

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-278-283>

УДК 62-757.73

Повышение эффективности лазерной резки стальных материалов путем предварительной обработки гидроабразивным способом

Докт. техн. наук, проф. И. В. Качанов¹⁾, канд. техн. наук А. В. Филипчик²⁾,
инженеры И. М. Шаталов¹⁾, Д. М. Иванов²⁾, канд. техн. наук А. Н. Жук¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова
Белорусского государственного университета (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Высокая эффективность современных методов изготовления деталей машин и механизмов тесно связана с качеством предварительной очистки металлических поверхностей от коррозии. Добиться необходимого уровня обработки удастся благодаря применению струйных технологических решений, особенно в условиях лазерной резки, используемой на машиностроительных предприятиях Республики Беларусь. Одним из ключевых показателей, определяющих результативность лазерной обработки металлов, является скорость лазерной резки. В данной статье рассматривается инновационный подход к струйной очистке металлических материалов от коррозии с последующим применением в процессе лазерной резки. Отличительная особенность предложенного метода гидроабразивной обработки заключается во введении в высоконапорную струю воды специальных компонентов – бентонитовой глины, кальцинированной соды и сажу. Это обеспечивает не только эффективное удаление коррозии, но и формирует поверхность, оптимальную для лазерной резки. С целью анализа влияния параметров гидроабразивной обработки на скорость лазерной резки проведены промышленные испытания трех групп образцов из сталей марок Ст3, Ст20 и Ст45. Размеры образцов составляли 200×200 мм при толщине листа в диапазоне $S = 2\text{--}12$ мм. На основе результатов экспериментальных исследований была разработана модернизированная технология гидроабразивной очистки металлических материалов, предназначенная для удаления коррозии с последующей их обработкой методом лазерной резки. В предложенной технологии применяется рабочая жидкость, содержащая следующие компоненты: бентонитовую глину ($K_b = 1,5\text{--}2,5\%$), кальцинированную соду ($K_{\text{к.с.}} = 1,8\text{--}2,2\%$), сажу ($K_{\text{сж}} = 11\text{--}13\%$) и воду. Применение данной рабочей жидкости позволило достичь повышения скорости лазерной резки на 8–12 % по сравнению с результатами, полученными при использовании аналогичной жидкости, содержащей полиакриламид вместо сажу, при этом без необходимости введения дополнительных технологических операций.

Ключевые слова: лазерная резка, струя, бентонитовая глина, металл, машины, механизмы, технология, машиностроение, механика, коррозия, покрытие, скорость, очистка, материал

Для цитирования: Повышение эффективности лазерной резки стальных материалов путем предварительной обработки гидроабразивным способом / И. В. Качанов [и др.] // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 4. С. 278–283. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-278-283>

Improving the Efficiency of Laser Cutting of Steel Materials by Pre-Treatment with Waterjet Method

I. V. Kachanov¹⁾, A. V. Filipchik²⁾, I. M. Shatalov¹⁾, D. M. Ivanov²⁾, A. N. Zyk¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The high performance of modern methods for manufacturing machine and mechanism components largely depends on the effective removal of corrosion from metallic surfaces. The required surface quality is achieved through jet-based

Адрес для переписки

Качанов Игорь Владимирович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 249-56-77
hidrokaf@bntu.by

Address for correspondence

Kachanov Igor V.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 249-56-77
hidrokaf@bntu.by

