

## ОБ ЭНЕГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТАХ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКЕ ОБРАЗЦОВ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, М.В. НОВОСЕЛОВА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет,  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: iz2v2@mail.ru

© Измайлов В.В., Новоселова М.В., 2026

Проведена оценка применимости уравнения баланса мощностей при лазерной резке быстрорежущей стали со вспомогательным газом азотом для повышения эффективности процесса. Приведено сравнение величин энергетических параметров, полученных экспериментально и путем теоретического расчета. Установлено, что разрезание материала обеспечивается при значении энергии не менее  $18 \text{ Дж/мм}^3$  на единицу объема расплава. При этом шероховатость поверхности реза исследованных образцов соответствовала значениям параметра  $Ra = 1,3 \dots 6,8 \text{ мкм}$ .

*Ключевые слова:* лазерная резка, быстрорежущая сталь, энергетический баланс.

### ВВЕДЕНИЕ

Лазерная резка в настоящее время широко применяется в промышленности и имеет ряд преимуществ как перед традиционными механическими, так и перед другими термическими технологиями разделения материалов – газовой и плазменной резкой благодаря сочетанию высокой производительности с высокой точностью и качеством реза. Для повышения эффективности процессов лазерной резки при обеспечении высокого качества необходим анализ их энергетического баланса. Этому вопросу уделяется большое внимание [1–7].

Целью настоящей работы является анализ энергетических затрат при лазерной резке быстрорежущей стали со вспомогательным газом азотом для повышения эффективности процесса.

### ОБРАЗЦЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования энергетических затрат при лазерной резке проводились на заготовках быстрорежущей стали марки Р6М5 (ГОСТ 19265-73) размером  $120 \times 40 \times h \text{ мм}$  (где  $h$  – толщина образца), упрочненных с помощью объемной закалки и трехкратного отпуска при температуре  $560 \text{ }^\circ\text{C}$  [8]. Лазерная резка заготовок выполнялась на лазерном комплексе BySprint 3015 компании Bystronic с использованием вспомогательного газа азота на диапазонах технологических параметров резки:

|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| толщина образцов, мм                | 3,3...9,5; |
| мощность лазерного излучения, кВт   | 1,8...4,4; |
| скорость резки, м/мин               | 0,2...3,0; |
| давление вспомогательного газа, МПа | 0,8...1,4. |

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Одним из ключевых параметров, характеризующих процесс лазерной резки и влияющих на качество реза, является энергетический параметр  $q_V$  – энергия лазерного излучения, вложенная в единицу объема удаляемого из канала реза материала:

$$q_V = \frac{A \cdot W}{h \cdot v \cdot d},$$

где  $A$  – коэффициент поглощения лазерного излучения в канале реза [3, 5];  $W$  – мощность лазерного излучения;  $v$  – скорость резки;  $d$  – ширина реза. Произведение  $A \cdot W$ , как это принято, будем называть эффективной мощностью  $W_{\text{эфф}}$ .

Энергетический параметр  $q_V$  – комплексная величина, зависящая не только от мощности лазерного излучения, но и от условий его фокусирования. Глубина прорезания и ширина реза зависят от положения фокуса относительно поверхности материала, которое задает размер лазерного пятна на поверхности.

Важнейшим критерием качества лазерной резки является шероховатость поверхности реза [9–11]. Для количественной оценки шероховатости поверхности реза мы рекомендуем использовать параметр  $Ra$  – арифметическое среднее отклонение профиля шероховатости (ГОСТ Р ИСО 4287-2014). Это статистически стабильный параметр, определяемый практически всеми приборами для контроля качества поверхности.

При лазерной резке происходит локальное плавление материала и удаление расплава струей вспомогательного газа. Уравнение баланса мощностей при лазерной резке с инертным газом можно записать в виде

$$A \cdot W = W_{\text{пл}} + W_{\text{нагр}}, \quad (1)$$

где  $W_{\text{пл}}$  – мощность, затрачиваемая на нагрев и плавление материала в зоне реза;  $W_{\text{нагр}}$  – мощность, расходуемая на нагрев материала вне зоны реза вследствие теплопроводности. В уравнении (1) не учтены незначительные потери мощности за счет конвективного охлаждения образца как вспомогательным газом, так и окружающим воздухом [1, 3, 5].

