

**ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
ИНТЕНСИВНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ  
ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ**

*Канд. техн. наук, доц. АВСИЕВИЧ А. М., докт. техн. наук, проф. ДЕВОЙНО О. Г.,  
канд. техн. наук, доц. КОЧЕРОВ А. Л., канд. техн. наук ПИЛИПЧУК А. П.*

*Белорусский национальный технический университет*

Лазерная обработка – высокоэффективный способ повышения эксплуатационных свойств деталей в современном производстве. Установлено, что свойства поверхностного слоя в основном зависят от параметров лазерной обработки, что позволяет рассматривать их в качестве факторов технологического процесса. Физические процессы, протекающие при взаимодействии луча лазера с поверхностью изделия, и их влияние на структуру и свойства материалов являются основой для создания упрочняющих технологий, позволяющих решать качественно новые технические задачи. Перспективное направление – формирование упрочненных поверхностей с неравномерным распределением свойств по поверхности детали в соответствии с эпюрой распределения нагрузок и скоростей в узле трения [1].

Изменение свойств материала на поверхности изделия может быть достигнуто варьированием [2]:

- величины теплового воздействия на различные участки упрочняемой поверхности;
- состава и количества материала, вводимого в зону лазерной обработки при лазерном легировании и наплавке.

Важным этапом разработки новых технологий является математическое моделирование процесса лазерной обработки. Оно выполняется для оценки теплового воздействия на наплавляемый материал и зону обработки упрочняемой поверхности. Параметры лазерного излучения (ЛИ) – мощность, скорость перемещения и фокусировка лазерного луча – используются на

этапе математического моделирования для определения температурного поля, температурных градиентов, мгновенных значений скоростей нагрева и охлаждения, что позволяет обосновать режим лазерной обработки. Анализ выполненных работ, посвященных математическому моделированию процесса лазерной обработки, свидетельствует о том, что сложность задачи определяется необходимостью учета зависимости теплофизических свойств материалов от температуры, фазовых изменений при плавлении-кристаллизации. Перечисленные факторы формируют данную задачу нелинейной, что определяет необходимость использования численных методов решения задач математической физики. При этом для численной реализации разработанной модели необходимо адекватно представить распределение интенсивности лазерного излучения по сечению лазерного пятна [3–5]. Установлено, что изменение распределения интенсивности (или интегральной характеристики – плотности энергии) излучения по площади пятна лазерного воздействия влияет на распределение температуры в зоне обработки. Это позволяет рассматривать данный параметр как важный фактор повышения эффективности обработки. Сложность математического описания реального распределения интенсивности заставляет использовать значительные упрощения, что приводит к снижению точности численных оценок. Поэтому задача корректного учета распределения энергии по сечению лазерного пятна при моделировании процессов лазерной обработки в настоящее время актуальна.

Для представления распределения интенсивности лазерного излучения по сечению лазерного пятна, как правило, используются упрощенные математические модели, которые аппроксимируют реальное распределение теплового источника равномерным или гауссовским распределением.

Рассмотренные способы упрощения в общем случае немонотонного излучения неточно описывают реальный поток мощности, что подтверждается результатами работ [3, 5]. Поэтому использование равномерного и гауссовского представлений при математическом моделировании не позволяет принять решение о возможности применения данного вида обработки для конкретного изделия.

Задачей проводимых исследований является разработка способа математического описания осесимметричного распределения интенсивности излучения лазерных источников энергии непрерывного действия. Предполагается, что в дальнейшем этот способ может быть использован при математическом моделировании температурного поля на поверхностях заготовок деталей.

Для адекватного представления реального распределения интенсивности по сечению лазерного луча требуется использование результатов экспериментальных исследований и их аппроксимации. Учитывая широкое распространение в промышленности лазеров непрерывного действия, было выполнено исследование распределения интенсивности лазерного излучения CO<sub>2</sub>-установки «Комета-2» с номинальной мощностью 1,5 кВт.

