

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕЖИМА ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА ШЕРОХОВАТОСТИ

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, М.В. НОВОСЕЛОВА, канд. техн. наук,
Л.Е. АФАНАСЬЕВА, канд. физ.-мат. наук

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

© Измайлова В.В., Новоселова М.В., Афанасьева Л.Е., 2025

Статья посвящена исследованию влияния параметров лазерной резки на качество поверхности реза. Объект исследования – биметаллический материал, представляющий собой наплавленную быстрорежущую сталь на подложку конструкционной стали. Критерием качества поверхности реза выступает параметр шероховатости $Rz5$ по ГОСТ Р ИСО 9013-2022, а характеристикой режимов резки – комплексный параметр q , имеющий физический смысл энергии лазерного излучения, приходящейся на единичную площадку поверхности реза. Выявлено неоднородное распределение параметра $Rz5$ по поверхности реза, которое иллюстрируется графическими зависимостями $Rz5(x/h)$, где x – расстояние от верхней кромки реза; h – толщина разрезаемого образца. Экспериментально определены оптимальные значения комплексного энергетического параметра q для данного биметаллического материала, обеспечивающие минимальные значения шероховатости.

Ключевые слова: лазерная резка, энергетические параметры, шероховатость поверхности, наплавка, быстрорежущая сталь, биметалл.

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-3-42-48

ВВЕДЕНИЕ

Технология лазерной резки отличается высокой производительностью и точностью раскроя листового материала. Она позволяет разделять керамику, металлы, полимеры, композиты на их основе и используется во многих отраслях промышленности и медицины [1–4]. В обзоре [1] отмечается, что, несмотря на широкое практическое применение данной технологии в течение нескольких десятков лет, в мировой науке наблюдается неуклонный рост публикаций по данному направлению, т.е. научный интерес к технологии лазерной резки высок. Это можно объяснить сложностью и многофакторностью протекающих во время резки процессов и не раскрытыми в полной мере потенциальными возможностями технологии.

В публикациях, посвященных исследованию влияния параметров лазерной резки на качество поверхности реза, различными авторами в качестве критерия оптимизации рассматриваются как отдельные параметры (мощность излучения, скорость резки, давление технологического газа, фокусировка луча и др.), так и комплексные [5–7].

Одним из ключевых параметров процесса лазерной резки материала является скорость резки, которая зависит, в частности, от толщины разрезаемого материала. Как показывают эксперименты, во многих случаях наблюдается пропорциональность

скорости резки V и отношения мощности лазерного излучения W к толщине разрезаемого материала h [2–4, 8]:

$$V \propto \frac{W}{h}. \quad (1)$$

Выражая скорость из очевидной зависимости $l = Vt$, где l – перемещение луча в направлении реза, а t – время, и переходя от пропорциональности к равенству, запишем уравнение (1) в виде

$$\frac{W}{h \cdot V} = \frac{W \cdot t}{h \cdot l} = \frac{E}{\Delta S} = q, \quad (2)$$

где $E = W \cdot t$ – энергия лазерного излучения;

$\Delta S = h \cdot l$ – площадь поверхности реза, на которую приходится эта энергия;

q – константа для данных параметров лазерного излучения и данного материала, зависящая от его физических свойств (плотности, температуры плавления, удельных энергий плавления и испарения) [2].

Определяемый уравнением (2) параметр $q = \frac{W}{h \cdot V}$, который имеет физический смысл энергии лазерного излучения, приходящейся на единичную площадку поверхности реза, может служить мерой эффективности процесса лазерной резки при сравнении различных технологических схем [8].

Качество лазерной резки определяется рядом показателей: точностью, шероховатостью, неперпендикулярностью (клиновидностью), размером зоны термического влияния, шириной реза, количеством грата, радиусом оплавления верхней кромки и др. [4]. Основными показателями качества лазерной резки принято считать шероховатость поверхности и наличие грата. Это связано в первую очередь с тем, что при минимальном значении указанных параметров другие показатели качества реза имеют допустимые значения. Поэтому получение лазерного реза с минимальной шероховатостью и отсутствием грата в нижней части образца представляет практический интерес.