Величина  $W_{\text{пл}}$  может быть рассчитана на основании очевидного уравнения расчета энергетических затрат на нагрев и плавление разделяемого материала в объеме канала плавления:

$$W_{\text{пл}} = v \cdot d \cdot h \cdot \rho \cdot (c \cdot \Delta T + L), \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность материала;  $c$  и  $L$  – удельная теплоемкость и удельная теплота плавления материала;  $\Delta T$  – изменение температуры образца от начальной до температуры жидкого металла в зоне реза (плавления).

Мощность, расходуемую на нагрев материала вне зоны реза вследствие теплопроводности, можно рассчитать по уравнению

$$W_{\text{нагр}} = 2 \cdot v \cdot z_e \cdot h \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta T, \quad (3)$$

где  $z_e$  – эффективный размер нагретой зоны в глубь материала от боковой поверхности реза. Для оценки величин  $z_e$  и  $W_{\text{нагр}}$  различные авторы используют теоретические модели распространения тепла от поверхности реза в глубь образца [1, 7, 12, 13].

В данной работе мощность, затраченную на нагрев материала вне зоны реза (тепловые потери), рассчитывали по формуле [1, 13]:

$$W_{\text{нагр}} = 2 \cdot v \cdot h \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta T \sqrt{\frac{2 \cdot \chi}{v} \left( d + \frac{\chi}{v} \right)}. \quad (4)$$

При применении формул (2)–(4) следует учитывать, что входящие в них физические константы материала так или иначе зависят от температуры, иногда довольно значительно, как, например, теплоемкость стали. Обычно в расчетах используются средние величины физических констант в диапазоне температур от комнатной до температуры плавления, что объективно делает эти расчеты приблизительными.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимость относительной величины  $\frac{W_{\text{эфф}} - W_{\text{нагр}}}{W_{\text{пл}}}$  от энергетического параметра  $q_V$  представлена на рис. 1. Безразмерная величина  $\frac{W_{\text{эфф}} - W_{\text{нагр}}}{W_{\text{пл}}}$  характеризует эффективность режима лазерной резки и равна отношению доли эффективной мощности, которая фактически могла быть затрачена на плавление материала, к теоретическому значению мощности, необходимой для плавления. Ряд точек на графике рис. 1 соответствует значению параметра эффективности меньше единицы. Это означает, что энергии лазерного излучения может оказаться недостаточно для расплавления материала соответствующих образцов по всей их толщине. Действительно, часть таких образцов оказались неразрезанными, остальные имели грубую поверхность реза с глубокими рисками с шагом 2...3 мм и глубиной более 0,5 мм при максимальной высоте шероховатости менее 50 мкм.

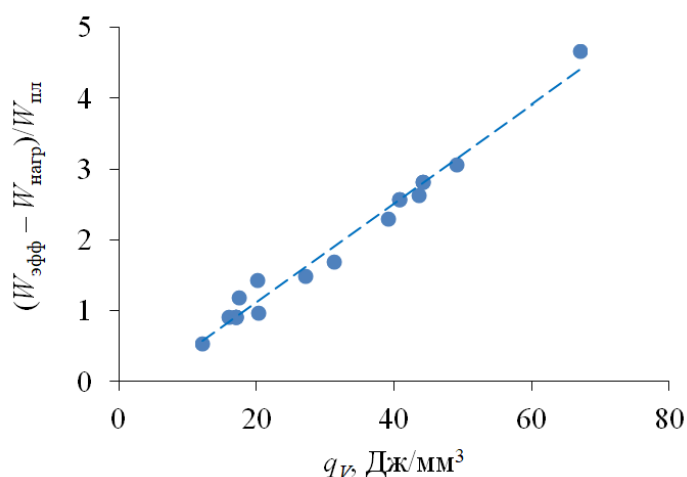


Рис. 1. Параметр эффективности процесса лазерной резки  $\frac{W_{\text{эфф}} - W_{\text{нагр}}}{W_{\text{пл}}}$  в зависимости от удельной энергии лазерного излучения  $q_V$ : точки – экспериментальные данные; пунктирная линия – аппроксимация

Из рис. 1 следует, что условие  $\frac{W_{\text{эфф}} - W_{\text{нагр}}}{W_{\text{пл}}} > 1$  соответствует удельной энергии лазерного излучения  $q_V \gtrsim 18 \text{ Дж/мм}^3$ , что следует рассматривать как условие успешной операции разделения данного материала лазерной резкой.

