

ЛАЗЕРНАЯ РЕЗКА КОРРОЗИОННО-СТОЙКОЙ СТАЛИ

Л.Е. АФАНАСЬЕВА, канд. физ.-мат. наук, И.А. СМОЛЯКОВА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: ludmila.a@mail.ru

© Афанасьева Л.Е., Смолякова И.А., 2023

Представлены результаты исследований микроструктуры коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т после лазерной резки. Методом металлографического анализа показано, что в зоне лазерного воздействия наблюдается расширение границ зерен аустенита, которое обычно связано с выпадением избыточной фазы по границам аустенитных зерен и понижением коррозионной стойкости стали. Даны рекомендации о необходимости выполнения слесарных работ по удалению металла в зоне лазерного воздействия.

Ключевые слова: лазерная резка, коррозионно-стойкая сталь, межкристаллитная коррозия.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-4-19-25

ВВЕДЕНИЕ

Лазерная резка – это динамично развивающаяся технология разделения материалов. Она характеризуется локальностью энергетического воздействия, высокой производительностью и качеством получаемой поверхности реза.

На рис. 1 показана схема процесса лазерной резки [1]. Перед движущимся по поверхности разделяемого материала лазерным лучом образуется расплавленный участок, удаляемый газовой струей. В нижней части заготовки процесс резки продолжается, но без участия лазерной энергии, а только лишь за счет струи газа и выдуваемого ею из зоны обработки перегретого расплавленного металла.

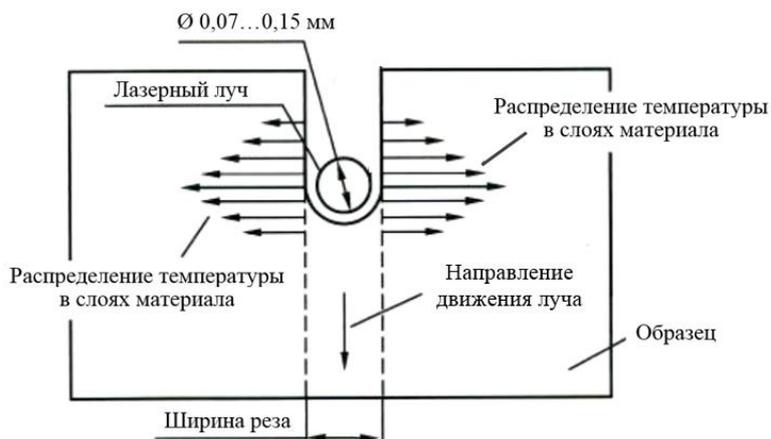


Рис. 1. Схема лазерной резки

В качестве вспомогательного газа используют кислород, воздух, азот и некоторые другие. При лазерной резке с продувкой азотом или инертными газами поверхность реза получается неокисленной и высокого качества. При использовании

кислорода происходит горение выдуваемого расплава с дополнительным выделением тепла, что является экономически выгодным. Появляется возможность снизить мощность лазерного излучения и расход вспомогательного газа. Однако поверхность реза окисляется, поэтому требуется дополнительная операция по удалению окисленного слоя [1, 2].

Как правило, зона с изменившейся в результате лазерного нагрева структурой имеет небольшую толщину. Ее строение для конструкционных сталей изучено достаточно хорошо, однако вопрос о необходимости удаления поверхностного слоя заготовки в зоне термического влияния остается открытым [1, 2].

Уравнение, описывающее процесс распределения тепла вдоль тела при нагреве мощным быстро движущимся источником, имеет вид [3]

$$T_i = \frac{qe^{-\left(\frac{vR}{2a}\right)}}{2\pi\lambda R},$$

где v – скорость лазерной резки, м/с; R – расстояние от рассматриваемой точки в поверхностном слое детали до источника тепла, м; λ – теплопроводность обрабатываемого материала, Вт/(м·°С); q – эффективная мощность лазерного теплового источника, Вт ($q = A \cdot P$, где P – мощность лазерного излучения, Вт; A – поглощательная способность обрабатываемого материала ($A = 0,82$ для стали)); a – температуропроводность, м²/с:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho},$$

где c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С); ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³.

