УДК 621.9.04 : 621.375.826

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПРИ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКЕ СТАЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК

© 2026 Н.Ю. Капалин[1], О.О. Бердников[1], Д.С. Реченко[1], Р.У. Каменов[2]

[1] Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия
[2] Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Россия

Статья поступила в редакцию 02.06.2026

Представлены результаты построения и статистического анализа регрессионных моделей второго порядка, предназначенных для прогнозирования толщины изменённого слоя h и шероховатости обработанной поверхности Ra при лазерной резке коррозионностойкой стали 12*Х*18*Н*10*Т* толщиной 0,8 мм на установке *DMG LASERTEC* 20. Экспериментальные исследования выполнены в рамках метода поверхности отклика с использованием полного факторного плана 3×5 с трёхкратным повторением каждого опыта (общее число наблюдений N=45), что обеспечило возможность оценки как систематических, так и случайных составляющих погрешности. В качестве варьируемых факторов рассматривались мощность лазерного излучения P и скорость перемещения режущей головки V, оказывающие определяющее влияние на формирование качества реза. Построение уравнений регрессии осуществлялось методом наименьших квадратов в кодированных переменных с учётом линейных, квадратичных и перекрёстных эффектов факторов. Полученные модели продемонстрировали высокую степень согласованности с экспериментальными данными: коэффициенты детерминации составили R^2=0,9602 для h и R^2=0,9558 для Ra, что свидетельствует о объяснении более 95% общей вариации откликов. Статистическая значимость моделей подтверждена по F-критерию Фишера, а их адекватность – с использованием теста Лэка–Оффита, показавшего отсутствие систематического несоответствия выбранной квадратичной формы. Дополнительно проведён анализ остатков, подтвердивший выполнение предположений о нормальности распределения и гомоскедастичности. На основе построенных моделей выполнена оптимизация параметров процесса, в результате которой определены режимы лазерной резки, обеспечивающие минимальные значения толщины изменённого слоя и шероховатости поверхности, а также найден компромиссный режим, представляющий практический интерес для промышленного применения. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования технологических процессов и повышения эффективности лазерной резки тонкостенных коррозионностойких сталей в машиностроении и приборостроении.

Ключевые слова: лазерная резка; метод поверхности отклика; регрессионный анализ; оптимизация режимов обработки; толщина изменённого слоя; шероховатость поверхности.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-5-54-61
EDN: OOLICS

1. ВВЕДЕНИЕ

Лазерная резка является одним из наиболее производительных методов разделения металлических заготовок, обеспечивающим высокую точность и минимальную зону термического влияния [1, 2]. Качество реза характеризуется прежде всего шероховатостью боковой обработанной поверхности Ra и толщиной изменённого (повреждённого) слоя h. Оба параметра определяются режимами процесса: мощностью лазерного излучения P и скоростью перемещения режущей головки V.

Традиционный подход к выбору режимов – одновариантный эксперимент – не позволяет учесть взаимодействие факторов. Метод поверхности отклика (Response Surface Methodology, RSM) обеспечивает построение математической модели, связывающей входные факторы и выходные параметры в рамках единого квадратичного уравнения [3, 4].

Цель настоящей работы – построить статистически значимые регрессионные модели $h(P, V)$ и $Ra(P, V)$ на основе полного факторного плана с трёхкратным повторением опытов, провести проверку адекватности моделей и определить оптимальные режимы резки.

Капалин Николай Юрьевич, аспирант. E-mail: kapanick@mail.ru ORCID: 0009-0001-5985-9296
Бердников Олег Олегович, аспирант. E-mail: oleg-berdnikow@mail.ru ORCID: 0009-0008-0201-2116
Реченко Денис Сергеевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры. «Металлорежущие станки и инструменты». E-mail: rechenko-denis@mail.ru ORCID: 0000-0002-6776-6452
Каменов Ренат Уахитович, кандидат технических наук, начальник НИЛ. «Механическая обработка и технологии управления поверхностным слоем». E-mail: renatkamenov@mail.ru ORCID: 0000-0001-9181-5704

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Эксперименты проводились на лазерной установке *DMG LASERTEC* 20 с волоконным лазером непрерывного действия (*CW*-режим). Фокусное расстояние фиксировано и составляло 1 мм. Частота импульсов лазерного излучения во всех экспериментах поддерживалась на уровне 500 Гц. Материал заготовок – сталь 12*Х*18*Н*10*Т*. Фиксированные параметры: защитный, выдувной газ – азот, давление 7 бар, фокусное расстояние – 1 мм.

Варьируемые факторы и их уровни приведены в таблице 1. Уровни мощности *P* охватывают три значения, скорость перемещения лазерной режущей головки (скорость резки) *V* – пять значений в диапазоне, обеспечивающем формирование полного реза. Режим *V*=700 мм/мин был исключён предварительными опытами (рез не формировался).

