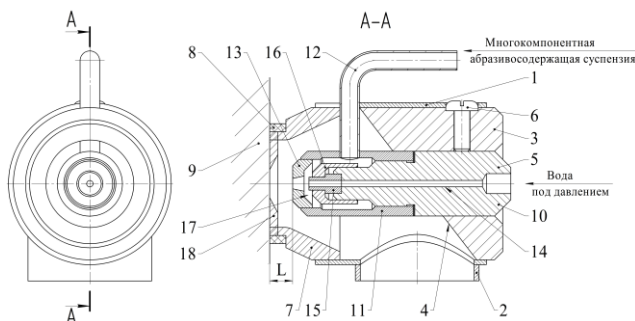


Рисунок 1 – Конструкция устройства для реализации процесса РСО

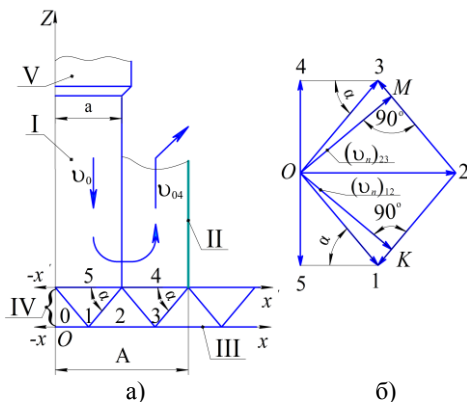
Благодаря эластичной насадке 8, которая плотно прилегает к обрабатываемой поверхности 9 и препятствует растеканию рабочей суспензии в радиальном направлении, струя, ударяясь об обрабатываемую поверхность 9, разворачивается на угол $160\text{--}180^\circ$ относительно исходного направления движения и перемещается по кольцевому зазору между внутренней поверхностью конического переходника 7, корпуса 1 и наружной поверхностью соплового блока 5. Из кольцевого зазора струя попадает на наклонную поверхность 4 отражателя 3 и удаляется вместе с продуктами очистки через сливную полость и далее по сливному каналу 2 в бак для регенерации (на рисунке 1 не указан).

На основании проведенных исследований предложены составы рабочих суспензий для проведения РСО стальных поверхностей в три этапа. Для реализации на первом этапе рекомендован состав суспензии на основе технической воды с использованием речного песка и полиакриламида. На втором этапе РСО рекомендовано использование технической воды для кратковременной промывки стальной поверхности. Для третьего (заключительного) этапа рекомендуется состав на основе технической воды с использованием бентонитовой глины и кальцинированной соды.

В третьей главе на основе приближенного энергетического метода предложена физико-математическая модель для расчета давления разрушения от воздействия реверсивной струи на обрабатываемую поверхность, покрытую слоем продуктов коррозионных отложений. Для расчета давлений разрушения использовалось кинематически возможное поле (КВП) линий скольжения (поле Р. Хилла, рисунок 2, а), с построенным для него годографом скоростей для условий плоской задачи (рисунок 2, б).

Из расчетной схемы на рисунке 2, а видно, что очаг деформации (разрушения) – слой коррозионных отложений IV, возникающий от воздействия реверсивной струи I, проходящей через клиновое сопло V, состоит из жестких треугольных блоков 1, 2, 3, скользящих друг относительно друга и по границам жесткой зоны III. Вследствие симметрии относительно оси OZ (рисунок 2, а, б) представлены правые половины кинематически возможного поля и построено-

го для него годографа скоростей. Цифрами обозначены: 0 – жесткая неподвижная зона; 1, 2, 3 – блоки поля; 4 – граница свободного пространства; 5 – граница контакта струи I с блоком 1. Границы между блоками и зонами обозначаются двумя цифрами (12 – граница между блоками 1 и 2 и т. д.). Построение годографа скоростей (рисунок 2, б) для принятого КВП проводилось на основе известных правил графостатики.



**I – плоская струя рабочей суспензии; II – плоский корпус струйного блока;
 III – обрабатываемая поверхность; IV – слой продуктов коррозии;
 V – клиновое сопло**

Рисунок 2 – Кинематически возможное поле линий скольжения (а) и годограф скоростей (б), принятые для анализа процесса реверсивно-струйной обработки поверхности листового проката

Из условия баланса мощности внешних и внутренних сил получено уравнение для расчета минимально необходимого давления разрушения p_{\min} слоя продуктов коррозии на очищаемой поверхности

$$p_{\min} = 2,6\sigma_{\text{в}} + 0,25\rho_{\text{м}}(1 + \lambda)v_{\text{стр}}^2, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{в}}$ – предел прочности материала, определяемый по результатам испытаний на сжатие (растяжение), МПа;

$\rho_{\text{м}}$ – плотность разрушаемого материала, кг/м³;

$v_{\text{стр}}$ – скорость струи в момент воздействия на контактную поверхность слоя продуктов коррозии, м/с;

λ – коэффициент обжатия, определяемый для плоской реверсивной струи по формуле (2):

$$\lambda = \frac{a}{A - a}, \quad (2)$$

где a – размер плоского сечения струи I (рисунок 2, а), мм;

A – размер сечения корпуса струйного блока II (рисунок 2, а), мм.

По уравнению (1) проведены расчеты давления реверсивной струи на преграду с учетом коэффициента обжата струи λ , скорости струи $v_{\text{стр}}$, физико-механических свойств ($\sigma_{\text{в}}$, $\rho_{\text{м}}$) разрушаемого материала и установлены параметры насосного оборудования (давление $p_{\text{н}}$, подача $Q_{\text{н}}$, мощность N), предназначенного для реализации процесса РСО.