Для оценки распределения интенсивности поверхностного источника использовали разновидность теплового метода [5] – метод прожигания образцов, основанный на превращении энергии излучения при взаимодействии с поверхностью образца в тепловую энергию, которая впоследствии нагревает и расплавляет материал. Основным допущением является предположение о том, что вся энергия, поступающая на поверхность, используется для испарения материала – так называемый предельный режим испарения [6]. В рамках данного подхода установлено, что для любого материала скорость роста глубины выемки пропорциональна плотности энергии. Способ позволяет

приблизительно определять распределение интенсивности лазерного излучения в результате измерения областей разрушения поверхности.

Для нефокусированного излучения апертурой 40 мм на выходе резонатора установки распределение плотности мощности определяли экспериментально путем кратковременного облучения пластины из оргстекла. Образец располагался на расстоянии 0,3 м от выходного окна лазера, что соответствует ближней зоне излучения. Материал образца при взаимодействии с лазерным излучением быстро испаряется, поэтому в каждой точке поверхности глубина проплавления пропорциональна количеству реализованной энергии и соответственно плотности мощности излучения. Первоначально определяли время облучения. Для пластины из оргстекла толщиной 3 мм оптимальным оказалось воздействие нефокусированного излучения в течение 4 с, когда максимальная глубина проплавления составляет 0,1–0,2 мм, а следы течения расплавленного материала отсутствуют. При увеличении времени воздействия установлена опасность сквозного прожига пластины, а также появления отдельных наплывов, обусловленных растеканием расплавленного материала по поверхности.

Измерение глубины проплавления проводили от оси излучения в двух радиальных направлениях, перпендикулярных направлению перемещения заслонки, где время воздействия излучения одинаково. При выбранном оптимальном времени были получены 30 экспериментальных распределений глубины проплавления, что согласно рекомендациям [5] обеспечивает статистическую достоверность результатов эксперимента. Измерения глубины проплавления проводили индикатором ИЧТ-0,01. Чтобы исключить погрешности измерений, обусловленные короблением и отклонением пластины из оргстекла от плоскостности, ее закрепляли прихватками к прошлифованной с двух сторон чугунной плите. Перемещение плиты относительно индикатора осуществляли винтовым механизмом, измерения производили с шагом 0,5 мм.

Фотография оплавленного образца представлена на рис. 1. В картине оплавления различимы концентрические окружности, что позволяет предположить наличие осевой симметрии в распределении интенсивности лазерного

излучения и вместо двумерного распределения интенсивности рассматривать одномерное.

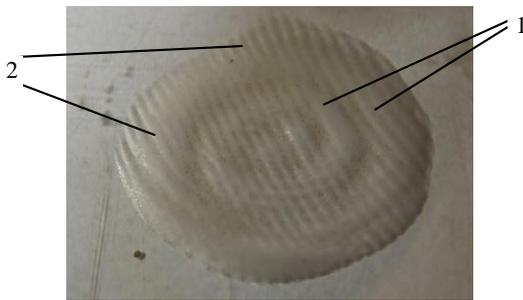


Рис. 1. Фотография экспериментального образца после оплавления: 1 – концентрические выступы и впадины; 2 – следы интерференционных борозд

Глубины проплавления для каждой точки в радиальном направлении рассчитывали как средние по результатам экспериментов. Различие глубины проплавления для одних и тех же значений координаты в радиальном направлении относительно оси луча составляли не более 17 мкм (10 %). Математическую обработку полученных результатов проводили с использованием пакета прикладных математических программ. На рис. 2 представлены результаты исследований, а также кубическая сплайн-интерполяция  $K(x)$ , равномерная  $R(x)$  и гауссовская  $G(x)$  аппроксимации экспериментальных данных, построенные в предположении

$$\int_{-\infty}^{\infty} K(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} R(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} G(x) dx. \quad (1)$$