technological processes, particularly in laser cutting operations performed under industrial conditions at mechanical engineering enterprises in the Republic of Belarus. One of the key parameters used to assess the efficiency of laser treatment of metallic surfaces is the laser cutting speed. This study presents an innovative method of jet-based corrosion removal for metallic materials, followed by their utilization in the laser cutting operations. A distinctive feature of the proposed hydro-abrasive technique is the introduction of special components – bentonite clay, calcined soda, and carbon black – into a high-pressure water jet. This formulation not only ensures corrosion elimination but also conditions the surface for subsequent laser cutting. To investigate the influence of various hydro-abrasive processing parameters on laser cutting speed, industrial tests were conducted on three groups of samples made of steel grades St3, St20, and St45. The dimensions of each sample were 200×200 mm with a sheet thickness in the range $S = 2\text{--}12$ mm. Based on the results of experimental studies, an advanced hydro-abrasive cleaning technology was developed for corrosion removal from metallic materials intended for laser cutting applications. The proposed method uses a working fluid containing the following components: bentonite clay ($C_b = 1.5\text{--}2.5\%$), calcined soda ($C_{c.s.} = 1.8\text{--}2.2\%$), carbon black ($C_{cb} = 11\text{--}13\%$), and water. The use of this working fluid made it possible to increase the laser cutting speed by 8–12 % compared to the results obtained when using an alternative fluid containing polyacrylamide instead of carbon black – without the need to introduce additional processing operations.

Keywords: laser cutting, jet, bentonite clay, metal, machinery, mechanisms, technology, mechanical engineering, mechanics, corrosion, coating, speed, cleaning, material

For citation: Kachanov I. V., Filipchik A. V., Shatalov I. M., Ivanov D. M., Zyk A. N. (2025) Improving the Efficiency of Laser Cutting of Steel Materials by Pre-Treatment with Waterjet Method. *Science and Technique*. 24 (4), 278–283. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-278-283> (in Russian)

Введение

Высокое качество современных технологий изготовления деталей машин и механизмов во многом зависит от эффективной очистки металлических поверхностей от коррозии с последующей их защитой. Требуемое качество поверхности при этом достигается за счет использования струйных технологических процессов, например при лазерной резке (ЛР) деталей в производственных условиях машиностроительных предприятий Республики Беларусь [1–4].

Важным параметром для оценки эффективности лазерной обработки металлических поверхностей считается скорость лазерной резки [4].

Наиболее широко распространенными методами струйной очистки металлических поверхностей от коррозии с последующим их применением для лазерной резки являются песко- и дробеструйная обработки. Воздействие этих процессов на металл осуществляется за счет кинетической энергии, которую создают сжатый воздух и абразивный материал – такие как стальная либо чугунная дробь, а также песок, стеклянные шарики, алмазная крошка, пемза, карбид бора и другие [4].

Однако очистка металлоизделий от коррозии с применением песко- и дробеструйных технологий сопровождается рядом негативных факторов, таких как повторная коррозия на

очищенной поверхности за счет воздействия кислорода из воздушной среды, возрастание температуры в зоне контакта абразивных частиц с металлической поверхностью, при этом песок и дробь остаются на обработанной поверхности материала, что приводит к дополнительным операциям по очистке [4].

Для устранения перечисленных выше недостатков используются гидравлические методы, которые позволяют эффективно решить проблемы пылеобразования в воздухе и повышения температуры в зоне обработки. Такие методы включают гидродинамическую, кавитационную и гидроабразивную очистку.

Гидродинамические методы очистки заключаются в подаче воды на очищаемую поверхность металлоизделия с различными показателями давления [1–3, 5]:

- низкий уровень – до 1 МПа;
- средний уровень – от 1 до 5 МПа;
- высокий уровень – от 5 до 60 МПа.

Технология гидродинамической очистки исключает повреждения обрабатываемых металлоизделий и обеспечивает более высокое качество поверхностей по сравнению с такими методами механической обработки, как фрезерование или шарошение [1–3, 5].

Однако к недостаткам данного метода относятся:

- высокая стоимость оборудования;
- значительное потребление энергии;

- ускоренный износ струеформирующих устройств;

- необходимость применения дополнительных методов защиты от коррозии (защитные покрытия, антикоррозионные составы).

