

REINSTALLATION OF A PART WITH A THREADED HOLE ON A TWO-SPINDLE TURNING MODULE

A.P. ARKHAROV, Cand. Sc.

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

An analysis of known methods and chucks for installing treaded parts during processing on lathes is presented. The relevance of the work on creating a method and means for reinstalling a workpiece with a threaded hole on a two-spindle turning module is noted. The essence of the developed method in which a threaded hole is used as a base when rearranging a workpiece on the machine's counter-spindle is outlined. The structure and operating principle of the designed jaw chuck with a threaded elastic sleeve, coupled with the chuck body with the possibility of axial movement, are disclosed. Comparative analyses of the designed method and the chuck with similar known solutions were carried out. The development originality and the achieved technical result are reflected.

Keywords: elastic sleeve, workpiece, threaded hole, reinstallation, method, jaw chuck, basing.

Поступила в редакцию/received: 21.01.2025; после рецензирования/revised: 03.02.2025;
принята/accepted: 05.02.2025

УДК 621.337.8

ОБ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ

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

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

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

Проведен анализ энергетических параметров лазерной резки быстрорежущей стали и их влияние на шероховатость поверхности реза. Показано, что при разделении быстрорежущей стали с продувкой азотом возможно получение качества поверхности реза сопоставимое по параметрам шероховатости с такими обработками, как фрезерование или точение. Энергетические затраты при этом сравнимы по величине с резкой низкоуглеродистой стали.

Ключевые слова: лазерная резка, быстрорежущая сталь, энергетические параметры.

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-2-18-25

ВВЕДЕНИЕ

Лазерная резка является одной из передовых технологий обработки материалов. Она отличается высокой точностью и производительностью раскроя; может применяться для разделения металлов, керамики, полимеров, композитов [1]. Современные лазеры способны резать стальные заготовки толщиной до сотен миллиметров на высокой скорости [2]. Лазерное излучение может доставляться на большие расстояния по оптоволокну, что позволяет проводить резку с небольшой головкой даже на расстоянии нескольких десятков или сотен метров от лазерного генератора [2]. Кроме того, узкая ширина реза (1...2 мм), которая связана с количеством вторичных отходов, служит еще одним преимуществом.

Научный и практический интерес к технологии лазерной резки неуклонно возрастает, что подтверждается увеличением во всем мире количества публикаций, посвященных данному направлению исследований [1–9]. На данный момент накоплен значительный опыт и разработаны технологические рекомендации по разделению различных классов материалов с высокой производительностью и качеством [3–17]. Однако из-за сложности и многофакторности данной технологии остается немало нерешенных и непонятых до конца задач. Например, для высоколегированных быстрорежущих сталей вопросы технологической эффективности процесса лазерной резки, качества получаемых поверхностей резов, места этой технологии в изготовлении инструментов разработаны недостаточно [3, 4]

Цель настоящей работы – провести анализ энергетических параметров лазерной резки быстрорежущей стали и их влияния на шероховатость поверхности реза.

МАТЕРИАЛЫ И ПАРАМЕТРЫ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ

Для проведения исследований использовали заготовки быстрорежущей стали марки Р6М5 (ГОСТ 19265-73) размером $120 \times 40 \times h$ мм, упрочненные с помощью объемной закалки и трехкратного отпуска при температуре 560 °С. Толщина образцов $h = 3,5...9,5$ мм.

Лазерную резку заготовок выполняли на комплексе BySprint 3015 компании Bystronic.

Параметрами, задаваемыми при лазерной резке, являлись:
мощность лазерного излучения,
скорость резки,
положение фокуса луча относительно поверхности образца,
давление вспомогательного (технологического) газа и толщина разделяемого материала.

Влияние отдельных параметров лазерной резки на микрогеометрию поверхности реза образцов Р6М5 представлено в работе [18]. В исследованиях величина мощности излучения $W = 1,8...4,4$ кВт; скорость резки $v = 0,2...3,0$ м/мин.

Расстояние между фокальной точкой и верхней поверхностью образца выбиралось из интервала 2,7...12,0 мм.

В качестве вспомогательного газа использовался азот, давление которого составляло 0,8...1,4 МПа.

