

Влияние шероховатости и теплопроводности обрабатываемой стали на выбор параметров газолазерной резки

Д.В. Малый, П.Н. Медведев

Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого, Тула

Аннотация: В статье проведен анализ влияния шероховатости и теплопроводности обрабатываемой стали на выбор параметров газолазерной резки. Описаны возможности и преимущества использования газолазерной резки в производстве. Представлены результаты экспериментального исследования образцов из стали марки Ст3 различной толщины. Анализ полученных данных показал, что при увеличении значения скорости газолазерной резки возрастает параметр шероховатости, а мощность лазера практически не влияет на значение шероховатости. Также авторами предпринята попытка учета влияния теплопроводности обрабатываемого материала на выбор характеристик лазерной резки. Было установлено, что для обеспечения минимальной шероховатости для сталей с большей теплопроводностью следует использовать повышенные значения мощности и скорости реза.

Ключевые слова: газолазерная резка, шероховатость, теплопроводность, параметры, математические модели, экспериментальное исследование.

В практике машиноиспользования в различных отраслях промышленности передовых стран главной задачей технического сервиса, обеспечивающего получение ощутимого эффекта, является полное и безусловное удовлетворение спроса потребителей машин на запасные части. Восстановление изношенных деталей, ремонт узлов и механизмов промышленной техники, осуществляют как крупные, так и мелкие специализированные производства, которым удается задействовать высокоэффективное оборудование и технологии, способные обеспечить высокое качество выпускаемой продукции при низкой ее себестоимости [1]. В настоящее время прослеживается увеличение спроса на высокоточное, наукоемкое, высокопроизводительное технологическое оборудование, способное обеспечить высокое качество и низкую себестоимость выпуска заготовок и изделий из листового проката при автоматизированном машино- и авиастроения [2 – 4]. Одной из таких технологий является высокоточная лазерная резка, использующая прецизионное лазерное,

высокопроизводительное оборудование – комплексы для раскроя листового проката.

Газолазерная резка позволяет экономить на изготовлении штампа, сокращает время подготовки производства, дает возможность в любой момент внести корректировки любой из деталей, позволяет получить узкие резы высокого качества при минимальной зоне термического влияния, что способствует сохранению физико-химических свойств обрабатываемого материала [5]. Вследствие технологических особенностей, лазерный раскрой является наиболее высокоточным и высокопроизводительным методом резки листового металла. Кроме того, за счет максимального расположения деталей на листе, удастся значительно экономить материал и, тем самым, удешевлять себестоимость конечной продукции. Лазерная резка имеет широкий список областей применения, но основной является изготовление деталей машин, роботов, сельскохозяйственной техники [6, с. 393].

До сих пор лазерную резку описывают не как единый процесс, а как совокупность термодинамических, газодинамических, квантовых и других процессов. Нет достоверной физической картины процесса, поэтому нет и аналитических моделей, описывающих получаемый результат, в частности, качество поверхности реза. В данной ситуации складывается необходимость разработки подходов к выбору и оптимизации параметров процесса, обеспечивающих заданное качество на листах конструкционных материалов разной толщины.

Обозначим переменные лазерной резки: H – толщина обрабатываемой стали; R_z – значение шероховатости листа; W – мощность излучения лазера; V – скорость резки; P – давление вспомогательного газа; b – ширина реза; γ – коэффициент температуропроводности материала; λ – коэффициент теплопроводности; T_m – температура плавления материала; F – фокусное расстояние. Таким образом $W/(\lambda H T_m)$ – значение, пропорциональное

удельной мощности протяженного источника; Vb/γ – число Пекле Pe ; b/H – параметр, характеризующий силовое воздействие газового потока на пленку расплава.