Для определения оптимального угла конусности $\alpha_{\text{опт}}$ выходного сопла приводится решение вариационной задачи по минимизации потерь напора в потоке рабочей суспензии, проходящей через КС. Полная потеря напора при течении рабочей суспензии в КС определялась как сумма двух видов потерь:

$$h = h_{\text{тр}} + h_{\text{п.с}}, \quad (3)$$

где $h_{\text{тр}}$ – потери напора на трение, м;

$h_{\text{п.с}}$ – потери напора на плавное сужение, м.

В результате решения уравнения (3) по минимизации потерь напора в рабочей части КС для течения рабочей суспензии в зоне гладкостенного сопротивления в диапазоне чисел Рейнольдса $4 \cdot 10^3 < \text{Re} < 3 \cdot 10^6$ было получено выражение для расчета оптимального угла конусности $\alpha_{\text{опт}}$:

$$\alpha_{\text{опт}} = 2 \arcsin \left(\frac{C_{\text{тр}}}{2,07 C_{\text{п}}} + 0,0067 \right)^{\frac{4}{19}}, \quad (4)$$

где $C_{\text{тр}}$ и $C_{\text{п}}$ – коэффициенты, зависящие от числа Рейнольдса Re и степени сужения сопла n .

Анализ расчетов по (4) показал, что минимальные потери напора и, как следствие, максимальное силовое воздействие реверсивной струи на очищаемую поверхность отмечаются при значениях оптимальных углов конусности $\alpha_{\text{опт}} = 39\text{--}43^\circ$, которые зависят от степени сужения n КС, динамической μ и кинематической ν вязкости, скорости струи $v_{\text{стр}}$ и плотности ρ рабочей суспензии.

В четвертой главе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса РСО.

В ходе проведенных исследований установлен диапазон коэффициентов обжата струи $\lambda = 0,05\text{--}0,08$, в рамках которого силовое воздействие реверсивной струи на основе технической воды превышает в 1,3–1,5 раза силовое воздействие радиально растекающейся струи на очищаемую поверхность. При этом установлено, что максимальная сила воздействия струи (независимо, от исследуемого диапазона давлений на входе $p_{\text{вх}}$ и исследуемых расстояний от торца КС до обрабатываемой поверхности L) отмечается при коэффициенте обжата $\lambda = 0,063$, что объясняется оптимальным соотношением между диаметрами струи $d_{\text{стр}}$ и установленного соосно с ней концентричного корпуса.

Силовое воздействие реверсивной струи повышается в 1,5 – 1,65 раза с добавлением в суспензию бентонита ($K_{\text{б}} = 3,5\%$) и кальцинированной соды ($K_{\text{к.с.}} = 1\%$) по сравнению с воздействием потока с РРС.

Установлено, что в диапазоне рабочих скоростей 140–240 м/с и давлений $p_{\text{вх}} = 18\text{--}45$ МПа расхождение теоретических и экспериментальных данных по определению давления разрушения составляет 5–30 %, что свидетельствует

о корректности полученной зависимости (1) для расчета давления от воздействия реверсивной струи и возможности использования этой зависимости в инженерной практике для подбора насосного оборудования при реализации технологии реверсивно-струйной обработки.

На основании теоретических и экспериментальных исследований установлено, что при скоростях струи $v_{стр} = 140\text{--}240$ м/с, содержащей бентонит с концентрацией $K_б = 2,7\text{--}4,2$ %, что соответствует динамической вязкости $\mu = (0,29\text{--}0,47) \cdot 10^{-2}$ Па·с, значения чисел Рейнольдса гарантированно находятся в диапазоне $Re = 4 \cdot 10^3\text{--}3 \cdot 10^6$. Это свидетельствует о корректности применения (4) для расчета оптимального угла конусности $\alpha_{опт}$ струеформирующего сопла.

В результате экспериментальных исследований получил подтверждение теоретический диапазон оптимальных углов конусности $\alpha_{опт} = 39\text{--}43^\circ$, в рамках которого движение рабочей суспензии со скоростью $v_{стр} = 140\text{--}240$ м/с при $\mu = (0,29\text{--}0,47) \cdot 10^{-2}$ Па·с; $\rho = (1,02\text{--}1,04) \cdot 10^3$ кг/м³; $n = 0,09\text{--}0,54$; $r_2 = 0,3\text{--}2,1$ мм обеспечивается с минимальными потерями напора, что приводит к максимальному силовому реверсивно-струйному воздействию на очищаемую поверхность.

При изменении давления $p_{вх}$ от 17 до 23 МПа и уменьшении расстояния от торца КС до очищаемой поверхности L от 50 до 8 мм производительность процесса РСО увеличивается в 1,3–1,6 раза по сравнению со струйным воздействием с РРС. Производительность РСО на первом этапе с использованием речного песка ($K_{р.п} = 8\text{--}10$ %) и полиакриламида ($K_{п} = 10^{-6}\text{--}10^{-2}$ %) на 60–70 % выше по сравнению с РРС, использующей в составе рабочей суспензии бентонит ($K_б = 2,7\text{--}4,2$ %) и кальцинированную соду ($K_{к.с.} = 0,2\text{--}1,0$ %).

В результате экспериментальных исследований определено, что в диапазонах скоростей $v_{стр} = 175\text{--}202$ м/с, расстояний $L = 8\text{--}50$ мм, давлений $p_{вх} = 17\text{--}23$ МПа параметр шероховатости поверхности Ra при РСО с $K_б = 3,5$ % уменьшается в среднем в 3,5–5,0 раза, достигая значений 2–4 мкм, которые вполне могут быть использованы для осуществления, например, операций ЛР стальных листовых материалов.

