

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МИНИМАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ РЕЗА

*Кутепов С.Н., Клементьев Д.С.*

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

**Ключевые слова:** лазерная резка, поверхность реза, зона газолазерного термического влияния, углеродный эквивалент, шероховатость.

**Аннотация.** В статье выполнено математическое моделирование процессов лазерной резки. Разработаны адекватные математические нелинейные регрессионные модели протяженности зоны газолазерного термического влияния ( $L$ ); угла отклонения от перпендикулярности поверхности реза ( $\alpha$ ); шероховатости поверхности газолазерного реза ( $Rz$ ), которые связывают показатели качества поверхности газолазерной резки с параметрами лазерной обработки, содержанием углерода в стали и толщиной стального листа. Многопараметрической оптимизацией найдены необходимые режимы лазерной резки, обеспечивающие получение минимальных значений показателей качества поверхности реза.

## OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF LASER CUTTING OF ALLOY STEELS TO OBTAIN MINIMUM QUALITY INDICATORS OF THE CUTTING SURFACE

*Kutepov S.N., Klementyev D.S.*

*Tula State Pedagogical University named after L.N. Tolstoy, Tula*

**Keywords:** laser cutting, cutting surface, zone of gas-laser thermal influence, carbon equivalent, roughness.

**Abstract.** Mathematical modeling of laser cutting processes is performed in the article. Adequate mathematical nonlinear regression models have been developed for the extent of the gas-laser thermal influence zone ( $L$ ); the angle of deviation from the perpendicular of the cutting surface ( $\alpha$ ); the surface roughness of the gas laser cutting ( $Rz$ ), which relate the quality indicators of the surface of the gas laser cutting to the parameters of laser processing, the carbon content in steel and the thickness of the steel sheet. By multiparametric optimization, the necessary laser cutting modes have been found to ensure that the minimum values of the cutting surface quality indicators are obtained.

Лазерная резка (ЛР) является одним из наиболее эффективных современных методов раскроя тонко- и среднелистового проката из легированных сталей [1] и цветных сплавов [2]. Основными направлениями развития ЛР являются повышение ее эффективности за счет задания необходимых параметров газолазерного воздействия (мощности, скорости, давления вспомогательного газа, фокусного расстояния) и достижения высоких показателей качества реза (отсутствие грата, состоящего из закристаллизованных капель металлического расплава, низкой шероховатости поверхности реза, прямых стенок реза, малой величины зоны лазерного влияния (ЗЛВ) [3]. Однако до сих пор некоторые вопросы, связанные с особенностями формирования свойств и структуры металлических сплавов на основе железа в процессах ЛР волоконным лазером остаются открытыми. Не разработаны многофакторные математические модели процессов ЛР, связывающие критерии качества

поверхности реза с параметрами лазерного процесса и химическим составом металлических сплавов. Не выявлены оптимальные режимы ЛР, обеспечивающие получение заданных показателей качества поверхности реза [1, 4].

Данная работа является продолжением работы [4] и направлена на проведение многопараметрической оптимизации позволяющей определить режимы газолазерной резки, дающие возможность получить минимально возможные значения показателей качества поверхности реза (шероховатости, ортогональности, зоны газолазерного термического воздействия (ЗГЛТВ)).

В качестве объектов исследования были выбраны листовые горячекатаные конструкционные легированные стали марок: 40Х и 30ХГСА толщиной 8 мм (ГОСТ 4543-2016); 09Г2С толщиной 5 мм (ГОСТ 19281-2014); 65Г толщиной 6 мм и 60С2ХА толщиной 10 мм (ГОСТ 14959-2016); 20Х13 толщиной 6 мм (ГОСТ 5632-2014). Из указанных сталей с применением ЛР по разным режимам [4], указанным в таблице, вырезали образцы размером 40×40 мм.

Задачу оптимизации параметров ЛР решали в нескольких постановках с помощью ППП «Mathcad 14.0.0.163» для ранее найденных моделей 1-3 [4]:

$$R_z = 0,75 \cdot C_{\text{Э}}^{2,5} \cdot H^{0,17} - 2,99 \cdot P^{0,01} \cdot V^{0,4} + 0,051 \cdot F^{1,3} \cdot W^{0,01}, \text{ мкм}; \quad (1)$$

$$\alpha = 0,761 \cdot C_{\text{Э}}^{0,1} \cdot H^{0,4} + 0,00152 \cdot P^{0,5} \cdot V - 0,0000486 \cdot F \cdot W^{0,6}, \text{ град}; \quad (2)$$

$$L = -0,058 \cdot C_{\text{Э}} \cdot H + 0,561 \cdot P^{0,1} \cdot V^{0,3} - 0,000000183 \cdot F \cdot W^{1,4}, \text{ мм}. \quad (3)$$

На первой итерации в ранее полученные модели 1-3 подставляли углеродный эквивалент  $C_{\text{Э}}$  (фактор  $x_1$ ) = 0,31% и толщину листа  $H$  (фактор  $x_2$ ) = 5 мм. После получения оптимальных режимов резки в перечисленных выше моделях меняли значения  $H$  от 5 до 10 мм. На второй итерации процедуру повторяли для  $C_{\text{Э}} = 0,758\%$  и т. д. На всех итерациях ( $C_{\text{Э}} = 0,31-2,995\%$ ;  $H = 5-10$  мм) в качестве ответа получали оптимальные значения параметров ЛР ( $W$ ,  $V$ ,  $P$ ,  $F$ ), а также минимально достижимые значения показателей качества поверхности реза.