На рис. 2 представлена зависимость параметра  $\frac{W_{\text{пл}} + W_{\text{нагр}}}{h}$  от произведения  $v \cdot d$ . Если считать, что основные потери энергии связаны с нагревом объема материала вне зоны реза, то  $W_{\text{пл}} + W_{\text{нагр}} = A \cdot W$  (см. уравнение (1)). Зависимость  $(A \cdot W) = f(v \cdot d)$ , построенная по полученным нами экспериментальным данным, хорошо аппроксимируется линейной функцией с коэффициентом корреляции  $R = 0,86$  (рис. 2). Теоретическая зависимость параметра  $\frac{W_{\text{пл}} + W_{\text{нагр}}}{h}$  от произведения  $v \cdot d$  также представлена на рис. 2 как результат расчетов по уравнениям (2) и (4). Из уравнения (2) очевидно, что зависимость  $(W_{\text{пл}} / h) = f(v \cdot d)$  линейная, тогда как согласно уравнению (4) зависимость  $(W_{\text{нагр}} / h) = f(v \cdot d)$  – нелинейная, однако результирующая зависимость  $\frac{W_{\text{пл}} + W_{\text{нагр}}}{h} = f(v \cdot d)$  также имеет практически линейный характер.

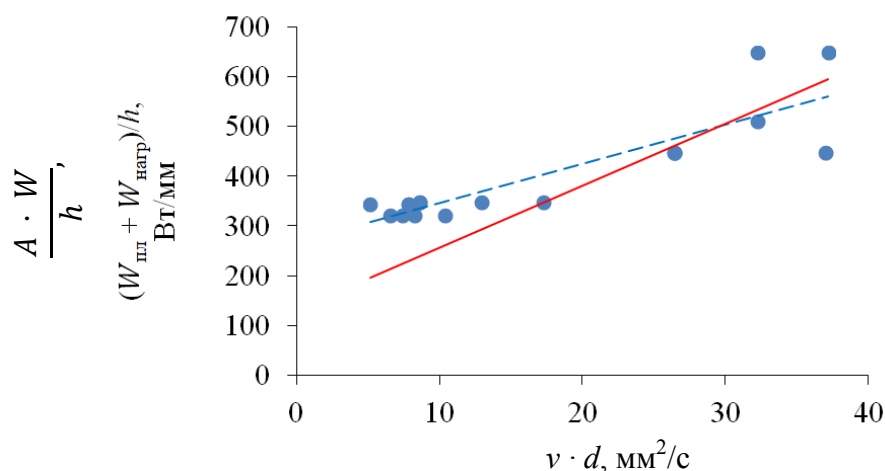


Рис. 2. Зависимости  $\frac{A \cdot W}{h} = f(v \cdot d)$  и  $\frac{W_{\text{пл}} + W_{\text{нагр}}}{h} = f(v \cdot d)$ : точки – экспериментальные данные; пунктирная линия – аппроксимация экспериментальной зависимости; сплошная линия – результат расчета

Зависимость энергетического параметра  $q_V$  от параметров лазерной резки  $v \cdot d$  представлена на рис. 3. Она носит убывающий характер, который объясняется тем, что согласно уравнению (4) энергия, затраченная на нагрев материала вне зоны реза (тепловые потери), убывает с ростом произведения  $v \cdot d$ . При этом энергия, затраченная на нагрев и плавление единичного объема материала в зоне реза, – постоянная величина для данного материала.

Из рис. 3 следует, что при  $q_V \lesssim 17 \text{ Дж/мм}^3$  экспериментальная зависимость  $q_V = f(v \cdot d)$  лежит ниже теоретической и при таких значениях объемной плотности энергии лазерного излучения материал не будет разделен. Действительно, точки на графике рис. 3, лежащие ниже теоретической кривой  $q_V = f(v \cdot d)$ , соответствуют образцам, которые не были разрезаны, что отмечено выше. Критические значения параметра  $q_V$ , определенные в соответствии с рис. 1 и 3, практически совпадают.

