

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать вывод о возможности применения инструментальной углеродистой стали У8А в качестве материала электрода-инструмента при обработке твердого сплава ВК-8.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Размерная электроэрозионная обработка металлов: Учеб. Пособие для студентов вузов/ Б.А. Артамонов, А.Л. Вишницкий, Ю.С. Волков, А.В. Глазков; Под ред. А.В. Глазкова. — М.: Высш. школа, 1975.-336 с. 2. Фотеев Н.К. Технология электроэрозионной обработки. — М.: Машиностроение, 1980.-184 с. 3. В.П. Александров Исследование технологических характеристик электроэрозионной обработки жаропрочных материалов. Издательство «Наука». Москва, 1964.-122 с.

УДК 621.9.048.7

А.П. Пилипчук

### ПОСТРОЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕМОНОТОННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*Военная академия  
Минск, Беларусь*

В настоящее время лазерная обработка является одним из наиболее перспективных методов улучшения физико-механических свойств поверхностных слоев материалов. Это обусловлено рядом преимуществ данного вида обработки, в первую очередь возможностью концентрации и дозирования значительной энергии на малых площадях. Применение лазерной обработки в машиностроении основано на явлении изменения температуры отдельных точек объема и поверхности обрабатываемого материала в результате его взаимодействия с лазерным излучением (ЛИ).

На данном этапе изучения особенностей взаимодействия лазерного излучения с материалами установлены зависимости величины и характера нагрева от условий обработки, свойств обрабатываемого материала и основных параметров лазерного излучения. Такими параметрами являются мощность, переносимая лазерным лучом, длительность воздействия и характер распределения энергии по пятну нагрева. Последний параметр в значительной степени определяет неравномерность итогового распределения температуры в материале, что является одной из причин возникновения остаточных напряжений.

Основу излучения тепловых процессов, протекающих в теле под воздействием лазерного излучения, составляет уравнение теплопроводности, которое может быть записано в виде [1]:

$$c\gamma(T) \frac{\partial T}{\partial t} + \operatorname{div} \bar{W} = Q(x, y, z, t), \quad (1)$$

где  $\bar{W} = -\lambda(T) \operatorname{grad} T$  — тепловой поток;  $c\gamma$  — объемная теплоемкость;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $Q(x, y, z, t)$  — объемная плотность тепловых источников.

Результатом решения данного уравнения является зависимость температуры от координат и времени, т. е.

$$T = f(x, y, z, t), \quad (2)$$

которая определяет искомое температурное поле. На основании анализа зависимости (2), полученной в результате решения (1), можно сделать выводы о характере распределения температуры, наличии температурных градиентов и прогнозировать структурные и фазовые изменения в материале. Отметим, что при традиционном подходе анализ данной зависимости сводится к определению границ зон фазовых изменений по положению соответствующих изотерм, а также оценке в некоторых частных случаях скорости нагрева и охлаждения в различных точках поля по расстоянию между соседними изотермами. Данные выводы являются основой для разработки технологических процессов лазерной обработки, способствующих формированию в материале требуемого уровня физико-механических свойств, обеспечивающего успешное функционирование детали в условиях реального нагружения.

Таким образом, температурное поле в рамках традиционного подхода рассматривается как скалярное нестационарное поле, когда каждой точке тела  $(x, y, z)$  в определенный момент времени  $(t)$  соответствует определенное значение скаляра — температуры  $(T)$ .

Однако как показывает опыт, результаты расчетных оценок распределения температуры всегда в той или иной степени отличаются от экспериментальных данных, одной из причин чего является упрощенное представление источника нагрева. В связи с этим отметим, что для рассматриваемой задачи обработки ЛИ, когда используется поглощающее покрытие является изотропным и равномерным по толщине,  $Q(x, y, z, t)$  задается в виде граничного условия на поверхности обрабатываемой детали ( $z=0$ ). При этом можно считать, что пространственная структура поверхностного источника тепла повторяет распределение интенсивности ЛИ  $I(x, y)$  по поверхности материала. Поэтому учет немонотонности ЛИ при решении уравнения (1) повышает адекватность математической модели процесса лазерной обработки.

В свою очередь, в самом общем случае воздействия ЛИ на поверхность, его распределение интенсивности имеет сложный вид, трудно поддающийся описанию. Следствием чего является идеализация источника, т. е. использование в практичес-

ких расчетах равномерного или гауссовского аналитических представлений распределения интенсивности лазерного излучения.

Таким образом, с одной стороны очевидна необходимость учета характера распределения интенсивности ЛИ при анализе процесса воздействия, а с другой – сложность аналитического представления решения данной задачи в удобном для практического использования виде.

Впервые аналитическое решение задачи теплопроводности в линейной постановке при воздействии ЛИ, имеющего немонотонный характер распределения интенсивности получено Н.Н. Рыкалиным в работе [2], где рассматривается процесс распространения тепла при нагреве полубесконечного тела подвижным нормально-круговым источником, как «совокупность элементарных процессов распространения тепла соответствующих мгновенных источников».

