

Математическое моделирование тепловых процессов и расчетная оптимизация режимов лазерной поверхностной обработки

Тарасова Т.В.

Московский государственный технологический университет “Станкин”
г. Москва, Россия

tarasova952@mail.ru

Белашова И.С.

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, МАДИ
г. Москва, Россия

irina455@inbox.ru

Кузьмин С.Д.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ
г. Москва, Россия

sarvatas@gmail.com

Кузьмина Е.И.

ГБОУ СОШ № 507
Московского района
г. Санкт-Петербург, Россия

el.iv.kuzmina@gmail.com

Аннотация. На основе математической модели полного факторного эксперимента проведена оценка влияния основных параметров процесса лазерной термической обработки на качественную характеристику обрабатываемой поверхности образца – микротвердость поверхности. Проведена оценка адекватности полученного уравнения регрессии и значимости коэффициентов уравнения. Для получения возможности оптимизации технологического процесса лазерной обработки и определения влияния параметров лазерной обработки на геометрические и качественные характеристики обрабатываемой поверхности был проведен математический расчет тепловых процессов при лазерной термообработке стали 95X18 через решение уравнения теплопроводности.

Ключевые слова: регрессионный анализ; математическое моделирование; математическое планирование эксперимента; уравнение регрессии.

ВВЕДЕНИЕ

Стремление промышленности к импортозамещению и сокращению эксплуатационных расходов требует разработки, совершенствования и внедрения современных методов упрочнения деталей, направленных на увеличение износостойкости рабочих поверхностей и срока службы изделий. Использование современных методов упрочнения, к которым относятся, главным образом, методы, в основе которых лежит воздействие на материал концентрированных источников энергии, в том числе лазерное излучение, позволяют получить на заданной глубине и траектории обработки уникальные свойства поверхности [1, 2]. Использование для обработки излучения современных волоконных лазеров позволяет эффективно обрабатывать детали сложной формы по различным траекториям и принципам воздействия на материал [3]. Для эффективного применения методов лазерной обработки требуется проведение комплексного исследования влияния различных факторов обработки на упрочняемую поверхность. С целью оптимизации количества необходимых экспериментов для определения преимущественного режима обработки целесообразно использование методов математического планирования эксперимента. Для теоретического определения параметров процесса лазерной термической обработки, таких как ширина и глубина зоны закалки и зоны лазерного влияния, скорости нагрева и охлаждения в зоне обработки рекомендуется проведение математиче-

ского расчета через решение уравнения теплопроводности. Моделирование тепловых процессов в сочетании с регрессионным анализом позволяет произвести теоретический выбор параметров процессов и дает возможность управления ими в заданных режимах.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе исследуется воздействие лазерного излучения на микротвердость поверхности стали 95X18. В качестве лазерного источника выступает волоконный квазинепрерывный лазер YLR-150/1500-QCW-AC с длиной волны излучения 1,07 мкм, работающий в импульсном режиме генерации. Металлографические исследования и определение микротвердости обработанных поверхностей проводились по стандартной методике на микротвердометре Qness Q30A с величиной нагрузки на индентор 50 г.

Регрессионный анализ является статистическим методом исследования зависимости случайной величины (параметра) от переменных величин (аргументов). Математическое моделирование позволяет показать зависимость параметров (коэффициентов, факторов, см. табл. 1) обработки на исследуемую характеристику материала (параметр оптимизации – микротвердость поверхности). Для выявления количественных данных о степени влияния переменных параметров (факторов) обработки на твердость упрочняемого слоя использовалась методика математического планирования эксперимента [4] по модели полного факторного эксперимента 23(ПФЭ), который позволяет качественно оценить линейные эффекты и все эффекты взаимодействия.

Таблица 1

Варьируемые параметры регрессионной зависимости

Параметр	Обозначения	Фактор
Энергия в импульсе	$E, Дж$	x_1
Частота следования импульсов	$f, Гц$	x_2
Диаметр пятна	$d, мм$	x_3

Параметр оптимизации – микротвердость упрочненного слоя.

Уравнение регрессии в общем виде для ПФЭ представляется выражениями (1), (2) [4, 5]:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (1)$$

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i \cdot x_i + \sum_{\substack{j,i=1 \\ j < i}}^n b_{ji} \cdot x_j \cdot x_i + b_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3, \quad (2)$$

где b_0 – свободный член уравнения регрессии; b_i – коэффициенты линейного эффекта; b_{ji} – коэффициенты эффекта парного взаимодействия; b_{123} – коэффициенты эффекта тройного взаимодействия; n – число факторов; x_j и x_i – факторы эксперимента.