Таблица 1 – Факторы и их уровни

Фактор	Обозн.	Ед.	Уровень −1	Уровень 0	Уровень +1
Мощность лазера	*P*	Вт	1300	1350	1400
Скорость резки	*V*	мм/мин	200	400	600

Примечание. Кодированные переменные: $Pc = (P - 1350)/50$; $Vc = (V - 400)/141{,}42$.

Для каждой из 15 комбинаций факторов выполнялось по три независимых повтора (n=3), итого *N*=45 наблюдений. Повторение опытов позволяет независимо оценить чистую погрешность процесса (Pure Error) и применить тест Лэка–Оффита для проверки адекватности модели.

Шероховатость обработанной поверхности *Ra* измерялась профилометром модели *Mitutoyo Surftest SJ*-210 (три замера на образец). Толщина изменённого слоя *h* определялась металлографическим анализом на инвертированном металлографическом микроскопе *Nikon Eclipse MA200* по поперечным шлифам образцов.

3. ПЛАН ЭКСПЕРИМЕНТА И МЕТОД ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Применялся полный факторный план 3×5 с трёхкратным повторением: три уровня *P* × пять уровней *V* × 3 повтора = 45 опытов [5]. Для построения квадратичной модели второго порядка использована матрица планирования (1):

$$X = [1,\ Pc,\ Vc,\ Pc^2,\ PcVc,\ Vc^2]. \tag{1}$$

Коэффициенты уравнения регрессии $\hat{\beta}$ определялись методом наименьших квадратов (МНК) (2):

$$\hat{\beta} = (X^{\mathrm{T}}X)^{-1} \cdot X^{\mathrm{T}}y, \tag{2}$$

где X – матрица планирования (45×6); y – вектор измерений, $\hat{\beta} = [\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5]^T$.

Декомпозиция суммарной изменчивости (3):

$$SST = SSR + SSE = SSR + SSLOF + SSPE, \tag{3}$$

где SSR – объяснённая регрессией дисперсия; $SSLOF$ – дисперсия несоответствия (Lack of Fit, *df*=9); $SSPE$ – чистая погрешность (Pure Error, *df*=30).

Значимость модели проверялась *F*-критерием Фишера (4), адекватность – тестом Лэка–Оффита (5):

$$F_{\text{рег}} = \frac{MSR}{MSE} \sim F(k, N-k-1); \tag{4}$$

$$F_{LoF} = \frac{MS_{LOF}}{MS_{PE}} \sim F(df_{LOF}, df_{PE}); \tag{5}$$

Модель признаётся значимой при $F_{\text{рег}} > F_{\text{крит}}(5; 39; 0{,}05)$. Модель признаётся адекватной при $F_{LoF} < F_{\text{крит}}$ (9; 30; 0,05) – отсутствие систематического несоответствия формы.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Результаты экспериментов в виде средних значений и стандартных отклонений трёх повторов представлены в таблице 2.

На рисунке 1 представлены зависимости *h* и *Ra* от скорости резки *V* при фиксированных уровнях мощности *P*.

Таблица 2 – Результаты экспериментов (средние значения ± стандартное отклонение, n=3)

№	P, Вт	V, мм/мин	h_1, мкм	h_2, мкм	h_3, мкм	$\bar{h}$ ± s, мкм	$\bar{Ra}$ ± s, мкм
1	1300	200	50,2	48,4	46,6	48,4 ± 1,8	3,666 ± 0,064
2	1300	300	35,6	37,6	38,1	37,1 ± 1,3	2,796 ± 0,054
3	1300	400	23,5	26	29,4	26,3 ± 3,0	2,722 ± 0,096
4	1300	500	25,2	27	28,1	26,8 ± 1,5	2,900 ± 0,103
5	1300	600	22,3	24,7	27,5	24,8 ± 2,6	3,528 ± 0,121
6	1350	200	40,4	38	38,3	38,9 ± 1,3	3,073 ± 0,140
7	1350	300	30,3	27	28,9	28,7 ± 1,7	2,351 ± 0,131
8	1350	400	24,7	19,1	19,2	21,0 ± 3,2	2,072 ± 0,137
9	1350	500	21,2	17.6	18,6	19,1 ± 1,9	2,508 ± 0,191
10	1350	600	17,5	19,7	21,6	19,6 ± 2,0	3,203 ± 0,044
11	1400	200	33,9	34	29,8	32,6 ± 2,4	2,755 ± 0,168
12	1400	300	22,3	21,8	22,9	22,3 ± 0,6	2,162 ± 0,081
13	1400	400	19,7	18,1	17,2	18,3 ± 1,3	2,046 ± 0,099
14	1400	500	16	17,5	15,7	16,4 ± 1,0	2,438 ± 0,112
15	1400	600	18,7	16,9	17,7	17,8 ± 0,9	3,275 ± 0,068

Примечание. h_1, h_2, h_3 – результаты трёх независимых измерений; $\bar{h}$ и $\bar{Ra}$ – среднеарифметические значения толщины изменённого (повреждённого) слоя и шероховатость обработанной поверхности; s – выборочное стандартное отклонение.

