

## ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ НА РАЗМЕР ЗОНЫ ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

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

Тверской государственной технической университет  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: bda@mail.ru

© Барчуков Д.А., Смолякова И.А., Афанасьева Л.Е., 2024

В статье отмечено, что на основе использования методов исследования тепловых процессов при сварке был выполнен анализ зоны лазерного воздействия, образующейся во время лазерной резки быстрорежущей стали. Показано, что на размер закаленного слоя большое влияние оказывает скорость лазерной резки. Напротив, изменение мощности лазерного излучения не приводит к существенному изменению размера зоны лазерного воздействия. Результаты выполненной работы могут быть полезны при разработке новых способов изготовления и упрочнения инструмента из быстрорежущей стали.

*Ключевые слова:* быстрорежущая сталь, лазерная резка, технологические параметры, зона лазерного воздействия.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2024-4-22-28**

### ВВЕДЕНИЕ

Технология лазерной резки получила широкое распространение во всем мире благодаря своим преимуществам. В первую очередь это высокая производительность, точность и качество реза. Технология применяется в различных отраслях промышленности, включая автомобильную, аэрокосмическую, медицинскую [1–6].

При лазерной резке происходит кратковременный локальный нагрев разделяемого материала до температур, превышающих температуру плавления. Расплавленный металл и образующаяся плазма выдуваются вспомогательным газом. При тепловом воздействии лазерного излучения в зоне реза могут проходить структурные превращения, приводящие к изменению механических свойств материала [1–3]. В связи с тем, что разные слои металла нагреваются до различных температур, зона лазерного воздействия (ЗЛВ) имеет слоистое строение (рис. 1). Выделяют три принципиально различных по природе фазовых превращений слоя: слой оплавленного металла (зону закалки из жидкой фазы); слой металла, претерпевшего структурные и фазовые изменения (зону закалки из твердой фазы); переходный слой к основе, остающейся без изменений (зону отпуска) [1].

Размеры отдельных участков и в целом зоны лазерного воздействия, а также степень упрочнения/разупрочнения материала в поверхностных слоях лазерного реза зависят от многих факторов: теплофизических свойств материала, параметров газовой струи, скорости резки, параметров лазерного излучения, толщины разделяемого материала и некоторых других. После лазерного раскрытия поверхности реза заготовки, как правило, подвергают слесарной обработке по удалению металла с измененной структурой и свойствами. Важной задачей является оценка целесообразности и масштабов проведения слесарных операций. Цель настоящей работы – провести анализ влияния технологических параметров лазерной резки на протяженность зоны лазерного воздействия.



Рис. 1. Схема строения зоны лазерного воздействия для стали:  
 $T$  – температура нагрева;  $T_c$  – температура кристаллизации;  
 $A_{c1}$  – критическая точка;  $t$  – время

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Технология лазерной резки углеродистых, низколегированных сталей и некоторых сплавов цветных металлов наиболее изучена. Накоплен значительный опыт, разработаны технологические рекомендации, позволяющие с высокой производительностью и качеством выполнять раскрой. Для высоколегированных сталей и композиций на их основе вопросы о технологическом качестве процесса лазерной резки и о месте этой технологии в изготовлении изделий рассмотрены недостаточно полно [7–12]. С учетом факторов высокой стоимости и трудной обрабатываемости при изготовлении инструмента в качестве исследуемого материала в данной работе была выбрана быстрорежущая сталь марки Р6М5 ГОСТ 19265-73 (М2 по американскому марочнику). Она является ведущей сталью на рынке производства инструментов как в нашей стране, так и за рубежом, относится к вольфрамомолибденовым сталям оптимального состава.

Для расчетов температурных полей при лазерной резке быстрорежущей стали использовали методы исследования тепловых процессов при сварке, разработанные Н.Н. Рыкалиным в XX веке [13] и подтвержденные многолетним опытом сварочного производства при нагреве металла дугой и газовым пламенем. Необходимость распространения данных методов на исследование тепловых процессов при лазерной резке доказана в работах [14–16].