Для расчетного определения рабочих параметров процесса, таких как распределение температуры по глубине, скорость нагрева и охлаждения, расчетная глубина закаленного слоя было решено уравнение теплопроводности по методике Рыкалина Н.Н. [6, 7]. Исходные данные для расчета представлены в табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные для расчета	
Параметры лазерной обработки	
Диаметр сфокусированного луча – $d = 400$ мкм ($r_p = 20 \cdot 10^{-3}$ м)	
Частота следования импульсов – 25 Гц	
Длительность импульса – 10 мс	
Средняя мощность импульса – 90 Вт	
Энергия импульса – 0,9 Дж	
Скорость сканирования – $V = 5$ мм/с ($Vl = 0,005$ м/с)	
Характеристики образца	
Материал – сталь 95X18	
Размеры – 0,01x0,03x0,03 м	
Температура плавления – $T_p = 1500$ °C	
Температура полиморфного превращения – $T_z = 810$ °C	
Плотность – $\rho = 7,75 \cdot 10^3$ кг/м ³	
Удельная теплоемкость – $c = 483$ Дж/кг·K	
Коэффициент теплопроводности – $\lambda = 24$ Вт/м·K	
Коэффициент поверхностного поглощения лазерного излучения – $A_{эф} = 0,5$	

Для выбора расчетной модели была проведена оценки некоторых параметров процесса:

$vt > Vl$ – движущийся источник

$ht \approx r_p$ – распределенный источник

$ht < H$ – модель полубесконечной тепловой задачи

Сравнение расчетных величин позволило определить расчетную модель – полубесконечное тело с движущимся распределенным гауссовским источником нагрева (цилиндрическая симметрия).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

Определив значения факторов и интервалы варьирования и построив расчетную матрицу планирования и результатов экспериментов, используя стандартную методику расчета коэффициентов, получили основное уравнение регрессии:

$$y = 623,125 - 23,125 \cdot x_1 + 45,625 \cdot x_2 - 40,625 \cdot x_3 + 4,375 \cdot x_1 \cdot x_2 + 4,375 \cdot x_1 \cdot x_3 + 40,625 \cdot x_1 \cdot x_3 - 23,125 \cdot x_2 \cdot x_3 - 26,875 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (3)$$

Для оценки значимости коэффициентов вычислим доверительный интервал для коэффициента по формуле [4, 5]:

$$\Delta b_i = \pm t \cdot S_{bi} \quad (4)$$

где t – критерий Стьюдента (табличное значение критерия при 5%-ном уровне значимости и при количестве степеней свободы $f = n - I = 3 - I = 2$), $t = 4,3$; S_{bi} – дис-

персия коэффициентов $S_{bi} = 0,36$.

Доверительный интервал: $\Delta b_i = \pm 1,548$.

Значимость коэффициентов уравнения регрессии определяется по правилу: если абсолютная величина коэффициента регрессии больше доверительного интервала – коэффициент значим, незначимые коэффициенты исключаются из модели

$$\Delta b_i < \Delta b_{ji} \quad (5)$$

Определили, что все коэффициенты регрессионного уравнения (3) больше доверительного интервала, что говорит об их значимости.

Адекватность модели подтвердим по критерию Фишера. Экспериментальное значение F-критерия (критерия Фишера) рассчитывается по формуле [4, 5]:

$$F_{расч} = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2} \quad (5)$$

где $S_{ад}^2$ – дисперсия адекватности модели (остаточная дисперсия), S_y^2 – дисперсия опыта (эксперимента)

$$S_{ад}^2 = 58,32, S_y = \sqrt{S_y^2} = 2,52.$$

Определим значение критерия Фишера:

$$F_{расч} = 9,21.$$

Учитывая уровень значимости и зная степень свободы, табличное значение критерия Фишера равно $F_{табл} = 19,25$. Табличное значение критерия Фишера выше аналогичной расчетной величины, что характеризует адекватность модели.

На основании полученного уравнения регрессии построили технологические диаграммы процесса лазерного термоупрочнения (рис. 1) для наглядного определения режимов обработки для получения требуемого значения микротвердости поверхности.