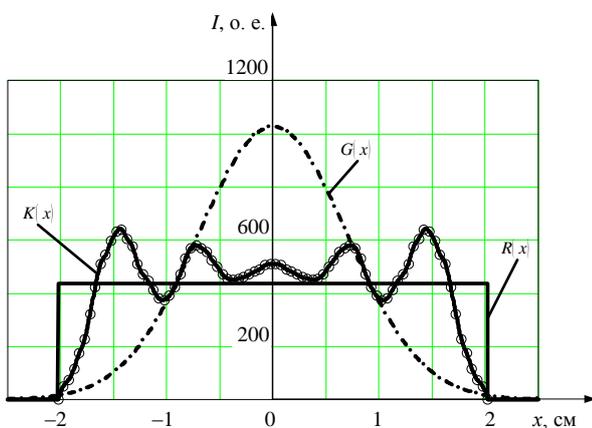


Рис. 2. Кубическая сплайн-интерполяция  $K(x)$ , равномерная  $R(x)$  и гауссовская  $G(x)$  аппроксимации экспериментального распределения интенсивности лазерного излучения по радиусу пятна нагрева

Для оценки ошибки аппроксимации использовался функционал

$$\psi[F] = \int_{-\infty}^{\infty} |K(x) - H(x)| dx \cdot \left( \int_{-\infty}^{\infty} K(x) dx \right)^{-1}. \quad (2)$$

Ошибки равномерной и гауссовской аппроксимаций составляют  $\psi R \approx 24,6 \%$  и  $\psi G \approx 61,0 \%$  соответственно. Полученные оценки точности аппроксимации подтверждают положение о необходимости поиска новых способов аналитического описания немонотонного осесимметричного распределения интенсивности лазерного излучения.

Основной идеей решения сформулированной задачи является аналитическое представление моделей распределения интенсивности излучения немонотонного поверхностного источника в виде многообразия сдвигов базисной функции

$$W(x, N) = \sum_{n=1}^N A_n F(x, P_n), \quad (3)$$

где  $F(x, P_n)$  – базисная функция разложения;  $x$  – аргумент базисной функции, пространственная переменная;  $P_n$  – вектор параметров базисной функции.

Строгое обоснование возможности аппроксимации произвольной функции содержится в работах Н. Винера, Н. Ахиезера [7].

Для удобства дальнейшего использования при решении задачи теплопроводности в качестве базисной функции  $F(x)$  разложения (1) обосновано использование функции Гаусса, вид которой определяется

$$G(x, \lambda, \sigma) = q_0 \exp\left(-\frac{(x - \lambda)^2}{\sigma}\right), \quad (4)$$

где  $q_0$  – максимальное значение интенсивности;  $\sigma$  – параметр, определяющий ширину пучка;  $\lambda$  – то же, определяющий положение функции  $G(x, \lambda, \sigma)$  на оси  $x$ .

Выбор гауссовской функции основывается на том, что она удовлетворяет необходимым требованиям к базисной (преобразование Фурье не обращается в нуль на всей прямой), а кроме

того, гауссоида является собственной функцией линейного стационарного уравнения теплопроводности. Поэтому в ряде случаев решение уравнения теплопроводности можно находить как суперпозицию все тех же гауссовских функций. Кроме того, появляется возможность использования существующих решений уравнения теплопроводности для нормально-круговых источников [8, 9], что, в свою очередь, позволяет представлять искомое тепловое поле в виде суперпозиции известных решений. При таком выборе вектор параметров  $P_n$  будет представлен совокупностью параметров  $q_{0j}, \lambda_j, \sigma_j$ .