Кавитационная очистка использует энергию схлопывания парогазовых пузырьков при контакте с очищаемой поверхностью, что позволяет разрушать загрязнения. Однако этот метод также имеет недостатки [1–3, 5]:

- повышенный риск повторной коррозии;
- необходимость пассивирования очищенных поверхностей;
- усиленный износ оборудования.

Гидроабразивная очистка [5] с применением в струе воды бентонитовой глины, кальцинированной соды, полиакриламида является современным способом для устранения ржавчины, нагара и прочих загрязнений. В процессе обработки частицы абразива бентонитовой глины действуют в струе воды, увеличивая эффективность очистки и образуя защитное пленочное покрытие.

Преимущества гидроабразивной обработки:

- отсутствие пылеобразования;
- эффективный теплоотвод за счет циркуляции охлаждающей жидкости (воды);
- образование защитного пленочного покрытия.

Недостатком данной гидроабразивной технологии следует считать применение в составе рабочей жидкости полиакриламида, который легко подвергается деструкции в сопле-кавитаторе, что приводит к снижению эффективности силового воздействия струи на очищаемую поверхность.

Основная часть

На кафедре «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика» БНТУ, в сотрудничестве с кафедрой «Энергоэффективных технологий» МГЭИ имени А. Д. Сахарова, проведены исследования нового способа очистки металлических материалов от коррозии с последующим использованием под лазерную резку. Данный метод гидроабразивной обработки (ГАО) отличается тем,

что за счет добавления специальных компонентов в высоконапорную струю воды (бентонит, кальцинированная сода, сажа) обеспечивается процесс очистки от коррозии с формированием поверхности под операцию лазерной резки [6]. При этом указанные компоненты в составе рабочей струи решали следующие задачи:

- бентонит (ГОСТ 28177–89) с концентрацией $K_6 = 1,5\text{--}2,5\%$ производил усиление силового воздействия;

- кальцинированная сода (ГОСТ 5100–85) с концентрацией $K_{\text{к.с}} = 1,8\text{--}2,2\%$ поддерживает рабочий раствор с бентонитовой глиной во взвешенном состоянии;

- сажа (ГОСТ 7885–86) с концентрацией $K_{\text{сж}} = 11\text{--}13\%$ способствует более интенсивному и преждевременному формированию кавитационных эффектов, что, в свою очередь, усиливает силовое воздействие струйного потока на очищаемую поверхность;

- вода исключает запыленность воздуха и снижает температуру в зоне обработки.

Промышленное использование процесса лазерной резки металлических материалов определяется такими характеристиками, как величина скорости резания $v_{\text{лр}}$, а также чистота обработанной поверхности, выражающаяся в отсутствии грата [4, 5].

В рамках производственной деятельности предприятия «Агродока» на высокотехнологичной установке HYPER GEAR 510 японской компании Yamazaki Mazak Optronics Corp (рис. 1) были выполнены экспериментальные работы, направленные на изучение воздействия процесса гидроабразивной очистки, с применением рабочей жидкости согласно составу [6], на изменение скорости лазерной резки.

Для изучения влияния различных параметров гидроабразивной обработки на скорость лазерной резки металлических поверхностей проведены производственные испытания трех групп образцов из сталей марок Ст3, Ст20 и Ст45. Образцы имели размеры 200×200 мм и толщину $S = 2\text{--}12$ мм. Данные марки сталей широко применяются для производства машин, механизмов, сварных конструкций в машиностроительном производстве, обладают высокими по-

казателями прочности, твердости, а также невысокой стоимостью.



Рис. 1. Внешний вид комплекса лазерной резки HYPER GEAR 510: 1 – дверь закрытия рабочей зоны; 2 – паллета; 3 – модуль лазерного станка

Fig. 1. External view of the HYPER-GEAR-510 laser cutting complex: 1 – the door closing the work area; 2 – pallets; 3 – laser machine module

Первую группу составляли образцы, не очищенные от продуктов коррозии. Результаты представлены на рис. 2.

