

Международной научно-технической конференции в рамках международной специализированной выставки «Машиностроение/Металлообработка–2022», (Минск, 7 апреля 2022 г.) / редкол.: В. К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск : Бизнесофсет, 2022. – С. 93–95.

3. Швец И. В. Анализ происходящих при лазерной закалке фазовых превращений и их влияние на изменение геометрии эвольвентных профилей зубчатых колес. Инновации в машиностроении: 100-летний опыт в науке, производстве, образовании. Сборник материалов 18-й Междун. науч.-техн. конф. «Наука-образованию, производству, экономике». Электронное научное издание. – Минск : БНТУ, 2021. – С. 33–38.

Поступила 23.11.2023

УДК 621.9.048: 621.373.8: 621.38

Шелег В. К., Шпакевич Д. А., Горбунов А. В., Лапковский А. С., Луцко Н. И.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ ОЧИСТКИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ОТ ПРОДУКТОВ КОРРОЗИИ

Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Беларусь

*В последние годы возросла потребность в автоматизации технологий, в частности, лазерных, для очистки металлоизделий от слоев окалины и ржавчины с целью улучшения энергоэффективности обработки. Для выполнения этого целесообразно проводить как расчеты интенсивности нагрева слоев, так и экспериментальную оптимизацию режимов лазерной очистки (ЛО). В данном исследовании проведено комбинированное определение параметров энергоэффективности ЛО от поверхностной окалины для широко используемого объекта – углеродистых сталей. Было установлено, что в диапазоне скоростей сканирования лазерного луча  $V$  от 0,4 до 2,0 м/с практически отсутствует влияние такого входного параметра, как частота импульсов лазерного излучения (ЛИ)  $f$ , на измеряемую производительность очистки. Как перспективные для дальнейшего использования изучены режимы ЛО при параметрах:  $V = 2,0$  м/с, диаметр пучка ЛИ на поверхности  $d_{\text{Л}} = 50$  мкм и частота  $f = 37$  кГц (что задает коэффициент скважности ЛИ  $S \approx 200$ ). При этом достигается высокая производительность очистки, при которой за один проход толщина удаляемого слоя близка к 6,5 мкм при средней длительности нагрева каждого участка слоя окалины  $t \approx 0,025$  мс. Сделанная кинетическая оценка скорости нагрева слоев окалины в воздушной среде в режиме проплавления окалины под пятном ЛИ (с допущением ее состава как  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) позволила провести анализ эмпирических параметров очистки и он выявил, что энергозатраты для оптимального экспериментального режима и одного из расчетных режимов (отличающегося тем, что рассмотрен стационарный лазер СВ-типа) несколько различаются и равны 4,0 и 2,7 кВтч/(кг окалины), соответственно.*

**Введение и задача исследования.** Удаление окалины и ржавчины с помощью современных физико-технических методов, в частности, лазерных, как потенциально высокоэффективный и экологически чистый метод очистки корродированных металлических поверхностей, в последнее десятилетие активно изучается и постепенно внедряется в машиностроительной, судостроительной, горнодобывающей и других отраслях [1–10]. Однако пока эффективность данной группы технологий лазерной очистки (ЛО) признается сильно зависимой от эмпирических навыков операторов лазерных установок по распознаванию изменений в условиях удаления данных оксидных загрязнений, связанных с

нестабильными режимами очистки и термическими дефектами металлических поверхностей [1]. При этом факторы, влияющие на механизм удаления оксидных слоев и качество удаления, усложняют контроль и управление процессом в реальном времени в ходе операций ЛО, особенно при использовании в них современных ОКГ (оптических квантовых генераторов, т. е. лазеров) импульсного действия с высокой частотой импульсов и повышенной мощностью [2; 8–9]. В связи с этим в научной и промышленной литературе отмечается наличие к настоящему времени заметной потребности в автоматизации технологий ЛО изделий из сталей от загрязняющих слоев – окалины и ржавчины (как правило, пористых), – для предотвращения завышения времени очистки, которое может давать нежелательный эффект частичного оплавления уже очищенной от загрязнений поверхности стали и отрицательно влиять на общую энергоемкость технологического процесса металлообработки [1; 2; 7].

