

УДК 537.533; 621.785; 669.15

УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ МОДИФИЦИРУЕМОГО СЛОЯ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКЕ

В.Г. ЗАЛЕССКИЙ, А.Г. МАНЯК, Д.Г. РУГОЛЬ
(Полоцкий государственный университет)

Представлены результаты численного моделирования температурного поля в одно- и двухслойных материалах с целью поиска условий, обеспечивающих управление параметрами модифицируемого слоя в одно- и многоимпульсных режимах воздействия.

Введение. Упрочнение материала предполагает некоторое термическое воздействие с целью создания на поверхности слоев, обладающих требуемым комплексом физико-механических свойств [1]. Реализация на практике таких технологий возможна при решении двух задач. Во-первых, необходим поиск инструмента, обеспечивающего оптимальное воздействие, а во-вторых, подбор технологических режимов воздействия, при которых упрочняемые слои обладают требуемыми свойствами.

Решение первой задачи достигается целым рядом известных способов, среди которых значительное место занимают перспективные корпускулярно-лучевые технологии, а именно лазерное, электронно- и ионно-лучевое упрочнение [2, 3]. Поскольку упрочнение, как правило, необходимо осуществлять на значительной площади, то в сравнении с лазерным [2] и традиционным электронно-лучевым упрочнением сканирующим сфокусированным пучком [1] использование плазменных источников электронов (ПИЭЛ) более эффективно [4]. Плазменные источники отличаются возможностью получать электронные пучки большого сечения с высокой однородностью плотности тока по сечению пучка, большой стабильностью параметров электронного пучка в сравнении с традиционными термокатодными пучками [5], особенно в условиях повышенного газоотделения при обработке порошковых и пористых материалов [6]. Плазменные источники электронов также обеспечивают генерацию электронных пучков в широком диапазоне плотностей тока в стационарном и импульсном режимах работы, что значительно расширяет область применения электронно-лучевых технологий.

Решение второй задачи требует одновременного выполнения зачастую противоречивых условий. Температура на заданной глубине не должна быть ниже температуры фазового перехода (температуры закалки), но при этом на поверхностях температура должна быть ограничена: на обрабатываемой поверхности - температурой плавления при закалке из твердого состояния, или температурой испарения - при закалке из жидкого состояния, а на обратной поверхности и в объеме изделия - температурой, не допускающей короблений и других дефектов. Для реализации закалочных процессов в материале скорости нагрева и охлаждения должны соответствовать требуемому диапазоном значений, при этом градиент температур по толщине упрочняемого слоя должен стремиться к минимальному значению. Последнее необходимо для получения слоев с высокой однородностью свойств по толщине.

Градиент температур и толщина упрочненного слоя при заданном энерговыкладе (плотности мощности и времени воздействия) определяются только теплофизическими свойствами материала. Это означает, что режим одноимпульсного воздействия не всегда может обеспечить сочетание толщины упрочненного слоя, температуры воздействия и градиента температур. В этом случае представляется более эффективным применение многоимпульсного режима, при котором возможности варьирования термического воздействия существенно расширяются за счет регулирования длительности, скважности и числа импульсов. Особый интерес представляет анализ результатов многоимпульсного режима воздействия на двухслойные материалы со значительно отличающимися теплофизическими параметрами.

Влияние импульсного энерговыклада лазерного излучения на формирование температурного поля в материале рассматривалось в ряде работ [7]. Однако в этих работах параметры импульсов не варьировались, а анализ охватывал, главным образом, практическую сторону вопроса - результат теплофизического воздействия. Это ограничило выявление особенностей формирования упрочняемого слоя при импульсном энерговыкладе.