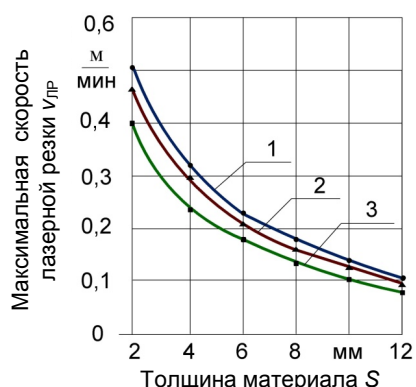


Рис. 2. Зависимость максимальной скорости лазерной резки от толщины листа (отсутствие очистки металла от продуктов коррозии) на комплексе HYPER GEAR 510: 1 – Ст3; 2 – Ст20; 3 – Ст45

Fig. 2. Dependency of the maximum laser cutting speed on the sheet thickness (no cleaning of the surface from corrosion products) on the complex HYPER-GEAR-510: 1 – St3; 2 – St20; 3 – St45

Вторую группу составляли образцы, очищенные до $R_a = 5\text{--}20$ мкм по гидроабразивной технологии [5], рабочая жидкость которой содержала бентонит ($K_b = 1,5\text{--}2,5$ %), полиакриламид ($K_{п} = 10^{-6}\text{--}10^{-4}$ %), кальцинированную соду ($K_{к.с} = 1,8\text{--}2,2$ %), остальное – вода. Рас-

стояние от сопла до очищаемой поверхности $L = 20\text{--}40$ мм, диаметр сопла $d_c = 1$ мм, скорость струи $v_{стр} = 300$ м/с. Результаты представлены на рис. 3.

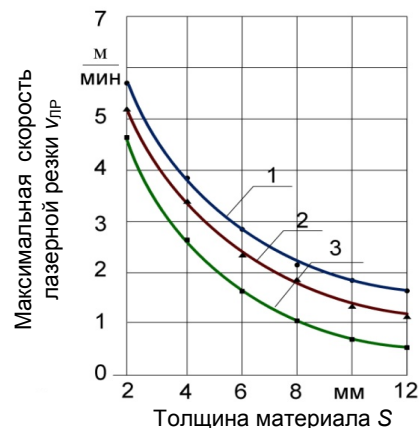


Рис. 3. Зависимость максимальной скорости лазерной резки от толщины листа (образцы, очищенные по гидроабразивной технологии [5]) на комплексе HYPER GEAR 510: 1 – Ст3; 2 – Ст20; 3 – Ст45

Fig. 3. Dependence of the maximum laser cutting speed on the sheet thickness (samples cleaned using waterjet technology [5]) on the complex HYPER-GEAR-510: 1 – St3; 2 – St20; 3 – St45

Третью группу составляли образцы, очищенные до $R_a = 5\text{--}20$ мкм по гидроабразивной технологии [6], рабочая жидкость которой содержала бентонитовую глину ($K_b = 1,5\text{--}2,5$ %), кальцинированную соду ($K_{к.с} = 1,8\text{--}2,2$ %), сажу ($K_{сж} = 11\text{--}13$ %), остальное – вода. Расстояние от сопла до очищаемой поверхности $L = 20\text{--}40$ мм, диаметр сопла $d_c = 1$ мм, скорость струи $v_{стр} = 300$ м/с. Результаты исследований приведены на рис. 4.

Графики 1–3, представленные на рис. 2–4, были построены на основе экспериментальных данных, полученных для стальных заготовок различных марок (1 – Ст3; 2 – Ст20; 3 – Ст45) при толщине листа от 2 до 12 мм.

Условием проведения испытаний являлось достижение максимальной скорости лазерной резки на установке HYPER GEAR 510 при полном отсутствии грат на линии реза. Для получения таких результатов применялись предварительно очищенные от коррозии образцы с параметрами шероховатости поверхности в диапазоне $Ra = 5\text{--}20$ мкм.

