

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОВЕРХНОСТИ РЕЗА

Кутепов С.Н., Клементьев Д.С.

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

Ключевые слова: лазерная резка, поверхность реза, зона лазерного 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 (α); шероховатости поверхности газолазерного реза (R_z), 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 HIGH-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, laser influence zone, 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 (α); the surface roughness of the gas laser cutting (R_z), 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)). Необходимо отметить, что в процессе ЛР происходит высокоскоростной нагрев и охлаждение металла в поверхностных слоях реза, что является основной причиной формирования ЗЛВ [3]. Преимуществами ЛР являются маленькая ширина реза,

высокая производительность, отсутствие значительных динамических и статических градиентов напряжений, хорошее качество поверхности реза.

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 получены достаточно полные экспериментальные результаты, оценивающие влияние ЛР волоконным лазером на структуру и свойства легированных сталей различных марок. Не разработаны многофакторные математические модели процессов ЛР, связывающие критерии качества поверхности реза с параметрами лазерного процесса и химическим составом металлических сплавов. Не установлены закономерности формирования структуры и строения ЗЛВ легированных сталей. Не выявлены оптимальные режимы ЛР, обеспечивающие получение заданных показателей качества поверхности реза.

Цель работы – провести многопараметрическую оптимизацию для нахождения режимов газолазерной резки, обеспечивающих получение заданных показателей качества поверхности реза.

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 (табл. 1) вырезали образцы размером 40×40 мм. В каждом эксперименте меняли параметры ЛР таким образом, чтобы разрезать стальной лист без получения гратов.

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

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

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

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

Постановка задачи предусматривает определение всех параметров ЛР (W , V , P , F), а также углеродного эквивалента и толщины листа (т. е. всех факторов в ранее полученных моделях), которые обеспечивают получение поверхности реза с минимально возможными значениями шероховатости поверхности (Rz), протяженности ЗЛВ (L), и угла отклонения от перпендикулярности поверхности реза (α). Ответами задачи в такой постановке являются оптимальные значения параметров ЛР, толщины листа и углеродного эквивалента в стали, применение которых позволяет одновременно получить наименьшие значения Rz , L , α .

Задаем начальные (минимальные) значения факторов для решения первой задачи:

$$x_1 := 0.31; x_2 := 5; x_3 := 0.01; x_4 := 650; x_5 := 298.5; x_6 := 700,$$

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.

Табл. 1. Режимы лазерной резки листовых конструкционных легированных сталей

Марка стали / толщина листа, мм	№ режима	Мощность излучения W , Вт	Скорость резки V , мм/мин	Давление вспомогательного газа P , МПа	Фокусное расстояние F , мм
09Г2С/5	1	930	1500	0,01	302
	2	930	1350	0,01	302
	3	980	1350	0,01	300
	4	950	1350	0,01	303
	5	950	1500	0,01	301
20Х13/6	1	900	1200	0,08	301
	2	900	1000	0,08	302
	3	1100	1200	0,01	301
	4	1100	950	0,01	302
30ХГСА/8	1	1100	700	0,08	301
	2	1400	1100	0,08	300
	3	900	1100	0,01	300
	4	800	900	0,01	301
	5	700	800	0,01	299
40Х/8	1	1350	1000	0,08	301
	2	1600	1000	0,08	301
	3	1300	1000	0,08	300
	4	1300	1100	0,08	302
60С2ХА/10	1	1300	700	0,08	302
	2	1500	800	0,08	301
	3	1100	650	0,08	300

Далее составим блок из неравенств искомым факторов входящих в модели и сами модели подвергаемые минимизации:

Given,

$$0.31 \leq x_1 \leq 2.995,$$

$$5 \leq x_2 \leq 10,$$

$$0.01 \leq x_3 \leq 0.08,$$

$$650 \leq x_4 \leq 1500,$$

$$298.5 \leq x_5 \leq 303,$$

$$700 \leq x_6 \leq 1600,$$

$$0 \leq 0,75 \cdot x_1^{2.5} \cdot x_2^{0.17} - 2,99 \cdot x_3^{0.01} \cdot x_4^{0.4} + 0,051 \cdot x_5^{1.3} \cdot x_6^{0.01} \leq 32.93,$$

$$0 \leq 0,761 \cdot x_1^{0.1} \cdot x_2^{0.4} + 0,00152 \cdot x_3^{0.5} \cdot x_4 - 0,0000486 \cdot x_5 \cdot x_6^{0.6} \leq 0.41,$$

$$0 \leq -0,058 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,561 \cdot x_3^{0.1} \cdot x_4^{0.3} - 0,000000183 \cdot x_5 \cdot x_6^{1.4} \leq 0.8,$$

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:

$$M := \text{Minner}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = \begin{pmatrix} M_{0,0} \\ M_{1,0} \\ M_{2,0} \\ M_{3,0} \\ M_{4,0} \\ M_{5,0} \end{pmatrix}.$$

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

Оптимальные значения параметров ЛР, углеродного эквивалента и толщины листа, позволяющие получить одновременно минимальные значения показателей качества реза, представлены в таблице 2.

Табл. 2. Оптимальные значения параметров ЛР, параметров листа для получения минимальных значений показателей качества реза

Сэ, %	H, мм	W, Вт	V, мм/мин	P, МПа	F, мм	Rz, мкм	a, град	L, мм
1,11	5,3	1600	1003	0,01	298,5	46,6	0,44	0,8

Таким образом, одновременное обеспечение минимальных значений показателей качества поверхности реза возможно на тонких листах на сталях соответствующих по химическому составу углеродному эквиваленту 1,11, т.е. 60С2ХА и 40Х при повышенном значении мощности излучения, низком давления вспомогательного газа, отрицательным фокусном расстоянии (выше кромки листа) и при средней скорости реза.

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.

Сведения об авторах:

Кутепов Сергей Николаевич – к.п.н., доцент, доцент кафедры «Технологии и сервиса»;
Клементьев Денис Сергеевич – преподаватель кафедры «Технологии и сервиса».