Параметры тепловых полей при лазерной резке быстрорежущей стали определяли по аналитическим выражениям, которые представляют собой решения дифференциальных уравнений теплопроводности в линейной постановке [13, 14]. Это значит, что коэффициенты теплофизических свойств считаются не зависящими от температуры. Уравнение, описывающее процесс распределения тепла вдоль тела при нагреве мощным быстро движущимся источником, имеет вид [14]

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

где  $e = 2,718$  – число Эйлера;  $v$  – скорость лазерной резки, м/с;  $R$  – расстояние от рассматриваемой точки в поверхностном слое детали до источника тепла, м;  $\lambda$  – 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 ( $A = 0,82$  для стали));  $a$  –

температуропроводность обрабатываемого материала,  $\text{м}^2/\text{с}$  ( $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ , где  $c$  – удельная теплоемкость быстрорежущей стали,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\rho$  – плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ).

Используя данное выше уравнение, выполняли расчеты распределения температуры в зоне лазерного воздействия при лазерной резке быстрорежущих сталей на различных режимах. Учитывая значения критических температур для стали Р6М5, определяли протяженность зоны лазерного воздействия в целом и размеры отдельных участков – зоны закалки и переходной зоны (зоны отпуска).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Процесс удаления расплава при лазерной резке сложен. Во время создания моделей необходимо учитывать законы газодинамики, гидродинамики, теплофизики, физики твердого тела, оптики [17–20]. Несмотря на широкое практическое использование, большинство исследователей считают, что технология лазерной резки далека от полного понимания. На текущий момент не существует единой модели, позволяющей учесть все особенности процесса. В связи с этим важное практическое значение имеет моделирование отдельных этапов технологического процесса, позволяющих оптимизировать режимы раскроя.

Согласно указанному выше уравнению, описывающему процесс распределения тепла вдоль тела при нагреве мощным быстродвижущимся источником, кроме свойств самого обрабатываемого материала, на протяженность зоны лазерного воздействия влияют мощность лазерного излучения и скорость резки.

В табл. 1 и на рис. 2 представлены результаты исследований влияния мощности лазерного излучения на формирование зоны лазерного воздействия, в том числе на протяженность отдельных участков. При расчетах скорость резки была постоянной и равнялась 0,043 м/с.

Таблица 1. Результаты расчетов протяженности ЗЛВ при постоянной  $v$  и переменной  $P$

$P$ , Вт	ЗЛВ, мкм	Зона закалки, мкм	Переходная зона, мкм
1 000	436	139	296
2 000	474	151	323
3 000	481	154	327
4 000	484	153	331
5 000	492	161	331

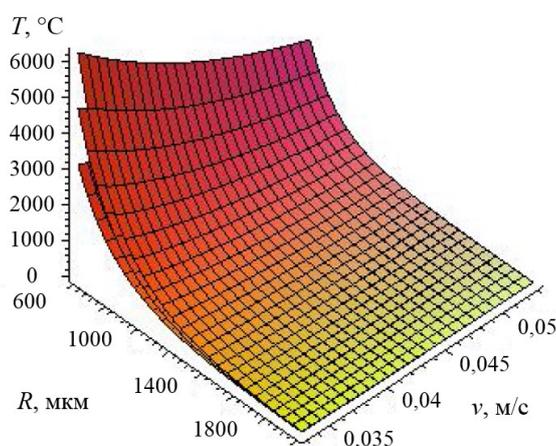


Рис. 2. Распределение температуры в ЗЛВ при лазерной резке стали с мощностью излучения 2 000 Вт (нижний график); 3 000 Вт (средний); 4 000 Вт (верхний)