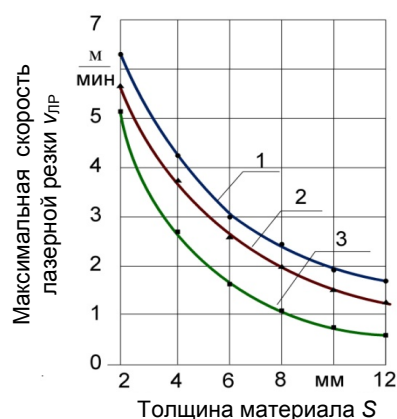


Рис. 4. Зависимость максимальной скорости лазерной резки от толщины листа (образцы, очищенные по гидроабразивной технологии [6]) на комплексе HYPER GEAR 510: 1 – Ст3; 2 – Ст20; 3 – Ст45

Fig. 4. Dependence of the maximum laser cutting speed on the sheet thickness (samples cleaned using waterjet technology [6]) on the complex HYPER-GEAR-510: 1 – St3; 2 – St20; 3 – St45

Результаты исследования и их обсуждение

В результате анализа проведенных испытаний установлено, что для отдельных групп образцов, таких как сталь марки Ст45 с толщиной листа $S = 4$ мм, наблюдалось значительное повышение скорости лазерной резки – от 0,26 м/мин (согласно кривой 3 на рис. 2) до 2,8 м/мин (кривая 3 на рис. 4). Данные значения были получены при условии отсутствия грат на боковой поверхности линии реза.

Сравнительный анализ образцов второй и третьей групп по параметру скорости лазерной резки показывает, что использование гидроабразивной очистки с применением водного раствора рабочей смеси, включающей бентонитовую глину, кальцинированную соду и сажу [6–10], в качестве предварительной обработки поверхности способствует увеличению скорости лазерной резки в среднем на 8–12 %.

Повышение скорости лазерной резки можно объяснить тем, что при использовании сажи в составе рабочей жидкости обеспечивается необходимое силовое воздействие на очищаемый металлический материал и одновременно с этим формируется поверхность с оптимальными светопоглощательными свойствами.

ВЫВОДЫ

1. На основе проведенных экспериментальных исследований, а также патентного источника [6] разработана усовершенствованная технология гидроабразивной очистки, предназначенная для удаления коррозии с металлических материалов с их дальнейшим использованием в процессах лазерной резки.

2. Данная технология, предполагающая использование рабочей жидкости, приготовленной на основе бентонитовой глины ($K_6 = 1,5–2,5$ %), кальцинированной соды ($K_{к.с} = 1,8–2,2$ %), сажи ($K_{сж} = 11–13$ %) и воды, позволила повысить скорость лазерной резки до 8–12 % (в сравнении с данными [5]) без выполнения дополнительных технологических операций.

ЛИТЕРАТУРА

- Донских, С. А. Основы современного материаловедения: учебное пособие для средних профессиональных и высших учебных заведений / С. А. Донских, В. Н. Сёмин; под общ. ред. С. А. Донских. 3-е изд., стер. М.: Директ-Медиа, 2025. 174 с.
- Шрубченко, И. В. Основы технологии сборки в машиностроении: учебное пособие / И. В. Шрубченко, Т. А. Дуюн, А. А. Погонин [и др.]. М.: ИНФРА-М, 2025. 235 с.
- Свиуднович, Н. А. Материаловедение. Перспективные машиностроительные и специальные материалы (с электронным приложением): учебное пособие / Н. А. Свиуднович, В. М. Константинов, П. А. Витязь [и др.]; под ред. Н. А. Свиудновича, В. М. Константинова. Минск: РИВШ, 2024. 628 с.
- Григорьянц, А. Г. Лазерная резка металлов / А. Г. Григорьянц, А. А. Соколов. М.: Директ-Медиа, 2021. 128 с.
- Применение технологии гидроабразивной очистки металлических поверхностей от коррозии для повышения скорости лазерной резки / А. В. Филиппик, В. С. Ковалевич, И. В. Качанов, И. М. Шаталов // Вестник ВГТУ. 2022. № 2. С. 64–70.
- Патент BY 17688, МПК В08В 3/04 (2006.01). Состав для подготовки металлической поверхности под лазерную резку: № а 20111188; заявлено 12.09.2011; опубл. 30.04.2013 / И. В. Качанов, А. В. Филиппик, А. С. Мойса, В. Н. Яглов, Я. В. Филиппик, В. В. Шаповалов; заявитель БГАТУ. URL: <https://by.patents.su/3-17688-sostav-dlya-podgotovki-metallicheskojj-poverhnosti-pod-lazernuyu-rezku.html>.
- Кельцев, В. В. Сажа: свойства, производство и применение / В. В. Кельцев, П. А. Теснер. Л.–М.: Гостоптехиздат, 1952. 172 с.