На рис. 1 показаны изображения поверхностей резов быстрорежущей стали, полученные при разных положениях фокальной точки.

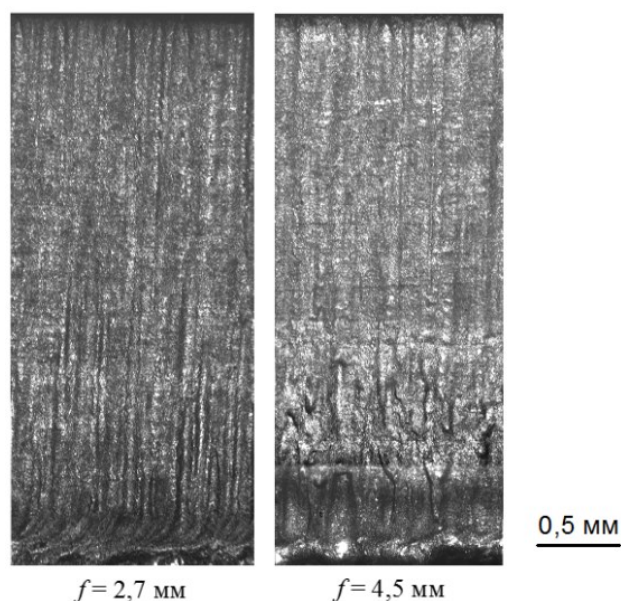


Рис. 1. Внешний вид резов образцов стали марки Р6М5, полученных при разных положениях фокальной точки f от верхней поверхности заготовки

ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ РЕЗА КАК ПОКАЗАТЕЛЬ КАЧЕСТВА ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ

Одним из основных показателей качества лазерной резки материалов служит шероховатость поверхности реза [15–17], которая, в свою очередь, характеризуется стандартными количественными параметрами (ГОСТ Р ИСО 4287-2014, ГОСТ 25142-82, ГОСТ 2789-73). Шероховатость лазерного реза подобна шероховатости поверхностей после таких видов механической обработки, как строгание или фрезерование: довольно грубая, с преобладанием детерминирующей составляющей и ярко выраженным направлением следов обработки (см. рис. 1). Такая шероховатость обычно характеризовалась параметром R_z , который вычислялся как средняя высота пяти элементов профиля (пяти наиболее высоких выступов и пяти наиболее глубоких впадин). Однако все актуальные версии вышеперечисленных стандартов трактуют параметр R_z принципиально иначе (в виде экстремального параметра), а именно как максимальную высоту профиля, равную сумме наибольшей высоты пика профиля и наибольшей глубины впадины профиля в пределах базовой длины. Использование параметра R_z в прежнем значении недопустимо, так как может привести к значительным погрешностям. Тем не менее метрологические средства, которые измеряют прежний параметр R_z , продолжают применяться в некоторых организациях. Кроме того, в технической литературе имеется обширный объем данных по параметрам R_z для различных технических поверхностей. В качестве выхода из сложившейся ситуации мы предложили использовать для данного параметра обозначение R_{10z} в прежнем понимании [18]. К слову, такой параметр введен в новой редакции международного стандарта ISO 21920-2:2021 Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile. Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters [20] (отечественного гармонизированного стандарта пока нет). Трактуются он именно как средняя высота профиля по десяти точкам (пяти самым высоким выступам и пяти самым глубоким впадинам). Поэтому далее при цитировании литературных данных, в которых приводится параметр R_z в устаревшей трактовке, мы используем для него обозначение R_{10z} .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для характеристики режимов лазерной резки различными авторами предложен ряд размерных и безразмерных параметров, рассмотренных ниже.

В качестве безразмерного энергетического параметра с очевидным физическим смыслом можно рассматривать величину $Q = W / (\lambda \cdot h \cdot \Delta T)$ [5, 6, 11–17] – отношение мощности лазерного излучения к потерям энергии в единицу времени за счет теплопроводности по толщине образца, где λ – теплопроводность разрезаемого материала; h – толщина образца; ΔT – изменение температуры образца от начальной до температуры жидкого металла в зоне реза (плавления). Для стали Р6М5 $\Delta T \approx 1310$ град. Средняя теплопроводность в данном интервале принята $\lambda \approx 30$ Вт/(м · К). В таблице приведены значения параметра Q для исследованных образцов быстрорежущей стали, а также литературные данные для низкоуглеродистой стали. Как видно из нее, при использовании азота в качестве вспомогательного газа возможно получение меньшей шероховатости поверхности реза быстрорежущей стали, чем при резке низкоуглеродистой стали. Энергетические затраты по параметру Q при этом сопоставимы по величине.

