

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Жук Андрея Николаевича «Технология абразивной реверсивно-струйной обработки поверхности стального листового проката и защиты от коррозии перед лазерной резкой», представленной в совет Д 02.05.03 при БНТУ на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

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

Содержание диссертации соответствует заявленной специальности 05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки). Область исследований соответствует пунктам III. 1, III. 4, III. 5 паспорта специальности 05.02.07.

2. Актуальность темы диссертации.

В сельхоз- и станкостроении, производстве строительных и дорожных машин доля листового металлопроката в общем объеме заготовок достигает 80%. Как следствие этого, увеличился спрос на технологии и оборудование для резки листового металлопроката. Из существующих методов резки листового металла наиболее перспективным является лазерная резка. Сфокусированное лазерное излучение, обеспечивая высокую концентрацию энергии, позволяет разделять практически любые металлы и сплавы независимо от их теплофизических свойств. При этом можно получать узкие разрезы с минимальной зоной термического влияния. Преимущества лазерной резки по сравнению с другими термическими методами обработки неоспоримы в условиях снижения серийности производства и необходимости быстрого изменения требований к изделию. Гибкость и возможность использования оборудования для лазерной резки в составе гибких автоматизированных производств делает лазерную резку чрезвычайно удобной и выгодной.

Современное оборудование для лазерной резки листового материала обеспечивает точность позиционирования по осям $\pm 0,01$ мм, что позволяет достигать точности взаимного расположения вырезаемых контуров заготовки, адекватной требованиям чертежа детали. Однако для того, чтобы после лазерной резки отпала необходимость производить дальнейшую механическую обработку вырезанных отверстий, проемов и сложных контуров деталей для выполнения заданных чертежом требований по точности (погрешность вырезаемых контуров $\pm 0,1$ мм) и по шероховатости поверхностей, требуется обеспечить высокое качество реза, что возможно только при соответствующей обработке поверхностей стального листа. К показателям качества поверхностей под лазерную резку относятся отсутствие на них коррозии, окалины, смазочных материалов и других загрязнений, высокая светопоглощающая способность.

Применяемые в производстве технологии очистки поверхностей стального металлопроката от продуктов коррозии (гидроабразивные, дробе- и пескоструйные) основаны на использовании энергии высоконапорной струи воды или воздуха с введением в нее порошковых абразивных материалов.

Проблема, возникающая в производственных условиях при использовании указанных технологий, сопряжена с большими затратами на потребляемую электроэнергию и на обеспечение экологической безопасности. Кроме этого, эти технологии не формируют гарантированно высокую светопоглощающую способность поверхностей, удовлетворяющую требованиям лазерной резки стального листового проката, и защиту их от коррозии перед лазерной резкой.

Тема диссертации Жук А. Н. направлена на повышение качества поверхностей стального листового проката при лазерной резке и является актуальной.

3. Степень новизны результатов, полученных в диссертации, и научных положений, выносимых на защиту.

Принципиальное отличие полученных результатов диссертации от достигнутого уровня струйных технологий обработки (очистки) металлических поверхностей состоит в развороте (реверсировании) струи рабочей суспензии на 180° в зоне контакта с очищаемой поверхностью, что существенно (в $1,3 \div 1,5$ раза) повышает давление струи при соприкосновении с обрабатываемой поверхностью. Разработана физико-математическая модель процесса разрушения коррозионного слоя на поверхностях стального проката при воздействии реверсивной струей жидкости, учитывающей физико-механические свойства материала (плотность, предел прочности), давление струи жидкости, что позволяет определять величину необходимого давления разрушения коррозионного слоя на очищаемой поверхности.

Разработаны математические зависимости, устанавливающие функциональную взаимосвязь кинематических параметров процесса обработки при изменении величин напора струи жидкости и ее скорости, вязкости и плотности рабочей суспензии, угла конусности сопла, использование которых позволило определить интервал рациональных величин углов конусности ($39 \div 43^\circ$), обеспечивающий максимальную скорость струи в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 4 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^6$.

