

## ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию Жука Андрея Николаевича «Технология абразивной реверсивно-струйной обработки поверхности стального листового проката и защиты от коррозии перед лазерной резкой», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

**Соответствие диссертации специальности и отрасли науки, по которым она представлена к защите.**

Диссертационная работа посвящена исследованию и разработке технологии абразивной реверсивно-струйной обработки поверхности стального листового проката перед последующей лазерной резкой. Результаты теоретических и экспериментальных исследований автора позволили решить важную проблему очистки листового проката перед лазерным раскроем на заготовки и одновременной защиты их от возможной последующей коррозии при межоперационном транспортировании и хранении. В работе установлены закономерности и взаимосвязи в процессе воздействия на обрабатываемый материал водно-абразивной струи и установлены оптимальная конструкция устройства и режимы подачи рабочей среды. Разработаны технические средства для реализации и управления технологического процесса абразивной реверсивно-струйной обработки листового материала.

Область исследований соответствует пунктам 3 и 4 паспорта специальности 05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки, утвержденного Приказом Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь от 18.12.2017 № 292 и отрасли науки-техническая.

**Актуальность темы диссертации.**

На промышленных предприятиях Республики Беларусь насчитывается более 350 лазерных комплексов, которые обрабатывают свыше 110 тыс. тонн листовой стали в год. Учитывая высокие требования к состоянию поверхности листов перед лазерной резкой, часто требуется их предварительная подготовка. Актуальным является и вопрос защиты поверхности стального листового проката после резки при межоперационном и складском хранении заготовок.

В практике наибольшее применение для очистки поверхности листов перед лазерной резкой нашли механический и гидроабразивный способы. Рядом исследований, в том числе, выполненных в БНТУ показано, что эффективность гидроабразивной очистки может быть существенно повышена, если в составе рабочей суспензии использовать такой компонент, как бентонитовая глина. Это позволяет наряду с очисткой решать задачи по формированию на поверхности листов защитного покрытия, позволяющего блокировать коррозионные процессы на очищенной поверхности. Такое сочетание процессов очистки и защиты от коррозии имеет существенное значение для современного промышленного производства и, особенно, для технологиче-



сов показал, что для обеспечения их эффективной работы обрабатываемая поверхность должна иметь определенный микрорельеф и минимальную отражательную способность. Последнее условие необходимо для более эффективного использования световой энергии лазерного луча именно на процесс плавления материала.

Исследования, положенные в основу диссертации Жука А.Н., соответствуют перечню приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований в Республике Беларусь, утвержденных постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12 марта 2015 года № 190 (п.8), а также Указам Президента Республики Беларусь № 166 от 22 апреля 2015 года «О приоритетных направлениях научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 годы» (п. 3) и № 156 от 7 мая 2020 года «О приоритетных направлениях научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы» (п. 4).

**Степень новизны результатов диссертации и научных положений, выносимых на защиту.**

Полученные результаты в диссертации и научные положения, выносимые на защиту, являются новыми.

Автором разработана физико-математическая модель процесса разрушения продуктов коррозии на обрабатываемом материале с учетом их физико-механических свойств ( $\sigma_b$ ,  $\rho_m$ ) под воздействием гидроабразивной струи с реверсивным отражением ее от обрабатываемой поверхности. Это позволило определить минимальное давление разрушения слоя продуктов коррозии и рассчитать основные параметры насосного оборудования для реализации процесса.

Диссертантом теоретически обоснован, установлен и экспериментально подтвержден диапазон оптимальных углов конусности  $\alpha_{\text{опт}} = 39\text{--}43^\circ$  сопла, распространяющийся на интервал значений чисел Рейнольдса  $Re = 4 \cdot 10^3\text{--}3 \cdot 10^6$  с учетом влияния скорости струи, вязкости и плотности рабочей суспензии, степени сужения конического сопла. Установлены оптимальные значения коэффициента обжатия струи  $\lambda = 0,05\text{--}0,08$ , степени сужения сопла  $n = 0,18\text{--}0,54$  и расстояния до очищаемой поверхности  $L = 8\text{--}30$  мм, при которых до 1,65 раза повышается силовое воздействие реверсивной струи по сравнению со струей с обычным радиальным растеканием потока по очищенной поверхности. Это обеспечивает повышение производительности процесса очистки в 1,3–1,6 раза при одинаковых затратах мощности, снижение шероховатости и повышение микротвердости поверхностного слоя обработанной поверхности, соответствующих требованиям состояния поверхностей стальных листов перед лазерной резкой.