Безразмерная мощность лазерной резки Q
и соответствующие параметры шероховатости поверхности реза

Источ- ник	Вспомогат. газ	Сталь	h , мм	Q	W/h , Вт/мм	$R10z$; $R10z/h$
[5, 6]	Кислород	Низко- углеродистая	5–10	1,45–1,78	180–220	–; 0,0017–0,0023
[11]			6–10	1,50–2,21	130–233	23–57 мкм; 0,0036–0,0043
[12]			5	1,6	200	8–10 мкм; –
[17]	Не указан		6–14	1,42–2,2	–	–; 0,0036–0,0043
[15]	Азот		3–5	> 8	–	32,3–35,1 мкм; –
Авторы		Быстро- режущая	3,5–9,5	11,8–27,6	463–857	6,6–33,8 мкм; 0,0013–0,0059

Следует отметить, что при разделении металлов с продувкой кислородом рез образуется путем удаления расплава с передней стенки струей кислорода. При горении железа выделяется значительное количество теплоты, что ускоряет процесс локального разрушения материала. Появляется возможность резки с меньшими энергетическими параметрами лазерного излучения.

Резка с использованием азота характеризуется отсутствием окисления; ее производительность составляет лишь $\sim 30\%$ от производительности резки с кислородом, поэтому требуется увеличение мощности лазерного излучения в 2...3 раза. Такой технологический газ, как азот, защищает материал, находящийся в зоне обработки, от воздействия кислорода воздуха. Это оказывает положительное влияние на качество поверхности реза, но требуются большие энергетические затраты для разделения материала [19].

Для достижения минимальной шероховатости поверхности реза мощность излучения CO_2 -лазера необходимо увеличивать пропорционально толщине разрезаемого листа из низкоуглеродистой стали [5, 6, 12, 14, 15]. В указанных работах отмечено, что минимальная степень шероховатости поверхности достигается в том случае, если во всем диапазоне толщин остается постоянной величина мощности лазерного излучения в расчете на единицу толщины разрезаемого материала и объема удаляемого материала W/h (см. таблицу). По этому параметру сравнение наших данных с литературными показывает существенно большие энергетические затраты в расчете на единицу толщины материала при резке быстрорежущей стали с продувкой азотом.

Режим лазерной резки можно также характеризовать с помощью параметра W/v , который, в отличие от предыдущего, показывает затраты энергии лазерного излучения в направлении движения лазерного луча в расчете на единицу длины реза [6]. На рис. 2 приведена зависимость величины W/v от толщины образца, соответствующая значениям $R10z$, не превышающим 20 мкм для исследованных образцов различной толщины ($h = 3,3; 3,5; 6,0; 8,0; 9,5$ мм). Данная зависимость хорошо описывается эмпирической формулой $W/v = 4,66 \cdot h^{2,78}$ Дж/мм, где мощность лазерного излучения W взята в ваттах, скорость перемещения лазерного луча v – в миллиметрах в секунду, толщина образца h – в миллиметрах (коэффициент детерминации $R^2 = 0,92$). Как видно, зависимость существенно нелинейная, т. е. увеличение толщины разрезаемого материала требует непропорционально опережающего увеличения расхода энергии.