Цель настоящей работы – выявление оптимального значения комплексного энергетического параметра q лазерной резки биметаллического материала по критерию качества реза – минимальной шероховатости поверхности реза.

МАТЕРИАЛЫ И ПАРАМЕТРЫ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ

На заготовки из среднеуглеродистой низколегированной стали 30ХГСА (ГОСТ 4543-71) дугой прямого действия на постоянном токе обратной полярности в защитной среде аргона осуществляли одноваликовую наплавку порошковой проволокой, по химическому составу близкой к быстрорежущей стали Р9М4К8 (ГОСТ 19265-73). Наплавку выполняли на следующих режимах:

сила тока 180...190 А;

напряжение 21...22 В;

скорость 12 м/ч.

После наплавки заготовки подвергали низкотемпературному отпуску при 200 °C с выдержкой 1 ч для снижения уровня остаточных напряжений, предотвращения образования холодных трещин. Затем полученные заготовки разрезали вдоль

наплавленного валика с помощью лазерной резки на комплексе BySprint 3015 на различных режимах. Мощность лазерного излучения $W = 2,7 \dots 4,4$ кВт. Скорость лазерной резки $V = 800 \dots 1\ 500$ м/мин. В качестве вспомогательного газа использовался азот, давление которого составляло $1,4 \dots 1,5$ МПа. Толщина исследуемых образцов равнялась 4,4 и 5,5 мм. Комплексный энергетический параметр $q = 37 \dots 60$ Дж/м 2 .

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве параметра, характеризующего шероховатость поверхности реза, была принята средняя высота профиля $Rz5$ (ГОСТ Р ИСО 9013-2022 «Резка термическая. Классификация резов. Геометрические характеристики изделий и допуски по качеству»), которая рассчитывается как максимальная высота профиля в пределах базовой длины l_r с последующим усреднением в пределах длины оценки $l_n = 5l_r$. Параметр $Rz5$ аналогичен параметру Rz по более универсальному отечественному стандарту ГОСТ Р ИСО 4287-2014 с той разницей, что в первом случае отношение длины оценки к базовой длине $l_n / l_r = 5$ обязательное, а во втором лишь рекомендуемое. Параметр $Rz5$ поверхностей лазерных резов образцов определяли по профилограммам, полученным на различных расстояниях от верхней кромки реза. Шероховатость у верхней кромки и в средней части поверхности реза соответствовала наплавленной быстрорежущей стали, у нижней кромки поверхности реза – подложке из среднеуглеродистой низколегированной стали.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Особенность лазерного реза заключается в образовании характерной шероховатости поверхности, которая проявляется в виде периодических бороздок (бороздчатости) с волнобразными выпуклостями и впадинами (рис. 1). Разные авторы дают различные названия подобным шероховатостям (англ. *striations*, *strokes*, *patterns*, *ripples* и др.). Исследованию свойств поверхности лазерного реза посвящено большое количество теоретических и экспериментальных работ, например [8–10]. При резке биметаллического образца с продувкой азотом бороздчатость может возникать из-за гидродинамической нестабильности слоя расплава, обусловленной силовым воздействием струи газа на расплав.