Экспериментально установлены диапазоны рациональных значений коэффициента обжатия струи ($0,05 \div 0,08$), степени сужения сопла ($0,18 \div 0,54$) и расстояния до очищаемой поверхности ($8 \div 30$) мм, при которых в $1,3 \div 1,6$ раза повышается силовое воздействие реверсивной струи и производительность по сравнению со струей с обычным радиальным растеканием, снижается шероховатость обработанной поверхности до $Ra = (2 \div 4)$ мкм, что соответствует требованиям к поверхностям стальных листов перед лазерной резкой.

Основные результаты исследований, полученные в диссертации, и научные положения, выносимые на защиту, являются новыми по получению параметров качества обработанных поверхностей и служат основой разработки новых технологий реверсивно-струйной очистки поверхностей стальных листов.

4. Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, обоснованы и достоверны. Их обоснованность аргументирована тем, что теоретические исследования реверсивно-струйной очистки поверхностей стальных листов про-

водились с использованием результатов анализа современных процессов очистки стальных поверхностей от продуктов коррозии и основных положений теории гидродинамики, а экспериментальных исследований – с использованием проверенных практикой методик исследований и методов обработки экспериментальных данных.

Достоверность заключительных выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается тем, что полученные теоретические результаты согласуются с полученными экспериментальными данными. Результаты диссертации апробированы на научно-технических конференциях, достаточно полно опубликованы автором в статьях в рецензируемых научных изданиях и материалах конференций. Ссылки на собственные публикации даны во всех пунктах заключительных выводов.

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

Научная значимость полученных результатов диссертации состоит в:

- разработке физико-математической модели процесса реверсивно-струйной обработки стальных листов от продуктов коррозии, учитывающую влияние скорости струи, коэффициента обжатия струи, физико-механических свойств разрушаемого материала (предел прочности, плотность) на силовой режим процесса и позволяющую определить минимальное давление разрушения слоя продуктов коррозии на очищаемой поверхности;

- решении вариационной задачи по минимизации потерь напора в потоке жидкости, проходящей через коническое сопло струеформирующего устройства, и получении математической зависимости для расчета оптимальных углов конусности, находящихся в интервале значений $39-43^\circ$, и учитывающей скорость струи, вязкость и плотность рабочей суспензии, степень сужения конического сопла;

- определении рациональных значений коэффициента обжатия струи ($0,05 \div 0,08$), в диапазоне которых при одинаковых затратах мощности силовое воздействие реверсивной струи в 1,3–1,6 раза превышает воздействие струи с радиальным растеканием потока по очищаемой поверхности. Впервые установлено, что максимальное давление на очищаемой поверхности обеспечивается при коэффициенте обжатия струи 0,063 и расстоянии сопла до очищаемой поверхности 8 мм;

Практическая значимость результатов исследования заключается в разработке технологии реверсивно-струйной обработки в три этапа, отличающиеся составом рабочих суспензий на основе технической воды. На первом этапе производится очистка поверхности от продуктов коррозии, окалина, жировых отложений и загрязнений, поэтому в составе суспензии содержится речной песок. На втором этапе производится последующая промывка поверхности реверсивной струей чистой воды. На третьем (завершающем) этапе обработка поверхности производится суспензией, содержащей бентонитовую глину и кальцинированную соду, что обеспечивает наряду с очисткой поверхности снижение ее шероховатости по параметру шероховатости Ra до ($2 \div 4$) мкм и формирование на

обработанной поверхности пленочного антикоррозионного покрытия толщиной 6–9 мкм с низкой отражательной способностью, которое обеспечивает повышение скорости лазерной резки стального листового проката с высоким качеством реза.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований позволяют производить расчет основных параметров насосного оборудования (давление, подача, мощность), предназначенного для реализации технологии реверсивно-струйной обработки.

Экономическая значимость. Разработанная технология реверсивно-струйной обработки была апробирована в условиях СООО «Элезер» и ОАО «Амкодор–Можа» вместо заводской технологии методом дробеструйной очистки при изготовлении деталей ОЗС-100.01.01.163 «Плита» и НЗ-100.01.13.101 «Полоса» на лазерном комплексе Nuper Gear 510 (Япония). Суммарный экономический эффект от использования технологии реверсивно-струйной обработки на указанных предприятиях за счет повышения в 1,2–1,3 раза скорости лазерной резки и соответственно производительности труда составил 10 707,97 BYN в ценах 2018 г.