Было проведено экспериментальное исследование на образцах из стали марки Ст3 толщиной 6, 10, 14 мм. Показатели параметров газолазерной резки варьировали в пределах $W = 1200\dots1900$ Вт, $V = 700\dots1600$ мм/мин, $P = 0,02\dots0,05$ МПа, $F = 295\dots305$ мм. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица № 1

Параметры лазерной резки

№ п/п	Параметры лазерной резки			
	$W/(\lambda HT_m)$	b/H	Vb/γ	R_{zH}
1	2,2	0,078	0,91	0,00418
2	2,1	0,07	0,82	0,0043
3	1,8	0,064	0,754	0,00416
4	1,6	0,06	0,682	0,0038
5	1,44	0,055	0,6	0,0036
6	1,42	0,052	0,513	0,0037
7	1,5	0,05	0,53	0,0038
8	1,6	0,047	0,55	0,0039
9	1,63	0,045	0,567	0,0039

По данным таблицы 1 с помощью Statgraphics Centurion XV была разработана математическая модель 1, описывающая влияние параметров лазерной резки на величину R_z/H . Полученные данные позволяют описать следующую модель взаимосвязи параметра R_z/H с параметрами лазерной резки:

$$\begin{aligned} \frac{R_z}{H} = & 0.018 + 0.0036 \times \left(\frac{W}{\lambda HT_m}\right) - 0.03 \times \frac{Vb}{\gamma} - 0.3 \times \frac{b}{H} - 0.00047 \times \left(\left(\frac{W}{\lambda HT_m}\right) \times \left(\frac{Vb}{\gamma}\right)\right)^3 \\ & + 0.63 \times \left(\left(\frac{Vb}{\gamma}\right) \times \left(\frac{b}{H}\right)\right) - 0.048 \times \left(\left(\frac{W}{\lambda HT_m}\right) \times \left(\frac{b}{H}\right)\right) \end{aligned} \quad (1)$$

На рисунках 1 и 2 представлены трехмерные графики, иллюстрирующие влияние параметров ЛР на величину R_z/H .

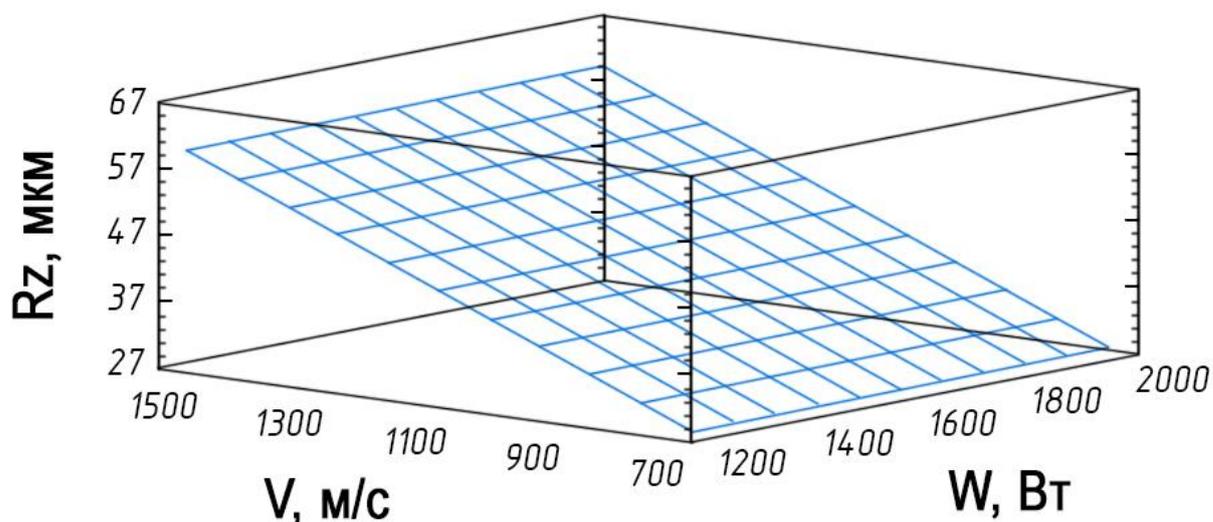


Рис. 1. – Влияние V и W на величину R_z/H
($H = 6$ мм, $P = 0,02$ Мпа; $F = 295$ мм)