Новизной характеризуется разработанная автором трехэтапная схема реверсивно-струйной обработки стальных листовых материалов, в соответствии с которой на первом этапе осуществляется предварительная очистка поверхности с применением суспензии на основе технической воды, содержащей речной песок с объемной долей  $K_{\text{р.п.}} = 8\text{--}10\%$ , обеспечивающая шероховатость поверхности по параметру Ra в диапазоне 15–20 мкм. На втором этапе производится промывка поверхности струей

технической воды. На третьем этапе осуществляется реверсивно-струйная обработка поверхности до шероховатости по параметру  $Ra=2-4$  мкм с применением суспензии, содержащей бентонитовую глину с объемной долей  $K_b=2,7-4,2$  % и кальцинированную соду с  $K_{к.с}=1$ %, обеспечивающая формирование на очищенной стальной поверхности антикоррозионного пленочного покрытия толщиной не менее  $\delta \geq (1,1-1,2)Ra$  с низкой отражательной способностью что обеспечивает повышение скорости лазерной резки в 1,2–1,3.

Новыми являются результаты, полученные при трибологических испытаниях образцов, обработанных на различных режимах. В результате испытаний установлено, что оптимальное время сушки образцов при температуре 20 С после реверсивно-струйной обработки (PCO) поверхности суспензией, содержащей бентонитовую глину с объемной долей  $K_b=3,5$  %, составляет 24 часа. При таком режиме сформированное на очищенной поверхности светопоглощающее пленочное покрытие характеризуется минимальным удельным объемным износом менее  $640 \cdot 10^{-15}$  м<sup>3</sup>/Нм. Коррозионными испытаниями установлена низкая степень поражения поверхности стальных образцов после PCO, соответствующая баллу 9 из 10 коррозионной стойкости, что обусловлено, в том числе, низким содержанием кислорода на очищенной поверхности под пленочным покрытием.

Полученные результаты исследований положены в основу научных положений, выносимых на защиту.

#### **Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

Представленные в работе результаты исследований научно обоснованы и экспериментально подтверждены. Постановка задач и методы их достижения базируются на современных представлениях теории прочности, технологии машиностроения, гидравлики, кинематики и динамики процессов абразивной обработки, опираются на актуальные технические решения и средства производства. В процессе исследований применялись оригинальные и стандартные современные методики и средства измерений, в том числе сканирующие электронные Mira Tescan, оптические микроскопы «МИКРО-200», профилограф-профилометр модели 252, автоматизированный комплекс трибологических испытаний ведущих научных организаций РБ – ГНУ ИПМ, ФТИ и др. Полученные результаты и сформулированные выводы соответствуют современным направлениям развития технологий в машиностроении, механической и физической обработки материалов. Результаты докладывались и прошли апробацию на научно-технических конференциях, достаточно широко раскрыты в изданиях различного уровня, нашли применение на промышленных предприятиях. Заключительные выводы диссертации обоснованы и подтверждены материалами исследований. Обоснованность полученных теоретических данных подтверждается их практическим использованием, а разработанные конструкции, способ и устройство для реализации технологии PCO хорошо зарекомендовали себя в условиях производства.



**Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов диссертации с указанием рекомендаций по их использованию.**

*Научная значимость* полученных результатов включает:

- разработку физико-математической модели процесса РСО, позволившая определить минимальное давление разрушения слоя продуктов коррозии.
- решение вариационной задачи по минимизации потерь напора в потоке жидкости, проходящей через коническое сопла струеформирующего устройства с получением математической зависимости, по которой определены оптимальные значения углов конусности КС  $\alpha_{\text{опт}}$  в интервале 39–43°;
- определение значений коэффициента обжатия струи  $\lambda = 0,05–0,08$  при которых силовое воздействие реверсивной струи в 1,3–1,5 раза превышает воздействие струи с радиальным растеканием потока, а максимальное давление достигается при  $\lambda=0,063$ .