С учетом упомянутой ситуации в разработке технологий очистки, *как задача для данной работы* нами было выбрано проведение начального этапа исследования, в первую очередь, экспериментального, для определения параметров энергоэффективности лазерной очистки от поверхностной окалины для широко используемого производственного объекта – низкоуглеродистых конструкционных сталей. Для реализации этого целесообразно выполнить одновременно и теоретическую оценку интенсивности плавления и возможной абляции оксидного слоя при лазерном нагреве поверхности конструкционных сталей.

Принцип действия системы очистки основан на передаче лазерного излучения через систему зеркал от излучателя или оптическое волокно на линзу, где излучение фокусируется на очищаемую поверхность (рис. 1).

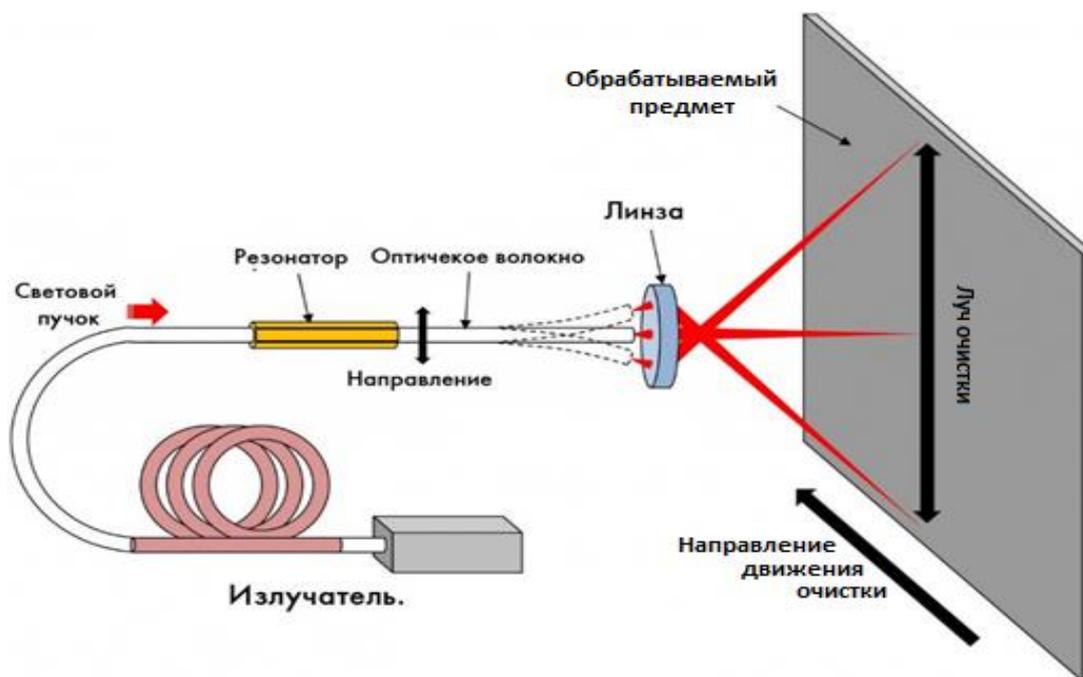


Рис. 1. Упрощенная схема экспериментальной системы лазерной очистки на основе импульсного оптоволоконного лазера

Под действием лазерного луча окалина нагревается, плавится и даже может частично испаряться. В результате происходит постепенное углубление поверхности и удаление слоя окалины. Глубина обработки зависит от множества параметров, к которым

относятся как физические свойства обрабатываемого материала, так и параметры установки лазерной обработки.

Технологическими параметрами, влияющими на процесс плавления и удаления материала с поверхности под действием лазерного излучения (ЛИ) от лазеров нестационарного действия, являются: скорость сканирования луча, частота генерации импульсов излучения, размеры обрабатываемого участка материала, количество проходов лазера и параметры фокусирующей линзы. Как промежуточную цель работ можно рассматривать поиск закономерностей ЛО, которые необходимо выявить для достижения эффективного удаления обрабатываемого слоя. В группу варьируемых параметров целесообразно включить следующие: скорость сканирования луча по поверхности, частоту ЛИ, а также шаг заливки (расстояние между осями параллельных «витков змеевиковидной траектории» движения лазерного луча по поверхности), который определяет степень перекрытия при сканировании луча по слою.