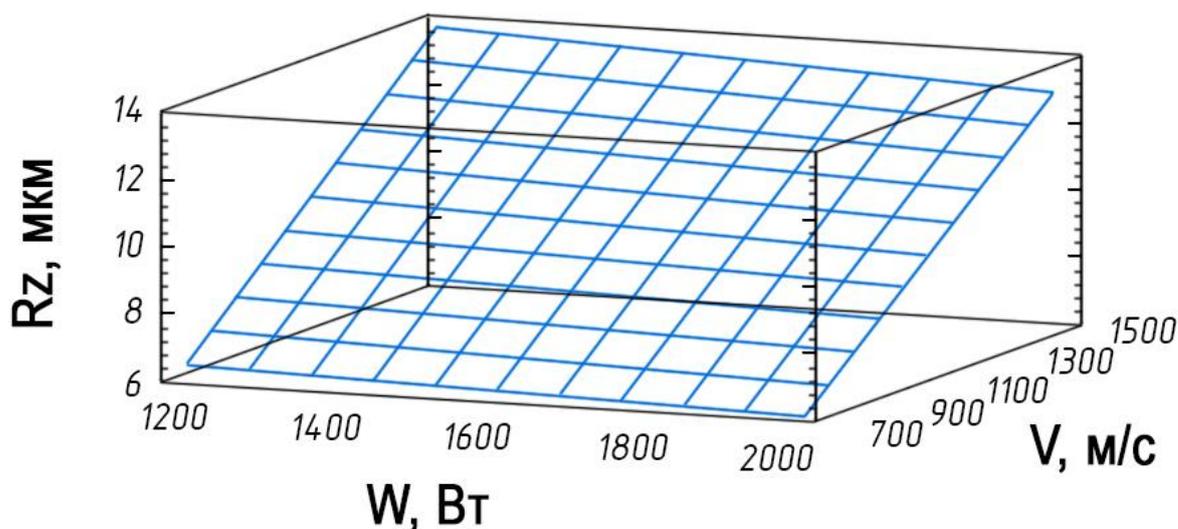


Рис. 2. – Влияние V и W на величину R_z/H
($H = 10$ мм, $P = 0,02$ Мпа; $F = 295$ мм)

Анализ данных показывает, что при увеличении значения скорости резки возрастает параметр шероховатости, а мощность лазера практически не влияет на значение шероховатости.

Как показано в аналитическом обзоре, происходящие при лазерной резке процессы на определенном этапе зависят от теплопроводности материала [7]. На основе разработанных моделей предпринята попытка учета

влияния теплопроводности обрабатываемого материала на выбор параметров лазерной резки для получения заданной шероховатости поверхности реза [8, 9].

Теплопроводность изменяли в диапазоне значений от 27 Вт/(м*град) (сталь Р6М5) до 63 Вт/(м*град) (сталь 08кп). Теплопроводность стали Ст3 (51Вт/(м*град)) занимает промежуточное положение. Для выявления связи между W и λ , а также V и λ модель 1 была упрощена без существенного ухудшения показателей адекватности модели 2, что подтверждается удовлетворительной прогнозирующей способностью (рис. 3.):

$$\frac{R_z}{H} = 0.003 + 0.00054 \times \left(\frac{W}{\lambda H T_m} \right) + 0.0013 \times \left(\frac{Vb}{\gamma} \right) - 0.015 \times \left(\frac{b}{H} \right) \quad (2)$$