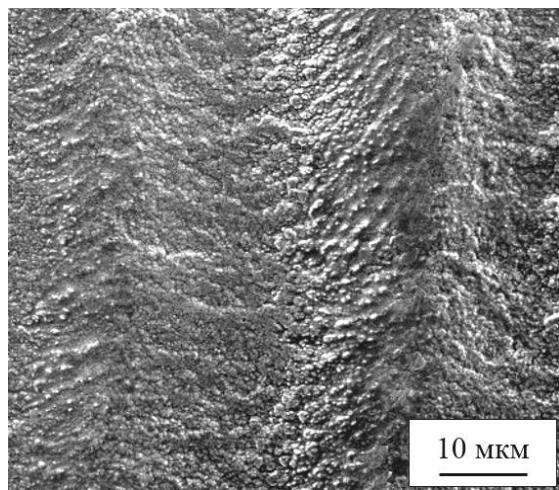


Рис. 1. Изображение участка поверхности лазерного реза образца

Бороздчатая структура на поверхности лазерного реза играет роль концентраторов напряжений и влияет на усталостную прочность материала. Для минимизации шероховатости поверхности реза необходимо проводить разделение материала на стационарном режиме, когда жидкая ванна расплава расположена по всей длине канала реза и скорости плавления металла в направлении реза и удаления расплавленного металла в каждом сечении канала равны [4]. Важно понимать, как энергетические параметры влияют на качество резки. Результаты выполненного анализа приведены ниже.

Изменение по глубине реза шероховатости образцов, полученных резкой на различных режимах, представлено на рис. 2, где x – расстояние от верхней кромки реза. Ось ординат направлена от верхней кромки образца к нижней. Из анализа изменения шероховатости по глубине реза можно заключить, что при двух режимах ($q = 44 \text{ Дж}/\text{мм}^2$ и $q = 50 \text{ Дж}/\text{мм}^2$) шероховатость практически постоянна, средние значения $Rz5$ составляют 13 и 21 мкм. При других режимах распределение шероховатости по глубине реза неравномерное, в разных областях поверхности одного реза различие параметра $Rz5$ достигает до 2 раз. В таком случае для характеристики шероховатости поверхностей реза необходимо использовать средние по всей глубине значения $Rz5$ [6].

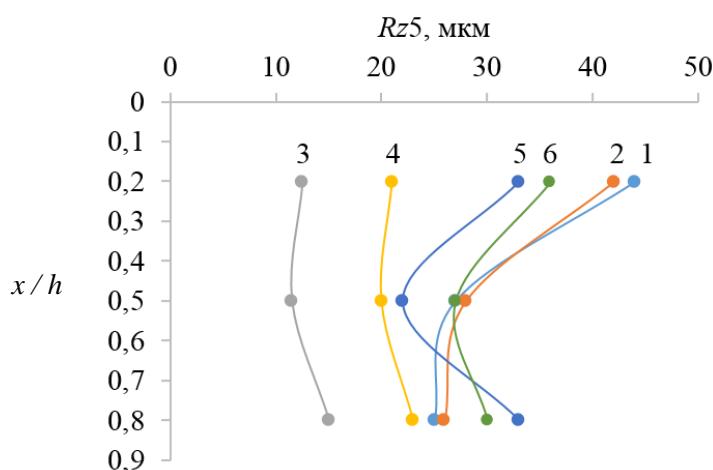


Рис. 2. Распределение шероховатости поверхности реза по толщине образцов:
1 – $q = 37 \text{ Дж}/\text{мм}^2$; 2 – $q = 38 \text{ Дж}/\text{мм}^2$; 3 – $q = 44 \text{ Дж}/\text{мм}^2$; 4 – $q = 50 \text{ Дж}/\text{мм}^2$;
5 – $q = 57 \text{ Дж}/\text{мм}^2$; 6 – $q = 60 \text{ Дж}/\text{мм}^2$

Величины параметра шероховатости $Rz5$ исследованных поверхностей в зависимости от комплексного энергетического параметра q представлены на рис. 3, средние значения по трем областям со среднеквадратичным отклонением – на рис. 3(б).