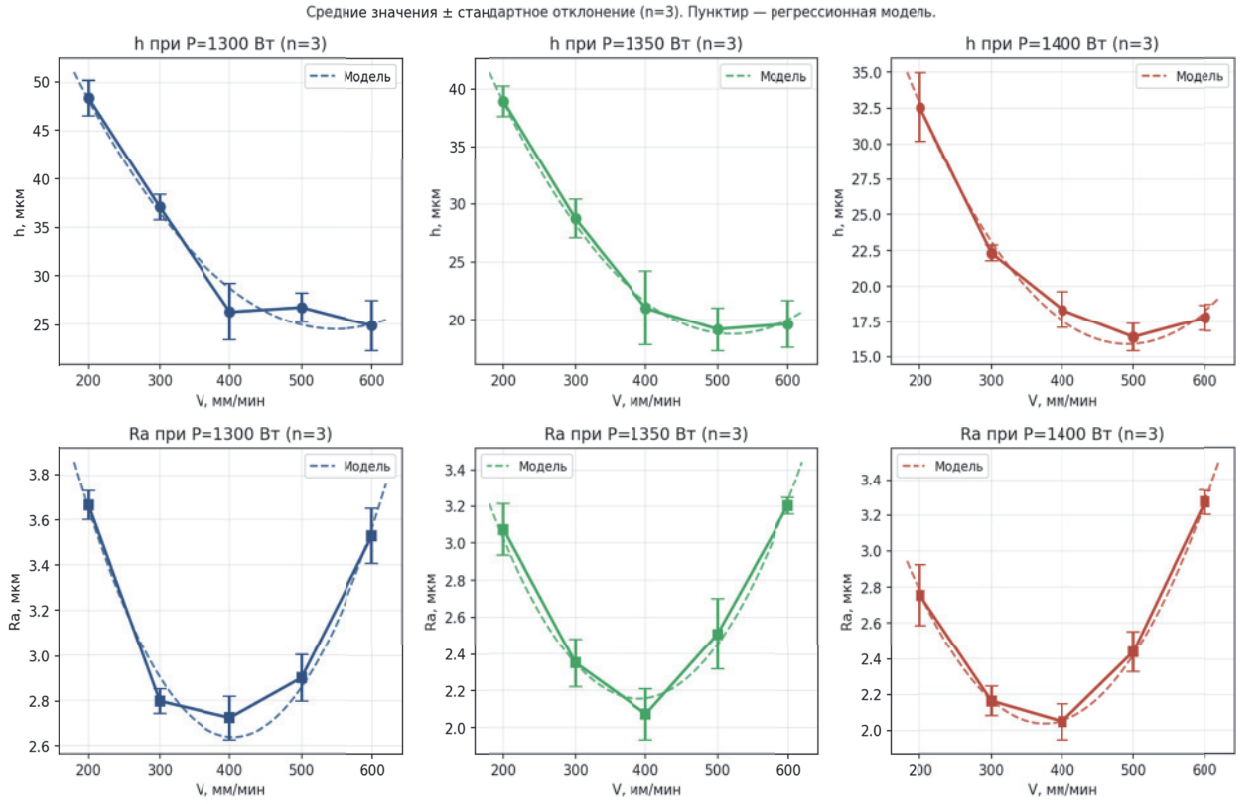

Рисунок 1 – Зависимость h и Ra от скорости резки V при фиксированных уровнях мощности P (планки погрешностей ±s; пунктир – предсказание квадратичной модели)

5. РЕЗУЛЬТАТЫ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА

В работе применялся метод наименьших квадратов (МНК), заключающийся в поиске наилучшего соответствия модели экспериментальным данным, основанный на минимизации суммы квадратов разностей (остатков) между наблюдаемыми и расчетными значениями [6, 7].

5.1. Уравнения регрессии в кодированных переменных.

По результатам обработки 45 наблюдений МНК-методом получены уравнения:

$$\hbar = 21{,}5495 - 5{,}6000 \cdot P_c - 6{,}6562 \cdot V_c + 1{,}6067 \cdot P_c^2 + 1{,}5509 \cdot P_{cV_c} + 3{,}9238 \cdot V_c^2; \quad (6)$$

$$Ra = 2{,}1576 - 0{,}2936 \cdot P_c + 0{,}0735 \cdot V_c + 0{,}1874 \cdot P_c^2 + 0{,}1052 \cdot P_{cV_c} + 0{,}4839 \cdot V_c^2, \quad (7)$$

где $Pc = (P - 1350)/50$, $Vc = (V - 400)/141{,}42$ – кодированные переменные.

5.2. Уравнения в натуральных единицах.