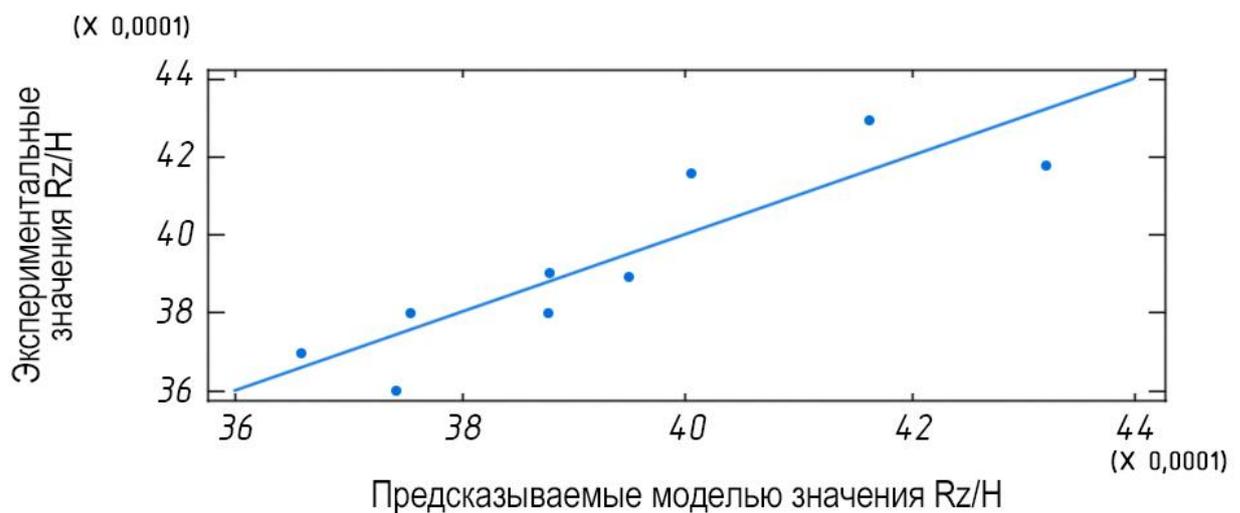


Рис. 3. – Прогнозирующая способность модели 2

Подставив в модель (2) значения $Rz = 36$ мкм (минимальное значение шероховатости для листов толщиной 6 мм и 10 мм); средние значения скорости и мощности $V = 0,019$ м/с; $W = 1250$ Вт; $T_m = 1400$ °С, получили соотношения между W и λ , V и λ :

$$W = 35\lambda - 1250; \quad V = 0.0005\lambda - 0.016 \quad (3)$$

Указанные соотношения для получения минимальной шероховатости поверхности представлены на рисунке 4 (а, б).

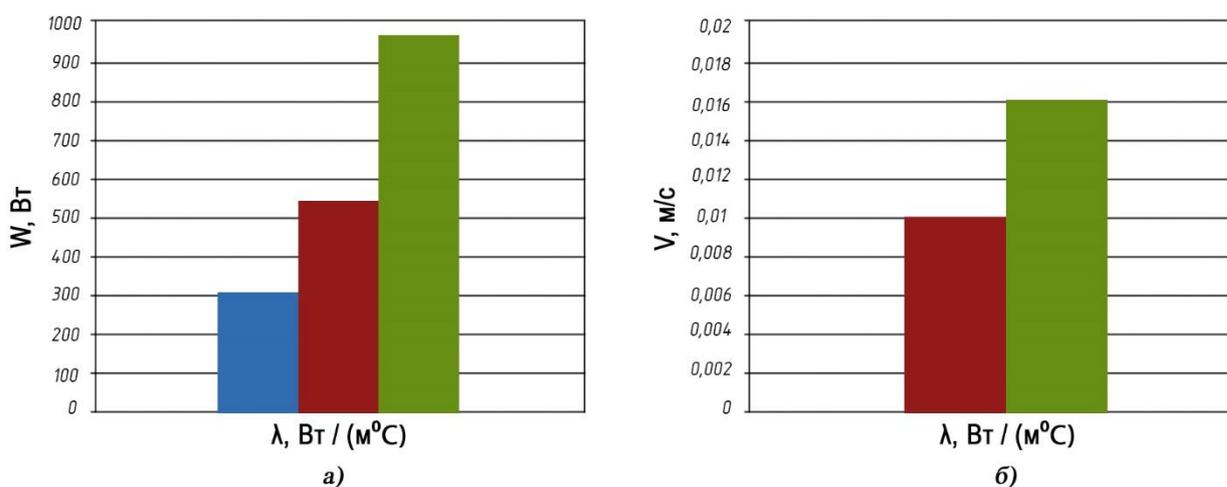


Рис. 4. – Соотношения значений задаваемой мощности лазера (а), скорости резки (б) и теплопроводности материала для получения минимального значения шероховатости