Число базисных функций, участвующих в сумме [5], принято равным пяти по числу локальных максимумов в кривой экспериментального распределения интенсивности (рис. 2). Таким образом, общее число параметров модели, подлежащих определению, равно 15. Для определения оптимальных значений [10] параметров  $q_{0j}, \lambda_j, \sigma_j \quad j=1, \dots, N$  введем в рассмотрение функционал

$$\partial N = \int_{\Omega} K(x) - W(x, N)^2 dx. \quad (5)$$

В этом случае оптимальные параметры могут быть определены путем численного решения системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial \delta N}{\partial q_{0j}} = 0, & j = \overline{1, \dots, N}; \\ \frac{\partial \delta N}{\partial \lambda_j} = 0, & j = \overline{1, \dots, N}; \\ \frac{\partial \delta N}{\partial \sigma_j} = 0, & j = \overline{1, \dots, N}. \end{cases} \quad (6)$$

Для экспериментального распределения (рис. 2) оптимальные параметры составляют:

$$q_{0j}: 634,25; 493,34; 506,4; 493,03; 634,1;$$

$$\lambda_j: 5,76; 12,82; 20,25; 27,67; 34,73;$$

$$\sigma_j: 0,09; 0,089; 0,037; 0,089; 0,09.$$

Параметры  $q_{0j}, \lambda_j, \sigma_j$  использованы при построении сдвигового представления (3) ре-

зультатов экспериментальных исследований. На рис. 3 представлено  $W(x)$  распределение интенсивности лазерного излучения  $K(x)$  базисными функциями  $G_1(x), G_2(x), G_3(x), G_4(x), G_5(x)$ , параметры которых определены в результате решения (6).

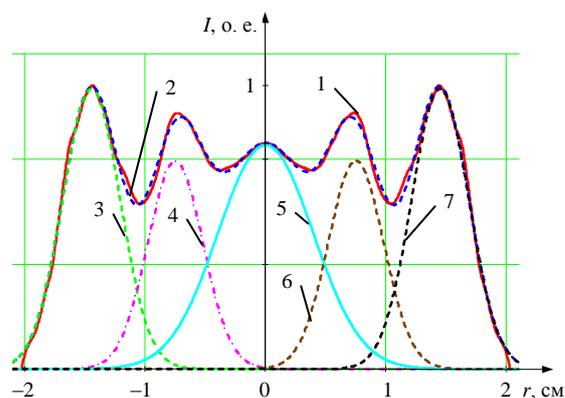


Рис. 3. 1 – кубическая сплайн-аппроксимация  $K(x)$ ; 2 – сдвиговая аппроксимация  $W(x)$ ; 3 – ее составляющая для интенсивности лазерного излучения  $G_1(x)$ ; 4 – то же  $G_2(x)$ ; 5 – то же  $G_3(x)$ ; 6 – то же  $G_4(x)$ ; 7 – то же  $G_5(x)$

Результаты исследований позволили представить исходное распределение интенсивности в виде совокупности гауссовых источников, удобном для дальнейшего определения температурного поля (рис. 4). При этом точность аппроксимации, вычисленная по формуле (2), составила  $\psi \approx 2,2\%$  при числе сдвигов  $N = 5$ . Таким образом, установлено, что предлагаемый способ позволяет более точно учесть особенности взаимодействия излучения и обрабатываемой поверхности, что, в свою очередь, способствует повышению точности математического моделирования [11].

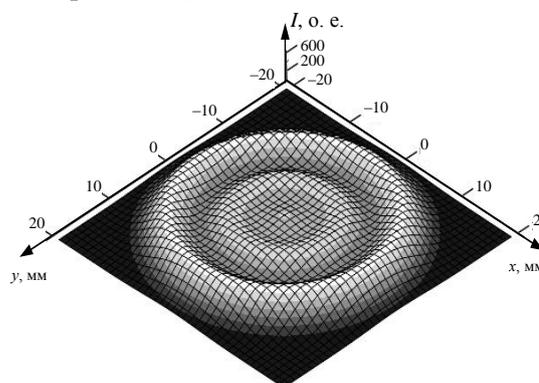


Рис. 4. Сдвиговая аппроксимация для интенсивности лазерного излучения

ВЫВОДЫ

Известные упрощенные представления (равномерное  $R$  и гауссово  $G$ ) не достаточно точно описывают распределение интенсивности лазерного излучения по сечению пятна, что подтверждает представленная в статье ошибка аппроксимации ( $\psi[R] \approx 24,6\%$  и  $\psi[G] \approx 61,0\%$ ). Отмеченное обстоятельство существенно снижает эффективность математического моделирования процесса лазерной обработки с использованием результатов упрощенных представлений.