Раскрытие кобразных переменных даёт уравнения в исходных единицах измерения:

$$\bar{h} = 1512{,}669 - 0{,}112000 \cdot P - 0{,}047067 \cdot V + 0{,}000643 \cdot P^2 + 0{,}000219 \cdot PV + 0{,}000196 \cdot V^2; \quad (8)$$

$$R\bar{a} = 158{,}372 - 0{,}005871 \cdot P + 0{,}000520 \cdot V + 0{,}000075 \cdot P^2 + 0{,}000015 \cdot PV + 0{,}000024 \cdot V^2. \quad (9)$$

Уравнения (8) и (9) пригодны для непосредственного расчёта выходных параметров по заданным значениям P (Вт) и V (мм/мин) без дополнительного кодирования.

5.3. Коэффициенты регрессии и их значимость.

Оценки коэффициентов, их стандартные ошибки и t-статистики представлены в таблице 3. Критическое значение t-критерия при df=39 и α=0,05: $t_{крит}$=2,023.

Таблица 3 – Оценки коэффициентов квадратичных моделей

Коэф.	Член	β (*h*)	β (*Ra*)	|*t*| (*h*)	|*t*| (*Ra*)	Вывод о значимости
β_0	Перехват	21,5495	2,1576	35,509	60,547	*знч. / знч.*
β_1	*Pc*	-5,6000	-0,2936	15,855	14,155	*знч. / знч.*
β_2	*Vc*	-6,6562	0,0735	23,082	4,341	*знч. / знч.*
β_3	Pc^2	1,6067	0,1874	2,626	5,216	*знч. / знч.*
β_4	*PcVc*	1,5509	0,1052	4,391	5,071	*знч. / знч.*
β_5	Vc^2	3,9238	0,4839	11,384	23,911	*знч. / знч.*

Примечание. Зелёным выделены значимые коэффициенты ($|t| > t_{крит} = 2{,}023$, df=39, α=0,05). Знч. – значим; незн. – незначим

6. ДИСПЕРСИОННЫЙ АНАЛИЗ И ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛЕЙ

Результаты дисперсионного анализа с расширенной декомпозицией остатков (с учётом чистой погрешности) представлена в таблице 4.

Таблица 4 – Расширенная таблица ANOVA

Источник изменчивости	*SS* (*h*)	*df*	*MS* (*h*)	*F* (*h*)	Вывод (*h*)
Регрессия	3517,5	5	703,5	188,0	> 2,456 ✓
Несоответствие (*LoF*)	37,0	9	4,12	1,133	< 2,211 ✓
Чистая погрешность (*PE*)	108,9	30	3,63	–	–
Остатки (*SSE*)	145,9	39	3,74	–	–
Итого	3663,4	44	–	–	–
R^2 = 0.9602; R^2adj = 0,9551; *RMSE* = 1,93 мкм					

Для Ra: R^2=0,9558, R^2adj=0,9502, $F_{рег}$=168,8, F_{LoF}=0,908 < 2,211 (модель адекватна). RMSE=0,114 мкм.

Значение $F_{рег}$ >> $F_{крит}$(5; 39; 0,05)=2,456 свидетельствует о высокой статистической значимости обеих регрессий. Тест Лэка–Оффита (F_{LoF} < $F_{крит}$ (9; 30; 0,05)=2,211) подтверждает адекватность квадратичной формы модели: систематическое отклонение формы поверхности отклика от экспериментальных данных отсутствует.

Коэффициент детерминации R^2=0,9602 для *h* и R^2=0,9558 для *Ra* означает, что квадратичная модель объясняет более 95% полного разброса наблюдений. Скорректированный коэффициент R^2adj=0,9551 незначительно ниже R^2, что указывает на отсутствие избыточных параметров в модели [8, 9].

7. АНАЛИЗ ОСТАТКОВ

Диагностика остатков представлена на рисунке 2, график «измеренное – расчётное» демонстрирует тесное прилегание точек к биссектрисе, подтверждая отсутствие систематических смещений.