Из рисунка 4 (а) получили, что для минимизации значения шероховатости поверхности необходимо для сталей с большей теплопроводностью использовать повышенные значения мощности. Из рисунка 4 (б) видно, что для получения минимального значения шероховатости нужно брать для стали с большей теплопроводностью большее значение скорости резки. Для стали Р6М5 с невысоким значением теплопроводности ($\lambda = 27$ Вт/(м*град)) невозможно получить необходимое минимальное значение шероховатости ($R_z = 36$ мкм).

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы:

1. Разработаны модели влияния параметров лазерной резки на показатели качества реза (шероховатость поверхности), учитывающие теплофизические свойства обрабатываемого материала. При увеличении значения скорости резки возрастает параметр шероховатости. Изменение мощности лазера практически не влияет на значение шероховатости.

2. Установлены удельные значения лазерной энергии, приходящиеся на единицу объема удаляемого материала, и мощности на единицу толщины листа для листов стали марки Ст3 при лазерной резке для обеспечения

минимальной шероховатости поверхности ($R_z = 36$ мкм). Значения $W/[VH\text{bp}(cT_m + L_m)] = 2,6$; $W/(\lambda HT_m) = 1,9$, указанным соотношениям соответствует постоянная величина числа Пекле $Pe = 0,6$.

3. Предпринята попытка учета влияния теплопроводности обрабатываемого материала на выбор характеристик лазерной резки. Для обеспечения минимальной шероховатости ($R_z = 36$ мкм) для сталей с большей теплопроводностью следует использовать повышенные значения мощности и скорости реза [10].

Литература

1. Афанасьева Л.Е., Елицкий М.Н., Зубков Н.С., Новоселова М.В. Влияние энергетических параметров газолазерной резки на микрогеометрию поверхности реза стали Р6М5 // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования, 2008. № 1. С. 127-131.

2. Syreyshchikova N.V., Pimenov D.Y., Yaroslavova E.N., Gupta M.K., Sharma S., Giasin K. Product quality planning in laser metal processing based on open innovation using quality function deployment // Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity, 2021. Vol. 7, № 4. DOI: 10.3390/joitmc7040240.

3. Proskuryakov N.A., Putilova U.S., Mamadaliev R.A., Teplouhov O.Yu. Analysis of the dependence of the quality of the connection by means of manual and automatic welding of aluminum alloy AD33 // Инженерный вестник Дона, 2020. №10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2020/6618.

4. Шпилев А.И., Исхаков Ф.Р., Нагулин К.Ю., Гильмутдинов А.Х. Исследование и оптимизация газопорошковых потоков во внеосевой сопловой насадке лазерного технологического комплекса // Инженерный вестник Дона, 2017. № 3 (46). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4278.

5. Chiabert, P., Aliev, K. Management of Laser-Cut Sheet-Metal Part Using Collaborative Robots // IFIP Advances in Information and Communication Technology, 2022. Vol. 639, pp. 59-73. DOI: 10.1007/978-3-030-94335-6_5.

6. Минаев И.В., Сергеев А.Н., Кубанова А.Н., Добровольский Н.М., Гвоздев А.Е., Кутепов С.Н., Малий Д.В. История развития лазера и особенности его применения // Чебышевский сборник, 2019. Т. 20. № 4 (72). С. 387-402.

7. Гвоздев А.Е., Сергеев Н.Н., Минаев И.В., Колмаков А.Г., Тихонова И.В., Сергеев А.Н., Провоторов Д.А., Хонелидзе Д.М., Малий Д.В., Голышев И.В. Распределение температур и структура в зоне термического влияния для стальных листов после лазерной резки // Материаловедение, 2016. № 9. С. 3-7.