Таким образом, формирование зоны термического влияния при лазерной резке зависит от многих факторов, прежде всего от теплофизических свойств разрезаемого материала и энергетических параметров лазерного воздействия [4–7].

Цель работы – изучить влияние лазерной резки на структуру коррозионно-стойкой стали и дать рекомендации о целесообразности удаления поверхностного слоя заготовки в области реза.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Лазерную резку выполняли на комплексе модели Vysprint 2. В качестве генератора мощного когерентного инфракрасного излучения использовали СО₂-лазер непрерывного действия. Соосно с лучом в зону резки подавался технологический газ (кислород, азот) для удаления расплавленного металла.

Листы коррозионно-стойкой стали марки 12Х18Н10Т (ГОСТ 5632-2014) толщиной 3 мм разрезали на режимах, представленных в таблице.

Режимы лазерной резки

Вспомогательный газ	Давление газа, МПа	Скорость резки, мм/мин	Мощность, Вт
Кислород	0,6	5 300	1 200
Азот	1,3	2 500	1 800

Микроструктуру стали в зоне лазерного воздействия выявляли химическим травлением шлифов царской водкой и исследовали с помощью отечественного оптического металлографического микроскопа МИМ-8 с цифровой камерой.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Хромоникелевая аустенитная сталь 12X18Н10Т обладает высоким комплексом свойств: прочностью, пластичностью, коррозионной стойкостью в различных агрессивных средах, жаростойкостью и жаропрочностью. Сочетание этих ценных свойств обусловлено нейтрализацией никелем ферритообразующих свойств хрома [8, 9].

Указанный материал чаще всего поставляют в виде катаных листов, подвергнутых закалке в воде при температуре 1 050 °С. После закалки отпуск не выполняют, так как хромоникелевая аустенитная сталь при быстром охлаждении от высоких температур приобретает наименьшую твердость, т.е. не закаливается. Такое поведение металла связано с тем, что при нагреве и охлаждении он не испытывает полиморфного превращения, в отличие от чистого железа и большинства марок сталей. В условиях медленного охлаждения из твердого раствора аустенита, преимущественно по границам зерен, происходит выпадение карбидов, что приводит к снижению стабильности аустенита и образованию вторичного феррита (по схеме $\gamma \rightarrow \alpha$). В результате сталь 12X18Н10Т в условиях медленного охлаждения приобретает структуру аустенита со вторичными карбидами и вторичным ферритом по границам зерен. В условиях быстрого охлаждения от высоких температур выпадение карбидов и образование вторичного феррита не успевает произойти [8, 9].

Большое влияние на сопротивляемость коррозии оказывает физико-химическое состояние хрома в сплаве. Наилучшая сопротивляемость достигается, когда весь хром находится в твердом растворе и сталь имеет однофазную структуру. Наряду с ценными свойствами у этих сталей есть существенный недостаток – они склонны к межкристаллитному и другим видам коррозионного разрушения. Межкристаллитная коррозия – это разрушение металлов по границам зерен под воздействием внешней агрессивной среды. Нагрев стали может способствовать проявлению этого вида коррозии. В интервале температур 450–850 °С по границам зерен аустенита выпадают карбиды хрома, в результате наружные слои аустенитного зерна теряют стойкость против коррозии. Карбиды образуются даже при температуре 400° С, но при очень длительной выдержке. Наиболее быстрое образование карбидов происходит при температурах 750–850 °С [8, 9].

Для повышения стойкости хромоникелевой стали к межкристаллитной коррозии ее дополнительно легируют специальными элементами, способными соединяться с углеродом быстрее, чем хром. Такими элементами являются титан, ниобий и тантал. Они соединяются с избыточным углеродом, образуя соответствующие карбиды, при этом содержание хрома в поверхностных слоях зерен аустенита не снижается. Количество этих элементов в стали зависит от содержания углерода и должно быть небольшим: титана – в среднем в пять раз больше, чем углерода, ниобия – в среднем в восемь раз больше. В отечественной промышленности отдается предпочтение сталям, легированным титаном. Для большей гарантии содержание углерода в хромоникелевых аустенитных сталях уменьшено до 0,08 %, а в проволоке для сварки – до 0,06 % и даже до 0,04 %.