**Условия проведения экспериментов.** Как материал образцов для опытов по ЛО использована сталь марки Ст3 (с содержанием С – 0,14–0,22 вес. %, Si – 0,15–0,3, Mn – 0,4–0,65 и Fe ~97 %). Размер пластинчатых образцов составлял – 90 x 70 мм, их толщина ~4 мм.

Для управляемых (входных) параметров исследуемого процесса ЛО в ходе экспериментов были выбраны интервалы:  $v$  – скорость сканирования луча – 400–2000 мм/с;  $h$  – ширина заливки – от 5 до 40 мкм;  $f$  – частота – в диапазоне от 30 кГц до 60 кГц. Размер обрабатываемых участков на поверхности образцов – 10 x 10 мм. Лазер импульсного типа использовался в экспериментах в связи с тем, что по опыту разработок в данной области [1–10] именно такой вариант более экономичен при нагреве слоев металлических и керамических материалов с фазовыми переходами. При использовании таких лазеров возможны три основных физико-химических механизма очистки от слоев на металлической подложке при ЛО (реализующиеся в различной степени в зависимости от режима лазерного облучения материала): тепловое воздействие с нагревом до температуры плавления слоя (после чего возможен унос капель расплава) или до более высокой, создание термоупругих напряжений в слое и механизм генерации слоя околоповерхностной лазерной плазмы с локальной ударной волной [11].

Перед началом и после каждого эксперимента по лазерному удалению окалины проводилось измерение толщины образцов с помощью микрометра. В качестве оборудования для проведения исследования использована система лазерной очистки с лазером, апробированным ранее для технологии лазерной маркировки стальных изделий, и имевшая характеристики, приведенные в табл. 1. В данной системе применялась линза OPEX F-theta Scan Lens SL-1064-112-163G, обеспечивавшая фокусное расстояние 163,0 мм и размер пятна в точке фокусировки ЛИ – 32–54 мкм, что равно диаметру  $d_{LI}$ . Фотографии образцов с окалиной до проведения очистки и после нее даны на рис. 2.

**Экспериментальные результаты.** На рис. 3 и 4 представлены полученные в экспериментах зависимости: для производительности очистки (в мм/мин) от скорости сканирования лазерного луча вдоль обрабатываемой поверхности, а также для производительности очистки от «плотности заливки» (т. е. шага заливки в змеевиковидной траектории при сканировании лазерного луча).

Таблица 1 – Параметры экспериментальной лазерной системы с излучателем RFL-P30QB

Частота, кГц	Длительность Импульса, нс	Выходной диаметр, мм	Энергия в импульсе, мДж	Круговая длина волны ЛИ, нм
30–60	120–150	6–8	1,0 (при 30–37 кГц)	1060–1085

Как пример полученных экспериментальных результатов, в т. ч. параметров энергоэффективности, ниже в табл. 2 приведены данные для одного из высокопроизводительных режимов лазерной очистки, в сопоставлении с параметрами рассчитанного нами по приближенной кинетической модели режима очистки (в упрощенной постановке, при допущении использования лазера не импульсного, а стационарного действия (CW-типа) [6, 12]). По результатам опытов было найдено, что в диапазоне скоростей сканирования ЛИ по поверхности от 0,4 м/с до 2,0 м/с практически отсутствует влияние такого входного параметра, как частота импульсов лазерного излучения  $f$ , на измеряемую на выходе производительность очистки. С учетом этого, как перспективный для дальнейшего применения может быть рекомендован режим очистки с параметрами: скорость сканирования луча  $v = 2,0$  м/с, ширина заливки  $h = 0,01$  мм и частота импульсов излучения  $f = 37$  кГц. При этом сочетании режимных параметров достигнута производительность очистки 0,036 мм/мин. В таком режиме за один проход толщина удаляемого слоя окалина составляет усредненно 6,5 мкм в условиях, сочетающих такие уровни параметров, как  $v = 2,0$  м/с, диаметр пучка ЛИ на поверхности  $d_{LI} = 50$  мкм,  $f = 37$  кГц (соответствует коэффициенту скважности ЛИ  $S = 200,2$ ) и длительность импульса  $t_p \approx 135$  нс. В данном режиме средняя длительность нагрева каждого участка окалина (под пятном ЛИ) составляет  $t \approx 0,25$  мс.