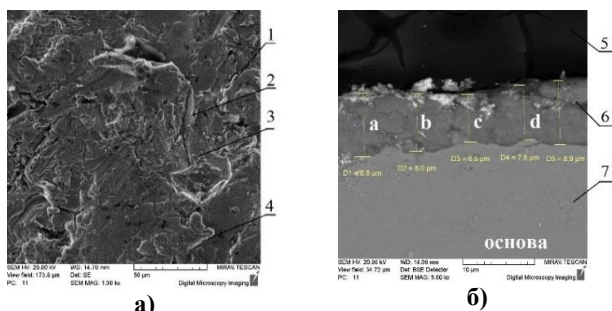
Наиболее эффективно процесс РСО обеспечивает снятие продуктов коррозии в оптимальном диапазоне значений коэффициента обжатия струи $\lambda = 0,05\text{--}0,08$ и степени сужения сопла $n = 0,27\text{--}0,36$. В рамках этих диапазонов величина параметра шероховатости Ra уменьшается на 15–20 % по сравнению со значениями Ra за этими пределами.

Установлено увеличение микротвердости поверхностного слоя H_μ при РСО по сравнению с очисткой с РРС в 1,2–1,39 раза. Наиболее эффективно увеличение H_μ отмечается в диапазоне $\lambda = 0,05\text{--}0,08$. Максимальный диапазон величин $H_\mu = 2650\text{--}2720$ МПа зафиксирован при $p_{вх} = 23$ МПа. При этом при исходной микротвердости поверхностного слоя $H_{\mu 0} = 1950$ МПа значение отношения $H_\mu/H_{\mu 0} = 1,35\text{--}1,39$ не превышает допустимую величину отношения $H_\mu/H_{\mu 0}$, отвечающую требованиям обработки стальной поверхности перед ЛР.

Дефектоскопия и микроструктурный анализ показали, что наиболее качественно обработанной является поверхность образцов после РСО с использованием бентонитовой глины ($K_б = 3,5$ %) и кальцинированной соды

($K_{к.с.} = 1$ %). Обработанная поверхность имеет практически однородный матовый цвет, и на ней отсутствуют признаки коррозии.

Экспериментальными исследованиями установлено, что реализация процесса РСО с применением на третьем этапе суспензии бентонита с концентрацией $K_6 = 3,5$ %, кальцинированной соды с $K_{к.с.} = 1$ % и технической воды (остальное) при скорости реверсивной струи $v_{стр} = 180–195$ м/с и $L = 30$ мм обеспечивает формирование ЗПП с толщиной $\delta \geq (1,1–1,2)Ra$ на очищенной от продуктов коррозии поверхности стального листа (СтЗпс). Исследования морфологии поверхности показали, что основной составляющей его являются «волнообразные» чешуйки с размером в плане 40–60 мкм (рисунок 3, а).



1–4 – «волнообразные» чешуйки; 5 – отвердитель шлифа (эпоксидная смола); 6 – ЗПП на основе бентонитовой глины; 7 – основной металл (сталь СтЗпс)
Рисунок 3 – Фотографии поверхности ЗПП (а) и поперечного сечения заготовки (б) после РСО

При этом сформированное ЗПП с толщиной $\delta = 6–9$ мкм полностью покрывает выступы профиля очищенной поверхности образца (рисунок 3, б). Установлено, что в состав покрытия входят химические соединения элементов Al, Si, Ca, Fe, O, которые содержатся в составе бентонитовой глины. Трибологические испытания показали, повышение износостойкости образцов, обработанных по РСО, по сравнению с образцами в состоянии поставки на 14–17 %.

Коррозионные испытания пленочного покрытия показали его высокую коррозионную стойкость (9 баллов из 10) при степени поражения поверхности $X_A = 0,77$ % (согласно ГОСТ 9.308-85), что имеет существенную значимость при обработке стальных материалов с продолжительным межоперационным циклом.

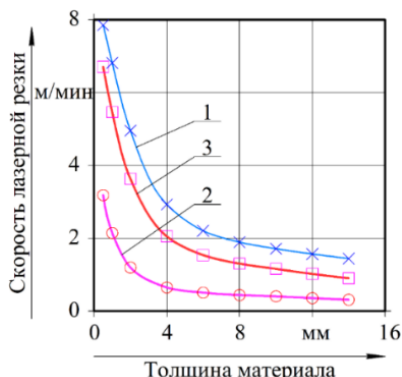
В пятой главе установлены оптимальные параметры для реализации технологии РСО в три этапа, включающие коэффициент обжатия струи $\lambda = 0,063$, значения оптимальных углов конусности сопла $\alpha_{опт} = 40–42^\circ$, скорость струи в выходном сечении КС $v_{стр} = 190$ м/с, давление на входе из КС $p_{вх} = 20$ МПа, расстояние от торца КС до очищаемой поверхности $L = 30$ мм. По результатам исследований для трех этапов процесса РСО рекомендованы составы рабочих суспензий, содержащие: для первого этапа РСО – речной песок с концентра-

цией $K_{р.п.} = 8-10 \%$, полиакриламид ($K_{п} = 10^{-6}-10^{-2} \%$), техническую воду (остальное); для второго – техническую воду ($K_{тв} = 100 \%$); для третьего этапа – техническую воду ($K_{тв} = 95,5 \%$), кальцинированную соду ($K_{к.с.} = 1 \%$), бентонит ($K_{б} = 3,5 \%$).

На основе использования установленных оптимальных параметров процесса и составов рабочих суспензий разработана технология PCO стальных образцов, которая обеспечивает повышение производительности процесса PCO в 1,3–1,6 раза, снижение потребной мощности насосного оборудования на 9–10 %, повышение силового воздействия в 1,3–1,65 раза по сравнению с известным процессом с РРС, а также формирование на очищенной поверхности коррозионностойкого с низкой отражательной способностью ЗПП толщины $\delta \geq (1,1-1,2)Ra$.