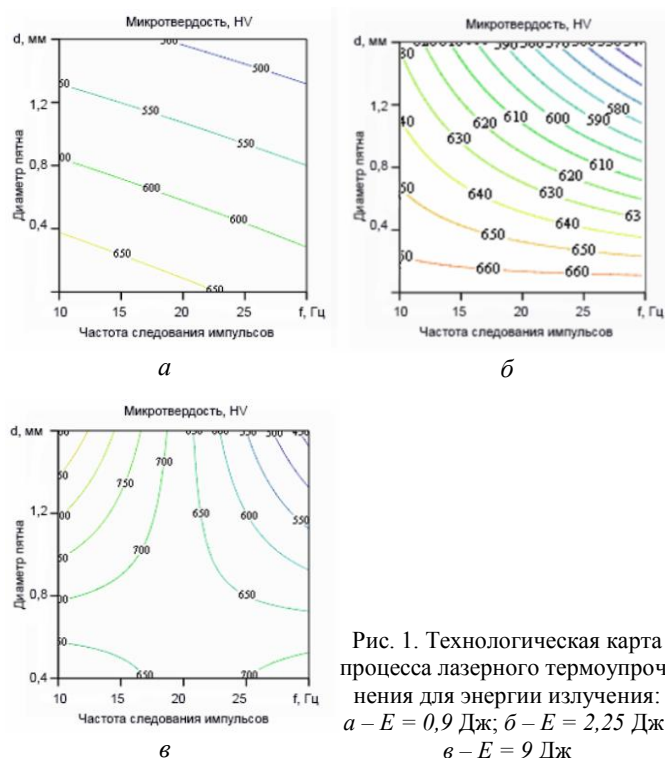


Рис. 1. Технологическая карта процесса лазерного термоупрочнения для энергии излучения: а – $E = 0,9$ Дж; б – $E = 2,25$ Дж; в – $E = 9$ Дж

В соответствии с методикой расчета по выбранной расчетной модели введем число разбиений по Z, R и t : $N = 50, i = 0..N, z_i = ht \cdot i / N, L = 75, j = 1..L, t_j = ti \cdot j / L, M = 40, k = 0..M, r_k = rpki / M, ,$ где ti – время лазерного воздействия, ht – глубина зоны термического влияния. Определим уравнение для расчета температурного поля на стадии нагрева [7]:

$$T3_{i,k} = B \cdot \int_0^{rw} \exp \left(\frac{\left(\frac{z_i}{x} \right)^2 + \left(\frac{r_k}{t0+x} \right)^2}{-4 \cdot a} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{x} \cdot (t0+x)} \cdot dx, \quad (7)$$

где a – температуропроводность материала;

$$B = \frac{2 \cdot A \cdot P}{c \cdot \rho \cdot (4 \cdot \pi \cdot a)^{1.5}}; \quad t0 = \frac{rp^2}{4 \cdot a},$$

и охлаждения $TR(z,r)$ [7]:

$$TR_{i,k} = B \cdot \left(\int_0^{tf} \exp \left(\frac{\left(\frac{z_i}{w} \right)^2 + \left(\frac{r_k}{t0+w} \right)^2}{-4 \cdot a} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{w} \cdot (t0+w)} \cdot dw - \int_0^{tf-ti} \exp \left(\frac{\left(\frac{z_i}{w} \right)^2 + \left(\frac{r_k}{t0+w} \right)^2}{-4 \cdot a} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{w} \cdot (t0+w)} \cdot dw \right),$$

Определим уравнение для расчета скорости охлаждения, проинтегрировав функцию (7) [7]:

$$V3_{i,j,k} = 2 \cdot A \cdot \frac{q \cdot \sqrt{a/t_j}}{\lambda \cdot \sqrt{\pi} \cdot \left(1 + 4 \cdot \pi \cdot a \cdot \frac{t_j}{rp^2} \right)} \times \exp \left(\frac{-\left(\frac{z_i}{4 \cdot a \cdot t_j} \right)^2 - \left(\frac{r_k}{4 \cdot a \cdot t_j + kp^{-1}} \right)^2} \right), \quad (9)$$

где $kp = 1 / rp^2$.

По полученным зависимостям построены графики и диаграммы изменения температуры по глубине и по поверхности на стадии охлаждения (рис. 2, а), и распределение скорости охлаждения по поверхности и глубине (рис. 2, б).

Анализ полученных данных позволил сделать качественную оценку влияния варьируемых параметров лазерной обработки на формирование температурных полей в пятне нагрева и в зоне термического влияния. Анализ полученных результатов позволил определить, что зона закалочных температур > 1100 °С располагается от поверхности материала на расстоянии около 40 мкм. Скорость охлаждения составила $1,831 \cdot 10^6$ °С/с.