Рис. 2. Вид стальных пластинчатых образцов со слоем окалина до лазерной обработки (а) и после ее проведения на локальных участках (б)

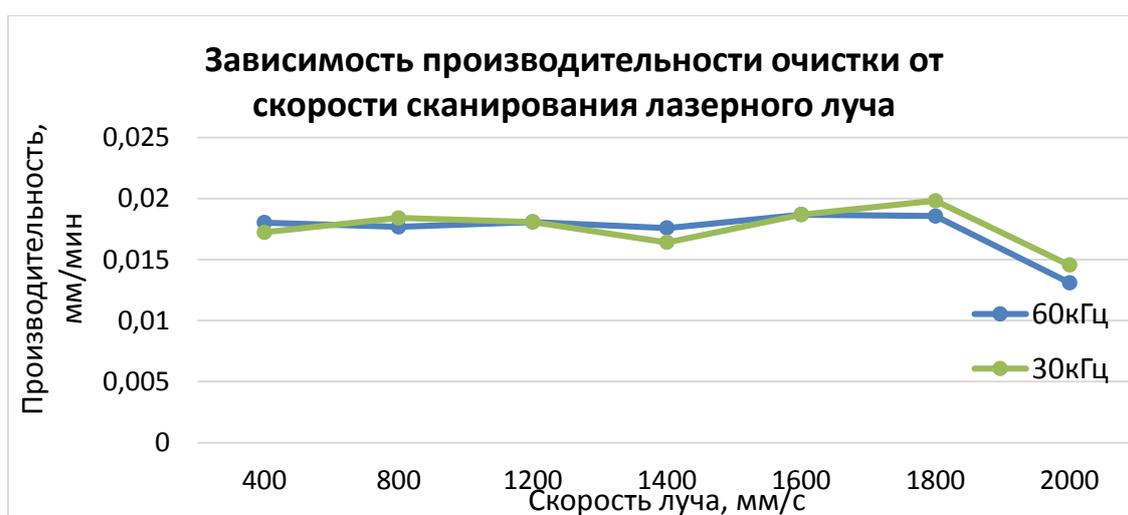


Рис. 3. Экспериментальная зависимость производительности очистки от линейной скорости сканирования лазерного луча

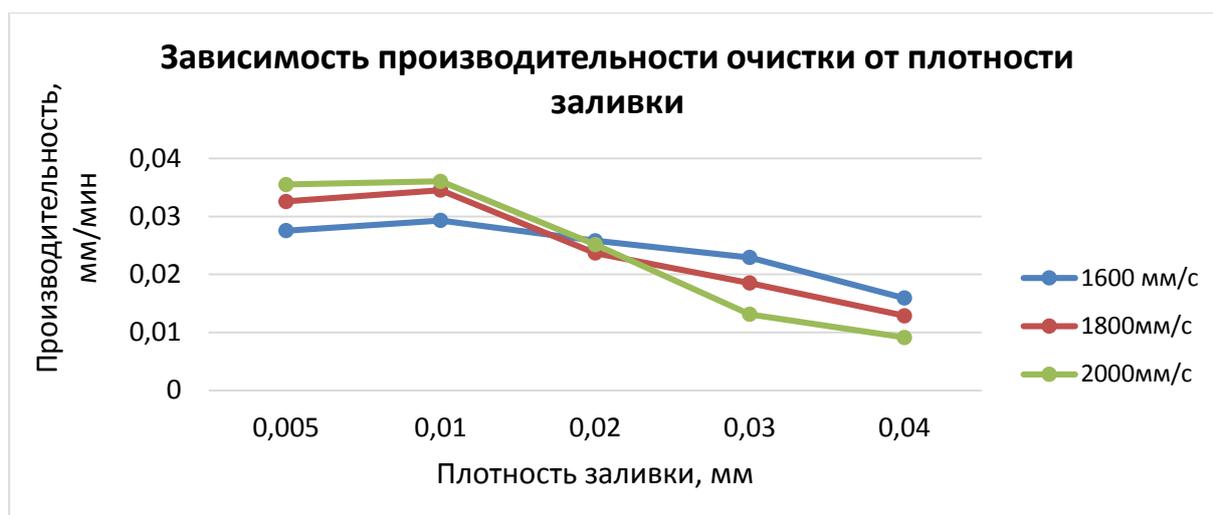


Рис. 4. Экспериментальная зависимость производительности очистки от «плотности заливки» при сканировании