Хромоникелевые стали с содержанием углерода более 0,1 % часто проявляют склонность к межкристаллитной коррозии, несмотря на наличие титана. Например, сталь 12X18Н10Т, содержащая 0,12 % углерода, сильнее проявляет склонность к межкристаллитной коррозии, чем сталь 08X18Н10Т, содержащая 0,08 % углерода.

Из вышесказанного следует, что во время лазерной резки в зоне термического влияния возможно образование карбидов хрома по границам зерен аустенита и снижение коррозионной стойкости. Известно, что с повышением толщины материала скорость лазерной резки снижается, что приводит к увеличению тепловложения и длительности теплового воздействия [10]. Это, в свою очередь, может привести к увеличению протяженности участка, склонного к межкристаллитной коррозии. Лазерная резка материалов больших толщин на текущий момент является важной научно-технической проблемой. Основное внимание исследователей направлено на улучшение качества поверхности резов: снижение шероховатости, уменьшение количества трещин и т.п. [11–14]. Свойства металла зоны термического влияния остаются менее изученными.

На рис. 2 представлено панорамное изображение микроструктуры коррозионно-стойкой стали марки 12X18H10T в зоне лазерного воздействия. При лазерной резке с использованием технологического газа кислорода поверхность реза, как и следовало ожидать, окисляется. На поверхности реза, особенно в нижней его части, образуются серые хрупкие включения оксидов (рис. 3а). На поверхности лазерного реза, выполненного с продувкой азотом, неметаллических включений не обнаружено (рис. 3б).

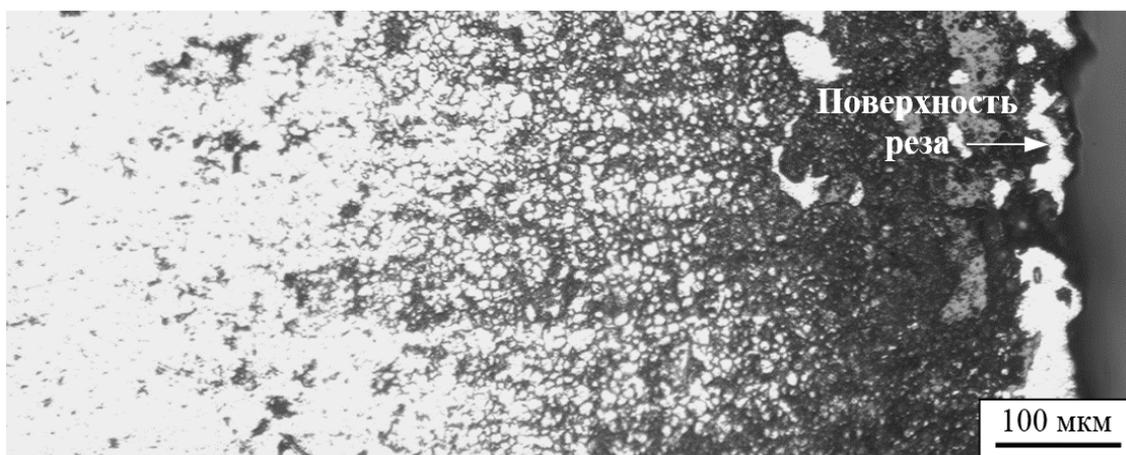
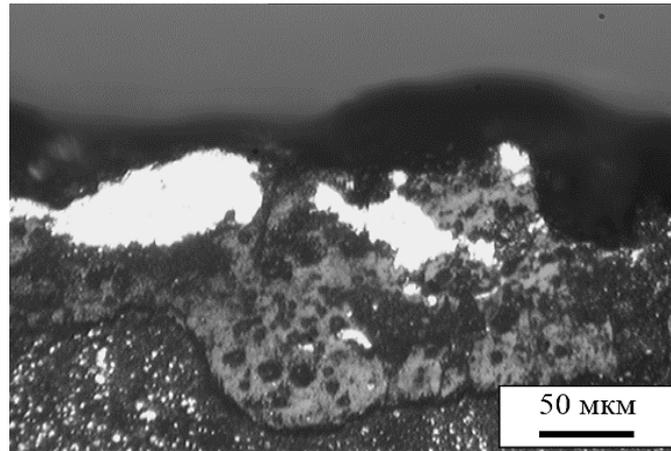
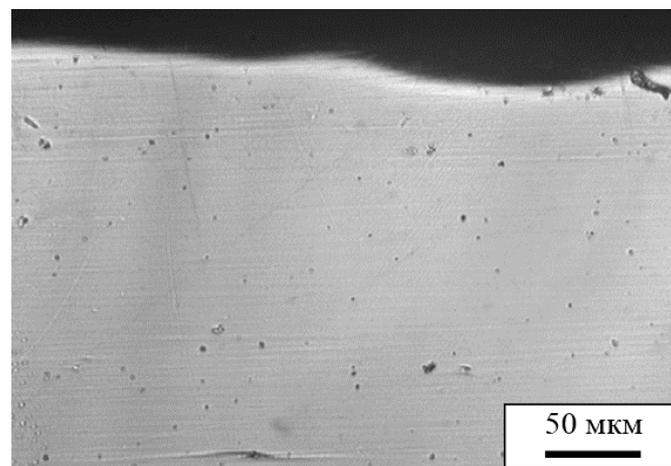