8. Терегулов Н.Г., Соколов Б.К., Матвеева В.С. Качество обрабатываемой поверхности при лазерной резке и его контроль // Дефектоскопия, 2007. № 2. С. 62-72.

9. Данилов В.И., Зуев Л.Б., Кузнецова Н.И., Малов А.Н., Оришич А.М., Фомин В.М., Шулятьев В.Б. Особенности лазерной резки листовой стали и мониторинг качества образцов после лазерного воздействия // Прикладная механика и техническая физика, 2006. Т. 47. № 4 (278). С. 176-184.

10. Гвоздев А.Е., Минаев И.В., Сергеев А.Н., Медведев П.Н., Малий Д.В., Кутепов С.Н., Дорохин Ю.С., Калинин А.А., Маляров А.В. Математический цифровой программный комплекс для получения оптимальных параметров газолазерной обработки с минимальными значениями протяженности зоны термического влияния, ортогональности и шероховатости поверхности реза металлических систем // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2021666051 от 06.10.2021 г. URL: elibrary.ru/item.asp?id=47118138.

References

1. Afanaseva, L.E., Elickij, M.N., Zubkov, N.S., Novoselova, M.V. Mekhanika i fizika processov na poverhnosti i v kontakte tverdyh tel, detalej tekhnologicheskogo i energeticheskogo oborudovaniya, 2008. № 1. pp. 127-131.
2. Syreyshchikova, N.V., Pimenov, D.Y., Yaroslavova, E.N., Gupta, M.K., Sharma, S., Giasin, K. Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity, 2021. Vol. 7, № 4. DOI: 10.3390/joitmc7040240.
3. Proskuryakov, N.A., Putilova, U.S., Mamadaliev, R.A., Teplouhov, O.Yu. Inzhenernyj vestnik Dona, 2020. №10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2020/6618.
4. Shpilev A.I., Iskhakov F.R., Nagulin K.Yu., Gilmutdinov A.H. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017. № 3 (46). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4278
5. Chiabert, P., Aliev, K. IFIP Advances in Information and Communication Technology, 2022. Vol. 639, pp. 59-73. DOI: 10.1007/978-3-030-94335-6_5.
6. Minaev I.V., Sergeev A.N., Kubanova A.N., Dobrovolskij N.M., Gvozdev A.E., Kutepov S.N., Malij D.V. Chebyshevskij sbornik, 2019. Vol. 20. № 4 (72). pp. 387-402.
7. Gvozdev A.E., Sergeev N.N., Minaev I.V., Kolmakov A.G., Tihonova I.V., Sergeev A.N., Provotorov D.A., Honelidze D.M., Malij D.V., Golyshev I.V. Materialovedenie, 2016. № 9. pp. 3-7.
8. Teregulov N.G., Sokolov B.K., Matveeva V.S. Defektoskopiya, 2007. № 2. pp. 62-72.
9. Danilov V.I., Zuev L.B., Kuznecova N.I., Malov A.N., Orishich A.M., Fomin V.M., SHulyatev V.B. Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika, 2006. Vol. 47. № 4 (278). pp. 176-184.
10. Gvozdev A.E., Minaev I.V., Sergeev A.N., Medvedev P.N., Malij D.V., Kutepov S.N., Dorohin Yu.S., Kalinin A.A., Malyarov A.V. Matematicheskij cifrovoj programmnyj kompleks dlya polucheniya optimal'nyh parametrov



gazolazernoj obrabotki s minimal'nymi znacheniyami protyazhennosti zony termicheskogo vliyaniya, ortogonal'nosti i sherohovatosti poverhnosti reza metallicheskih sistem [Mathematical digital software package for obtaining optimal parameters of gas laser processing with minimal values of the extent of the zone of thermal influence, orthogonality and roughness of the cutting surface of metal systems]. Svidetel'stvo o registracii programmy dlya EVM № 2021666051 ot 06.10.2021. URL: elibrary.ru/item.asp?id=47118138.