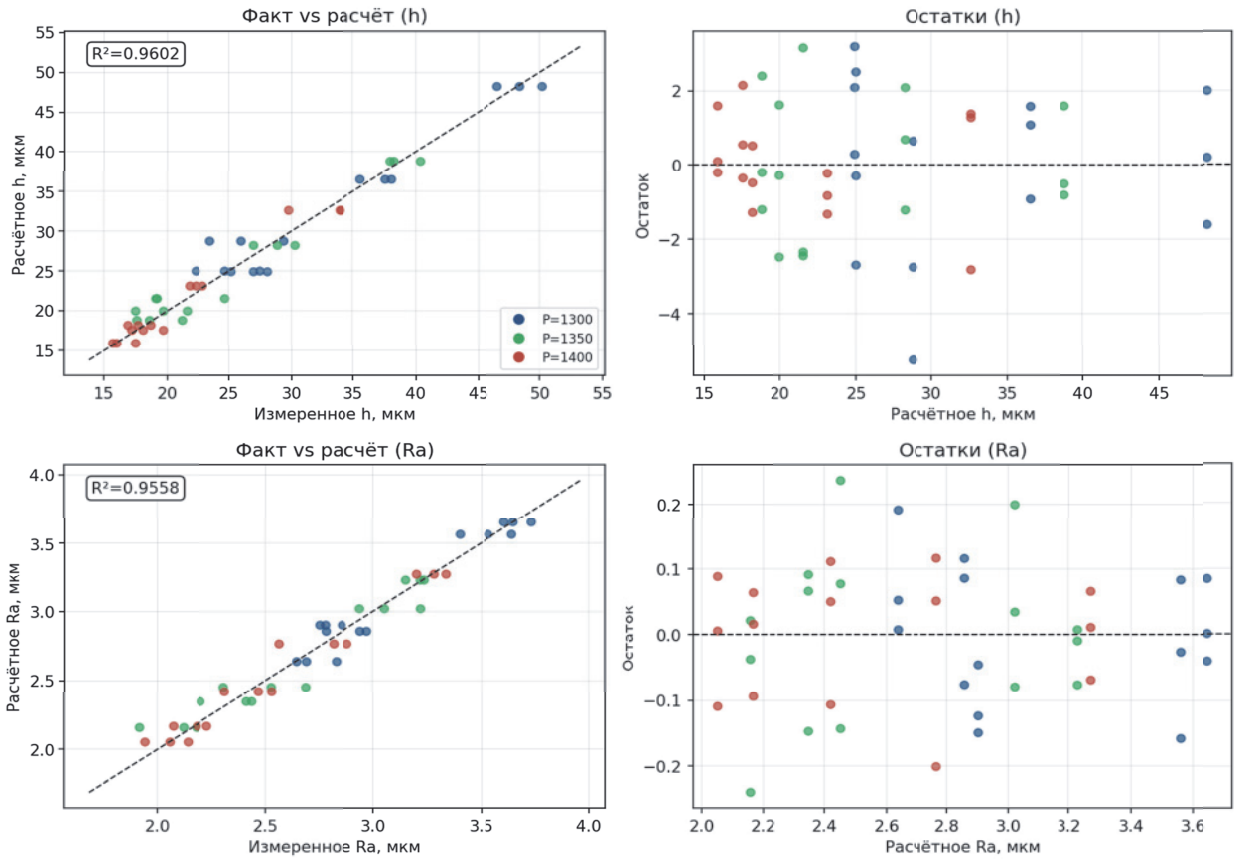

Рисунок 2 – Диагностика остатков:
слева – измеренное vs расчётное; справа – остатки vs расчётное
(синий – *P*=1300 Вт; зелёный – *P*=1350 Вт; красный – *P*=1400 Вт)

На графике «остатки – расчётное» разброс остатков равномерен по всему диапазону предсказанных значений (гомоскедастичность не нарушена). Среднеквадратическое значение остатков: $RMSE_h$=1,93 мкм, $RMSE_{Ra}$=0,114 мкм, что соответствует уровню воспроизводимости процесса.

8. ПОВЕРХНОСТИ ОТКЛИКА И КОНТУРНЫЕ КАРТЫ

Трёхмерные поверхности отклика (рисунок 3) и контурные карты (рисунок 4) позволяют визуально оценить характер влияния факторов и выявить области оптимальных режимов [10, 11].

Анализ поверхностей показывает, что толщина изменённого слоя *h* монотонно убывает с ростом мощности *P* и скорости перемещения режущей головки *V*. При этом при малых и умеренных (~490 мм/мин) значениях скорости перемещения режущей головки, минимальное значение измененного слоя достигается в области высоких значений *P*. Шероховатость обработанной поверхности *Ra* имеет выраженный экстремум по скорости перемещения режущей головки *V* с минимумом в диапазоне 370–400 мм/мин, что соответствует установившемуся режиму резки с наименьшей нестабильностью расплавленной ванны.