Постановка задачи. Будем рассматривать электронный пучок как поверхностный источник теплоты, что уместно при ускоряющих напряжениях ~ 30 кВ, что характерно для плазменных источников электронов [4, 5]. В условиях радиальной симметрии электронного пучка постановка задачи теплопроводности с учетом температурной зависимости теплофизических коэффициентов имеет вид:

$$C_v(T) \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda(T) r \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right]. \quad (1)$$

Граничные условия для однослойных материалов:

$$-\lambda(T) \frac{\partial T(r, 0, t)}{\partial z} = q(r); \quad (2)$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T(r, h, t)}{\partial z} = 0; \tag{3}$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T(R, z, t)}{\partial z} = 0, \tag{4}$$

где h, R – соответственно толщина и радиус обрабатываемого материала; q – плотность мощности электронного пучка, которая для однородного по сечению электронного пучка радиуса r_f задается функцией

$$q(r) = \begin{cases} q_0, & r < r_f \\ 0, & r \geq r_f \end{cases} \tag{5}$$

Условия (3) и (4) выражают факт отсутствия теплоотвода с обратной и торцевой поверхностями изделия, поскольку электронно-лучевое воздействие осуществляется в вакууме. Для двухслойных материалов к граничным условиям (2) - (4) необходимо добавить условие идеальности (или неидеальности) теплового контакта материалов. В случае идеального теплового контакта граничные условия принимают вид:

$$\begin{aligned} -\lambda_1(T) \frac{\partial T(r, 0, t)}{\partial z} &= q(r); \\ -\lambda_2(T) \frac{\partial T(r, h_2, t)}{\partial z} &= 0; \end{aligned} \tag{6}$$

$$\lambda_1(T) \frac{\partial T(r, h_1, t)}{\partial z} = \lambda_2(T) \frac{\partial T(r, h_2, t)}{\partial z},$$

где h_1, h_2 – соответственно толщина первого и второго слоя.

Начальные условия могут быть представлены в виде функции

$$T(r, z, \tau) = \begin{cases} T_0, & \tau = 0 \\ T(r, z, \tau_{i-1}), & \tau_i > \tau_{i-1} \end{cases}, \tag{7}$$

где T_0 – начальное распределение температуры; $T(r, z, \tau_{i-1})$ – начальное распределение температуры в материале, установившееся в результате $i - 1$ цикла.

Уравнение (1) совместно с граничными условиями (2) – (4) или (6) и начальным условием (7) решалось численно. В расчетах использовались экспериментальные зависимости теплофизических коэффициентов $\lambda(T)$ и $c(T)$ от температуры для стали 45 и борсодержащих материалов, а также параметры электронного пучка экспериментального плазменного источника электронов [4, 5].

Результаты моделирования и их обсуждение. Для иллюстрации особенностей многоимпульсного воздействия, в сравнении с одноимпульсным, проводился расчет термического цикла закалки в выбранном диапазоне температур для некоторого материала (сталь 45). С этой целью температура на поверхности ограничивалась некоторым значением (1000 или 1300 °С), а по распределению температуры определялась толщина слоя, на которой достигалась заданная температура (750 или 900 °С) при варьировании плотности мощности, числа и скважности импульсов.

На рис. 1 и 2 представлены результаты расчетов, полученные в рамках предложенной модели, - фрагмент распределения температуры в материале и зависимость толщины закаленного слоя от плотности мощности и суммарного энерговклада в изделие электронного пучка для одно- и многоимпульсного режимов воздействия.

Как следует из рис. 1, 2, с увеличением плотности мощности электронного пучка крутизна распределения температуры (рис. 1, кривые 1,2) увеличивается, а толщина закаленного слоя и суммарный энерговклад уменьшаются (рис. 2, кривые 4,5).

При этом распределения температуры, полученные при одно- и многоимпульсном воздействии, различаются незначительно (рис. 1, кривые 1,2). С уменьшением плотности мощности или времени нагрева в многоимпульсном режиме различия в распределении температур становятся более существенными (рис. 1, кривые 7, 8 и рис. 2, кривые 1 - 3). При малых плотностях мощности воздействия возможна реализация режима, когда интенсивность термического воздействия соответствует скорости теплопередачи для данного материала. Теоретически в таком случае даже в одноимпульсном режиме возможно получение закалочного слоя большой толщины. Однако, как показали расчеты, остальная часть изделия подвергается значительному разогреву, что в ряде случаев не допустимо [1]. Это означает, что, варьируя