Социальная значимость полученных результатов состоит в обеспечении чистоты на рабочем листе и повышении культуры производства при проведении очистных работ по технологии реверсивно-струйной обработки стального листового проката. Социальный эффект достигается за счет того, что вместо небезопасной дробеструйной очистки при реверсивно-струйной обработке обеспечивается сбор в корпусе устройства всего объема использованной для очистки суспензии с последующей его закачкой в отдельную емкость для проведения процесса регенерации.

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

6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати.

Результаты диссертации опубликованы в 17 научных работах, в том числе: 1 монография (в соавторстве), 5 статей в изданиях, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, 11 статей, тезисов и докладов в сборниках материалов международных научных конференций. Получено 6 патентов на изобретения.

В опубликованных материалах в полной мере отражено основное содержание диссертации, что соответствует требованиям ВАК Беларуси.

7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК.

Диссертация и автореферат написаны в соответствии с требованиями к научно-техническим трудам, содержат качественно выполненные рисунки, схемы, копии снимков, раскрывающие достаточно полно излагаемый материал. Текстовая и графическая части диссертации и автореферата выполнены в соответствии с требованиями Инструкции ВАК к оформлению диссертаций. Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации и ее

основным выводам и не содержит информации, которая отсутствует в диссертации.

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

Уровень решенных в диссертации задач характеризует ее автора как сложившегося специалиста в области абразивной обработки поверхностей деталей из стального проката. Соискатель способен ставить и решать актуальные научные и прикладные задачи, обобщать и анализировать известные и полученные результаты. Это свидетельствует о том, что научная квалификация Жук Андрея Николаевича соответствует ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки.

9. Замечания по диссертации.

1. При анализе современных процессов очистки стальных поверхностей от продуктов коррозии (раздел 1.1) не рассмотрен способ виброабразивной обработки. Результаты анализа целесообразно было бы свести в таблицу с указанием их достоинств и недостатков.

2. Иллюстративный материал диссертации в ряде мест (глава 3 и 4) пересыщен графиками однопериодных зависимостей. Например, рисунки 3.2 и 3.3 (с.78 и 79) носят принципиально один и тот же информативный характер, поэтому один из них можно было бы не приводить.

3. Название раздела 4.2 (с. 98) предусматривает исследование силового струйного воздействия на плоские поверхности заготовок-препятствий различной формы. Однако, по сути рассматривается форма плоских торцевых поверхностей и исследуется силовое воздействие на них струи в зависимости от расстояния сопла до этих поверхностей, различных величин давления на входе в сопло и др. параметров.

4. В разделе 4.3 (с. 104) зависимости на рисунках 4.9 и 4.10 желательно было бы представить через обобщенный показатель – плотность суспензии, а не через процентный состав входящих в нее компонентов, так как плотность суспензии является основным параметром, определяющим скорость движения струи.

5. Производительность процесса реверсивно-струйной обработки оценивалась величиной массы материала, снятого с поверхности, или величиной обработанной площади в единицу времени. Производительность следовало бы оценивать величиной съема материала в единицу времени на единице площади.

6. В разделе 4.4 не указан период времени, за который были достигнуты указанные на рисунке 4.18 (с.113) величины параметра шероховатости поверхности.

7. В диссертации отсутствуют исследования механизма формирования топографии поверхности при реверсивно-струйной обработке, имея ввиду, что

удар абразивных частиц о поверхность может приводить как к возникновению на ней кратера (эрозия поверхности), так и к микрорезанию материала.

8. Непонятна цель интерпретации зависимостей, представленных на с. 77-78, в порядке, обратном поставленным задачам, т.е. переход от реверсивно-струйной очистки к струйной обработке с радиальным растеканием струи.

9. Для внедрения разработанной технологии на предприятиях дополнительно к приведенным в диссертации требованиям к оборудованию и режимам обработки в подразделе 5.2.2 следовало бы указать скорость перемещения струи (подача), усилие поджима головки к обрабатываемой поверхности с учетом компенсации реактивной силы, а также оборудование для их реализации.