8. Печковская, К. А. Сажа как усилитель каучука / К. А. Печковская. М.: Химия, 1968. 215 с.
9. Зуев, В. П. Производство сажи: учеб. пособие / В. П. Зуев, В. В. Михайлов. М.: Химия, 1965. 329 с.
10. Буканов, А. М. Технический углерод: учеб. пособие / А. М. Буканов, Н. Я. Овсянников, Л. А. Ковалёва. М.: МИРЭА, 2018. 79 с.

Поступила 30.04.2025

Подписана в печать 02.07.2025

Опубликована онлайн 31.07.2025

REFERENCES

1. Donskikh S. A., Syomin V. N. (2025) *Fundamentals of Modern Materials Science: Teaching Aid for Secondary Vocational and Higher Education Institutions*. 3rd ed. Moscow, Direkt-Media Publ. 174 (in Russian).
2. Shrubchenko I. V., Duyun T. A., Pogonin A. A., Khurtasenko A. V., Voronkova M. N. (2025) *Fundamentals of Assembly Technology in Mechanical Engineering*. Moscow, INFRA-M Publ. 235 (in Russian).
3. Svidunovich N. A., Konstantinov V. M., Vityaz' P. A., Voitov I. V., Kuis D. V., Myurek M. N., Grigor'ev I. E. (2024) *Materials Science. Prospective Mechanical Engineering and Special Materials (with Electronic Appendix)*. Minsk, National Institute for Higher Education. 628 (in Russian).
4. Grigoryants A. G., Sokolov A. A. (2021) *Laser Cutting of Metals*. Moscow, Direkt-Media Publ. 128 (in Russian).
5. Filipchik A. V., Kovalevich V. S., Kachanov I. V., Shatalov I. M. (2022) Application of Waterjet Cleaning Technology of Metal Surfaces from Corrosion to Increase the Speed of Laser Cutting. *Vestnik VGTU = Bulletin of Vitebsk State Technological University*, (2), 64–70 (in Russian).
6. Kachanov I. V., Filipchik A. V., Moysa A. S., Yaglov V. N., Filipchik Ya. V., Shapovalov V. V. (2013) *Composition for Preparing Metal Surfaces for Laser Cutting*. Patent BY 17688 (in Russian).
7. Keltsev V. V., Tesner P. A. (1952) *Soot: Properties, Production and Application*. Leningrad, Moscow, Gostoptekhizdat Publ. 172 (in Russian).
8. Pechkovskaya K. A. (1968) *Carbon Black as A Rubber Reinforcer*. Moscow, Khimiya Publ. 215 (in Russian).
9. Zuev V. P., Mikhailov V. V. (1965) *Carbon Black Production*. Moscow, Khimiya Publ. 329 (in Russian).
10. Bukanov A. M., Ovsyannikov N. Ya., Kovalyova L. A. (2018) *Carbon Black*. Moscow, MIREA. 79 (in Russian).

Received: 30.04.2025

Accepted: 02.07.2025

Published online: 31.07.2025