параметры импульса при выбранной плотности мощности, можно получить слой с заданным градиентом температур и толщиной, по крайней мере, большей, чем при одноимпульсном режиме при прочих равных условиях (рис. 1, кривые 3 и 6, рис. 2). Увеличение толщины слоя обеспечивается за счет теплопередачи в промежутки времени, когда электронно-лучевое воздействие отсутствует. Поэтому с увеличением времени охлаждения τ_o при постоянных τ_n и q можно получить большую толщину закалочного слоя (рис. 1, кривые 4, 5). При этом соответственно увеличивается и суммарный энергозатрат (рис. 2), что неизбежно в силу физических причин. Как известно, реализация закалочных процессов в материалах возможна только при условии, что скорость нагрева и охлаждения достигают критических значений. Расчеты показывают, что при многоимпульсном режиме обработки, как и при одноимпульсном, скорости охлаждения оказываются достаточными для закалки ($10^3 \dots 10^4$ °C/c).

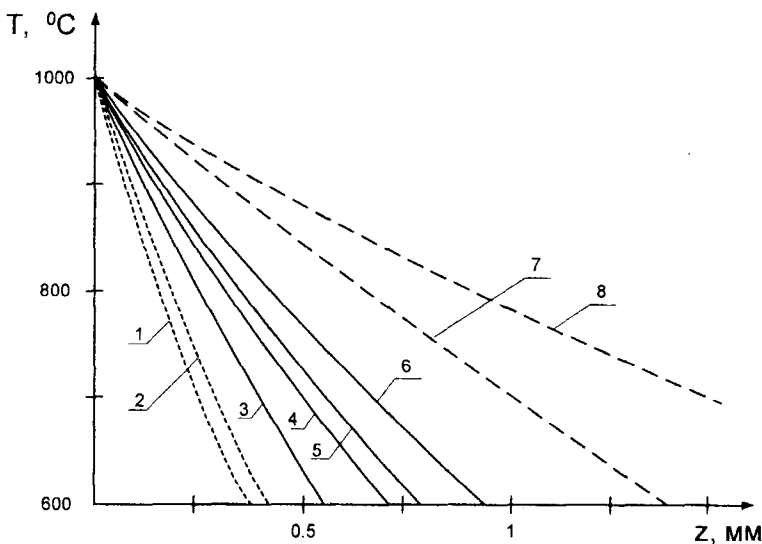


Рис. 1. Фрагмент распределения температуры по толщине однослойного материала для различных параметров импульса:

1, 3, 7 – одноимпульсный режим воздействия; 2, 4, 5, 6, 8 – многоимпульсный режим воздействия;
 $1 - 2 - q = 3,97 \cdot 10^7$ Вт/м²; $1 - \tau_n = 0,068$ с; $2 - \tau_n = 0,05$ с; $\tau_o = 0,5$ с; $3 - 6 - q = 2,4 \cdot 10^7$ Вт/м²; $3 - \tau_n = 0,16$ с;
 $4, 5 - \tau_n = 0,05$ с; $6 - \tau_n = 0,03$ с; $4 - 6 - \tau_o = 0,1$ с; $5 - \tau_o = 0,3$ с; $7 - 8 - q = 1,59 \cdot 10^7$ Вт/м²;
 $7 - \tau_n = 0,34$ с; $8 - \tau_n = 0,05$ с; $\tau_o = 0,1$ с.

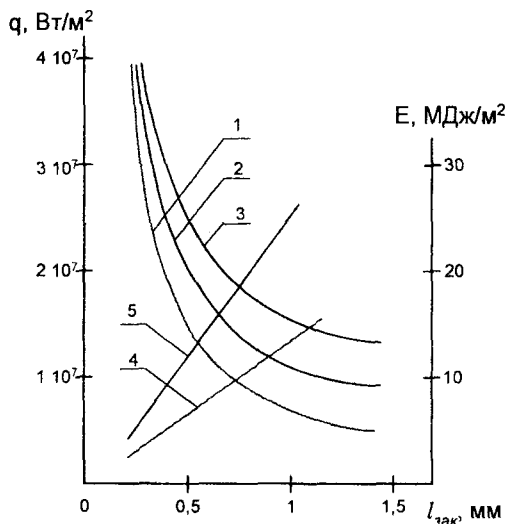


Рис. 2. Зависимость толщины закаленного слоя от плотности мощности и суммарного энергозатрата:

1, 4 – одноимпульсный режим воздействия; 2, 3, 5 – многоимпульсный режим воздействия;
 $2 - \tau_n = 0,05$ с; $\tau_o = 0,1$ с; $3 - \tau_n = 0,03$ с; $\tau_o = 0,1$ с

С целью выявления особенностей обработки многоимпульсным режимом проводили расчет термического цикла для борсодержащих покрытий на стальной подложке и стальных покрытий на медной основе. В результате моделирования выявили, что при обработке таких материалов проявляются аналогичные закономерности (рис. 3, кривые 1 - 5), как и для стали.

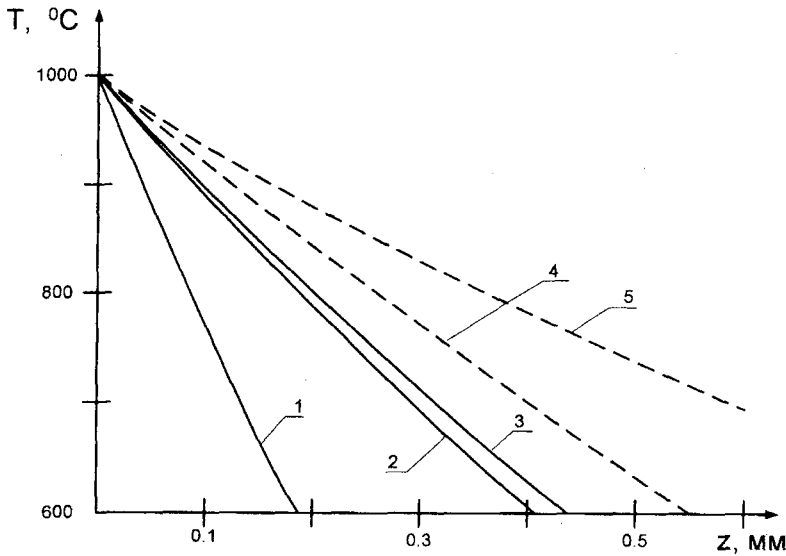


Рис. 3. Режимы воздействия:

1, 4 – одноимпульсный режим воздействия; 2, 3, 5 – многоимпульсный режим воздействия;
 1 – 3 – $q = 3,97 \cdot 10^7$ Вт/м²; 4 – 5 – $q = 1 \cdot 10^7$ Вт/м²; 1 – $\tau_n = 0,038$ с; 2, 3 – $\tau_n = 0,01$ с; 4 – $\tau_n = 0,349$ с;
 5 – $\tau_n = 0,05$ с; 2 – $\tau_o = 0,1$ с; 3 – $\tau_o = 0,2$ с; 5 – $\tau_o = 0,05$ с

Однако если упрочняемый материал обладает гораздо меньшей теплопроводностью чем подложка, то формирование модифицированного слоя с заданной толщиной и градиентом температур в одноимпульсном режиме затруднительно (рис. 3, кривая 1). В этом случае использование многоимпульсного режима обработки является более эффективным (рис. 3, кривые 2, 3, 5). Результаты обработки приведены в таблице.