Сравнение высотного параметра шероховатости поверхности реза $Rz5$ при различных технологических режимах лазерной резки (рис. 3) наглядно свидетельствует о существенном влиянии этих режимов на качество поверхности реза. Характер зависимости $Rz5(q)$ аналогичен для всех областей поверхности реза с минимумом $Rz5 = 12\dots15 \text{ мкм}$ при $q \approx 45 \text{ Дж}/\text{мм}^2$. Аналогичная экспериментальная зависимость в безразмерных координатах описана в работе [5], где для образцов низкоуглеродистой стали толщиной 5…10 мм при оптимальных условиях лазерной резки (с использованием технологического газа кислорода) получена минимальная без-

размерная шероховатость $Rz/h = (1,7 \dots 2,3) \cdot 10^{-3}$. В наших исследованиях оптимальных условий лазерной резки биметаллического материала минимальная безразмерная шероховатость $Rz5/h$ лежит в интервале $(2,6 \dots 3,0) \cdot 10^{-3}$, что практически совпадает с вышеуказанным интервалом. При их сравнении надо учесть, что в 2009 году, когда была опубликована работа [5], параметр шероховатости Rz определялся как высота неровностей профиля шероховатости по десяти точкам и его значения примерно на 25 % меньше, чем значения параметра $Rz5$ для той же поверхности.

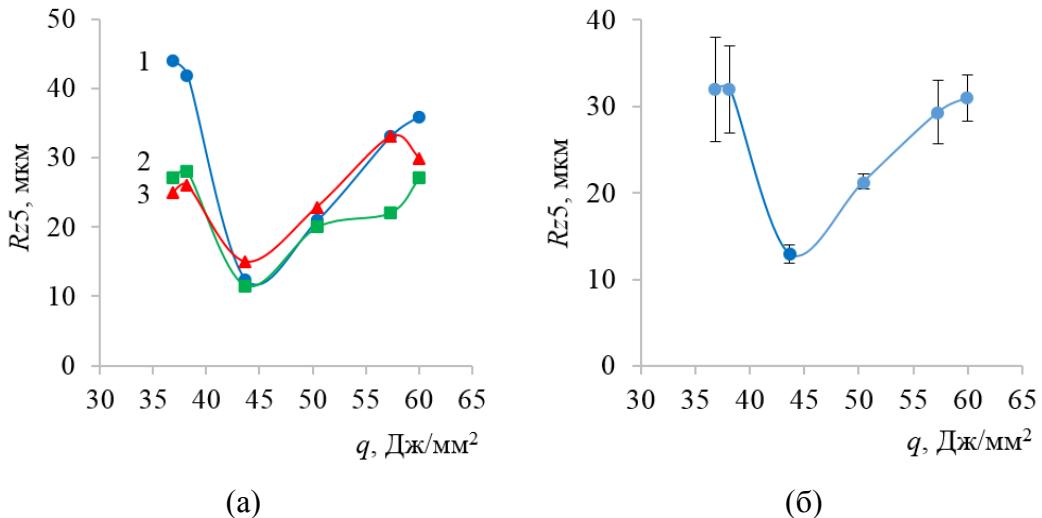


Рис. 3. Зависимость шероховатости поверхности реза от комплексного энергетического параметра лазерной резки: в трех областях поверхности реза (а):
1 – наплавка; 2 – переходная зона; 3 – подложка;
усредненная по трем областям поверхности реза (б)

Для полноты анализа результатов исследования целесообразно сравнить шероховатость поверхности реза после лазерной резки с аналогичными значениями поверхности реза после других способов разделения материала (таблица).

Шероховатость поверхности реза

Способ разделения	Среднее арифметическое отклонение профиля Ra , мкм						
	50	25	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8
Кислородная резка	○	●	○				
Механическая резка	○	●	●	●	○		
Электроэррозионная резка			○	●	●	●	○
Лазерная резка			□	■	■	□	

Примечание. Темные значки – типичные значения параметра Ra , светлые – возможные значения; ●, ○ – литературные данные; ■, □ – данные авторов статьи.