Для трех групп образцов, из которых первую группу составили образцы, обработанные по технологии PCO ($Ra = 2-4 \text{ мкм}$, $H_{\mu} = 2580-2650 \text{ МПа}$); вторую группу составили образцы в состоянии поставки ($Ra = 20-30 \text{ мкм}$, $H_{\mu} = 1900-2000 \text{ МПа}$); третью группу составили образцы после заводской дробеструйной обработки ($Ra = 0,25-0,5 \text{ мкм}$, $H_{\mu} = 3100-3200 \text{ МПа}$) были проведены испытания по ЛР при условии отсутствия грата на комплексе HYPER GEAR 510 в диапазоне скоростей от 0,5 до 7,9 м/мин (рисунок 4).

По результатам испытаний установлено повышение скорости ЛР для образцов, обработанных по технологии PCO, в 1,2–1,3 раза по сравнению с образцами, которые прошли предварительную заводскую дробеструйную обработку перед ЛР. Установленный эффект увеличения скорости ЛР на опытных образцах с параметром шероховатости $Ra = 2-4 \text{ мкм}$ можно объяснить отсутствием эффекта взаимодействия между лазерным лучом и выступами профиля очищенной поверхности, которые полностью покрыты ЗПП с толщиной $\delta \geq (1,1-1,2)Ra$. Повышению скорости ЛР способствует также снижение уровня упрочнения в 1,15–1,23 раза у экспериментальных образцов, прошедших PCO, по сравнению с заводскими, обработанными перед ЛР методом дробеструйной очистки. Фотографии деталей НЗ-100.01.13.101 «Полоса» и вертикальных поверхностей реза для вышеназванных трех групп стальных образцов, представлены на рисунке 5.



1 – образец после PCO; 2 – образец из материала СтЗпс в состоянии поставки; 3 – образец после предварительной дробеструйной обработки поверхности по заводской технологии
Рисунок 4 – Зависимость максимальной скорости ЛР (при условии отсутствия грата) от толщины материала



1 – грат на кромке реза; 2 – линии бороздок реза; а, б – образец № 1, прошедший перед ЛР РСО ($L = 30$ мм, $v_{стр} = 190$ м/с, $p_{вх} = 20$ МПа, $Ra = 2-4$ мкм, $d_c = 1,2$ мм, $H_{\mu} = 2580-2650$ МПа); в, г – образец № 2, прошедший ЛР без предварительной обработки (в состоянии поставки) ($Ra = 20-30$ мкм, $H_{\mu} = 1900-2000$ МПа); д, е – образец № 3, прошедший перед ЛР предварительную обработку поверхности по заводской дробеструйной технологии ($Ra = 0,25-0,5$ мкм, $H_{\mu} = 3100-3200$ МПа; материал – сталь СтЗпс; толщина листа $S_{л} = 10$ мм; $V_{др} = 1,7$ м/мин

Рисунок 5 – Фотографии деталей НЗ-100.01.13.101 «Полоса» (а, в, д) и вертикальной поверхности реза стальных образцов (б, г, е)

На фотографиях (рисунок 5, в, г, д, е) видно, что образцам № 2 и 3 присущи такие дефекты реза, как увеличение глубины и шага линии бороздки, которые по всей поверхности имеют неоднородный характер, образование грата на нижней кромке реза во множестве мест вырезанной детали, нарушение перпендикулярности поверхности реза.

На матовой поверхности образцов № 1 после РСО (рисунок 5, а) отсутствуют очаги коррозии, видны тонкие чистые бороздки реза с равномерно распределенным по всей длине шагом, с отсутствием грата на нижней кромке реза (рисунок 5, б). Это свидетельствует о том, что при одинаковых толщине и скорости ЛР только образцы № 1 имеют поверхность реза, отвечающую по параметрам качества нормам СТБ ИСО 9013-2010.

Экономический эффект от внедрения разработанной новой технологии РСО в условиях завода СООО «Элезер» (г. Дзержинск) при изготовлении серии деталей ОЗС-100.01.01.163 «Плита» составил 4372,64 белорусского рубля в ценах января 2018 г., при изготовлении деталей НЗ-100.01.13.101 «Полоса» в ООО «Амкород–Можга» – 6335,33 белорусского рубля в ценах сентября 2018 г.

Результаты работы внедрены в учебный процесс по дисциплине «Технология судостроения» на кафедре «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика» БНТУ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. На основе метода верхней оценки разработана физико-математическая модель процесса реверсивно-струйной очистки поверхности стального проката от слоя продуктов коррозии, учитывающая влияние скорости $v_{стр}$ и коэффици-

ента обжатия λ реверсивной струи, физико-механических свойств разрушаемого материала (предела прочности σ_b и плотности ρ_m) на силовой режим процесса. Получено уравнение для расчета минимального давления разрушения p_{\min} слоя продуктов коррозии на очищаемой поверхности, которое явилось основой для расчета параметров (подача, давление, мощность) насосного оборудования, необходимого для промышленной реализации процесса реверсивной очистки. Установлено, что при переходе от обычной ($\lambda = 0$) к реверсивной очистке ($\lambda > 0$) в диапазоне скоростей $v_{\text{стр}} = 100\text{--}195$ м/с струйное давление на очищенную поверхность возрастает при неизменной мощности в 1,37–1,71 раза, доходя до значений $p_{\min} = 18\text{--}50$ МПа, при этом достижение в указанном диапазоне заданного давления на очищаемой поверхности при переходе от $\lambda = 0$ к $\lambda > 0$ обеспечивается за счет снижения скорости струи и затраченной мощности насосного оборудования в 1,2–1,4 раза [1, 2, 3, 5, 8, 16–18].