*Практическое значение* результатов исследования заключается:

-в разработке технологии реверсивно-струйной обработки, позволяющей за счет оптимизации режимов обработки и составов рабочих суспензий получить поверхность на стальных листах заданного качества с одновременным нанесением на нее защитного пленочного покрытия с низкой отражательной способностью, что обеспечивает повышение скорости лазерной резки стального листового проката с высоким качеством реза.

-в разработке составов рабочих суспензий на основе технической воды, используемые в трехэтапном процессе реверсивно-струйной обработки, с применением в суспензии на первом этапе речного песка, последующей промывкой поверхности реверсивной струей чистой воды (и завершающей обработкой поверхности суспензией, содержащей бентонитовую глину и кальцинированную соду, что обеспечивает наряду с очисткой поверхности, формирование на обработанной поверхности пленочного покрытия с низкой отражательной способностью.

*Экономическая значимость.* Разработанная технология реверсивно-струйной обработки была апробирована в условиях СООО «Элзесер» при изготовлении типовой детали «Плита» в количестве 2800 шт., в результате чего экономический эффект составил 4372,64 рублей в ценах января 2018 г., а при апробировании результатов в условиях ОАО «Амкодор–Можа», при изготовлении детали «Полоса» на лазерном комплексе Nurep Gear 510 (Япония) экономический эффект составил 6335,33 рублей в ценах 2018 г.

*Социальная значимость* полученных результатов состоит в улучшении условий проведения работ по обработке стального листового проката за счет использования технологии с разработанной конструкцией устройства для реализации РСО, позволяющая обеспечить сбор рабочей суспензии и после ее регенерации повторное ее использование.

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

#### **Опубликованность результатов диссертации в научной печати.**

По теме диссертации в соавторстве подготовлена и опубликована 1 монография, 16 научных работ, в том числе 5 статей в изданиях, включенных в перечень ВАК Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований, 11 статей, тезисов и доклада в сборниках материалов международных научно-технических и научно-практических конференций. Получено 6 патентов на изобретения:

#### **Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК.**

Диссертация состоит введения, общей характеристики работы, пяти глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений. Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав с выводами к каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 202 страницы. Работа содержит 81 рисунок, 14 таблиц, 5 приложений, библиографический список из 128 источников, список публикаций соискателя из 17 научных работ и 6 патентов на изобретения.

#### **Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует.**

Представленные в диссертационной работе технические решения и исследования характеризуют автора как квалифицированного исследователя, способного самостоятельно формулировать и решать поставленные научные задачи, применять современные методы и методики в своей деятельности.

Выполненная оценка результатов, представленных в диссертации, анализ обоснованности и достоверности ее положений, научной и практической значимости дают основания считать, что диссертация Жука Андрея Николаевича «Технология абразивной реверсивно-струйной обработки поверхности стального листового проката и защиты от коррозии перед лазерной резкой» соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней и присвоения ученых званий», а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки.

#### **Замечания по диссертации.**

1. В обзорной части рассмотрено большое количество технологий очистки поверхностей стальных листов, но они недостаточно проанализированы по назначению, производительности и условиям реализации.

2. Защита от коррозии при обработке листового материала важна как на этапе подготовки к раскрою на лазерных комплексах, но и при межоперационном или



складском хранении заготовок, чему не уделено достаточного внимания в диссертации.

3. Изменения в поверхностном слое обработанной РСО поверхности некорректно указаны как «глубина измененной микроструктуры...» (стр. 122).

4. Учитывая направленность разработанной технологии на применение преимущественно в современных лазерных комплексах недостаточно уделено внимание автоматизации процесса.

Отмеченные замечания не затрагивают основных положений диссертации, не повлияли на полученные результаты и выводы.

### **Заключение.**

Рассматриваемая диссертация Жук А.Н. «Технология абразивной реверсивно-струйной обработки поверхности стального листового проката и защиты от коррозии перед лазерной резкой», является законченной научно-исследовательской работой по специальности 05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки. По содержанию работа соответствует этой специальности и технической отрасли науки. Диссертация содержит новые обоснованные научные положения, по уровню исследований и полученных результатов отвечает требованиям ВАК Республики Беларусь, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Оформление диссертации и автореферата, представляемых к защите, а также публикаций по теме диссертации в научных изданиях Республики Беларусь соответствует инструкции ВАК Республики Беларусь.