В схеме расчетов источник тепла располагался в центре реза. Если разделение материала осуществляется, то формируется рез некоторой ширины. Поэтому  $R$  (расстояние от рассматриваемой точки в поверхностном слое заготовки) не может быть равно нулю и принимает значение, равное половине ширины реза (если проводится исследование поверхности реза) или больше (в случаях расчетов температуры в ЗЛВ или основном металле). Размер зоны закалки включает в себя как зону оплавления (зону закалки из жидкой фазы), так и зону закалки из твердой фазы. Поскольку в сталях процессы плавления и кристаллизации происходят в интервале температур, то определить, с какой температуры начинается формирование оплавленной зоны, затруднительно. Поэтому при установлении размеров началом зоны закалки считали кромку реза, а окончанием – расстояние, при котором в стали была температура нагрева  $815\text{ }^{\circ}\text{C}$ , соответствующая значению критической точки  $A_{c1}$ . При нагреве до этой температуры в стали данной марки образуется аустенит ( $\gamma$  – железо).

Протяженность зоны отпуска соответствовала участку, нагретому в интервале температур  $815\text{...}200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При верхних значениях нагрева в стали возможно разупрочнение за счет распада мартенсита, а также упрочнение за счет прохождения процессов дисперсионного твердения. При отпуске  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  в предварительно закаленных быстрорежущих сталях еще возможно образование карбидов цементитного типа, а следовательно, некоторое повышение твердости.

Анализ полученных данных показал, что даже кратное увеличение мощности излучения повышает протяженность зоны лазерного воздействия незначительно. Это связано с тем, что при большей мощности лазерного излучения возрастает температура расплавленного металла и плазмы, которые выдуваются вспомогательным газом из зоны реза и не успевают заметно увеличить протяженность зоны лазерного воздействия.

Скорость лазерной резки оказывает гораздо большее влияние на размер зоны лазерного воздействия (табл. 2 и рис. 3). В табл. 2 представлены результаты расчетов при постоянной мощности лазерного излучения  $3\ 000\text{ Вт}$  и переменной скорости резки.

Технологию лазерной резки можно рассматривать не только как разделительную, но и как одновременно упрочняющую обработку при изготовлении некоторых инструментов из быстрорежущей стали. Например, в работе [11] дана рекомендация использовать лазерную резку при изготовлении малоразмерного инструмента. Удаление припусков наплавленной быстрорежущей стали с помощью лазерной резки позволяет существенно сократить технологический цикл изготовления биметаллического инструмента [10].

Таблица 2. Результаты расчетов протяженности ЗЛВ при переменной  $v$  и постоянной  $P$

$v$ , м/с	ЗЛВ, мкм	Зона закалки, мкм	Переходная зона, мкм
0,05	424	141	282
0,04	525	170	354
0,03	669	223	446
0,02	969	307	662
0,01	1 838	577	1 260