Точность описания распределения интенсивности лазерного излучения можно повысить в результате определения зависимостей распределения, а затем аппроксимации полученных результатов экспериментов в виде суперпозиции базисных функций, что подтверждают результаты исследований (ошибка аппроксимации  $\psi \approx 2,2\%$ ).

Перечень принятых обозначений и сокращений:

- $r$  – радиус пятна нагрева;
- $q(x)$  – интенсивности лазерного излучения как функция координаты  $x$ ;
- $x$  – координата в поперечном направлении относительно оси лазерного луча;
- $\sigma$  – параметр, определяющий ширину пучка (коэффициент сосредоточенности);
- $K(x)$  – кубическая сплайн-интерполяция распределения интенсивности лазерного излучения;
- $R(x)$  – равномерная аппроксимация распределения интенсивности лазерного излучения;
- $G(x)$  – гауссовская аппроксимация распределения интенсивности лазерного излучения;
- $W(x)$  – сдвиговая аппроксимация распределения интенсивности лазерного излучения;
- $\psi[M]$  – ошибка распределения  $M$ ;
- $N$  – количество базисных функций, аппроксимирующих экспериментальное распределение;
- $\lambda_i$  – параметр, определяющий положение  $i$ -й базисной функции;
- $A_i$  – амплитуда  $i$ -й базисной функции.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Повышение** долговечности трущихся элементов вращательных кинематических пар механизмов машин на основе моделирования их износа / И. П. Филонов [и др.] // Современные методы проектирования машин: Респ. межведомств. сб. науч. тр. – Вып. 2: в 7 т. / под общ. ред. П. А. Витязя. – Минск, 2004. – Т. 4. – С. 127–132.
2. **Девойно, О. Г.** Технология формирования износостойких поверхностей лазерным легированием / О. Г. Девойно. – Минск: Технопринт, 2001. – 180 с.
3. **Учет** немонотонности пространственного распределения лазерного излучения при расчете режимов термической обработки массивных изделий / А. А. Углов [и др.] // Митом. – 1989. – № 11. – С. 9–13.
4. **Снижение** трещинообразования при оплавлении покрытий из самофлюсующихся сплавов лазерным лучом / В. Н. Чачин [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 1991. – № 1. – С. 125–131.
5. **Рэди, Дж.** Действие мощного лазерного излучения: пер. с англ. В. А. Баталова и И. К. Красюка. – М.: Мир, 1974. – 470 с.
6. **Эндрюс, Дж.** Сверление лазером / Дж. Эндрюс, Д. Р. Этси // Математическое моделирование. – М., 1979. – С. 81–93.
7. **Ахизер, Н. И.** Лекции по теории аппроксимации / Н. И. Ахизер. – М.: Наука, 1965. – 407 с.
8. **Рыкалин, Н. Н.** Расчеты тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. – М.: ГНТИМЛ, 1951. – 298 с.
9. **Пилипчук, А. П.** Построение и анализ температурного поля при воздействии немонотонного лазерного излучения / А. П. Пилипчук // Машиностроение. – 2003. – Вып. 19. – С. 111–116.
10. **Кочеров, А. Л.** Способ определения оптимальных коэффициентов разложения при сдвиговой аппроксимации функций / А. Л. Кочеров // Цифровая обработка информации и управление в чрезвычайных ситуациях: материалы первой междунар. конф.: в 2 т. / Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси. – Минск, 1998. – Т. 1. – С. 124–127.
11. **Девойно, О. Г.** Моделирование многомодового излучения лазера как этап синтеза технологии оплавления газотермических покрытий / О. Г. Девойно, А. П. Пилипчук, А. Л. Кочеров // Машиностроение. – 2000. – Вып. 16.

Поступила 02.05.2012