

## 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

© Измайлов 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 °С 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  $V = 800 \dots 1500$  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/мм<sup>2</sup>.

### 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 волнообразными 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 неустойчивости слоя расплава, обусловленной силовым воздействием струи газа на расплав.

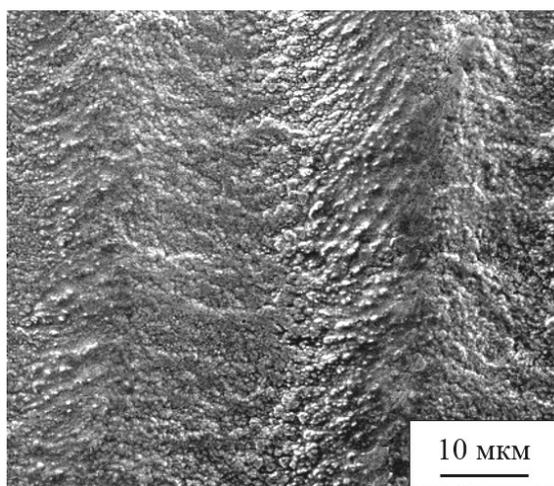


Рис. 1. Изображение участка поверхности лазерного реза образца

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 ( $q = 44 \text{ Дж/мм}^2$  и  $q = 50 \text{ Дж/мм}^2$ ) 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].

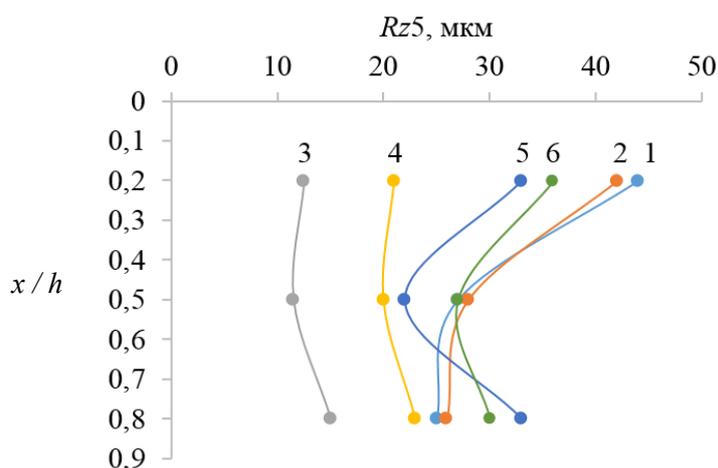


Рис. 2. Распределение шероховатости поверхности реза по толщине образцов:  
 1 –  $q = 37 \text{ Дж/мм}^2$ ; 2 –  $q = 38 \text{ Дж/мм}^2$ ; 3 –  $q = 44 \text{ Дж/мм}^2$ ; 4 –  $q = 50 \text{ Дж/мм}^2$ ;  
 5 –  $q = 57 \text{ Дж/мм}^2$ ; 6 –  $q = 60 \text{ Дж/мм}^2$

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  $Rz5 = 12...15 \text{ мкм}$  при  $q \approx 45 \text{ Дж/мм}^2$ . 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  $Rz/h = (1,7...2,3) \cdot 10^{-3}$ . В наших исследованиях оптимальных условий лазерной резки биметаллического материала минимальная безразмерная шероховатость  $Rz5/h$  лежит в интервале  $(2,6...3,0) \cdot 10^{-3}$ , 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.

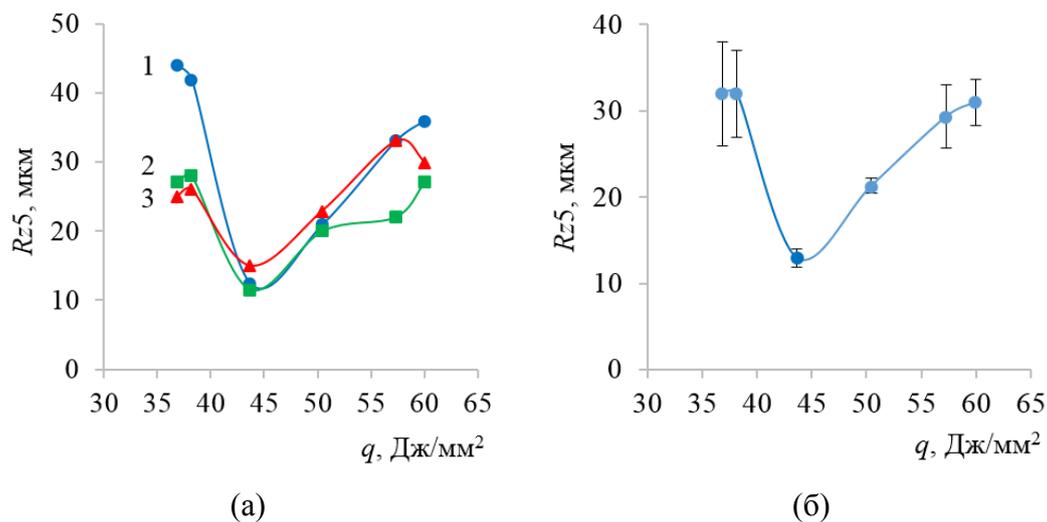


Рис. 3. Зависимость шероховатости поверхности реза от комплексного энергетического параметра лазерной резки: в трех областях поверхности реза (а): 1 – наплавка; 2 – переходная зона; 3 – подложка; усредненная по трем областям поверхности реза (б)

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	○	●	●	●	○		
Электроэрозионная 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 среднеуглеродистой низколегированной стали, минимальная шероховатость поверхности реза получена при  $q \approx 45$  Дж/мм<sup>2</sup> 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., Мисюрлов 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., Гольшев И.В. Оптимизация технологических параметров газолазерной резки за счет их приведения к безразмерным величинам // *Технологическое образование: достижения, инновации, перспективы: Межвузовский сборник статей*. Тула: ТГПУ им. Л.Н. Толстого, 2015. С. 77–81.
7. Фомин В.М., Гольшев А.А., Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Механические характеристики высококачественной лазерной резки стали волоконным и СО<sub>2</sub>-лазерами // *Прикладная механика и техническая физика*. 2015. Т. 56. № 4 (332). С. 215–225.
8. Black I. A Comparison of Severance Energies for Reactive CO<sub>2</sub> 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 // *Вест-*

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:** Измайлов 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  $Rz5$  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  $Rz5$  over the cut surface is revealed, which is illustrated by the graphical dependencies  $Rz5(x/h)$ , 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