2. По результатам теоретических и экспериментальных исследований, учитывающих влияние в рабочих диапазонах плотности рабочей суспензии $\rho = (1,02\text{--}1,065) \cdot 10^3$ кг/м³, динамической вязкости $\mu = (0,29\text{--}0,47) \cdot 10^{-2}$ Па·с, скорости реверсивной струи $v_{\text{стр}} = 140\text{--}240$ м/с, степени сужения конического сопла $n = 0,09\text{--}0,54$ реверсивно-струйного устройства на величину потерь напора в потоке рабочей суспензии, установлен диапазон оптимальных углов конусности $\alpha_{\text{опт}} = 39\text{--}43^\circ$, обеспечивающих формирование максимальной скорости струи $v_{\text{стр}}$ на выходе из конического сопла в интервале чисел Рейнольдса $Re = 4 \cdot 10^3\text{--}3 \cdot 10^6$, в рамках которого осуществляется реализация технологии реверсивно-струйной обработки с максимальным струйным воздействием рабочей суспензии на очищаемую поверхность [5–7, 10, 14, 15, 17].

3. По результатам экспериментальных исследований влияния концентрации компонентов и составов рабочих суспензий на силовой режим, производительность процесса и качество очищенной поверхности установлена целесообразность проведения процесса РСО в три этапа с применением на каждом из них следующих составов рабочих суспензий, содержащих: для первого этапа – речной песок ($K_{\text{р.п.}} = 8\text{--}10$ %), полиакриламид ($K_{\text{п}} = 10^{-6}\text{--}10^{-2}$ %), техническую воду (остальное); для второго – техническую воду ($K_{\text{тв}} = 100$ %); для третьего этапа – бентонитовую глину ($K_{\text{б}} = 2,7\text{--}4,2$ %), кальцинированную соду ($K_{\text{к.с.}} = 0,2\text{--}1$ %), техническую воду (остальное) [4, 10, 12–14, 17, 19, 22, 23].

4. В результате экспериментальных исследований влияния технологических параметров (коэффициент обжатия струи λ , расстояние L от выходного сечения конического сопла до очищаемой поверхности, давление $p_{\text{вх}}$ на входе в коническое сопло, концентрация абразивных компонентов (речного песка, бентонитовой глины) в составах рабочих суспензий, скорость струи $v_{\text{стр}}$ в выходном сечении конического сопла) на параметры силового режима (сила F и давление струи p), упругочения H_{μ} и параметра шероховатости Ra очищенной поверхности, производительности процесса, установлены оптимальные значения коэффициента обжатия $\lambda = 0,05\text{--}0,08$, расстояния $L = 8\text{--}30$ мм, скорости $v_{\text{стр}} = 175\text{--}202$ м/с, составы рабочих суспензий для трех этапов обработки,

микротвердости поверхностного слоя $H_{\mu} = 2580\text{--}2720$ МПа, параметра шероховатости $Ra = 2\text{--}4$ мкм, давления $p_{\text{вх}} = 20\text{--}23$ МПа, при которых обеспечиваются повышение силового воздействия в 1,3–1,65 и производительности в 1,3–1,6 раза, получение относительной величины упрочнения $H_{\mu}/H_{\mu 0} = 1,32\text{--}1,39$, не превышающей допустимых значений ($H_{\mu}/H_{\mu 0} = 1,4$), отвечающих требованиям качества обработки стальной поверхности перед последующей лазерной резкой [3, 5, 9, 10, 14, 17].

5. В результате экспериментальных исследований влияния режимов РСО на качество очищенной поверхности металла и характеристики сформированного на этой поверхности защитного пленочного покрытия установлено, что трехэтапная реверсивно-струйная обработка с применением разработанных составов рабочих суспензий обеспечивает при скоростях реверсивной струи $v_{\text{стр}} = 180\text{--}195$ м/с качественную очистку без очагов коррозии на поверхности металла до параметра шероховатости $Ra = 2\text{--}4$ мкм (при исходных значениях $Ra = 20\text{--}30$ мкм) с формированием на ней защитного пленочного покрытия с высокими антикоррозионными (9 баллов по 10-балльной шкале) и трибологическими (износ поверхности ЗПП на 14–17 % ниже, чем у стальных образцов в состоянии поставки) характеристиками, с толщиной покрытия $\delta \geq (1,1\text{--}1,2)Ra$, обеспечивающей повышение скорости лазерной резки в 1,2–1,3 раза. На основе полученных результатов разработана технология реверсивно-струйной обработки стального листового проката для эффективной реализации последующей лазерной резки [3, 4, 11–14, 17, 19, 20–23].

Рекомендации по практическому применению результатов работы

Разработанная трехэтапная технология РСО с использованием трех составов рабочих суспензий на основе технической воды с добавками речного песка и полиакриламида (на первом этапе), а также бентонитовой глины и кальцинированной соды (на третьем этапе) может быть использована на различных предприятиях машиностроения для повышения качества очищенной поверхности, производительности труда и скорости лазерной резки. Промышленное опробование разработанной технологии было проведено в СООО «Элезер» (г. Дзержинск) и ООО «Амкодор–Можга» (г. Крупки) при изготовлении соответственно деталей ОЗС-100.01.163 «Плита» с экономическим эффектом 4372,64 белорусского рубля (в ценах января 2018 г.) и НЗ-100.13.101 «Полоса» с экономическим эффектом 6335,33 белорусского рубля (в ценах сентября 2018 г.).

Предложенные новые конструкции центробежного пульпогустителя и реверсивно-струйного устройства для реализации технологии РСО могут быть использованы на участках лазерной резки в различных секторах промышленного производства Республики Беларусь.