Таблица 2 – Значения начальных/входных и выходных параметров для выбранного расчетного режима ЛО слоя окалины в сравнении с высокопроизводительным экспериментальным режимом ЛО

№	Параметр	Модельный вариант (расчет)	Экспериментальный вариант
Входные технологические параметры			
1	Состав слоя окалины	$Fe_3O_4$	$Fe_3O_4, Fe_2O_3$ (примесь)
2	Длина волны ЛИ $\lambda$ , нм	1064	~1070
3	Диаметр пучка ЛИ $d_{LI}$ , мкм	400,0	50,0
4	Площадь пятна ЛИ $s$ , (м <sup>2</sup> )*10 <sup>7</sup>	1,257	0,0196
5	Толщина слоя окалины $\delta$ , мкм	15,0	6,5
6	Пористость слоя окалины $p$ , %	20,0	~20,0 (оценочно)
7	Плотность теплового потока ЛИ $q_0$ , (Вт/м <sup>2</sup> )	$7,175 \cdot 10^8$	$1,413 \cdot 10^{10}$
8	Длительность нагрева участка (пятна ЛИ) $t$ , мс	0,8188	0,025
9	Степень перекрытия (нахлестки) при сканировании луча ЛИ по поверхности, %	0	0 (условно)
Выходные параметры			
1	Температура на границе окалины и стали $T_2$ , К	1870	$\geq 1870$
2	Линейная скорость перемещения пучка ЛИ вдоль поверхности $v$ , м/с	0,489	2,00
3	Скорость удаления слоя $G_{lw}$ , дм <sup>2</sup> /с	0,0195	0,0100
4	Скорость нагрева слоя $HR_{min}$ ( $\approx (T_m - T_0)/t$ ), К/с	$1,92 \cdot 10^6$	$6,29 \cdot 10^7$
5	Тепловая мощность пучка ЛИ $P_0$ , Вт	90,17	27,75
6	Число Пекле $Pe$ (нормированная по $a$ скорость обработки [13]) для условий с $T = T_m$	254,1	130,1
7	Энергозатраты $EC_0$ , кВтч/м <sup>2</sup> окалины	0,163	0,000521
8	Энергозатраты $EC'_{0w}$ , кВтч/(кг окалины)	2,67	4,01 (0,0196 – усредненные затраты с учетом значения $S$ )

Для интерпретации экспериментальных данных нами была проведена теоретическая оценка интенсивности плавления и возможной абляции оксидного слоя при лазерном нагреве поверхности конструкционных сталей.

**Определение параметров энергоэффективности на основе расчета кинетики нагрева и плавления слоя окалины. Сравнение с экспериментом.** Запишем уравнение энергетического баланса для стационарного процесса лазерной очистки окалины с поверхности стали, с учетом потерь на побочные процессы нагрева (твердой и газовой сред, окружающих нагреваемый, т. е. целевой с точки зрения технологии, слой оксидного материала) и выражая суммарные энергозатраты процесса очистки под действием ЛИ как  $E_w$  (в Дж на 1 кг нагреваемого материала, т. е. окалины):

$$E_w = Q_w + E_w \cdot (1 - A) + Q_{hl-1} + Q_{hl-2}. \quad (1)$$

В уравнении (1)  $A$  это коэффициент поглощения (оптический) ЛИ поверхностью материала, усредненный для температурного диапазона процесса ЛО. Энергозатраты  $Q_w$  (в Дж/кг) на нагрев удаляемого слоя окалины от исходной (298 К) до конечной температуры (задаваемой по технологическим соображениям, например, точки плавления ( $T_m$ ) или испарения слоя), т. е. энергозатраты только в целевой процесс нагрева окалины, – приближенно можно найти по выражениям, в которые входят тепловые эффекты фазовых переходов и затраты тепла на нагрев до переходов [14].