Задаем начальные (минимальные) значения факторов для решения задачи:

$$x_3 := 0,01; x_4 := 650; x_5 := 298,5; x_6 := 700.$$

Условия итерации:

$$x_1 := 0,31; x_2 := 5,$$

где  $x_1$  – углеродный эквивалент, %;  $x_2$  – толщина листа, мм;  $x_3$  – давление вспомогательного газа, МПа;  $x_4$  – скорость резки, мм/мин;  $x_5$  – фокусное расстояние, мм;  $x_6$  – мощность лазерного излучения, Вт.

Далее составим блок из неравенств искомым факторов входящих в модели и сами модели, подвергаемые минимизации [4]:

*Given*

$$0,01 \leq x_3 \leq 0,08; \quad 650 \leq x_4 \leq 1500;$$

$$298,5 \leq x_5 \leq 303; \quad 700 \leq x_6 \leq 1600;$$

$$0 \leq 0,75 \cdot x_1^{2,5} \cdot x_2^{0,17} - 2,99 \cdot x_3^{0,01} \cdot x_4^{0,4} + 0,051 \cdot x_5^{1,3} \cdot x_6^{0,01} \leq 32,93;$$

$$0 \leq 0,761 \cdot x_1^{0,1} \cdot x_2^{0,4} + 0,00152 \cdot x_3^{0,5} \cdot x_4 - 0,0000486 \cdot x_5 \cdot x_6^{0,6} \leq 0,41;$$

$$0 \leq -0,058 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,561 \cdot x_3^{0,1} \cdot x_4^{0,3} - 0,000000183 \cdot x_5 \cdot x_6^{1,4} \leq 0,8.$$

Для решения составленной системы неравенств используем функцию *Minerr*, которая реализует приближенное решение системы уравнений и неравенств относительно переменных  $x_1, \dots, x_n$ , минимизирующее невязку системы. Решение реализуется в виде матрицы:

$$M := \text{Minerr}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = \begin{pmatrix} M_{0,0} \\ M_{1,0} \\ M_{2,0} \\ M_{3,0} \end{pmatrix}.$$

При вычислениях программа широко оперирует фактором давления. Для исключения выхода давления за допустимые границы введен блок проверки на несоответствие начальным условиям расчетов. Если значение давления меньше 0,01 МПа, то принимается значение равное 0,01 МПа, а если значение больше 0,08 МПа, то принимается 0,08 МПа.

$$z_1 := M_{0,0}, \quad z_2 := M_{2,0}$$

$$p(z_1) := \begin{cases} 0.01 & \text{if } z_1 < 0.01 \\ \text{if } z_1 \geq 0.01 \\ M_{0,0} & \text{if } z_1 \leq 0.08 \\ 0.08 & \text{if } z_1 > 0.08 \end{cases}$$

$$f(z_2) := \begin{cases} 298.5 & \text{if } z_2 < 298.5 \\ \text{if } z_2 \geq 298.5 \\ M_{2,0} & \text{if } z_2 \leq 303 \\ 303 & \text{if } z_2 > 303 \end{cases}$$

Далее подставляем полученные значения  $x_1 \dots x_6$  в модели и получаем минимальные значения  $R_z, \alpha, L$ .

$$0,75(x_1)^{2,5} \cdot (x_1)^{0,17} - 2,99 \cdot (p(z_1))^{0,01} \cdot (M_{1,0})^{0,4} + 0,051 \cdot (f(z_2))^{1,3} \cdot (M_{3,0})^{0,4} = R_z,$$

$$0,761(x_1)^{0,1} \cdot (x_2)^{0,4} + 0,00152 \cdot (p(z_1))^{0,5} \cdot (M_{1,0}) - 0,0000486 \cdot (f(z_2)) \cdot (M_{3,0})^{1,4} = \alpha,$$

$$-0,058 \cdot (x_1) \cdot (x_2) + 0,0561 \cdot (p(z_1))^{0,01} \cdot (M_{1,0})^{0,3} - 0,000000183 \cdot (f(z_2)) \cdot (M_{3,0})^{1,4} = L.$$

Рисунки 1-3 иллюстрируют влияние углеродного эквивалента в объектах исследования заданной толщины на минимально достижимые значения показателей качества поверхности реза.

Данные графические зависимости можно рассматривать как номограммы для выбора материала, на котором можно получить требуемое сочетание всех показателей качества поверхности реза на листе заданной толщины.