Результаты работы внедрены в учебный процесс по дисциплине «Технологии судостроения» на кафедре «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика» БНТУ.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Монографии

1. Технология струйной гидроабразивной очистки и защиты от коррозии стальных изделий с применением бентонитовой глины / И. В. Качанов, А. В. Филипчик, В. Е. Бабич, А. Н. Жук, С. И. Ушев. – Минск : БНТУ, 2016. – 167 с.

Статьи в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК

2. Качанов, И. В. Математическая модель расчета минимального давления разрушения поверхностного слоя коррозии от воздействия реверсивной струи рабочей жидкости / И. В. Качанов, В. В. Веремеиук, А. Н. Жук // Наука и техника. Серия 1. Машиностроение. – 2014. – № 2. – С. 46–51.

3. 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. Серия 1. Машиностроение. – 2015. – № 3. – С. 30–36.

4. Жук, А. Н. Технология реверсивно-струйной очистки стальных листов от коррозии перед лазерной резкой / А. Н. Жук, И. В. Качанов, А. В. Филипчик // Наука и техника. Серия 1. Машиностроение. – 2017. – № 3. – С. 232–241.

5. Результаты исследований по определению давления реверсивной струи на обрабатываемую плоскую поверхность / А. Н. Жук, И. В. Качанов, В. В. Веремеиук, А. В. Филипчик // Наука и техника. Серия 1. Машиностроение. – 2018. – № 1. – С. 5–13.

6. Расчет оптимального угла конусности конфузора, используемого для реверсивно-струйной очистки металлических поверхностей от коррозии / И. В. Качанов, А. Н. Жук, И. М. Шаталов, В. В. Веремеиук, А. В. Филипчик // Наука и техника. Серия 1. Машиностроение. – 2019. – № 3. – С. 216–222.

Материалы докладов на конференциях, семинарах, тезисы докладов

7. 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 – образованию, производству, экономике : материалы Пятой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2007 г. : в 2 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: Б. М. Хрусталеv, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Минск, 2007. – Т. 1. – С. 343–346.

8. Жук, А. Н. Методика регистрации силового воздействия реверсивной струи на обрабатываемую поверхность / А. Н. Жук, А. Д. Голевков, А. М. Бурачевская // Наука – образованию, производству, экономике : материалы Одиннадцатой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2013 г. : в 4 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: Б. М. Хрусталеv, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Минск : БНТУ, 2013. – Т. 2. – С. 97.

9. Жук, А. Н. Результаты экспериментальных исследований по определению силового воздействия реверсивной струи на плоскую поверхность заготовки-препятствия различной формы / А. Н. Жук, А. В. Филипчик // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 12-й междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2014 г. : в 4 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: Б. М. Хрусталеv, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Минск : БНТУ, 2014. – Т. 2. – С. 87.

10. Жук, А. Н. Некоторые результаты исследования реверсивно-струйной очистки стальных поверхностей от коррозии / А. Н. Жук // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 14-й междунар. науч.-техн. конф. (69-й науч.-техн. конф. проф.-преподавательского состава, науч. работников, докторантов и аспирантов БНТУ), Минск, 2016 г. : в 4 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: Б. М. Хрусталеv, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Минск : БНТУ, 2016. – Т. 2. – С. 142.

11. Жук, А. Н. Морфология и химсостав поверхностного пленочного покрытия, сформированного при реверсивно-струйной обработке / А. Н. Жук // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 15-й междунар. науч.-техн. конф. (70-й науч.-техн. конф. проф.-преподавательского состава, науч. работников, докторантов и аспирантов БНТУ), Минск, 2017 г. : в 4 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: Б. М. Хрусталеv, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Минск, 2017. – Т. 2. – С. 139.

12. Практическое применение гидроабразивной очистки металлических поверхностей в машиностроительном производстве / И. В. Качанов, А. В. Филипчик, В. Е. Бабич, А. Н. Жук // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 15-й междунар. науч.-техн. конф. (70-й науч.-техн. конф. проф.-преподавательского состава, науч. работников, докторантов и аспирантов БНТУ), Минск, 2017 г. : в 4 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: Б. М. Хрусталеv, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Минск : БНТУ, 2017. – Т. 1. – С. 413–414.

13. Технология реверсивно-струйной очистки стальных листов перед лазерной резкой / И. В. Качанов, А. Н. Жук, А. В. Филипчик, В. А. Ключник // Форум проектов программ Союзного гос. – VI форум вузов инженерно-технологического профиля : секция «Молодежное инновационное предпринимательство» : сб. тез. докл. молодых ученых, Минск, 24–28 окт. 2018 г. – Минск : БНТУ, 2018. – С. 64–69.

14. Результаты исследований процесса реверсивно-струйной очистки металлических поверхностей от коррозии / И. В. Качанов, А. Н. Жук, А. В. Филипчик, В. В. Пармон, И. М. Шаталов, В. С. Ковалевич, Е. В. Качанова // Fundamental and applied science – 2018 : materials of the XIII International scientific and practical Conference, Sheffield, oct. 30 – nov. 7 / ed. M. Wilson. – Sheffield : Science and education LTD, 2018. – Vol. 9. – P. 93–107.

15. Теоретические исследования процесса реверсивно-струйной очистки судовых поверхностей от коррозии / И. В. Качанов, А. Н. Жук, В. А. Ключников, А. А. Кособуцкий, И. М. Шаталов, В. С. Ковалевич, Е. В. Качанова // Нау-

ka i inowacja – 2018 : materiały XIV Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji, Przemysł, 7–15 października 2018 / J. Ciborowski (redaktor prowadzący) [i inni]. – Przemysł : Nauka i studia, 2018. – Vol. 2. – S. 66–77.