Кондуктивные потери тепла в окружающие (квази-цилиндрическую область нагрева окалины) слои материалов – окалину и стальную подложку характеризуются в упрощенном виде следующей функцией

$$Q_{hl-1} = f(a_I, a_{II}, T, t), \quad (2)$$

а потери тепла в окружающую область нагрева относительно холодный газ по конвективно-излучательному механизму в упрощенном виде это:

$$Q_{hl-2} = f(\alpha, \varepsilon, T, t), \quad (3)$$

где  $a_I$ ,  $a_{II}$ ,  $\alpha$  и  $\varepsilon$  – это два коэффициента температуропроводности материалов в твердом состоянии (для окалины и для стальной подложки), коэффициент конвективной теплоотдачи от нагретой поверхности окалины к окружающему газу и интегральная излучательная способность материала поверхности, соответственно;  $T$  – определяющая температура нагретой поверхности;  $t$  – время нагрева площади пятна ЛИ (т. е. экспозиция ЛИ).

Оценка интенсивности лазерного нагрева в условиях процесса ЛО может быть проведена на основе упрощенной тепловой модели для режимов с варьируемой мощностью излучения, по аналогии с использовавшейся ранее в расчетах лазерного оплавления материалов, а также методики, апробированной для испарительной абляции органических пленок на металлах. При этом допустимо использовать стандартное решение задачи теплопроводности в полуограниченном теле (окалине в нашем случае) с граничным условием второго рода (рассматривавшееся в моделях локального нагрева твердых тел) [15–16], с применением некоторых уточненных нами для  $T \rightarrow T_m$  теплофизических свойств фаз оксидов железа и стальной основы.

В ряде важных случаев (в т. ч. при ЛО) тепловой поток, действующий на участок поверхности полуограниченного твердого тела можно представить в виде тонкого кругового источника тепла. При этом можно рассматривать нестационарную осесимметричную задачу с тепловым потоком постоянной интенсивности  $q$ , равномерным внутри области радиуса  $R$  на поверхности. Для краевой задачи по определению распределения температуры  $T(r, z, t)$  в полупространстве, где нагрев происходит от внешнего постоянного

источника тепла, можно использовать одно из стандартных аналитических решений данной двумерной задачи для нестационарного поля температур в полупространстве (с граничным условием) – имитаторе твердых материалов:

$$\Theta(\rho, x, \tau) = 0,5 \int_0^{\infty} (J_0(\lambda \rho) \cdot J_1(\lambda)) \cdot \left[ (exp(-\lambda x)) \cdot erfc\left(\frac{x}{2\tau^{0,5}} - \lambda \cdot \tau^{0,5}\right) - (exp(\lambda x)) \cdot erfc\left(\frac{x}{2\tau^{0,5}} + \lambda \cdot \tau^{0,5}\right) \right] \frac{d\lambda}{\lambda} \cdot (4)$$

В уравнении обозначены величины: тепловой критерий Фурье для процесса теплопроводности в материале  $Fo = \tau = (a \cdot t/R^2)$ ;  $a$  – коэффициент температуропроводности материала;  $t$  – время;  $R$  – радиус зоны нагрева (т. е. пятна ЛИ на поверхности); безразмерные симплексы для аксиальной и радиальной координат (т. е. глубины  $z$  и координаты по радиусу  $r$  пятна лазерного луча на поверхности) области нагрева в материале:  $x = z/R$  и  $\rho = r/R$ . Путем решения уравнения типа (4) находятся значения основных величин, характеризующих процесс, в т. ч. времени нагрева  $t^*$ , требуемого для плавления окалина в зоне под пятном ЛИ, и теплового потока от ЛИ  $q^*$ .

Предварительная кинетическая оценка условий нагрева слоя показала, что детальный расчет абляционных режимов (для температурной области существенно выше точек плавления оксидных и металлических фаз) затруднен из-за недостатка опубликованных теплофизических данных по свойствам фаз, возможных в окалине. Для области до температур плавления ситуация является более благоприятной для организации кинетического моделирования процессов нагрева железосодержащих окисленных слоев.