Результаты расчета термического цикла при электронно-лучевом воздействии для однослойных и двухслойных материалов

Режим воздействия	Плотность мощности, q , Вт/м ²	Заданная температура на поверхности изделия, $T_{пов}$, °C	Время воздействия, $t_{ч}$, с	Время межимпульсного периода, $t_{о}$, с	Температура закалки		Общее время воздействия, $t_{нр}$, с	Количество импульсов, N	Скорость нагрева, V_n , °C/с	Скорость охлаждения, V_o , °C/с
					750 °C	900 °C				
					Толщина слоя, $l_{зак}$, м	Толщина слоя, $l_{зак}$, м				
Сталь 45										
Одноимпульсный	$3,97 \cdot 10^7$	1000	0,068	–	0,0002	$8,1 \cdot 10^{-5}$	–	1	10^4	–
	$2,4 \cdot 10^7$	1000	0,163	–	0,00031	0,00012	–	1	10^4	–
	$1,59 \cdot 10^7$	1000	0,342	–	0,00045	0,00017	–	1	10^4	–
Многоимпульсный	$3,97 \cdot 10^7$	1000	0,05	0,1	0,00021	$8,6 \cdot 10^{-5}$	0,189	2	10^4	10^3
	$2,4 \cdot 10^7$	1000	0,05	0,1	0,00036	0,00013	0,796	6	10^4	10^3
	$1,59 \cdot 10^7$	1000	0,05	0,1	0,00062	0,00019	2,895	20	10^4	10^3
	$2,4 \cdot 10^7$	1000	0,05	0,05	0,00036	0,00013	0,436	6	10^4	10^3
	$2,4 \cdot 10^7$	1000	0,03	0,1	0,00044	0,00015	2,238	18	10^4	$2,6 \cdot 10^3$
	$2,4 \cdot 10^7$	1000	0,05	0,3	0,00038	0,00013	5,648	16/17	10^4	$2,6 \cdot 10^3$
Борсодержащее покрытие на стальной подложке										
Многоимпульсный	$3,97 \cdot 10^7$	1000	0,01	0,2	0,00025	$9,88 \cdot 10^{-5}$	5,679	28	$3,8 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^3$
	$3,97 \cdot 10^7$	1000	0,01	0,1	0,00024	$9,4 \cdot 10^{-5}$	1,439	14	$3,8 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^3$
	$3,97 \cdot 10^7$	1000	0,05	0,05	0,00012	$4,8 \cdot 10^{-5}$	0,038	1	$2,4 \cdot 10^4$	–
	$3,18 \cdot 10^7$	1000	0,05	0,05	0,00017	$6,6 \cdot 10^{-5}$	0,121	2	$1,8 \cdot 10^4$	$6,5 \cdot 10^3$
	$2,4 \cdot 10^7$	1000	0,05	0,05	0,00017	$6,9 \cdot 10^{-5}$	0,146	2	$1,8 \cdot 10^4$	$6,5 \cdot 10^3$
	$1,19 \cdot 10^7$	1000	0,05	0,05	0,00037	0,00013	0,735	8	$7,5 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^3$

Окончание таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	$1 \cdot 10^7$	1000	0,05	0,05	0,00044	0,00015	1,040	11	$6,5 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$
Одноимпульсный	$3,97 \cdot 10^7$	1000	0,038	—	0,00012	$4,8 \cdot 10^{-5}$	—	1	$2,4 \cdot 10^4$	—
	$3,18 \cdot 10^7$	1000	0,053	—	0,00014	$5,4 \cdot 10^{-5}$	—	1	$1,8 \cdot 10^4$	—
	$1,98 \cdot 10^7$	1000	0,109	—	0,00018	$7,2 \cdot 10^{-5}$	—	1	$8,510^3$	—
	$1 \cdot 10^7$	1000	0,349	—	0,00031	0,00012	—	1	$2,810^3$	—
Стальное покрытие на медной подложке										
Многоимпульсный	$3,97 \cdot 10^7$	1000	0,01	0,1	0,00055	0,00014	3,639	34	$2,4 \cdot 10^4$	$2,2 \cdot 10^3$
	$1 \cdot 10^7$	1000	0,05	0,05	0,0018	0,00032	2,542	26	$3,4 \cdot 10^3$	$2,2 \cdot 10^3$
Одноимпульсный	$3,97 \cdot 10^7$	1000	0,068	—	0,0002	$8,1 \cdot 10^{-5}$	—	1	$1,4 \cdot 10^4$	—
	$1 \cdot 10^7$	1000	0,755	—	0,00074	0,00026	—	1	$1,3 \cdot 10^3$	—