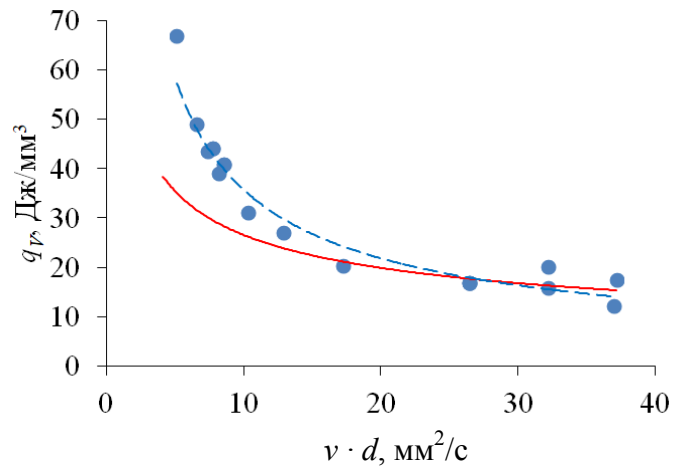


Рис. 3. Зависимость энергетического параметра  $q_v$  от произведения  $v \cdot d$ : точки – экспериментальные данные; пунктирная линия – аппроксимация; сплошная линия – теоретическая зависимость

Зависимость термического КПД процесса лазерной резки от параметра  $v \cdot d$ , построенная по результатам описанных экспериментов, приведена на рис. 4. Термический КПД определяли как отношение мощности, затраченной на нагрев и плавление материала в зоне реза  $W_{\text{пл}}$ , к эффективной мощности  $W_{\text{эфф}}$ :  $\eta_T = W_{\text{пл}} / W_{\text{эфф}}$  [14].

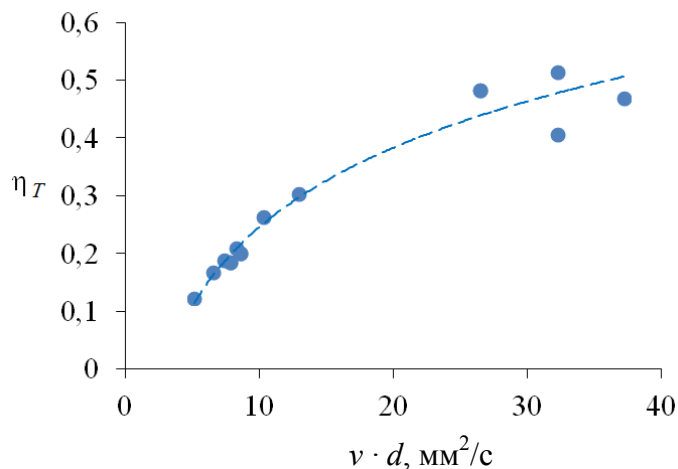


Рис. 4. Зависимость термического КПД процесса лазерной резки от параметра  $v \cdot d$ : точки – экспериментальные данные; пунктирная линия – аппроксимация

Увеличение термического КПД с ростом параметра  $v \cdot d$  связано с отмеченным выше уменьшением потерь энергии на нагрев материала вне зоны лазерного реза.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере образцов из быстрорежущей стали показана возможность использования уравнений энергетического баланса для оценки параметров лазерной резки. С помощью таких уравнений установлено, что требуемая для данного материала энергия лазерного излучения  $q_v$ , вложенная в единицу объема удаляемого из канала реза материала, должна составлять не менее 18 Дж/мм<sup>3</sup>. В противном случае разрезаемый материал может остаться неразделенным.