В рассматриваемом случае нормально-круговой источник с эффективной мощностью  $q$  и с коэффициентом сосредоточенности  $k$  перемещался с постоянной скоростью  $v$  по поверхности полубесконечного тела, не обменивающегося теплом с окружающей средой. Данный источник имеет осесимметричное гауссовское распределение интенсивности и описывается выражением

$$q_m(x_0, y_0, t) = q_m(x_0, y) = q_0 \exp\left(-\frac{x_0^2 + y_0^2}{r^2}\right) = q_0 \exp\left(-k(x_0^2 + y_0^2)\right), \quad (3)$$

где  $r$  – радиус пучка, т. е.  $q_m(r) = \frac{q_0}{e}$ ;  $k = \frac{1}{r^2}$  – коэффициент сосредоточенности.

Полученное выражение для определения температуры в момент времени  $t$  от действия нормально-кругового источника  $q(t)$  перемещающегося со скоростью  $v$  в неподвижной системе координат  $(x_0, y_0, z_0)$ , центр которой совпадает с центром источника имеет вид [2]:

$$T(x_0, y_0, z_0; t) = \int_0^t \frac{2qdt'}{c\gamma [4\pi a(t-t')]^{3/2} (4\pi a(t_0 + t - t'))} \times \exp\left[-\frac{z_0^2}{4a(t-t')} - \frac{(x_0 - vt')^2 + y_0^2}{4a(t_0 + t - t')}\right], \quad (4)$$

Выражение (4) можно рассматривать как результат действия отдельного нормально-кругового источника на поверхность тела.

Разработанная методика получила широкое распространение при решении задач анализа процессов взаимодействия ЛИ. Так, в работе [3] отмечена возможность оценки теплового поля, «возникающего при термообработке или наплавке массивного тела сосредоточенным источником лазерного нагрева ... в первом приближении».

Кроме того, было обоснована возможность [2] использования принципа суперпозиции тепловых полей от различных гауссовых тепловых источников:

$$Q(x, y, z, t) \equiv Q(x, y, t) = \sum_{i=1}^n Q_i(x, y, t). \quad (5)$$

Примером применения данного подхода служит работа [4], где рассматриваются тепловые процессы, происходящие при обработке непрерывным технологическим CO<sub>2</sub>-лазером модели Spektraphysics-973.

При этом оговаривается, что использование принципа суперпозиции «является эффективным в том случае, когда для аппроксимации достаточно лишь нескольких гауссовых источников», что само по себе уже является существенным ограничением. В рассматриваемом примере лазерной обработки «наблюдаются два явных максимума излучения», что позволило, по мнению авторов, ограничиться «суперпозицией двух гауссовых тепловых источников», «аппроксимирующих воздействие ... с приемлемой точностью»:

$$q(x, y) = q_0 \left\{ \exp \left[ -k \left( x^2 + (y - y_0)^2 \right) \right] + \exp \left[ -k \left( x^2 + (y + y_0)^2 \right) \right] \right\}, \quad (6)$$

где  $y_0$  — смещение центра теплового источника относительно начала координат;  $x, y$  — текущие координаты;  $q_0$  — плотность мощности излучения отдельного источника.

Особенностью данной работы также является то, что авторы представили процесс распространения тепла в движущейся системе координат, начало которой совпадает с центром зоны лазерного воздействия, что позволило снова ввести в рассмотрение коэффициент сосредоточенности  $k$ . К сожалению, из самой работы не ясно, каким образом авторы определяют значения  $y_0$  и  $q_0$ , и оценивают влияние степени точности аппроксимации распределения интенсивности ЛИ на результат. Поэтому вывод о том, что данный «способ, основанный на аппроксимации реального теплового источника совокупностью гауссовых» может быть использован «для расчета параметров нагрева массивных тел» представляется не вполне корректным.

Таким образом, основными недостатками разработанной методики учета немонотонности пространственного распределения лазерного излучения при расчете режимов термической обработки являются отсутствие рекомендаций по выбору вида аппроксимирующих тепловых источников (т.е. определение параметров  $q$  и  $k$ ), определению их числа и взаимного расположения, обеспечивающих требуемую степень точности.

Основной идеей предлагаемого решения задачи определения результирующего теплового воздействия является использование методики аналитического представления моделей распределения интенсивности ЛИ с любой наперед заданной степенью точности [5].

Основанием служит возможность экспериментального определения вида функции  $q(x, y, z)$  для ЛИ [6].

Отправным пунктом предлагаемого представления являются работы американского ученого Н. Винера, развитые в дальнейшем советским математиком Ахизером [7,8]. В этих работах доказана возможность аппроксимации произвольной функции  $K(x)$  математической конструкцией  $W(x, N)$  вида

$$W(x, N) = \sum_{n=1}^N A_n \cdot F(x - \lambda_n), \quad (7)$$

которая, по сути, является линейным многообразием сдвигов базисной функции  $F(x)$ , где  $\lambda$  — величина сдвига, а  $F(x - \lambda)$  — сдвиг базисной функции на величину  $\lambda$ . В дальнейшем под  $K(x)$  будем понимать пространственное распределение интенсивности ЛИ, а  $W(x, N)$  — сдвиговое приближение, формализующее данное распределение. Данное аналитическое представление полностью определено вектором параметров, составленным из значений коэффициентов разложения  $\{A_n\}_N = \{A_1, \dots, A_N\}$  и величин соответствующих сдвигов или сетки разложения  $\{\lambda_n\}_N = \{\lambda_1, \dots, \lambda_N\}$ . Таким образом, единственное ограничение применения данного подхода к описанию источника энергии — физическая реализуемость рассматриваемого (аппроксимированного) распределения.