ВЫВОДЫ

1. Анализ основного уравнения регрессии (3) показывает, что наиболее существенно на твердость обрабатываемой лазером поверхности влияет значение частоты следования импульсов, далее по значимости – диаметр пятна и энергия излучения.

2. В результате была получена адекватная модель, где все коэффициенты значимые.

3. Выбор режимов лазерной обработки по регрессионной модели подтвердил выбор оптимальных параметров, однако, необходимо отметить, что оптимизация параметров по разработанной модели требует учитывать и качество получаемой поверхности: для технологических задач недопустимо образование трещин в упрочненном слое, превышение допустимой шероховатости, коробление или сильное оплавление поверхности.

4. Математическое моделирование тепловых процессов позволяет оценить влияние режимов обработки на исследуемый материал, глубину распространения тепла, скорость нагрева и охлаждения при заданных режимах обработки. Позволяет корректировать параметры лазерного воздействия для обеспечения заданной глубины зоны упрочнения. Получены расчетные значения скорости охлаждения $1,83 \cdot 10^6$ °С/с и глубины зоны закалки 40 мкм при лазерной обработке, обеспечивающие обработку в соответствии с заданными физическими и эксплуатационными характеристиками.

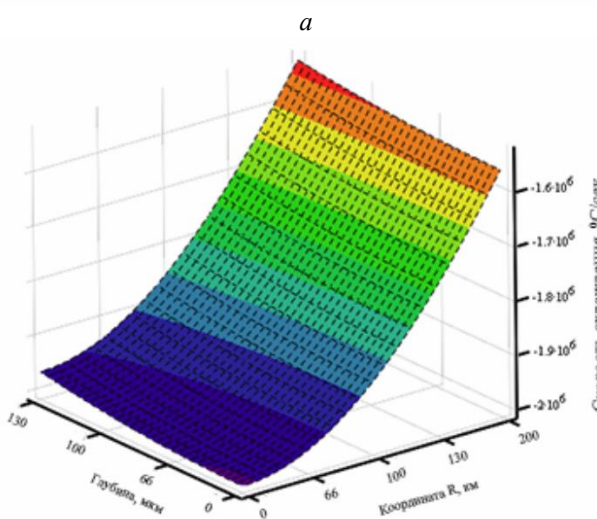
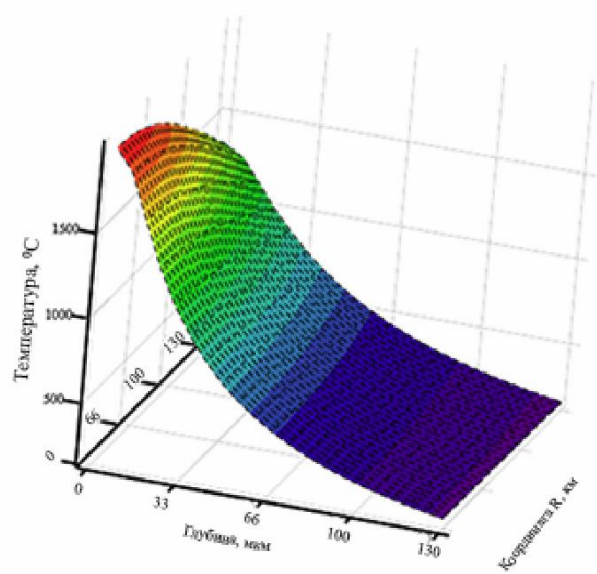


Рис. 2. Распределение по глубине и поверхности: а – температуры; б – скорости охлаждения

ЛИТЕРАТУРА

1. Тарасова Т.В. Перспективы использования лазерного излучения для повышения износостойкости коррозионно-стойких сталей // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2010. – №6. – С. 54-58.
2. Белашова И.С. Модифицирование поверхности инструментальных сталей с применением лазерного нагрева // *Наукоемкие технологии*. – 2004. – С. 36-40.
3. Влияние степени дискретного упрочнения поверхности на триботехнические характеристики сталей и сплавов / Т.В. Тарасова, С.Д. Кузьмин, И.С. Белашова, Т.Д. Белоконов // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2015. – Т. 3, №1. – С. 13-16.

4. Адлер Ю.П. Планирование экспериментов при поиске оптимальных условий. / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.И. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 277 с.

5. Новик Ф.С. Планирование эксперимента на симплекс при изучении металлических систем. - М.: *Металлургия*, 1985. – 255 с.