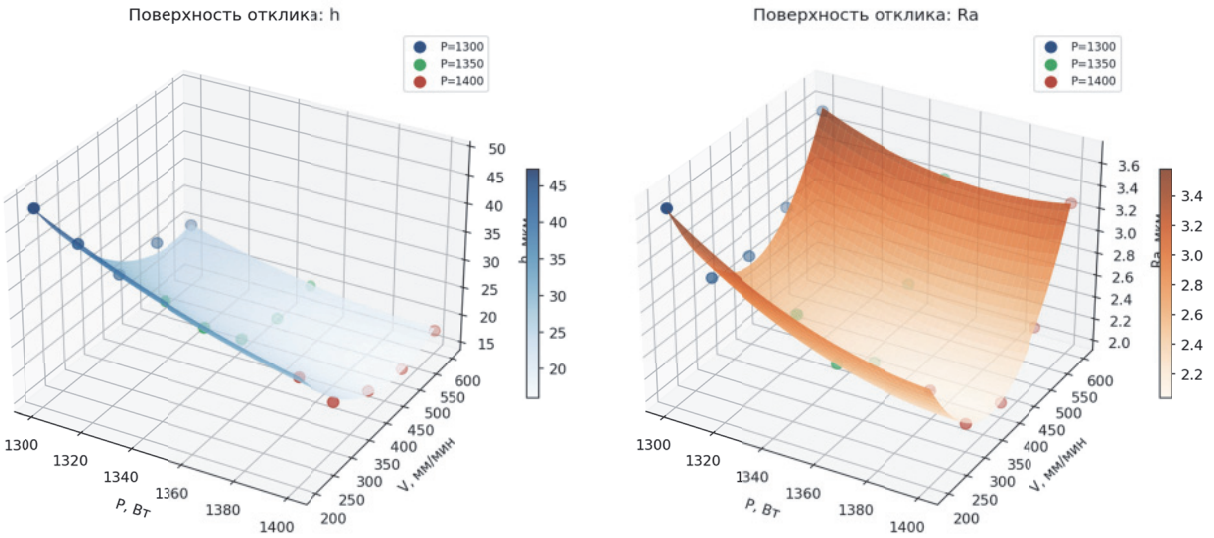

Рисунок 3 – Поверхности отклика $\hat{h}(P, V)$ и $\hat{Ra}(P, V)$;
точки – средние экспериментальные значения

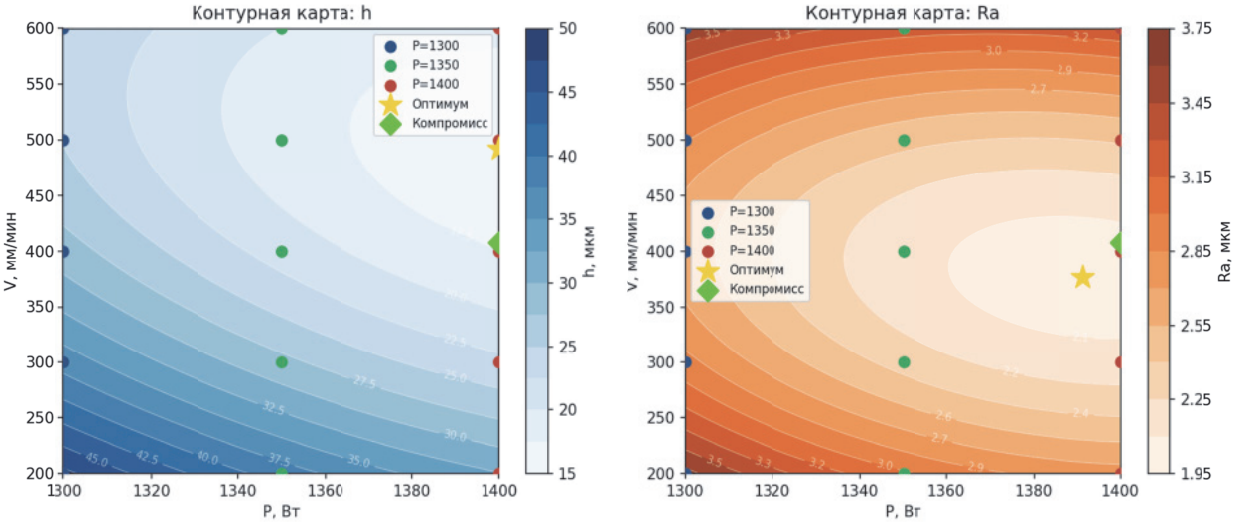

Рисунок 4 – Контурные карты $\hat{h}$ и $\hat{Ra}$;
★ – точка одноцелевого оптимума; ◆ – точка компромиссного оптимума

Квадратичный член Vc^2 вносит значимый вклад ($|t|$=11,4 > $t_{крит}$) в модель h, что подтверждает нелинейный характер зависимости толщины изменённого слоя от скорости резки.

9. ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА

Поиск оптимальных режимов выполнялся методом L-BFGS-B в области эксперимента. Рассматривались три постановки: минимизация h, минимизация Ra и компромиссная задача (10):

$$F(P,V) = h(P,V)/\Delta h + Ra(P,V)/\Delta Ra \rightarrow min, \quad (10)$$

где Δh и ΔRa – диапазоны предсказанных значений по модельной сетке (нормировка на [0; 1]).

В таблице 5 представлены оптимальные режимы лазерной резки.

Компромиссный оптимум (P=1400 Вт, V=408,1 мм/мин) обеспечивает одновременно малую толщину изменённого слоя $\hat{h}$=17,28 мкм и приемлемую шероховатость $\hat{Ra}$=2,063 мкм, что делает его предпочтительным для практического применения.

10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе построены квадратичные регрессионные модели толщины изменённого слоя и шероховатости поверхности при лазерной резке стали. Основные результаты:

1. Реализован полный факторный план 3×5 с трёхкратным повторением (N=45), что позволило независимо оценить воспроизводимость процесса ($RMSE_h$≈1,93 мкм) и применить тест адекватности Лэка–Оффита.