Жук Андрей Николаевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки за установленные новые научно обоснованные теоретические и экспериментальные результаты исследований, **включающие:**

- физико-математическую модель процесса реверсивно-струйной очистки поверхности стального листового проката от загрязнений и продуктов коррозии, учитывающую влияние кинематических параметров струи, физико-механических свойств обрабатываемого материала на параметры силового режима (давление струи и сила, действующая на поверхность), устанавливающую зависимость для расчета минимального давления разрушения  $p_{\min}$  слоя продуктов коррозии под воздействием реверсивной струи рабочей суспензии, заключающийся в повышении в 1,3–1,65 раза струйного давления (18–50 МПа) при переходе от обычной очистки ( $\lambda = 0$ ) к реверсивной ( $\lambda > 0$ ) в диапазоне скоростей  $v_{\text{стр}} = 100\text{--}195$  м/с при неизменной мощности, что позволяет рассчитывать технологические режимы и параметры насосного оборудования для промышленной реализации реверсивной очистки и уменьшить потребляемую мощность в (1,2–1,4) раза;

- теоретические и экспериментальные зависимости влияния плотности рабочей суспензии, динамической вязкости, скорости реверсивной струи  $v_{\text{стр}}$  в диапазоне 140–240 м/с, степени сужения конического сопла реверсивно-струйного устройства на

величину потерь напора в потоке рабочей суспензии, на основании которых установлен диапазон оптимальных углов конусности  $\alpha_{\text{опт}} = 39-43^\circ$ , обеспечивающих формирование максимальной скорости струи  $v_{\text{стр}}$  на выходе из конического сопла, при которой осуществляется реализация технологии реверсивно-струйной обработки с максимальным струйным воздействием рабочей суспензии на очищаемую поверхность;

- результаты экспериментальных исследований процесса РСО, позволившие установить оптимальные значения коэффициента обжатия  $\lambda$  0,05–0,08, расстояния до обрабатываемой поверхности 8–30 мм, скорости струи 175–202 м/с, составы рабочих суспензий, содержащих: для первого этапа технологии – речной песок 8–10 %, полиакриламид  $10^{-6}-10^{-2}$  %, техническую воду; для второго – техническую воду; для третьего этапа – бентонитовую глину 2,7–4,2 %, кальцинированную соду 0,2–1% техническую воду, обеспечивающие относительные величины деформационного упрочнения поверхности, не превышающей допустимое значение 1,4, шероховатость поверхности по параметру  $Ra=2-4$  мкм, давление  $p_{\text{вх}}=20-23$  МПа, при которых обеспечиваются повышение силового воздействия и производительности в 1,3–1,65 раза с формированием на поверхности листа светопоглощающего защитного пленочного покрытия толщиной до 9 мкм,

**что в совокупности позволило** разработать, апробировать и реализовать в промышленности технологию реверсивно-струйно-абразивной обработки поверхности стального листового проката с защитой от коррозии, позволившую повысить скорость лазерной резки в 1,2–1,3 раза по сравнению с подготовкой поверхности традиционными методами.

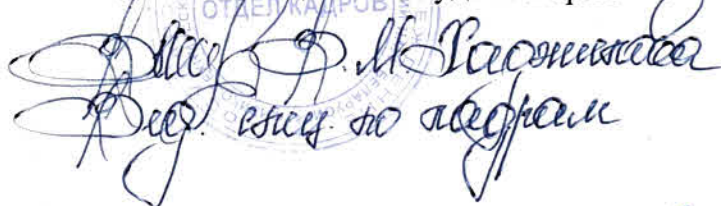
Официальный оппонент:

кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник ФТИ НАН Беларуси

В.Я. Лебедев

« 10 » 03 2023 г.

Подпись Лебедева В.Я. удостоверяю

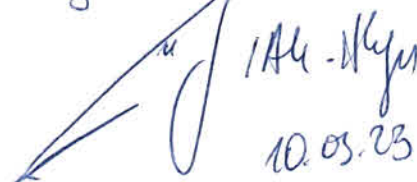
  
Дир. Института абразив

Отзыв поступил в  
совет 10.03.23

Уп. секретарь

  
О. П. Деловино

С отзывом  
оппонента

  
ИИ-ИИИ  
10.03.23