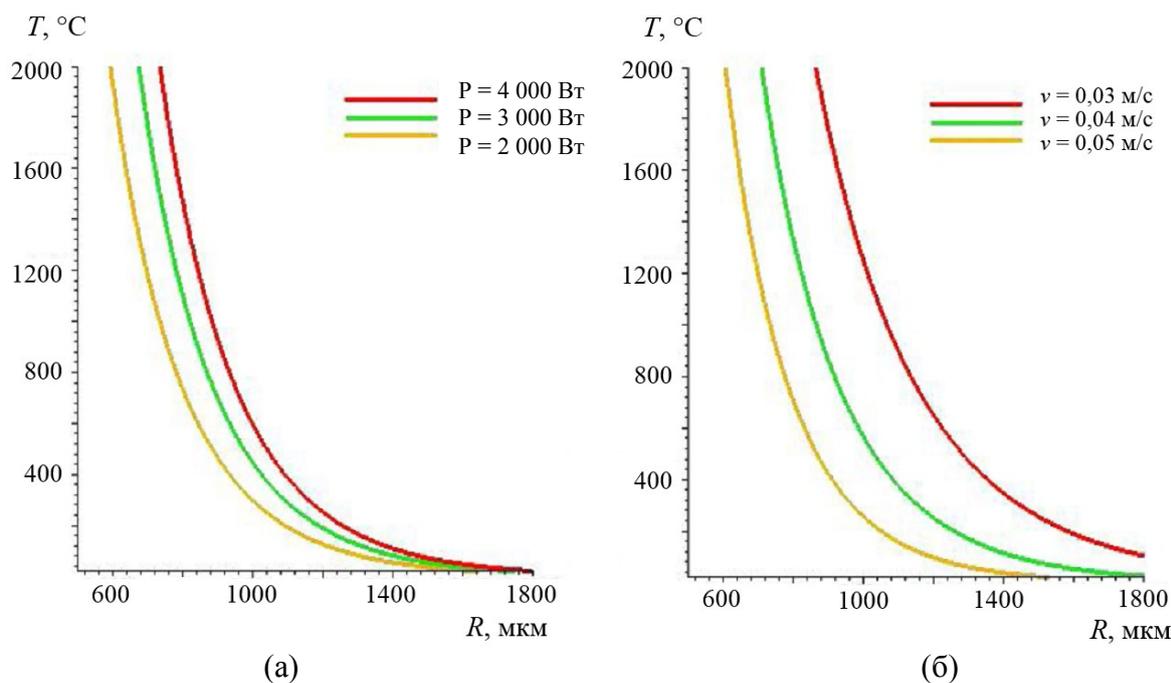


Рис. 3. Изменение температуры в зоне лазерного воздействия: переменная мощность излучения (а); скорость резки (б)

Отмечается ряд положительных свойств материала в зоне лазерного воздействия. В быстрорежущей стали формируется зона закалки с повышенной микротвердостью до  $10\,600 \pm 160$  МПа и износостойкостью [12]. В предварительно закаленной и отпущенной быстрорежущей стали при лазерной резке не успевает проходить распад мартенсита при нагреве в интервале температур  $A_{c1} \dots 620$  °С, т.е. переходная зона, или зона отпуска, не выявляется. Кроме того, авторами работы [12] показано, что зона закалки из жидкой фазы имеет ячеистое строение. Первичные карбиды практически все растворяются в металлической матрице, следовательно, при эксплуатации исключается преждевременный выход из строя инструмента из-за выкрашивания крупных карбидов в режущей кромке. При лазерной резке отсутствуют зоны многократного нагрева, что способствует повышению однородности свойств по всей поверхности реза. Перечисленные положительные свойства, а также результаты настоящей работы могут быть основой для пересмотра существующих технологий производства инструментов и разработки новых с использованием лазерной резки.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные расчеты показали, что размер закаленного слоя в зоне лазерного воздействия при лазерной резке быстрорежущей стали изменяется незначительно с увеличением мощности лазерного излучения. Глубина упрочненного слоя в большей степени зависит от скорости резки. Разработанные Н.Н. Рыкалиным методы исследования тепловых процессов при сварке вполне можно использовать для анализа зоны лазерного воздействия при лазерной резке.