2. Построены квадратичные модели второго порядка для $h(P, V)$ и $Ra(P, V)$ с коэффициентами детерминации R^2=0,9602 и R^2=0,9558 соответственно (R^2adj=0,9551 и 0,9502), что указывает на очень высокую точность двух регрессионных моделей.

3. Статистическая значимость моделей подтверждена F-критерием: F_h=188,0 >> $F_{крит}$=2,456 (df_1=5, df_2=39, α=0,05). Тест Лэка–Оффита (F_{LoF}=1,133 < 2,211) подтвердил адекватность квадратичной формы модели.

4. Установлено, что рост скорости V снижает h при высоких P; Ra имеет минимум при V≈370–400 мм/мин. Взаимодействие P×V (коэффициент β_4) значимо влияет на оба отклика.

5. Определён компромиссный оптимум: P=1400 Вт, V=408,1 мм/мин, что обеспечивает $\hat{h}$=17,28 мкм и $\hat{Ra}$=2,063 мкм

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Капалин, Н.Ю.* Влияние скорости перемещения лазерной режущей головки при обработке сплава 12Х18Н10Т на качество получаемой поверхности / Н.Ю. Капалин, О.О. Бердников, Д.С. Реченко, Б.А. Лопатин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2026. – Т. 26. – № 1. – С. 78-86. – DOI 10.14529/engin260107.
2. *Закалюкина, Л.А.* Виды и параметры процесса лазерной резки / Л.А. Закалюкина, В.Я. Баннов // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2016. – № 19. – С. 163-167.
3. *Хакимзянова, А. А.* Особенности технологии лазерной резки металлических материалов / А. А. Хакимзянова, И. А. Савин // Техника и технологии машиностроения: материалы V Международной студенческой научно-практической конференции, Омск, 2016. С. 391-396.
4. *Myers R.H., Montgomery D.C., Anderson-Cook C.M.* Response Surface Methodology. – 4th ed. – Hoboken: Wiley, 2016. – 825 p.
5. *Екимова, М.Ю.* Применение полного факторного плана для расчета уравнений регрессии с использованием ЭВМ / М.Ю. Екимова, Е.А. Тесленко // Проблемы повышения эффективности научной работы в оборонно-промышленном комплексе России: Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции, Знаменск, 11-12 апреля 2024 года. – Астрахань: Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева, 2024. – С. 53-56.
6. *Головančиков, А.Б.* Сравнение точности аппроксимации экспериментальных данных методом наименьших относительных квадратов с методом наименьших квадратов / А. Б. Голованчиков, М. К. Доан, А. В. Петрухин и др. // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2020. – Т. 8. – № 1(28).
7. *Поляков, С. А.* Сравнение метода корреляции и метода наименьших квадратов / С. А. Поляков, М.А. Шпагин, М. Б. Тчитембо и др. // Математическое моделирование и информационные технологии при исследовании явлений и процессов в различных сферах деятельности: Сборник материалов III Международной научно-практической конференции студентов, магистрантов и аспирантов, Краснодар, 20 марта 2023 года / Отв. за выпуск Н.В. Третьякова. – Краснодар: Новация, 2023. – С. 298-304.
8. *Сидняев, Н.И.* Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных / Н. И. Сидняев. – М.: Юрайт, 2020. – 495 с.
9. *Кудрявцев, А.Р.* Двухфакторный дисперсионный анализ в аддитивном производстве / А.Р. Кудрявцев, Д.А. Журавлев // Молодежный вестник ИрГТУ. – 2020. – Т. 10. – № 2. – С. 11-18.
10. *Кожухарь, О.Ю.* Влияние положения констант в уравнениях математических моделей на методологию их поиска / О.Ю. Кожухарь, А.С. Скичко // Вестник Международной академии системных исследований. Информатика, экология, экономика. – 2022. – № 24. – С. 105-112.
11. *Волгин, С.Н.* Методика и результаты исследований противоизносных и антифрикционных свойств полужидких редукторных смазок / С.Н. Волгин, О.С. Матина // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2021. – № 9. – С. 24-36.

MATHEMATICAL MODELING OF QUALITY PARAMETERS DURING LASER CUTTING OF STEEL WORKPIECES

© 2026 N.Yu. Kapalin[1], O.O. Berdnikov[1], D.S. Rechenko[1], R.U. Kamenov[2]

[1] Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk, Russia
[2] Togliatti State University (TSU), Togliatti, Russia