Перед выполнением кинетических расчетов мы провели специальный анализ данных по теплофизическим свойствам существующих в слоях металлооксидной окалины и на границе с ней веществ [17]. Сравнение рассчитанных нами (по опубликованным значениям других свойств с использованием экстраполяции) значений температуропроводности  $a$  для рассматриваемых видов компонентов окалины с имеющимися в современной литературе опытными значениями этого параметра показывают наличие отличий и для оксидных и для металлических фаз, причем достигающих для твердых веществ уровня в 50 % и выше. Данная процедура позволяет заполнить пробел в области  $T = 1600–1800$  К, имевшийся в опубликованных массивах данных по температуропроводности железосодержащих фаз  $a$ . При этом, по проведенной нами оценке (с использованием термодинамической методики с помощью кода «TERRA» (МГТУ) [14]), к термодинамически стабильным формам конденсированной фазы в условиях лазерного нагрева типичной окалины на углеродистой стали (со стехиометрией, близкой к оксиду  $Fe_3O_4$ ) при температурах плавления и выше них относятся оксиды  $Fe_3O_4$  (твердый) и  $FeO$  (расплав) и металлическое железо (в твердом и жидком состояниях), что согласуется с известными опытными данными.

Сравнение выходных технологических параметров лазерного процесса, в частности показателей его энергоемкости (табл. 2), показывает, что значения такого параметра, как энергозатраты на единицу веса удаляемой окалины (условно принятой по составу как  $Fe_3O_4$ )  $EC'_{0w}$  (в кВтч/(кг окалины)) для экспериментального режима (с использованием импульсного лазера) и расчетного режима несколько отличаются и составляют соответственно 4,01 (по энергии в импульсе) и 2,67. Этот факт в дальнейшем будет целесообразно анализировать дополнительно, учитывая, что, обычно, режимы лазерного нагрева с помощью ОКГ нестационарного действия (т. е. импульсных) считаются более технологически эффективными, в т. ч. по энерговыкладу, по сравнению с режимами нагрева неорганических материалов CW-лазерами.

### **Выводы.**

1. По результатам экспериментов в режимах очистки образцов из углеродистой стали марки Ст3 от слоя прокатной оксидной окалины, для дальнейшей апробации и производственного использования может быть рекомендован режим очистки, использующий следующие уровни входных параметров импульсного лазера (генерирующего излучение с энергией импульса  $\sim 1$  мДж) для получения выходной производительности очистки на уровне 0,036 мм/мин: скорость сканирования лазерного луча по поверхности  $v = 2,0$  м/с, межосевое расстояние между соседними «витками» траектории луча вдоль поверхности  $h = 0,01$  мм и частота импульсов лазерного излучения  $f = 37$  кГц. При данном уровне производительности очистки за один проход толщина удаляемого слоя составляет около 6,5 мкм окалины в условиях, сочетающих  $v = 2,0$  м/с, диаметр пучка ЛИ на поверхности  $d_{LI} = 50$  мкм и  $f = 37$  кГц (что обеспечивает коэффициент скважности излучения  $S = 200,2$ ).

2. Проведен анализ опубликованной экспериментальной информации по ряду физических свойств оксидов железа и стальной основы (при давлении 0,1 МПа). Систематизированные и дополненные сведения по свойствам компонентов дают дополнительную возможность моделирования лазерной термообработки и очистки сталей. Проведен оценочный кинетический расчет процесса нагрева слоев окалины на стали в режиме полного проплавления окалины под пятном лазерного облучения для двух вариантов фаз ( $Fe_3O_4$ ,  $Fe$ ), возможных в условиях окислительной и восстановительной газовых сред.

