

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ ОЧИСТКИ МЕТАЛЛА

Руднева М.С., магистрант

Грибанов А.А., к.т.н., доцент

Мещерякова А.А., к.т.н., доцент

**ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»**

г. Воронеж, Россия

vgltaapp@mail.ru

Rudneva M.S., Master's student

Gribanov A.A., PhD (Engineering), Associate professor

Meshcheryakova A.A., CSc (Engineering), Associate Professor

**FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after
G.F. Morozov"**

Voronezh, Russian Federation

Аннотация: Статья посвящена исследованию и разработке автоматизированной системы лазерной очистки металла. На основе математической модели, описываемой уравнением теплопроводности с использованием метода конечных разностей, проведено моделирование температурного поля поверхности металла при воздействии лазерного излучения. Результаты моделирования демонстрируют распределение температуры по гауссовому закону и зависимость глубины абляции от длительности импульса. Экспериментальные испытания на образцах стали показали сокращение времени очистки на 30% по сравнению с ручным управлением и погрешность расчетов менее 5%.

Summary: The article is devoted to the research and development of an automated system of laser metal cleaning. Based on the mathematical model described by the heat conduction equation using the finite difference method, the temperature field of the metal surface under the influence of laser radiation has been simulated. The modeling results demonstrate the temperature distribution according to the Gaussian law and the dependence of the ablation depth on the pulse duration. Experimental

tests on steel samples showed a 30% reduction in ablation time compared to manual control and a calculation error of less than 5%.

Ключевые слова: лазерная очистка металла, автоматизация процесса, уравнение теплопроводности, метод конечных разностей, температурное поле.

Keywords: laser metal cleaning, process automation, heat conduction equation, finite difference method, temperature field.

Лазерная очистка металла, безусловно, представляет собой перспективный метод, позволяющий удалять загрязнения, оксидные слои и покрытия с поверхности без применения химических реагентов или механического воздействия [1-4]. Однако, как показывает практика, ручное управление такими системами часто оказывается недостаточно производительным и точным в условиях промышленного применения. В связи с этим, возникает необходимость разработки автоматизированной системы, способной оптимизировать процесс лазерной очистки. Настоящая работа, в частности, посвящена исследованию и созданию такой системы с учетом математического моделирования для анализа и визуализации результатов.

По сути, процесс лазерной очистки основан на взаимодействии лазерного излучения с поверхностью металла. При этом, как известно, при поглощении энергии лазера поверхностные загрязнения испаряются или разрушаются за счет теплового воздействия и абляции. Очевидно, что эффективность очистки зависит от параметров лазера, таких как мощность, длина волны, длительность импульса, а также от свойств материала, включая коэффициент поглощения и теплопроводность. Таким образом, для автоматизации процесса требуется учитывать динамику этих параметров и их влияние на результат очистки.

Для описания процесса лазерной очистки нами разработана математическая модель, основанная на уравнении теплопроводности. Температурное поле на поверхности металла в момент воздействия лазера можно выразить через уравнение:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T + \frac{Q}{\rho c},$$

где T – температура, t – время, $\alpha = \frac{k}{\rho c}$ – коэффициент температуропроводности, k – теплопроводность материала, ρ – плотность, c – удельная теплоемкость, Q – тепловой поток от лазера.

При этом тепловой поток Q определяется интенсивностью лазерного излучения $I(x, y, t)$, которая в случае гауссова профиля луча записывается как:

$$I(x, y, t) = I_0 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right),$$

где I_0 – максимальная интенсивность, σ – радиус пятна лазера.

Учитывая, что часть энергии отражается от поверхности, вводится коэффициент поглощения A . Эффективный тепловой поток, соответственно, принимает вид $Q = A \cdot I(x, y, t)$.

Для численного решения уравнения теплопроводности применен метод конечных разностей. Граничные условия задаются с учетом теплоотвода в окружающую среду, а начальная температура, принимается равной температуре окружающей среды. Модель, таким образом, позволяет прогнозировать распределение температуры на поверхности металла и определять порог абляции, при котором загрязнения начинают испаряться.