The results of the construction and statistical analysis of second-order regression models designed to predict the thickness of the modified layer h and the roughness of the treated surface Ra during laser cutting of corrosion-resistant steel 12*X*18*H*10*T* 0.8 mm thick on a *DMG LASERTEC* 20 installation are presented. Experimental studies were performed using the response surface method using a full 3×5 factor plan with a three-fold repetition of each experiment (total number of observations *N*=45), which made it possible to estimate both systematic and random error components. The power of the laser radiation *P* and the speed of movement of the cutting head *V*, which have a decisive influence on the formation of cutting quality, were considered as variable factors. The regression equations were constructed using the least squares method in coded variables, taking into account linear, quadratic and cross-effects of factors. The obtained models demonstrated a high degree of consistency with experimental data: the coefficients of determination were R^2=0.9602 for *h* and R^2=0.9558 for *Ra*, which indicates an explanation for more than 95% of the total variation in responses. The statistical significance of the models was confirmed by the Fisher F-criterion, and their adequacy was confirmed using the Lack–Offit test, which showed the absence of a systematic discrepancy between the chosen quadratic form. Additionally, an analysis of the residuals was performed, confirming the fulfillment of assumptions about the normality of the distribution and homoscedasticity. Based on the constructed models, process parameters were optimized, as a result of which laser cutting modes were determined that ensure minimum values of the thickness of the modified layer and surface roughness, and a compromise mode was found that is of practical interest for industrial applications.
The results obtained can be used to improve technological processes and increase the efficiency of laser cutting of thin-walled corrosion-resistant steels in mechanical engineering and instrumentation.
Keywords: laser cutting; response surface method; regression analysis; optimization of processing modes; thickness of the modified layer; surface roughness.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-5-54-61
EDN: OOLICS

REFERENCES

1. The effect of the speed of movement of the laser cutting head during processing of alloy 12X18H10T on the quality of the resulting surface / N.Yu. Kapalin, O.O. Berdnikov, D.S. Rechenko, B.A. Lopatin // Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical engineering. – 2026. – Vol. 26, No. 1. – pp. 78-86. – DOI 10.14529/engin260107.
2. *Zakalyukina L. A., Bannov V. Ya.* Types and parameters of the laser cutting process // New information technologies in automated systems, 19, 2016. pp. 163-167.
3. *Khakimzyanova A. A., Savin I. A.* Features of laser cutting technology of metal materials // Engineering and technology of mechanical engineering: materials of the V International Student Scientific and practical Conference Conferences, Omsk, 2016. pp. 391-396.
4. *Myers R.H., Montgomery D.C., Anderson-Cook C.M.* Response Surface Methodology. – 4th ed. – Hoboken: Wiley, 2016. – 825 p.
5. *Ekimova M. Yu., Teslenko E. A.* Application of a complete factor plan for calculating regression equations using a computer // Problems of increasing the efficiency of scientific work in the Russian military-industrial complex: Proceedings of the VII All-Russian Scientific and Practical Conference, Znamensk, April 11-12, 2024. Astrakhan: Astrakhan State University named after V.N. Tatishchev, 2024, pp. 53-56.
6. Comparison of the accuracy of approximation of experimental data by the least relative squares method with the least squares method / A. B. Golovanchikov, M. K. Doan, A.V. Petrukhin et al. // Modeling, optimization and information technologies. – 2020. – Vol. 8, No. 1(28).
7. Comparison of the correlation method and the least squares method / S. A. Polyakov, M.A. Shpagin, M.B. Tchitembo and others // Mathematical modeling and information technologies in the study of phenomena and processes in various fields of activity: Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference of Students, undergraduates and postgraduates, Krasnodar, March 20, 2023 / Reply for the release of N.V. Tretyakov. Krasnodar: Novation, 2023. pp. 298-304.
8. Theory of experimental planning and analysis of statistical data / Sidnyaev N. I.: Yurayt Publishing House, 2020. 495 p.
9. *Kudryavtsev A. R., Zhuravlev D. A.* Two–factor dispersion analysis in additive manufacturing // Youth Bulletin of IrSTU. – 2020. - Vol. 10, No. 2. – pp. 11-18.
10. *Kozhukhar O. Yu., Skichko A. S.* The influence of the position of constants in the equations of mathematical models on the methodology of their search // Bulletin of the International Academy of Systems Research. Computer science, ecology, economics. - 2022. – No. 24. – pp. 105-112.
11. *Volgin S. N., Matina O. S.* Methods and results of research on anti-wear and antifriction properties of semi-liquid gear lubricants // Oil refining and petrochemistry. Scientific and technical achievements and best practices. - 2021. – No. 9. – pp. 24-36.

Nikolay Kapalin, Postgraduate Student. E-mail: kapanick@mail.ru ORCID:0009-0001-5985-9296
Oleg Berdnikov, Postgraduate Student, E-mail: oleg-berdnikow@mail.ru ORCID: 0009-0008-0201-2116
Denis Rechenko, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department «Metal Cutting Machines and Tools». E-mail: rechenko-denis@mail.ru. ORCID: 0000-0002-6776-6452.
Renat Kamenov, PhD, Head of the Research Laboratory «Mechanical Processing and Surface Layer Control Technologies» E-mail: renatkamenov@mail.ru ORCID: 0000-0001-9181-5704