Рис. 2. Микроструктура стали марки 12X18H10T в зоне лазерного воздействия

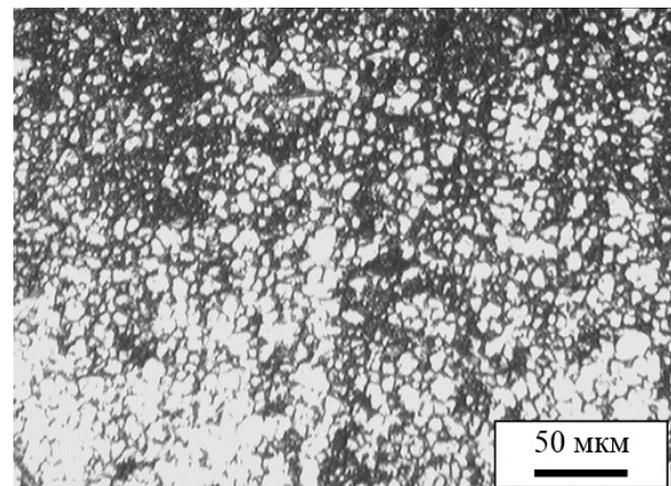
Сравнивая физические свойства аустенитных сталей с аналогичными свойствами углеродистых сталей, например стали марки Ст3, можно сделать вывод, что теплопроводность аустенитных сталей в два раза ниже, чем теплопроводность низкоуглеродистой [15]. Это способствует увеличению времени воздействия опасных температур и повышает риск появления межкристаллитной коррозии стали в зоне лазерного воздействия. При помощи химического травления шлифов удалось выявить значительное расширение границ зерен аустенита на глубину до 500 мкм от поверхности реза, которое обычно связано с понижением коррозионной стойкости (см. рис. 2 и рис. 3в). Возможно, в результате нагрева во время лазерной резки по границам зерен аустенита выделились карбиды хрома.



(a)



(б)



(в)

Рис. 3. Микроструктура стали марки 12X18H10T: изображение кромки реза, выполненного с продувкой кислородом (а); азотом (нетравленный шлиф) (б); расширение границ зерен аустенита на расстоянии 250 мкм от поверхности реза с продувкой кислородом (в)

На основании проведенных исследований можно сказать, что лазерная резка коррозионно-стойкой стали 12X18H10T с продувкой кислородом не обеспечивает необходимого качества поверхности реза, поэтому требуются слесарные работы по удалению металла зоны лазерного воздействия. Лазерная резка нержавеющей стали с использованием в качестве вспомогательного газа азота обеспечивает более высокое качество поверхности реза. Визуально формируется поверхность реза, чистая от окисления, и только металлографические исследования позволяют выявить наличие участков с пониженной коррозионной стойкостью и дать обоснованное заключение о необходимости и масштабе выполнения слесарных работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лазерная резка коррозионно-стойкой стали 12X18H10T с продувкой кислородом не позволяет получить высокое качество поверхности реза из-за интенсивного окисления. С помощью химического травления царской водкой металла в зоне термического влияния выявлено расширение границ зерен аустенита на глубину до 500 мкм, что свидетельствует о склонности стали к межкристаллитной коррозии на этом участке. Необходимо проведение слесарных работ по удалению материала кромки реза.