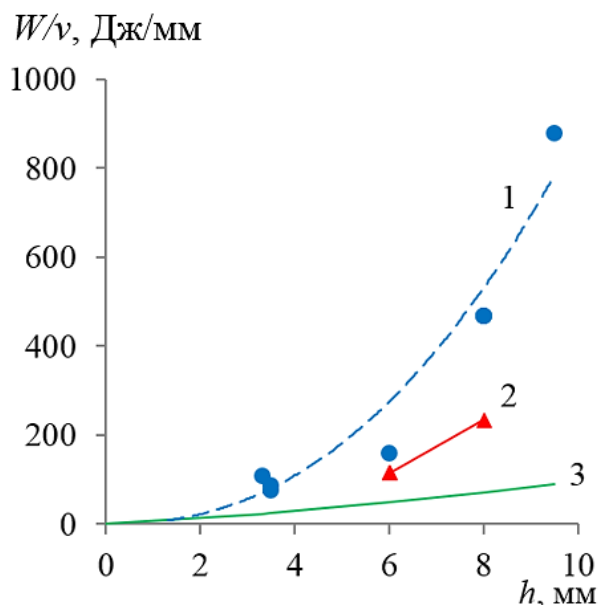


Рис. 2. Затраты энергии лазерного излучения: 1 – быстрорежущая сталь, азот; 2 – образец не разрезался (глубина реза меньше толщины образца); 3 – низкоуглеродистая сталь, кислород, $W/v = 0,35h^2 + 6h$ Дж/мм [6]

Важное значение параметра W/v иллюстрирует линия 2 на рис. 2, построенная согласно режимам лазерной резки, при которых разрезание материала не осуществилось. Для образцов толщиной 6 и 8 мм энергия W/v , равная соответственно 114 и 234 Дж/мм, оказалась недостаточной для разделения материала (глубина реза меньше толщины образца). Уменьшение скорости резки (увеличение затраты энергии на единицу длины реза W/v) привело к разрезанию этих образцов, что можно объяснить повышением плотности мощности излучения в зоне резки.

Плотность мощности в зоне воздействия лазерного излучения на материал – важный фактор, определяющий как характер протекания процесса резки металлов, так и размерные характеристики резов. Этот параметр является комплексной величиной и зависит не только от мощности лазерного излучения, но и от условий его фокусирования. Глубина прорезания и ширина реза обуславливаются положением фокуса относительно поверхности материала. При фокусировке излучения в пятно меньшего диаметра повышается плотность мощности в зоне резки.

Анализ шероховатости образцов (рис. 3, на котором x – расстояние от верхней кромки реза), полученных резкой при различных расстояниях b между фокальной точкой и верхней поверхностью образца, выявил существенную неоднородность распределения величины $R10z$ по глубине. Минимальное и максимальное значения $R10z$ различались почти в 2 раза. Представленные результаты показали, что в этом случае проведение сравнения шероховатости образцов реза в отдельных точках по толщине материала может привести к ошибочным выводам, поэтому необходимо использовать средние по всей высоте реза значения $R10z$ [15].

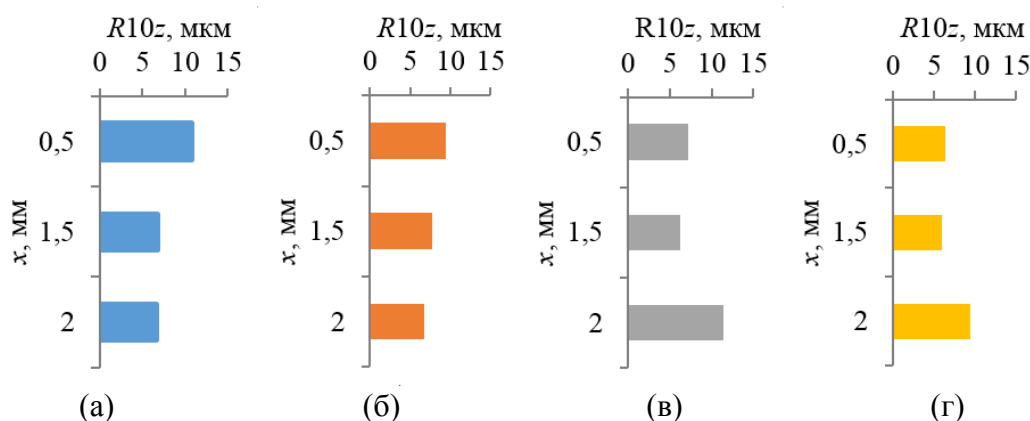


Рис. 3. Изменение шероховатости по толщине образца при разных расстояниях b между фокальной точкой и верхней поверхностью образца: $b = 2,7$ мм (а); $3,1$ мм (б); $3,5$ мм (в); $4,5$ мм (г); толщина образца $h = 3,3$ мм; $W/v = 108$ Дж/мм

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследований было установлено, что энергетические параметры влияют на качество лазерной резки быстрорежущей стали (в частности, на глубину получения качественных резов). Возможно достижение шероховатости $R10z$ менее 10 мкм, что сопоставимо с шероховатостью поверхностей после фрезерования или точения. Использование вспомогательного газа азота способствует эффективной защите поверхности реза от окисления, при этом энергетические затраты по параметру Q близки по величине при разделении низкоуглеродистой и быстрорежущей стали сравнимых толщин.