Полученные результаты влияния технологических параметров лазерной резки на формирование зоны лазерного воздействия могут быть полезны при планировании и проведении последующих слесарных работ для конструкционных материалов, а также оценке глубины упрочненного слоя для инструментальных сталей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2006. 664 с.
2. Riveiro A., Quintero F., Boutinguiza M., Del Val J., Comesaña R., Lusquiños F., Pou J. Laser Cutting: A review on the Influence of Assist Gas // *Materials*. 2019. V. 12. № 1. P. 157.
3. Khatak P. Laser Cutting Technique: A Literature Review // *Materials Today: Proceedings*. 2022. V. 56. P. 2484–2489.
4. Genna S., Menna E., Rubino G., Tagliaferri V. Experimental Investigation of Industrial Laser Cutting: The Effect of the Material Selection and the Process Parameters on the Kerf Quality // *Applied Sciences*. 2020. V. 10. № 14. P. 4956.
5. Kanyilmaz A. The Problematic Nature of Steel Hollow Section Joint Fabrication, and a Remedy Using Laser Cutting Technology: A Review of Research, Applications, Opportunities // *Engineering Structures*. 2019. V. 183. P. 1027–1048.
6. Parthiban A., Sathish T., Chandran S.S., Venkatesh R., Vijayan V. Optimization of CO<sub>2</sub> Laser Cutting Parameters on Austenite Stainless Steel Using Grey Relational Analysis // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2019. V. 10. № 1. P. 984–992.
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. Sobih M., Crouse P.L., Li L. Striation-free Fibre Laser Cutting of Mild Steel Sheets // *Applied Physics A*. 2008. V. 90. № 1. P. 171–174.
9. Wee L.M., Li L. An Analytical Model for Striation Formation in Laser Cutting // *Applied Surface Science*. 2005. V. 247. № 1–4. P. 277–284.
10. Афанасьева Л.Е., Барабонова И.А., Раткевич Г.В., Новоселова М.В., Гречишкин Р.М. Микроморфология поверхности и абразивная износостойкость инструментальной стали после газолазерной резки // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2016. № 12. С. 46–53.
11. Afanasieva L., Bolotov A., Abu-Abed F. High-Speed Steel Technology Substitution in Mining Machinery – an Experimental Study // *Acta Monstaniatica Slovaca*. 2024. V. 29 (1). P. 50–61.
12. 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.
13. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. М.: Машгиз. 1951. 296 с.
14. Безъязычный В.Ф., Семенов А.А. Расчетное определение температуры в поверхностном слое детали при лазерной резке // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2013. № 7. С. 35–40.
15. Зоренко Д.А., Барчуков Д.А., Афанасьева Л.Е. Моделирование температурных полей при лазерном раскрое стального проката // *Металлообработка*. 2021. № 2 (122). С. 26–31.
16. Tani G., Tomesani L., Campana G., Fortunato A. Quality factors assessed by analytical modelling in laser cutting // *Thin Solid Films*. 2004. V. 453. P. 486–491.

17. Ковалев О.Б., Оришич А.М., Петров А.П., Фомин В.М., Юдин П.В., Малов А.Н., Ермолаев Г.В. Моделирование фронта плавления и разрушения пленки расплава при газолазерной резке металлов // *Прикладная механика и техническая физика*. 2004. Т. 45. № 1. С. 162–172.

18. Пугачева Н.Б., Смирнов С.В., Ермолаев Г.В., Ковалев О.Б., Оришич А.М. Микроструктура поверхности и особенности моделирования физико-химических процессов при кислородной лазерной резке конструкционных сталей // *Физика и химия обработки материалов*. 2010. № 1. С. 15–22.

19. Зайцев А.В., Ковалев О.Б., Оришич А.М., Фомин В.М., Шулятьев В.Б. Газодинамика лазерной резки толстых металлических пластин непрерывным СО<sub>2</sub>-лазером // *Вычислительные технологии*. 2006. Т. 11. № S1. С. 74–83.

20. Nabavi S.F., Farshidianfar A., Dalir H. An Applicable Review on Recent Laser Beam Cutting Process Characteristics Modeling: Geometrical, Metallurgical, Mechanical, and Defect // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. V. 130. № 5. P. 2159–2217.

**Для цитирования:** 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.

## INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF LASER CUTTING ON THE SIZE OF THE LASER IMPACT ZONE

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

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

It is noted in the article that based on the use of methods of research of thermal processes during welding, the laser impact zone formed during laser cutting of high-speed steel has been analyzed. It was shown that the size of the hardened layer is greatly affected by the laser cutting speed. On the contrary, changing the laser radiation power does not lead to a significant change in the size of the laser impact zone. The results of the work performed can be useful in developing new methods for manufacturing and hardening tools from high-speed steel.

*Keywords:* high-speed steel, laser cutting, technological parameters, laser impact zone.

Поступила в редакцию/received: 30.08.2024; после рецензирования/revised: 09.09.2024;  
принята/accepted: 20.09.2024