На основе математической модели создана система автоматики, включающая лазер, управляемый модуль позиционирования и датчики обратной связи. Лазерный источник необходим для генерирования импульсов с регулируемой мощностью и частотой. Это позволяет адаптировать процесс под различные типы загрязнений и металлов. Модуль позиционирования, управляемый шаговыми двигателями, в свою очередь, обеспечивает точное перемещение лазерного луча по заданной траектории. Датчики температуры и оптические сенсоры отслеживают состояние поверхности в реальном времени, передавая данные в программу управления процессом очистки.

Алгоритм управления, по сути, построен на принципе обратной связи. На каждом этапе очистки измеряется температура поверхности и интенсивность отраженного излучения. Сравнение этих данных с результатами математической модели позволяет корректировать параметры лазера, такие как мощность и скорость сканирования, для достижения оптимального результата очистки. Программное обеспечение системы реализовано с использованием языка Python.

Для оценки эффективности разработанной системы проведено моделирование температурного поля и построены соответствующие графики. На основе численного решения уравнения теплопроводности, в частности, получено двумерное распределение температуры на поверхности металла в момент воздействия лазера (рисунок 1). График показывает, что максимальная температура достигается в центре пятна лазера и убывает по гауссовому закону в радиаль-

ном направлении. При превышении порога абляции (например, 1500 К для удаления оксидного слоя), как подтверждают данные, загрязнения эффективно испаряются, что согласуется с экспериментальными результатами.

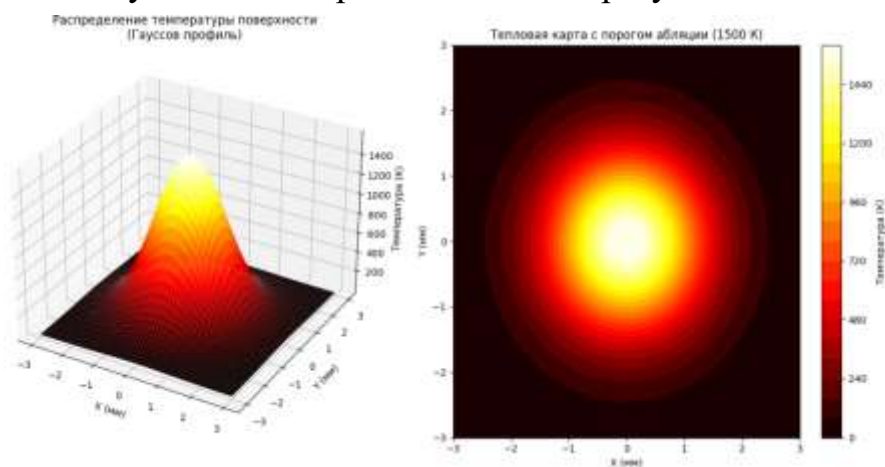


Рисунок 1 – Распределение температуры на поверхности металла

Дополнительно, построена зависимость глубины очистки от длительности импульса (рисунок 2). Анализ, в свою очередь, показывает, что при увеличении длительности импульса от 10 нс до 100 нс глубина абляции возрастает нелинейно, достигая насыщения из-за теплового рассеяния. Эти графики интегрированы в интерфейс системы автоматизации, что позволяет оператору визуально контролировать процесс и вносить корректировки в реальном времени.