Подобная аппроксимация может быть выполнена как для фиксированной последовательности  $\{A_n\}_N$  при варьируемой сетке разложения, так и для заданной сетки разложения  $\{\lambda_n\}_N$  при варьируемых коэффициентах разложения  $\{A_n\}_N$ . При этом выбор конкретного способа построения сдвигового приближения обусловлен требованиями к получаемым моделям, а также теми задачами, для решения которых они применяются.

Для аналитического представления решения уравнения теплопроводности (1) в случае немонотонного ЛИ в качестве базисной функции  $F(x)$  разложения предпочтительнее всего использование гауссовой функции, или нормально-кругового источника (4). Данный выбор основывается на том, что гауссова функция удовлетворяет необходимому требованию к базисной (ее Фурье преобразование не обращается в нуль на всей прямой), а кроме того, гауссоида является собственной функцией линейного стационарного уравнения теплопроводности.

В случае обработки немонотонным ЛИ температурное поле в полубесконечном теле может быть представлено в виде:

$$T(x, y, z, t) = T_0 + \sum_{i=1}^n \Delta T_i(x, y, z, t), \quad (8)$$

при условии, что каждое слагаемое  $\Delta T_i$  является результатом воздействия отдельного подвижного нормально-кругового источника. (4). Полученное выражение для определения температуры в момент времени  $t$  от действия нормально-кругового источника  $q(t)$  перемещающегося со скоростью  $v$  в подвижной системе координат  $(x_0; y_0; z_0)$ , центр которой совпадает с центром источника имеет вид:

$$\Delta T(x_n; y_n; z_n; t) = \frac{A_0 q_0}{\lambda \sqrt{\pi k}} \int_0^{2\sqrt{kat}} \exp \left\{ -\frac{(z_n)^2 k}{\xi^2} - \frac{(y_n)^2 k}{1 + \xi^2} - \frac{(x_n + \alpha \xi^2)^2 k}{1 + \xi^2} \right\} d\xi, \quad (9)$$

где  $\alpha = \frac{v}{4ka}$ ,  $\xi = 2\sqrt{ka(t-t')}$ .

В свою очередь, параметры данных подвижных нормально-круговых источников  $q$  и  $k$  и величина сдвига  $\lambda$  определяются из условия выполнения (7). При этом

каждый источник рассматривается как базисная функция  $F(x)$ , а  $W(x, N)$  результат аппроксимации произвольного распределения интенсивности  $K(x)$ .

Таким образом, использование предлагаемого подхода позволит повысить адекватность модели процесса лазерной обработки массивных тел.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лыков А.В. Теория теплопроводности. –М.: Высшая школа, 1967. –600с. 2. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. –М.: Машгиз, 1951. –296с. 3. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. –М.: Машиностроение, 1989. –304с. 4. Углов А.А., Смуров И.Ю., Смирнов В.П., Смирнов А.Л. Учет немонотонности пространственного распределения лазерного излучения при расчете режимов термической обработки массивных изделий // Металловедение и термическая обработка металлов. –1989. –№11. –С.9-13. 5. Кочеров А.Л. Способ определения оптимальных коэффициентов разложения при сдвиговой аппроксимации функций // Цифровая обработка информации и управление в чрезвычайных ситуациях: Материалы первой междунар. конф. / Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси. –Минск, 1998. –Т.1. –С.124-127. 6. Хирд Г. Измерение лазерных параметров. –М.: Мир, 1970. –540с. 7. Винер Н. Интеграл Фурье и его приложения / Пер. с англ. Н.Я.Виленкина. –М.: Наука, 1963. –256с. 8. Ахизер Н.И. Лекции по теории аппроксимации. –М.: Наука, 1965. –407с.

УДК 620.1.669.1

Н.А. Семашко, Д.В. Мельников, Р.Ф. Крупский, В.И. Муравьев, С.Б. Марьин

### ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ 20 ПОСЛЕ ГАЗОЛАЗЕРНОГО РАСКРОЯ

*ОАО «Комсомольское-на-Амуре авиационное производственное  
объединение им. Ю. А. Гагарина»  
Комсомольск-на-Амуре, Россия*

Повышение эффективности производства деталей из конструкционных сплавов, используемых в авиастроении, связано с внедрением новых методов обработки материалов. Одним из новых методов, который в последнее время стал успешно использоваться на производстве, является метод газолазерного раскроя (ГЛР). Наряду с традиционными методами, такими как фрезерование, электроискровой раскрой, штамповка и т.п., метод ГЛР обладает существенными преимуществами. К достоинствам метода ГЛР можно отнести высокую производительность (скорость реза), точность