Для получения свободной от окисления поверхности реза рекомендуется лазерная резка с продувкой азотом. Но и в этом случае нужно проводить металлографические исследования металла зоны термического влияния для выявления склонности стали к межкристаллитной коррозии, а также протяженности участка с пониженной коррозионной стойкостью, которая визуальными методами контроля не выявляется. Вероятность снижения коррозионной стойкости стали в зоне термического влияния при лазерной резке возрастает с повышением толщины разделяемого материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковалев О.Б., Фонин В.М. Физические основы лазерной резки толстых листовых материалов. М.: Физматлит. 2013. 255 с.
2. Исследование триботехнических свойств поверхностей, полученных воздействием концентрированных потоков энергии / Л.Е. Афанасьева [и др.]. Тверь: ТвГТУ. 2022. 164 с.
3. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Кокора А.Н. Лазерная обработка материалов. М.: Машиностроение. 1975. 296 с.
4. Павеле Л.А. Влияние энергетических и газодинамических параметров лазерной резки на формирование реза и течение пленки расплава // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2008. № 7. С. 12–18.
5. Rajaram N., Sheikh-Ahmad J., Cheraghi S.H. CO₂ laser cut quality of 4 130 steel // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2003. V. 43. № 4. P. 351–358.
6. Laser cutting of steel sheets: Influence of workpiece thickness and beam waist position on kerf size and stria formation / С. Karatas [et al.] // *Journal of Materials Processing Technology*. 2006. № 172 (1). P. 22–29.
7. Измайлов В.В., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В. О фрикционных характеристиках поверхности газолазерного реза быстрорежущей стали Р6М5 // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 1 (13). С. 5–13.
8. Березовская В.В., Березовский А.В. Коррозионно-стойкие стали и сплавы: учебное пособие. Екатеринбург: Издательство Уральского университета. 2019. 244 с.

9. Юсеф Х.А. Обработка нержавеющей сталей и жаропрочных сплавов: традиционные и нетрадиционные методы. Египет: Александрийский университет. 2016. 278 с.
10. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. М.: МГТУ. 2006. 664 с.
11. Halász G., Fábíán E.R., Kuti J. Laser Cutting of Austenitic Corrosion-Resisting Steels // *Acta Materialia Transylvanica*. 2019. V. 2. № 2. P. 93–98.
12. Kurp P. Laser Cutting Methods–Review // *Materials Research Proceedings*. 2020. V. 17. P. 120–125.
13. Borkmann M., Mahrle A., Wetzig A. Laser Fusion Cutting: The Missing Link between Gas Dynamics and Cut Edge Topography // *Journal of Laser Applications*. 2023. V. 35. № 4. P. 042017.
14. Optimization of nitrogen use efficiency in cutting of austenitic stainless steel by a fiber laser / M. Duspara [et al.] // *FME Transactions*. 2022. V. 50. № 4. P. 745–751.
15. Коррозионностойкие, жаростойкие и высокопрочные стали и сплавы: справ. изд. / А.П. Шляпнев [и др.]. М.: Интермет Инжиниринг. 2000. 232 с.

Для цитирования: Афанасьева Л.Е., Смолякова И.А. Лазерная резка коррозионно-стойкой стали // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2023. № 4 (20). С. 19–25.

LASER CUTTING OF CORROSION-RESISTANT STEEL

L.E. AFANASIEVA, Cand. Sc., I.A. SMOLYAKOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University

22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, Russian Federation, e-mail: ludmila.a@mail.ru

The results of studies of the microstructure of corrosion-resistant steel 12Kh18N10T after laser cutting are presented. Using metallographic analysis, it was shown that in the laser irradiation zone there is an expansion of austenite grain boundaries, which is usually associated with the precipitation of excess phase along the boundaries of austenite grains and a decrease in the corrosion resistance of steel. Recommendations are given on the need to perform plumbing work to remove metal in the laser impact zone.

Keywords: laser cutting, corrosion-resistant steel, intergranular corrosion.

Поступила в редакцию/received: 11.09.2023; после рецензирования/ revised: 01.10.2023;
принята/accepted: 04.10.2023