

УДК 621.793

**И. Н. Поддубный¹, д-р техн. наук Л. И. Ивченко²,
канд. техн. наук О. Г. Чернета¹**

¹ Днепродзержинский государственный технический университет, г. Днепродзержинск

² Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ

Получена математическая зависимость, позволяющая определить микротвердость рабочих поверхностей деталей машин после импульсной лазерной обработки.

Ключевые слова: лазер, фактор, математическая модель, микротвердость.

Введение

Конкретные условия эксплуатации деталей машин, в частности автомобилей, требуют создания упрочняющих технологий с получением на их рабочих поверхностях слоев различного фазового состава и структуры, что определяет работоспособность деталей в условиях изнашивания, воздействия коррозионной среды, знакопеременных нагрузок, а также сопротивлению ползучести при повышенных температурах. В связи с этим большое значение приобретает создание различных вариантов технологий, которые позволяют получить заданную структуру и фазовый состав поверхностных слоев деталей, обеспечивающих оптимальные характеристики деталей машин [1].

Методика исследований

Для исследований выбрана сталь мартенситного класса 40X10C2M, из которой изготавливают клапаны двигателей внутреннего сгорания. В качестве упрочняющей обработки исследованных образцов использовали модифицирование поверхностей детали при помощи лазера.

Лазерную обработку поверхностных слоев образцов осуществляли с помощью импульсного лазера ГОС-1001. При работе на этой установке доминирующими параметрами являются: энергия накачки лазера – E_n и расстояние ΔF между фокусом объективной линзы и обрабатываемым образцом.

К основным параметрам обработки импульсной лазерной закалке относятся энергия в импульсе W , Дж, диаметр лазерного пятна d_n , мм, и длительность импульса τ_p , мс. Иногда, как энергетические характеристики лазеров используют такие величины, как мощность в импульсе P_u , Вт, и среднюю мощность лазера, Вт:

$$P_{cp} = P_u \tau_i f_i = W_u f_i, \quad (1)$$

где W_u – энергия импульса, Дж;

P_u – мощность импульса, Вт:

$$P_u = W_u / \tau_i, \quad (2)$$

где τ_i – длительность импульса, мс;

f_i – частота следования импульсов, Гц.

При условии, что энергия по пятну распределена равномерно, параметры можно объединить и определить плотность мощности, Вт/см²:

$$E = W_u / S_n \tau_i = P_u / S_n, \quad (3)$$

где S_n – площадь лазерного пятна, см².

Некоторые зоны на рабочей поверхности фаски клапана испытывают двойное воздействие лазерного луча из-за неизбежности наложений круглых лазерных пятен. Важным параметром при этом является коэффициент перекрытия, который определяется по формуле [2]:

$$K_n = S / d_n, \quad (4)$$

где S – шаг по заданному контуру, мм,

d_n – диаметр пятна, мм.

Замеры микротвердости поверхностного слоя образцов производили на микротвердомере ПМТ-3 с нагрузкой 0,5 Н.

Полученные результаты и их обсуждение

Для построения математической модели зависимости микротвердости рабочих поверхностей деталей от вышеприведенных факторов в виде полинома первого порядка применялись методы планирования эксперимента, а именно, полный факторный эксперимент. Уровни варьирования факторов представлены в таблице 1.

Для упрощения записи условий эксперимента и обработки экспериментальных данных масштабы по осям выбираются так, чтобы верхний уровень варьирования соответствовал +1, нижний -1, а основной уровень варьирования равнялся нулю.

Таблица 1 – Уровни варьирования факторов

№ п/п	Фактор	Код	Уровни			Интервал
			-1	0	+1	
1	Плотность мощности лазерного излучения, E , кВт/мм ²	X_1	2,0	2,4	2,8	0,4
2	Длительность импульса, ϕ , с	X_2	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$1,75 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1,25 \cdot 10^{-3}$
3	Коэффициент перекрытия зон обработки, K_n , %	X_3	10	30	50	20

Для факторов с непрерывной областью определения это возможно осуществить с помощью преобразования:

$$x_j = \frac{\tilde{x}_j - \tilde{x}_{j0}}{I_j}, \quad (5)$$

где x_j – кодированное значение фактора;
 \tilde{x}_j – натуральное значение фактора;
 \tilde{x}_{j0} – натуральное значение основного уровня;
 I_j – интервал варьирования;
 j – номер фактора.

С помощью формулы преобразования запишем матрицу плана и полученные результаты эксперимента (табл. 2).

В результате обработки экспериментальных данных были получены оценки влияния факторов и взаимодействий факторов на исследуемый параметр $H_{\mu 0,5}$.

Для движения к точке оптимума использовалась математическая модель вида:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k),$$

где x_1, \dots, x_k – факторы зависимостей.

В данном случае математическая модель для полного трехфакторного эксперимента имеет вид:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (6)$$

Целью проведения исследований является определение по результатам эксперимента значения неизвестных коэффициентов рассматриваемой модели.

Коэффициенты регрессии можно вычислить по формуле:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} \cdot y_i}{N}, \quad j = 0, 1, 2, \dots, k, \quad (7)$$

где N – количество опытов.