Поскольку в многоимпульсном режиме влияющих на термический цикл факторов много, то однозначно установить зависимости, учитывающие влияние времени нагрева, времени охлаждения, количества импульсов, плотности мощности, геометрии изделия, сложно, а оптимизировать параметры такого воздействия крайне затруднительно. Поэтому можно указать только некоторые качественные зависимости, например, увеличение времени охлаждения, ведет к уменьшению градиента температур, при этом число импульсов значительно возрастает (см. рис. 1, кривая 5; рис. 3, кривая 3). Снижение плотности мощности и времени воздействия, в свою очередь, приводит к увеличению количества импульсов, уменьшению градиента температур, однако это отражается на уменьшении скорости нагрева и охлаждения, которые могут не соответствовать необходимым для упрочнения (см. рис. 1, кривая 6, 8; рис. 3, кривая 4,5).

Необходимо отметить, что полученные зависимости ни в коей мере не могут считаться технологическим условиями закалки данного материала, а должны рассматриваться в качестве зависимостей, которые иллюстрируют возможность управления комплексом свойств закалочного слоя (градиент температур, толщина, скорость охлаждения) посредством использования многоимпульсного воздействия с различными параметрами воздействия.

Выводы. На основании сделанных расчетов можно сделать следующие выводы. Нам представляется, что использование многоимпульсного режима воздействия может существенно расширить технологические возможности электронно-лучевой обработки в области упрочняющих технологий за счет варьирования дополнительными, в сравнении с одноимпульсным режимом, параметрами - скважностью и числом импульсов.

Многоимпульсный режим позволяет достичь большей толщины модифицируемого слоя, чем при одноимпульсном воздействии, с высокой однородностью свойств, т.е. повысить, при определенных условиях, эффективность энерговклада как при обработке однослойных материалов, так и материалов с покрытиями.

Поиск оптимального режима упрочнения возможен для каждого конкретного материала с учетом соответствующих температурных зависимостей, теплофизических коэффициентов, наличия подложки, геометрических параметров изделия и т.д., что может быть осуществлено в рамках предложенной модели на основе разработанного программного обеспечения.

Работа выполнена в рамках гранта фонда фундаментальных исследований Республики Беларусь, который был направлен на исследование закономерностей электронно-лучевого воздействия на борсодержащие материалы и принципов оптимизации электронно-лучевого оборудования для технологии упрочнения и восстановления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шипко А.А., Поболь И.Л., Урбан И.Г. Упрочнение сталей и сплавов с использованием электронно-лучевого нагрева. - Мн.: Наука і тэхніка, 1995. - 280 с.
2. Рыкалин Н.Н. Лазерная обработка материалов. - М.: Машиностроение, 1975.
3. Рыкалин Н.Н. Основы электронно-лучевой обработки материалов. - М.: Машиностроение, 1978. - 240 с.
4. В.А. Груздев, В.Г. Залесский, Д.А. Антонович, Ю.П. Голубев // Инженерно-физический журнал. - 2002. - Т. 75, №3. - С. 166-170.
5. Плазменный электронно-ионный источник для термической модификации поверхностей материалов / Д.А. Антонович, Ю.П. Голубев, В.Г. Залесский, А.Г. Маняк // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: Сб. науч. тр. / Под ред С.А. Астапчика, П.А. Витязя. - Мн.: Технопринт; Новополоцк: ПГУ, 2001. - С. 369 - 372.
6. Залесский В.Г., Снарский А.С., Сороговец В.И. Особенности электронно-лучевого воздействия на борсодержащие износостойкие наплавленные покрытия // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: Сб. науч. трудов / Под ред С.А. Астапчика, П.А. Витязя. - Мн.: Технопринт; Новополоцк: ПГУ, 2001. - С. 378 - 381.
7. Глытенко А.Л., Любов Б.Я. Импульсно-периодический нагрев металлов // Инженерно-физический журнал. - 1987. - Т. 53, № 4. - С. 642 - 648.