3. Анализ найденных параметров очистки, в частности ее энергоемкости, выявил, что удельные энергозатраты  $EC'_{ow}$  для высокопроизводительного экспериментального режима и расчетного режима (отличающегося использованием не импульсного лазера, а СВ-типа) несколько различаются по уровню и составляют – 4,0 и 2,7 кВтч/(кг нагреваемой до плавления окалины), соответственно.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Xie, X. A. New monitoring method for metal rust removal states in pulsed laser derusting via acoustic emission techniques / X. Xie, Q. Huang, J. Long, Q. Ren, W. Hu, S. Liu // Journal of Materials Processing Technology. – 2020. – Vol. 275, Article ID 116321.
2. Zaheer, U. Evaluation of the laser cleaning efficacy of Q235 steel using laser-induced breakdown spectroscopy / U. Zaheer, S. Din, C. Shi, Q. Zhang, Y. Wei, W. Zhang // Metals. – 2023. – Vol. 13, no. 1: 59.
3. Kim, J.-E. A. Study on the application of laser cleaning on the weld of the gas fuel supply pipe for DF engine / J.-E. Kim, P.-S. Kim, J.-M. Lee, H.-S. Choe, J.-D. Kim // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11, no. 24: 11832.
4. Софронов, В. Л. Исследования по лазерной дезактивационной очистке поверхностей металлов, загрязненных радиоактивными материалами / В. Л. Софронов, Е. Ю. Карташов, С. А. Ткачук и др. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333, № 11. – С. 171–182.
5. Wang, X. A. Novel de-rusting method with molten salt precleaning and laser cleaning for the recycling of steel parts / X. Wang, J. Li, L. Wang, X. Jia, M. Hong, Y. Ren, M. Ma // Clean Technologies and Environmental Policy. – 2021. – Vol. 23, no. 5. – Pp. 403–1414.
6. Ogbekene, Y. F. Laser cleaning of grey cast iron automotive brake disc: rust removal and improvement in surface integrity / Y. F. Ogbekene, P. Shukla, Y. Zhang, X. Shen, S. Prabhakaran, S. Kalainathan, K. Gulia, J. Lawrence // International Journal of Peening Science and Technology. – 2018. – Vol. 1, no. 2. – Pp. 155–180.
7. Ren, Z. Improvement of corrosion resistance of carbon steel by laser derusting microstructuring / Z. Ren, L. Shi, H. Chen, C. Wu // Optical Engineering. – 2019. – Vol. 58, no. 5: 056104.

8. Ma, M. Investigation of the surface integrity of Q345 steel after Nd:YAG laser cleaning of oxidized mining parts / M. Ma, L. Wang, J. Li, X. Jia, X. Wang, Y. Ren, Y. Zhou // *Coatings*. – 2020. – Vol. 10, no. 8: 716.
9. Deschênes, J. M. Fraser, A. Empirical study of laser cleaning of rust, paint, and mill scale from steel surface // *Materials Processing Fundamentals 2020* / J. Lee, S. Wagstaff, G. Lambotte (eds.). The Minerals, Metals & Materials Series. – Springer, Cham, Switzerland, 2020. – Part V. – Pp. 189–201.
10. Ren, Y. Stepwise removal process analysis based on layered corrosion oxides / Y. Ren, L. Wang, M. Ma, W. Cheng, B. Li, Y. Lou, J. Li, X. Ma // *Materials*. – 2022. – Vol. 15, no. 21: 7559.
11. Han, J. Laser effects based optimal laser parameter identifications for paint removal from metal substrate at 1064 nm: a multi-pulse model / J. Han, X. Cui, S. Wang, F. Sha, G. Feng, G. Deng, R. Hu // *Journal of Modern Optics*. – 2017. – Vol. 64, no. 19. – Pp. 1–13.
12. Song, K. H. Surface removal of stainless steel using a single-mode continuous wave fiber laser to decontaminate primary circuits / K. H. Song, J. S. Shin // *Nuclear Engineering and Technology*. – 2022. – Vol. 54, Issue 9. – Pp. 3293–3298.
13. Li, C. Analysis of striation formation and suppression strategy on upper edge of cutting surface in laser cutting / C. Li, D. You // *World Journal of Engineering and Technology*. – 2018. – Vol. 6. – Pp. 201–213.
14. Gorokhovski, M. Plasma technologies for solid fuels: experiment and theory / M. Gorokhovski, E. I. Karpenko, F. C. Lockwood, V. E. Messerle, B. G. Trusov, A. B. Ustimenko // *Journal of the Energy Institute*. – 2005. – Vol. 78, no. 4. – Pp. 157–171.
15. Carslaw, H. S. *Conduction of heat in solids* / H. S. Carslaw, J. C. Jaeger – Oxford University Press, 1986 (2nd edition). – ISBN-10:0198533683, ISBN-13:978-0198533689. – 520 p.
16. Pinsker, V. A. Unsteady-state temperature field in a semi-infinite body heated by a disk surface heat source / V. A. Pinsker // *High Temperature*. – 2006. – Vol. 44, no. 1. – Pp. 129–138.
17. Девойно, О. Г. Формирование базы данных по физическим свойствам компонентов оксидной окалины для теоретической оценки эффективности лазерной очистки углеродистых сталей и родственных технологий / О. Г. Девойно, А. В. Горбунов, А. С. Лапковский, Н. И. Луцко // *Наука и техника*. – 2024. – Т. 23, № 3. –10 с. (в печати).

*Поступила 01.12.2023*