10. В пункте 4 выводов по главе 3 имеется стилистическая неточность (выделена курсивом): «...для достижения на очищаемой поверхности струйных давлений разрушения в диапазоне убывающих значений $p_{\min} = 50-15$ МПа необходимо *неэффективно повышать скорость...*».

10. 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, самостоятельно подготовленной соискателем по специальности 05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки, которая по содержанию соответствует этой специальности и по ней же представляется к защите. Диссертация содержит новые обоснованные научные положения и достоверные результаты, отвечает требованиям ВАК Республики Беларусь, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Жук Андрей Николаевич достоин 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 слоя продуктов коррозии, учитывающую влияние кинематических параметров реверсивной струи (скорости $v_{\text{стр}}$, коэффициента обжатия λ), физико-механических свойств обрабатываемого материала (предела прочности σ_b и плотности ρ_m) на параметры силового режима (давление струи p и ее сила F , действующая на поверхность), устанавливающую теоретическую зависимость для расчета минимального давления разрушения p_{\min} слоя продуктов коррозии и механизм разрушения этого слоя под воздействием реверсивной струи рабочей суспензии, заключающийся в повышении в 1,4–1,7 раза струйного давления (18–50 МПа) при переходе от обычной очистки ($\lambda = 0$) к реверсивной ($\lambda > 0$) в диапазоне скоростей $v_{\text{стр}} = 100-195$ м/с и неизменной мощности, что позволяет рассчитывать режимы (давление на входе в сопло $p_{\text{вх}}$, расстояние L от торца сопла до обрабатываемой поверхности) технологии и параметры (подача, давление, мощность) 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 $\rho = (1,02–1,065) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, динамической вязкости $\mu = (0,29–0,47) \cdot 10^{-2} \text{ Па}\cdot\text{с}$, скорости реверсивной струи $v_{\text{стр}} = 140–240 \text{ м/с}$, степени сужения конического сопла $n = 0,09–0,54$ 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 в интервале чисел Рейнольдса $Re = 4 \cdot 10^3–3 \cdot 10^6$, в рамках которого осуществляется реализация технологии реверсивно-струйной обработки с максимальным струйным воздействием рабочей суспензии на очищаемую поверхность;

- результаты экспериментальных исследований влияния режимов и параметров реверсивно-струйной обработки на выходные параметры процесса, позволившие установить оптимальные значения коэффициента обжатия $\lambda = 0,05–0,08$, расстояния $L = 8–30 \text{ мм}$, скорости $v_{\text{стр}} = 175–202 \text{ м/с}$, составы рабочих суспензий, содержащих: для первого этапа технологии – речной песок ($K_{\text{р.п.}} = 8–10 \%$), полиакриламид ($K_{\text{п}} = 10^{-6}–10^{-2} \%$), техническую воду (остальное); для второго – техническую воду ($K_{\text{тв}} = 100 \%$); для третьего этапа – бентонитовую глину ($K_{\text{б}} = 2,7–4,2 \%$), кальцинированную соду ($K_{\text{к.с.}} = 0,2–1 \%$), техническую воду (остальное), обеспечивающие относительные величины упрочнения $H_{\mu}/H_{\mu 0} = 1,32–1,39$, не превышающей допустимую ($H_{\mu}/H_{\mu 0} = 1,4$), шероховатость поверхности $Ra = 2–4 \text{ мкм}$, давления $p_{\text{вх}} = 20–23 \text{ МПа}$, при которых обеспечиваются повышение силового воздействия и производительности в 1,3–1,6 раза с формированием на очищенной поверхности светопоглощающего защитного пленочного покрытия бентонитовой глины толщиной $\delta \geq (1,1–1,2)Ra$,

что в совокупности позволило разработать, апробировать и внедрить на 2-х предприятиях технологию для абразивной реверсивно-струйной обработки поверхности стального листового проката и защиты от коррозии, позволившую повысить скорость лазерной резки в 1,2–1,3 раза по сравнению с резкой листа после дробеструйной обработки поверхности.

Официальный оппонент:

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры технологии металлов
Белорусского государственного аграрного
технического университета, г. Минск



Подпись *Л. М. Акулович*
удостоверяю
Начальник ОК *А. В. Банун*

Л. М. Акулович

Отзыв поступил в

А. В. Банун

с отзывом о качестве