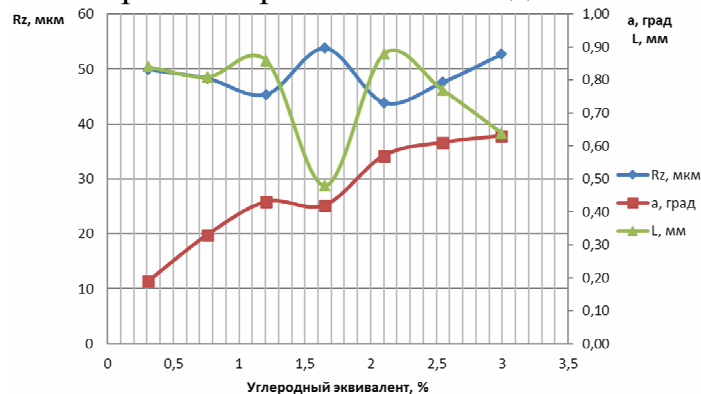


Рис. 1. Минимальные значения показателей качества поверхности реза для исследуемых образцов с разным углеродным эквивалентом при толщине листа 5 мм

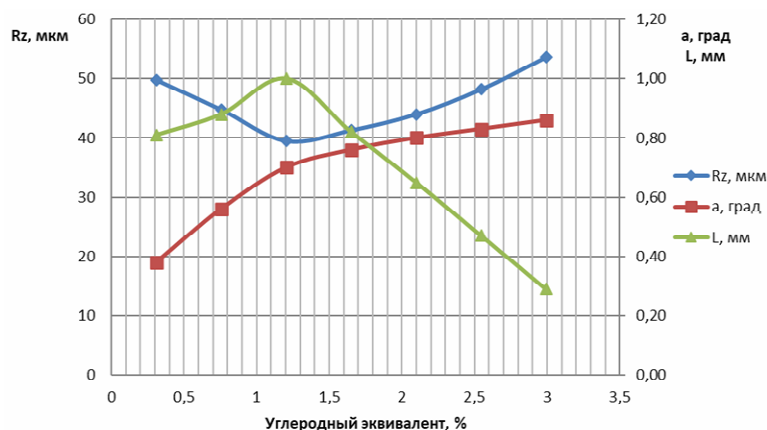


Рис. 2. Минимальные значения показателей качества поверхности реза для исследуемых образцов с разным углеродным эквивалентом при толщине листа 7 мм

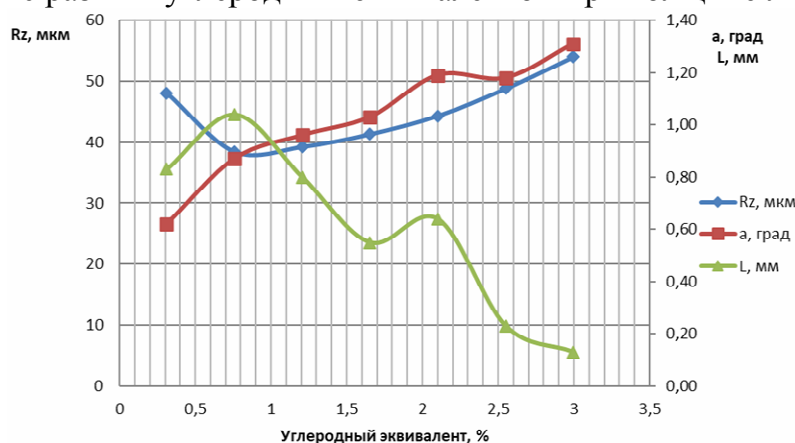


Рис. 3. Минимальные значения показателей качества поверхности реза для исследуемых образцов с разным углеродным эквивалентом при толщине листа 10 мм

В различных постановках задачи оптимизации получены разные ответы и по режимам ЛР, и по минимально достижимым значениям показателей качества поверхности реза. Как и в любой другой задаче принятия решения, выбор наилучшего варианта производится оперирующей стороной, осуществляющей ЛР в зависимости от конкретной постановки задачи на основе представленных результатов оптимизации.

### Список литературы

1. Сергеев Н.Н., Минаев И.В., Тихонова И.В., Сергеев А.Н., Кутепов С.Н., Комарова М.Ю., Гвоздев А.Е. Основы лазерной и газоплазменной обработки конструкционных сталей: монография. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. – 283 с.
2. Сергеев Н.Н., Минаев И.В., Тихонова И.В., Гусев А.Д., Стаханова Я.А., Кутепов С.Н., Гвоздев А.Е., Малий Д.В. Особенности лазерной резки медных и алюминиевых сплавов: монография. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. – 123 с.
3. Криштал М.А., Жуков А.А., Какора А.Н. Структура и свойства сплавов, обработанных излучением лазера. – М.: Металлургия, 1973. – 192 с.
4. Кутепов С.Н., Клементьев Д.С. Оптимизация параметров лазерной резки легированных сталей для получения качественных показателей поверхности реза // *Фундаментальные основы механики*. – 2024. – № 13. – С. 71-74.

### Сведения об авторах:

*Кутепов Сергей Николаевич* – к.п.н., доцент, доцент кафедры «Технологии и сервиса»;

*Клементьев Денис Сергеевич* – старший преподаватель кафедры «Технологии и сервиса».