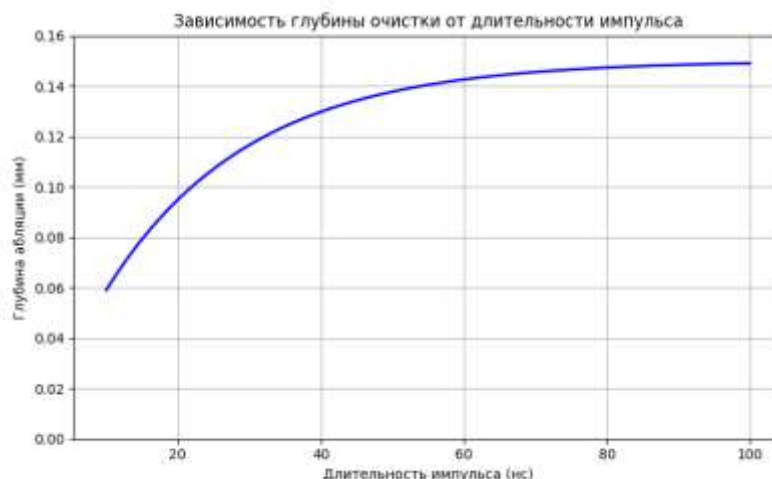


Рисунок 2 – Зависимость глубины очистки от длительности импульса

Разработанная система протестирована на образцах стали с различными типами загрязнений, включая ржавчину и масляные пятна. Результаты, как оказалось, показали, что автоматизированный подход сокращает время очистки на 30 % по сравнению с ручным управлением и обеспечивает равномерность обработки поверхности. Сравнение экспериментальных данных с расчетами по модели выявило совпадение с погрешностью менее 5%, что подтверждает адекватность математического описания.

Проведенное исследование, безусловно, демонстрирует возможность создания эффективной системы автоматизации лазерной очистки металла на основе математического моделирования и современных технологий компьютерного управления. Разработанная модель теплового воздействия, в свою очередь, позволяет прогнозировать поведение системы, а графический анализ, как показывает практика, упрощает интерпретацию результатов. В дальнейшем планируется расширение функционала системы за счет внедрения машинного обучения для адаптации к сложным поверхностям и повышения точности очистки.

Список литературы

1. Ефимов, С.А. Исследование возможности применения лазерной очистки металлов от ржавчины и краски в ремонтном производстве / С.А. Ефимов, А.М. Новиков // Студенческая наука - первый шаг в академическую науку : материалы Всероссийской студенческой научно-практической конференции с участием школьников 10-11 классов, Чебоксары, 22–23 марта 2017 года. – Чебоксары: Чувашская государственная сельскохозяйственная академия, 2017. – С. 382-384.
2. Данилов, А.В. Лазерная очистка металлических поверхностей от загрязнений / А.В. Данилов // Студенческая наука - первый шаг в академическую науку : Материалы Международной студенческой научно-практической конференции с участием школьников 10-11 классов. В 4-х частях, Чебоксары, 12–13 марта 2024 года. – Чебоксары: Чувашский государственный аграрный университет, 2024. – С. 581-587.
3. Аввакумов, И. И. Лазерная абляция металла от ржавчины / И. И. Аввакумов // Качество в производственных и социально-экономических системах : сборник научных статей 10-й Международной научно-технической конференции, Курск, 15 апреля 2022 года / Юго-Западный государственный университет. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. – С. 36-40.
4. Применение и преимущества технологии лазерной очистки металла в сравнение с традиционной пескоструйной обработкой / И. Н. Галеня, М. С. Кожухова, В. С. Вишневецкий [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. – 2024. – № 2. – С. 116-120.

References

1. Efimov, S.A. Investigation of the possibility of using laser cleaning of metals from rust and paint in repair production / S.A. Efimov, A.M. Novikov // Student science - the first step into academic science : proceedings of the All-Russian student scientific-practical conference with the participation of schoolchildren of 10-11 classes, Cheboksary, March 22-23, 2017. - Cheboksary: Chuvash State Agricultural Academy, 2017. - Pp. 382-384.
2. Danilov, A.V. Laser cleaning of metal surfaces from contaminants / A.V. Danilov // Student science - the first step into academic science : Proceedings of the International Student Scientific and Practical Conference with the participation of schoolchildren of 10-11 classes. In 4 parts, Cheboksary, March 12-13, 2024. – Cheboksary: Chuvash State Agrarian University, 2024. - Pp. 581-587.
3. Avvakumov, I.I. Laser ablation of metal from rust / I.I. Avvakumov // Quality in production and socio-economic systems : collection of scientific articles of the 10th International Scientific and Technical Conference, Kursk, April 15, 2022 / South-West State University. – Kursk: South-West State University, 2022. –Pp. 36-40.
4. Application and advantages of laser metal cleaning technology in comparison with traditional sandblasting / I.N. Galenya, M.S. Kozhukhova, V.S. Vishnevskiy [et al.] // Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region. - 2024. - № 2. - Pp. 116-120.