6. Физические основы моделирования и оптимизации процесса лазерной поверхностной закалки сталей / Б.И. Бертяев, И.Н. Завестовская, В.И. Игошин и др. // *Труды ФИАН*. – М.: Наука. – 1989. – Т. 198. – С. 5-23.

7. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: справочник / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев, А.Н. Кохора. – М.: *Машиностроение*, 1985. – 496 с.

DOI: 10.24892/RIJIE/20170408

Mathematical Modeling of Thermal Processes and Optimization of Laser Surface Treatment Modes

Tarasova T.V.

Moscow State University of
Technology “STANKIN”
Moscow, Russia
tarasova952@mail.ru

Belashova I.S.

Moscow Automobile and
Road Construction State
Technical University
Moscow, Russia
irina455@inbox.ru

Kuzmin S.D.

Moscow Aviation Institute
(National Research University)
Moscow, Russia
sarvatas@gmail.com

Kuzmina E.I.

CPS № 507
of Moscow Rayon
St. Petersburg, Russia
el.iv.kuzmina@gmail.com

Abstract. Based on the mathematical model of the full factorial experiment was evaluated the influence of the main parameters of the laser heat treatment process on the qualitative characteristics of the surface sample - microhardness of the surface. The adequacy of the regression equation and the value of the coefficients of the equation were estimated. To obtain the possibility of optimizing the technological process of laser processing and determining the influence of laser processing parameters on the geometric and qualitative characteristics of the surface sample was carried a mathematical calculation of the thermal processes for laser heat treatment of 95X18 steel through the solution of the heat equation.

Keywords: regression analysis; mathematical modeling; mathematical planning of the experiment; regression equation.

REFERENCES

1. Tarasova T.V. Prospects of using laser radiation to improve wear resistance of corrosion-resistant steels [Perspektivy ispol'zovaniya lazernogo izlucheniya dlya povysheniya iznosostoykosti korrozionnostoykikh staley], *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov [Metal Science and Heat Treatment of Metals]*, 2010, no.6, pp. 54-58. (in Russ.)

2. Belashova I.S. Modification of the surface of tool steels with the use of laser heating [Modifitsirovanie poverkhnosti instrumental'nykh staley s primeneniem lazernogo nagreva], *Naukoemkie tekhnologii [High technology technologies]*, 2004, pp. 36-40. (in Russ.)

3. Tarasova T.V., Kuzmin S.D., Belashova I.S., Belokon T.D. Influence of the degree of discrete hardening of the surface on the tribotechnical characteristics of steels and alloys, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2015, vol. 3, no.1, pp. 13-16. (in Russ.)

4. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovsky Yu.I. *Planirovaniye eksperimentov pri poiske optimal'nykh usloviy* [Planning experiments in the search for optimal conditions], Moscow, Nauka, 1976, 277 p. (in Russ.)

5. Novik F.S. *Planirovaniye eksperimenta na simpleks pri izuchenii metallicheskikh sistem* [Planning an experiment on simplex in the study of metal systems], Moscow, Metallurgy, 1985, 255 p. (in Russ.)

6. Bertyaev B.I., Zastovovskaya I.N., Igoshin V.I. et al. Physical fundamentals of modeling and optimization of laser surface hardening of steels [Fizicheskie osnovy modelirovaniya i optimizatsii protsessa lazernoy poverkhnostnoy zakalki staley], *Trudy FIAN [Proc. FIAN]*, Moscow, Nauka, 1989, vol. 198, pp. 5-23. (in Russ.)

7. Rykalin N.N., Uglov A.A., Zuev I.V., Kokhora A.N. *Lazernaya i elektronno-luchevaya obrabotka materialov: spravochnik* [Laser and electron-beam processing of materials: Handbook], Moscow, Mechanical Engineering, 1985, 496 p. (in Russ.)

Библиографическое описание статьи

Тарасова Т.В. Математическое моделирование тепловых процессов и расчетная оптимизация режимов лазерной поверхностной обработки / Т.В. Тарасова, И.С. Белашова, С.Д. Кузьмин, Е.И. Кузьмина // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2017. – Т.5, №4. – С. 63-66. DOI: 10.24892/RIJIE/20170408

Reference to article

Tarasova T.V., Belashova I.S., Kuzmin S.D., Kuzmina E.I. Mathematical modeling of thermal processes and optimization of laser surface treatment modes, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2017, vol.5, no.4, pp. 63-66. DOI: 10.24892/RIJIE/20170408