Для подсчета коэффициента b_1 используется вектор-столбец x_1 , а для b_2 – столбец x_2 . Остается неясным как найти b_0 . Если наше уравнение (6) справедливо, то оно верно и для средних арифметических значений переменных. Но в силу свойства симметрии $\tilde{x}_1 = \tilde{x}_2 = 0$, $\tilde{y} = b_0$. Следовательно, b_0 есть среднее арифметическое значение параметра оптимизации.

Таблица 2 – Матрица плана и результаты эксперимента

№ п/п	Кодированные значения факторов в эксперименте								$Y(H_{\mu 0,5})$, МПа
	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	6920
2	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	6900
3	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	6852
4	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	6850
5	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	6500
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	6455
7	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	6450
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	6390
9	1	0	0	0	0	0	0	0	6685
10	1	0	0	0	0	0	0	0	6690
11	1	0	0	0	0	0	0	0	6681
12	1	0	0	0	0	0	0	0	6680

Коэффициенты линейной модели (6) имеют следующие величины:

$$\begin{aligned} b_0 &= 6671,08; & b_{12} &= 0,25; \\ b_1 &= 143,92; & b_{13} &= -6,92; \\ b_2 &= 19,42; & b_{23} &= 0,25; \\ b_3 &= 10,58; & b_{123} &= -5,58. \end{aligned}$$

Коэффициенты при независимых переменных указывают на силу влияния факторов. Чем больше численная величина коэффициента, тем большее влияние оказывает фактор. Если коэффициент имеет знак «плюс», то с увеличением величины фактора параметр оптимизации увеличивается. Величина коэффициента соответствует вкладу данного фактора в величину параметра оптимизации при переходе фактора с нулевого уровня на верхний или нижний.

Подставив найденные коэффициенты в уравнение (6), получим следующее соотношение:

$$y = 6671,08 + 143,92 \cdot \tilde{x}_1 + 19,42 \cdot \tilde{x}_2 + 10,58 \cdot \tilde{x}_3 + 0,25 \cdot \tilde{x}_1 \cdot \tilde{x}_2 - 6,92 \cdot \tilde{x}_1 \cdot \tilde{x}_3 + 0,25 \cdot \tilde{x}_2 \cdot \tilde{x}_3 - 5,58 \cdot \tilde{x}_1 \cdot \tilde{x}_2 \cdot \tilde{x}_3. \quad (8)$$

В уравнении (8) переменные значения $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3, \tilde{x}_4$ представляют собой кодированные величины. Для удобства вычисления кодированные величины заменяем натуральными:

$$\begin{aligned} \tilde{x}_1 &= \frac{E - 2,4}{0,4} = 2,5 \cdot E - 6; \\ \tilde{x}_2 &= \frac{\tau_i - 0,00175}{0,00125} = 800 \cdot \tau_i - 1,4; \\ \tilde{x}_3 &= \frac{K_{II} - 30}{20} = 0,05 \cdot K_{II} - 1,5; \end{aligned} \quad (9)$$

где E — плотность мощности лазерного излучения, кВт/мм²;

τ_i — длительность импульса, сек;
 K_{II} — коэффициент перекрытия зон обработки, %.

Подставив выражения (9) в уравнение (8), получим математическую зависимость для определения значения поверхностной твердости детали от вышеприведенных факторов:

$$\begin{aligned} H_{\mu 0,5} &= 5775,16 + 355,58 \cdot E - 26140 \cdot \tau_i + \\ &0,245 \cdot K_{II} + 17240 \cdot E \cdot \tau_i + 0,115 \cdot E \cdot K_{II} + \\ &+ 1349,2 \cdot \tau_i \cdot K_{II} - 558 \cdot E \cdot \tau_i \cdot K_{II}. \end{aligned} \quad (10)$$

Выводы

Полученная математическая зависимость позволяет определить микротвердость поверхностного слоя детали, обработанной при помощи импульсной лазерной обработки.

Список литературы

1. Александров В. А. Планирование эксперимента и обработка результатов исследований по азотированию сталей в аммиачно-воздушных атмосферах / В. А. Александров, Л. Г. Петрова, Ю. Г. Фомина // Упрочняющие технологии и покрытия, — 2007. — № 4. — С. 18–23.
2. Григорьянц А. Г. Технологические процессы лазерной обработки : Учеб. пособие для вузов / Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисюров А. И. ; под ред. А. Г. Григорьянца. — М. : Изд-во МГТУ им. Баумана, 2006. — С. 286–290.
3. Вернигора В. Д. Построение математической модели для определения количества масла перенесенного со стороны шлама абразивной обработки металлов в моющих раствор / Виктор Вернигора, Александр Коробочка // Сб. науч. тр. КГМТУ «Механизация производственных процессов рыбного хозяйства, промышленных и аграрных предприятий». — 2010. — Вып. 11. — С. 25–30.

Поступила в редакцию 04.07.2011

Піддубний І.М., Івченко Л.Й., Чернета О.Г. Моделювання властивостей матеріалів після лазерної модифікації

Отримана математична залежність, що дозволяє визначити микротвердість робочих поверхонь деталей машин після імпульсної лазерної обробки.

Ключові слова: лазер, фактор, математична модель, микротвердість.

Poddubnyi I., Ivchenko L., Cherneta O. Design of properties of materials after laser modification

Mathematical dependence, allowing to define surfaces's microhardness of details of machines after impulsive laser treatment is got.

Key words: laser, factor, mathematical model, microhardness.