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. Shin J.S., Song K.H., Oh S.Y., Park S.K. Laser cutting studies on 10–60 mm thick stainless steels with a short focus head for nuclear decommissioning // *Optics & Laser Technology*. 2024. V. 169. P. 110121.

3. Афанасьева Л.Е., Измайлов В.В., Новоселова М.В. Микротопография и микроструктура поверхности быстрорежущей стали после газолазерной резки // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2021. № 5. С. 68–75.

4. 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.

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. Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Экспериментальная оптимизация газолазерной резки толстых стальных листов // *Квантовая электроника*. 2009. Т. 39. № 6. С. 547–551.

7. 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: Сборник трудов ИПЛИТ РАН* / под ред. В.Я. Панченко и В.С. Голубева. М.: Интерконтакт Наука, 2005. С. 221–227.

8. Голубев В.С. Анализ моделей динамики глубокого проникновения лазерного излучения в материалы // *Современные лазерно-информационные и лазерные технологии: Сборник трудов ИПЛИТ РАН* / под ред. В.Я. Панченко и В.С. Голубева. М.: Интерконтакт Наука, 2005. С. 199–207.

9. 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.

10. 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.

11. Минаев И.В., Хонелидзе Д.М., Голышев 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.

12. Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Энергетические характеристики лазерно-кислородной резки стали излучением CO₂-лазера // *Квантовая электроника*. 2012. Т. 42. № 7. С. 640–644.

13. Фомин В.М., Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б., Голышев А.А. О законах подобия течения многофазной жидкости в условиях газолазерной резки металлов // *Динамика многофазных сред: Труды XIV Всероссийского семинара, приуроченного к 75-летию академика РАН Фомина В.М.* / под ред. В.М. Фомина, А.В. Федорова. Новосибирск: ИТПМ СО РАН, 2015. С. 105–108.

14. Голышев А.А., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Оптимальный выбор технологии лазерной резки толстых стальных листов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2016. № 3 (72). С. 15–22.

15. 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.

16. Голышев А.А. Стандартизация лазерно-кислородной резки по критерию шероховатости поверхности // *Обработка металлов*. 2016. № 1 (70). С. 16–21.

17. Малий Д.В., Медведев П.Н. Влияние шероховатости и теплопроводности обрабатываемой стали на выбор параметров газолазерной резки // *Инженерный вестник Дона*. 2022. № 3 (87). С. 52–61.

18. 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.

19. Kellens K., Rodrigues G.C., Dewulf W., Duflou J.R. Energy and resource efficiency of laser cutting processes // *Physics Procedia*. 2014. V. 56. P. 854–864.

20. ISO 21920-2:2021 Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile. Part 2: Terms, definitions and surface texture parameter. URL: <https://www.iso.org/standard/72226.html> (дата обращения: 22.01.2025).

Для цитирования: Измайлов В.В., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В. Об энергетических параметрах лазерной резки быстрорежущей стали // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 2 (26). С. 18–25.

ON THE ENERGY PARAMETERS OF LASER CUTTING OF HIGH-SPEED STEEL

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

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

The energy parameters of laser cutting of high-speed steel and their influence on the roughness of the cut surface are analyzed. It is shown that when cutting high-speed steel with nitrogen purging, it is possible to obtain a cut surface quality comparable in roughness parameters to such processing as milling or turning. Energy costs are comparable in magnitude with cutting low-carbon steel.

Keywords: laser cutting, high-speed steel, energy parameters.

Поступила в редакцию/received: 03.02.2025; после рецензирования/revised: 05.02.2025;
принята/accepted: 10.02.2025