16. Жук, А. Н. К вопросу определения параметров насосного оборудования для реализации технологии реверсивно-струйной очистки стальных листов перед лазерной резкой / А. Н. Жук, И. В. Качанов, И. М. Шаталов // Новые горизонты – 2021 : сб. материалов VIII Белорусско-Китайского молодежного инновационного форума, Минск, 11–12 нояб. 2021 г. : в 2 т. – Минск : БНТУ, 2021. – Т. 2. – С. 38–40.

17. Жук, А. Н. Некоторые результаты исследования процесса реверсивно-струйной очистки стальных поверхностей перед лазерной резкой / А. Н. Жук, И. В. Качанов, И. М. Шаталов // Новые горизонты – 2021 : сб. материалов VIII Белорусско-Китайского молодежного инновационного форума, Минск, 11–12 нояб. 2021 г. : в 2 т. – Минск : БНТУ, 2021. – Т. 2. – С. 40–42.

Патенты

18. Способ определения предела прочности металла : пат. ВУ 11520 / И. В. Качанов, Л. А. Исаевич, В. Н. Ковалеский, В. Н. Шарий, А. Н. Жук. – Оpubл. 28.02.2009.

19. Устройство для отбора осветленной гидросмеси на земснаряде : пат. ВУ 14172 / И. В. Качанов, Г. В. Песцов, А. Н. Чернобылец, А. Н. Жук. – Оpubл. 30.04.2011.

20. Устройство для очистки от коррозии плоской стальной поверхности : пат. ВУ 16526 / И. В. Качанов, А. Н. Жук, В. Н. Шарий, С. О. Мяделец. – Оpubл. 30.10.2012.

21. Устройство для очистки от коррозии плоской стальной поверхности : пат. ВУ 19543 / И. В. Качанов, А. Н. Жук, И. М. Шаталов, В. Н. Шарий, С. И. Ушев, А. А. Рубченя. – Оpubл. 30.10.2015.

22. Состав рабочей жидкости для гидродинамической очистки металлических поверхностей от коррозии перед лазерной резкой : пат. ВУ 21455 / И. В. Качанов, А. Н. Жук, В. Н. Яглов, А. В. Филипчик. – Оpubл. 30.10.2017.

23. Способ очистки металлических поверхностей : пат. ВУ 21512 / И. В. Качанов, А. Н. Жук, А. В. Филипчик, А. С. Исаенко. – Оpubл. 30.12.2017.

РЭЗЮМЭ

ЖУК Андрэй Мікалаевіч

Тэхналогія абразіўнай рэверсіўна-струменевай апрацоўкі паверхні сталевага ліставага пракату і аховы ад карозіі перад лазернай рэзкай

Ключавыя словы: ачыстка, рэверсіўны струмень, сопла, ціск разбурэння, прадукты карозіі, рабочая вадкасць, плёнкавае пакрыццё, лазернае рэзанне.

Мэта даследавання: распрацоўка тэхналогіі абразіўнай рэверсіўна-струменевай ачыскі паверхні сталевага ліставага пракату і ахова ад карозіі перад лазернай рэзкай з паслядоўным трохэтапным ужываннем розных складаў працоўных вадкасцей на аснове тэхнічнай вады з даданнем асноўных абразіўных кампанентаў (рачны пясок, бентанітавая гліна), якія забяспечваюць фарміраванне каразійнатрывалай якаснай паверхні сталевага ліставага пракату з улікам патрабаванняў наступнага лазернага рэзання.

Метады даследавання. Распрацавана методика па вызначэнні сілы ціску рэверсіўнага струменю на ачышчаную паверхню, а таксама вызначаны метадкі для вымярэння глейкасці рабочай вадкасці, шурпатасці і мікрацвердасці апрацаванай паверхні, каразійнай устойлівасці ахоўнага плёнкавага пакрыцця. Выкананы тэарэтычныя і эксперыментальныя даследаванні па вызначэнні аптымальных дыяпазонаў струменевага рэверсіўнага ўздзеяння на ачышчаную паверхню.

Вынікі даследавання і іх навізна. Атрыманы залежнасці па разліку мінімальнага ціску разбурэння p_{\min} пласта карозіі пры ўздзеянні на яго рэверсіўнага струменю, а таксама аптымальных вуглоў конуснасці $\alpha_{\text{опт}} = 39\text{--}43^\circ$ з улікам уплыву хуткасці струменя $v_{\text{стр}}$ і фізіка-механічных уласцівасцяў рабочай вадкасці. Распрацавана і створана новая ўстаноўка РСА, устаноўлены для яе аптымальныя значэнні каэфіцыента абціскання $\lambda = 0,05\text{--}0,08$, у рамках якіх сілавое ўздзеянне рэверсіўнага струменю ў $1,3\text{--}1,65$ разы перавышае ўздзеянне струменю са звычайным радыяльным расцяканнем патоку па ачышчальнай паверхні. Устаноўлена, што пры РСА з ужываннем рабочых вадкасцяў на аснове бентанітавай гліны, кальцынаванай соды на ачышчанай паверхні разам з ачысткай адбываецца фарміраванне ахоўнага плёнкавага пакрыцця. Усталяваны эфект павышэння хуткасці лазернага рэзання ў $1,2\text{--}1,3$ разы для матэрыялаў, на паверхні якіх сфармавана плёнкавае пакрыццё пасля РСА.

Рэкамендацыі па выкарыстанні. Распрацавана тэхналогія РСА ліставых сталевых матэрыялаў, прызначаных пад лазернае рэзанне. Вынікі работы ўкаранены ў навучальны працэс па дысцыплінах “Механіка вадкасці і газу”, “Тэхналогіі суднабудавання”, “Праектаванне судоў” на кафедры “Гідратэхнічнае і энергетычнае будаўніцтва, водны транспарт і гідраўліка” БНТУ.