Оптимизация параметров лазерной резки по критерию шероховатости не входила в задачи данного исследования. Можно только отметить, что шероховатость поверхности реза исследованных образцов соответствовала значениям параметра  $Ra = 1,3 \dots 6,8$  мкм, и это можно считать вполне качественным результатом [8, 10].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Базылева И.О., Галушкин М.Г., Голубев В.С., Дубровина Е.А., Карасев В.А. Термические потери в процессе газолазерной резки металлов // *Современные лазерно-информационные и лазерные технологии: Сб. трудов ИПЛИТ РАН* / под ред. В.Я. Панченко и В.С. Голубева. М.: Интерконтакт Наука, 2005. С. 221–227.
2. Карасев В.А., Голубев В.С., Филиппова Е.О. Термический КПД и эффективный коэффициент поглощения энергии лазерного излучения при газолазерной резке низкоуглеродистой стали в струе азота и воздуха // *Физика и химия обработки материалов*. 2009. № 6. С. 72–77.
3. Фомин В.М., Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Энергетические условия газолазерной резки толстых стальных листов // *Прикладная механика и техническая физика*. 2011. Т. 52. № 3. С. 16–23.
4. Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Энергетические характеристики лазерно-кислородной резки стали излучением  $\text{CO}_2$ -лазера // *Квантовая электроника*. 2012. Т. 42. № 7. С. 640–644.
5. Голышев А.А., Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Высококачественная лазерная резка нержавеющей стали в атмосфере инертного газа с помощью волоконного иттербиевого и  $\text{CO}_2$ -лазеров // *Квантовая электроника*. 2014. Т. 44. № 3. С. 233–238.
6. Голышев А.А., Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Экспериментальное сравнение затрат лазерной энергии при качественной лазерно-кислородной резке низкоуглеродистой стали излучениями волоконного и  $\text{CO}_2$ -лазеров // *Квантовая электроника*. 2015. Т. 45. № 9. С. 873–878.
7. Фомин В.М., Голышев А.А., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Энергетика высококачественной резки стали волоконным и  $\text{CO}_2$ -лазерами // *Прикладная механика и техническая физика*. 2017. Т. 58. № 2. С. 212–220.
8. Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В., Измайлов В.В., Барчуков Д.А. Исследование триботехнических свойств поверхностей, полученных воздействием концентрированных потоков энергии: монография. Тверь: ТвГТУ, 2022. 164 с.
9. Фомин В.М., Голышев А.А., Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Механические характеристики высококачественной лазерной резки стали волоконным и  $\text{CO}_2$ -лазерами // *Прикладная механика и техническая физика*. 2015. Т. 56. № 4. С. 215–225.
10. Голышев А.А. Стандартизация лазерно-кислородной резки по критерию шероховатости поверхности // *Обработка металлов*. 2016. № 1. С. 16–21.
11. Малий Д.В., Медведев П.Н. Влияние шероховатости и теплопроводности обрабатываемой стали на выбор параметров газолазерной резки // *Инженерный вестник Дона*. 2022. № 3. С. 52–61.
12. Галушкин М.Г., Голубев В.С., Гришаев Р.В. Сравнительный анализ аналитических методов оценки термических потерь для газолазерной резки // *Физика и химия обработки материалов*. 2012. № 1. С. 5–9.
13. Голубев В.С. Механизмы удаления расплава при лазерной резке материалов: монография // *Глубокое каналирование и филаментация мощного лазерного излучения в веществе* / под ред. В.Я. Панченко. М.: Интерконтакт Наука, 2009. С. 102–143.

14. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов / под ред. А.Г. Григорьянца. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 664 с.

**Для цитирования:** Измайлов В.В., Новоселова М.В. Об энергетических затратах при лазерной резке образцов быстрорежущей стали // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2026. № 3 (31). С. 5–11.

## **ON ENERGY CONSUMPTIONS IN LASER CUTTING OF HIGH-SPEED STEEL SAMPLES**

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., M.V. NOVOSELOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University,  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: iz2v2@mail.ru

The applicability of a power balance equation for laser cutting of high-speed steel with nitrogen as an assisting gas to improve process efficiency was assessed. Energy parameters obtained experimentally and through theoretical calculations were compared. It was found that material cutting was achieved with an energy per unit melt volume more than  $18 \text{ J/mm}^3$ . The cut surface roughness of the studied samples corresponded to  $Ra = 1.3 \dots 6.8 \text{ } \mu\text{m}$ .

*Keywords:* laser cutting, high-speed steel, energy balance.

Поступила в редакцию/received: 17.04.2026; после рецензирования/revised: 24.04.2026;  
принята/accepted: 30.04.2026

УДК 621.833.6

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-3-11-20

## **СИНТЕЗ И КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КРИВОШИПНО-КОРОМЫСЛОВОГО МЕХАНИЗМА ПРИВОДА ВЕЛОСИПЕДА**

А.А. ГОЛОВНИН, канд. техн. наук

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

© Головнин А.А., 2026

Статья посвящена синтезу и кинематическому анализу рычажного механизма привода вращения заднего колеса велосипеда, ведущим звеном которого является обычная для велосипеда каретка с полноповоротным движением кривошипов. Для синтеза и кинематического анализа выбран механизм с простейшей структурной схемой – четырехзвенный рычажный, а именно кривошипно-коромысловый механизм. Принят общий порядок проектирования рычажного механизма. Приведен выбор с обоснованием задач, которые должны быть решены в процессе синтеза и кинематического анализа. В качестве показателя эффективности работы механизма предложено использовать отношение угла прямого хода кривошипа к углу половины дуги окружности ( $180^\circ$ ). Для кинематического анализа применен графоаналитический