Сравнение проводилось по значениям параметра Ra , так как именно они в основном приводятся в литературе [11]. Как видно из данных таблицы, качество поверхности реза по критерию шероховатости после газолазерной резки не уступает

качеству поверхности после механической резки (и даже превосходит его) и существенно выше, чем после кислородной резки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с поставленной целью экспериментально показано существенное влияние комплексного энергетического параметра лазерной резки q на качество поверхности реза биметаллического материала по критерию шероховатости. Параметр q имеет физический смысл энергии лазерного излучения в расчете на единицу площади поверхности реза и может использоваться для сравнения и выбора оптимальных режимов лазерной резки, таких как мощность излучения и скорость резки. Для исследованного двухслойного материала толщиной 5,5 мм, состоящего из наплавленной быстрорежущей стали на подложке конструкционной среднеглеродистой низколегированной стали, минимальная шероховатость поверхности реза получена при $q \approx 45 \text{ Дж/мм}^2$ и характеризуется значениями параметра $Rz5$ в диапазоне 12...15 мкм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Alsaadawy M., Dewidar M., Said A., Maher I., Shehabeldeen T.A. A comprehensive review of studying the influence of laser cutting parameters on surface and kerf quality of metals // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. V. 130. № 3. P. 1039–1074.
2. Steen W. M. Laser Material Processing. London: Springer–Verlag, 2003. 408 p.
3. LIA Handbook of Laser Materials Processing / Ed. J.F. Ready. Orlando: Laser Institute of America; Magnolia Publ. Inc., 2001. 716 p.
4. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной сварки, резки и размерной обработки. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. 376 с.
5. Фомин В.М., Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. О законах подобия газолазерной резки толстых стальных листов // *Доклады академии наук*. 2009. Т. 428. № 3. С. 325–329.
6. Минаев И.В., Хонелидзе Д.М., Голышев И.В. Оптимизация технологических параметров газолазерной резки за счет их приведения к безразмерным величинам // *Технолого-экономическое образование: достижения, инновации, перспективы: Межвузовский сборник статей*. Тула: ТГПУ им. Л.Н. Толстого, 2015. С. 77–81.
7. Фомин В.М., Голышев А.А., Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Механические характеристики высококачественной лазерной резки стали волоконным и CO₂-лазерами // *Прикладная механика и техническая физика*. 2015. Т. 56. № 4 (332). С. 215–225.
8. Black I. A Comparison of Severance Energies for Reactive CO₂ Laser Cutting of Mild Steel // *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*. 1999. V. 15. № 11. P. 832–834.
9. Барчуков Д.А., Смолякова И.А., Афанасьева Л.Е. Влияние технологических параметров лазерной резки на размер зоны лазерного воздействия // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 4 (24). С. 22–28.
10. 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»*. № 3 (27), 2025

ник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2022. № 1 (13). С. 5–13.

11. Уайтхауз Д. Метрология поверхностей. Принципы, промышленные методы и приборы. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2009. 472 с.

Для цитирования: Измайлова В.В., Новоселова М.В., Афанасьева Л.Е. Оптимизация энергетического режима лазерной резки биметаллического материала по критерию минимума шероховатости // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 3 (27). С. 42–48.

OPTIMIZATION OF THE ENERGY MODE OF LASER CUTTING OF BIMETALLIC MATERIAL BY THE CRITERION OF MINIMUM ROUGHNESS

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., M.V. NOVOSELOVA, Cand. Sc.,
L.E. AFANASIEVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: ludmila.a@mail.ru

The article is devoted to the study of the influence of laser cutting parameters on the quality of the cut surface. The object of the study is a bimetallic material, which is high-speed steel deposited on a structural steel substrate. The roughness parameter R_{z5} according to GOST R ISO 9013-2022 serves as the cut surface quality criterion, and the complex parameter q , which has the physical meaning of the laser radiation energy per unit area of the cut surface, serves as a characteristic of the cutting modes. A non-uniform distribution of the parameter R_{z5} over the cut surface is revealed, which is illustrated by the graphical dependencies $R_{z5}(x / h)$, where x is the distance from the upper edge of the cut, h is the thickness of the cut sample. Optimum values of the complex energy parameter q for this bimetallic material, providing minimum roughness values, are experimentally determined.

Keywords: laser cutting, energy parameters, surface roughness, deposition, high-speed steel, bimetal.

Поступила в редакцию/received: 07.04.2025; после рецензирования/revised: 12.04.2025;
принята/accepted: 25.04.2025