Вобласць ужывання. Машынабудаванне, суднабудаванне.

РЕЗЮМЕ

ЖУК Андрей Николаевич

Технология абразивной реверсивно-струйной обработки поверхности стального листового проката и защиты от коррозии перед лазерной резкой

Ключевые слова: очистка, реверсивная струя, сопло, давление разрушения, продукты коррозии, рабочая суспензия, пленочное покрытие, лазерная резка.

Цель исследования: разработка технологии абразивной реверсивно-струйной обработки поверхности стального листового проката и защиты от коррозии перед лазерной резкой с последовательным трехэтапным применением различных составов рабочих суспензий на основе технической воды с добавлением основных абразивных компонентов (речной песок, бентонитовая глина), обеспечивающих формирование коррозионностойкой качественной поверхности стального листового проката с учетом требований последующей лазерной резки.

Методы исследования. Разработана методика по определению силы давления реверсивной струи на очищаемую поверхность, а также определены методики для измерения вязкости рабочей суспензии, шероховатости и микропористости обработанной поверхности, коррозионной стойкости защитного пленочного покрытия. Выполнены теоретические и экспериментальные исследования по определению оптимальных диапазонов струйного реверсивного воздействия на очищаемую поверхность.

Результаты исследования и их новизна. Получены зависимости по расчету минимального давления разрушения p_{\min} слоя коррозии при воздействии на него реверсивной струи, а также оптимальных углов конусности $\alpha_{\text{опт}} = 39\text{--}43^\circ$ с учетом влияния скорости струи $v_{\text{стр}}$ и физико-механических свойств рабочей суспензии. Разработана и создана новая установка РСО, установлены для нее оптимальные значения коэффициента обжатия $\lambda = 0,05\text{--}0,08$, в рамках которых силовое воздействие реверсивной струи в 1,3–1,65 раза превышает воздействие струи с обычным радиальным растеканием потока по очищаемой поверхности. Установлено, что при РСО с применением рабочих суспензий на основе бентонитовой глины, кальцинированной соды на очищаемой поверхности наряду с очисткой происходит формирование защитного пленочного покрытия. Установлен эффект повышения скорости лазерной резки в 1,2–1,3 раза для материалов, на поверхности которых сформировано пленочное покрытие после РСО.

Рекомендации по использованию. Разработана технология РСО листовых стальных материалов, предназначенных под лазерную резку. Результаты работы внедрены в учебный процесс по дисциплинам «Механика жидкости и газа», «Технологии судостроения», «Проектирование судов» на кафедре «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика» БНТУ.

Область применения. Машиностроение, судостроение.

SUMMARY

ZHUK Andrey

Technology of abrasive reverse jet surface treatment of steel sheet and corrosion protection before laser cutting

Keywords: cleaning, reverse jet, nozzle, burst pressure, corrosion products, working fluid, membrane coating, laser cut.

The purpose of the study: the development of a technology for abrasive, reverse jet surface treatment of steel sheet and corrosion protection before laser cutting with a sequential three-stage application of various compositions of working suspensions based on technical water with the addition of basic abrasive components (river sand, bentonite clay), which ensure the formation of a corrosion-resistant, high-quality surface of steel sheet products, taking into account the requirements of subsequent laser cutting.

Research methods. A technique for determining the pressure force of the reverse jet on the surface to be cleaned has been developed, as well as methods for measuring the viscosity of the working nozzle, roughness and microhardness of the treated surface, corrosion resistance of the protective membrane coating. Theoretical and experimental studies have been performed to determine the optimal ranges of jet reversible action on the surface to be cleaned.

The results of the study and their novelty. The dependences on the calculation of the minimum burst pressure p_{\min} of the corrosion layer under the action of a reversible jet, as well as the optimal taper angles $\alpha_{\text{opt}} = 39\text{--}43^\circ$ considering the influence of the jet velocity v_{str} and physico-mechanical properties working fluid. A new RJC unit has been developed and created, the optimal values of the compression coefficient $\lambda = 0.05\text{--}0.08$ have been established for it, within which the force action of a reversible jet is 1.3–1.65 times higher than the impact of a jet with a normal radial spreading the flow on the surface to be cleaned. It was found that in RJC with the use of working fluids based on bentonite clay, polyacrylamide, soda ash on the cleaned surface along with cleaning there is a formation of a protective membrane covering. The effect of increasing the laser cutting speed by 1.2–1.3 times was established for materials on the surface of which a membrane coating was formed after RJC.

Recommendations for use. The technology of RJC of the sheet steel materials intended for laser cutting is developed. The results of the work are introduced into the educational process in the disciplines "Liquid and Gas Mechanics", "Shipbuilding Technologies", "Ship Design" at the Department of "Hydraulic and Power Construction, Water Transport and Hydraulics" BNTU.

Scope. Mechanical engineering, shipbuilding.

Научное издание

ЖУК
Андрей Николаевич

**ТЕХНОЛОГИЯ АБРАЗИВНОЙ РЕВЕРСИВНО-СТРУЙНОЙ ОБРАБОТКИ
ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЬНОГО ЛИСТОВОГО ПРОКАТА И ЗАЩИТЫ
ОТ КОРРОЗИИ ПЕРЕД ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКОЙ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.02.07 – технология и оборудование механической
и физико-технической обработки

Подписано в печать 13.02.2023. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Цифровая печать.
Усл. печ. л. 1,34. Уч.-изд. л. 1,52. Тираж 100. Заказ 75.

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.