

УДК 536.212;537.533;669.15

**В. А. Груздев, В. Г. Залесский, Д. Г. Руголь****МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

*Представлены результаты численного моделирования температурного поля в одно- и двухслойных материалах при электронно-лучевом воздействии в стационарном и импульсном режимах, а также проанализированы условия, при которых обеспечивается управление параметрами термообработанного слоя за счет варьирования длительностью, скважностью и числом импульсов воздействия.*

Одним из методов упрочнения поверхностей конструктивных элементов в машиностроении является соответствующее термическое воздействие [1]. Для реализации этого метода перспективны лазерные, электронно- и ионно-лучевые технологии [2, 3]. При этом часто необходимо нагревать площади поверхности, значительно превышающие сечение высокоэнергетических пучков, что требует их сканирования по поверхности. Использование плазменных источников электронов (ПИЭЛ) с пучками большого сечения позволяет повысить однородность термического электронно-лучевого воздействия [4]. Кроме того, ПИЭЛ в сравнении с традиционными термокатодными электронными пушками менее чувствительны к газовой выделению, сопровождающему термическую обработку [5, 6], способны обеспечить более широкий диапазон регулирования потока поступающей на поверхность энергии, например, за счет реализации импульсного воздействия электронного пучка на поверхность. Влияние величины импульсного энерговыклада на формирование температурного поля в поверхностном слое при воздействии лазерного излучения рассматривалось, в частности, в [7]. Однако в упомянутых работах основное внимание уделено результатам теплофизической модификации свойств поверхностей, а анализ влияния возможного варьирования параметрами импульсного энерговыклада на параметры модифицируемого поверхностного слоя практически не проводился. В то же время можно предположить, что изменение длительности импульсов энерговыклада, длительности паузы между импульсами и количества импульсов расширит возможности регулирования толщины поверхностного модифицируемого слоя, градиента температуры в слое, а также позволит снизить термическое воздействие на прилегающие к слою области материала.

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования температурного поля в поверхностных слоях материала при непрерывном режиме и в различных импульсных режимах энерговыклада, обеспечиваемых реально существующими ПИЭЛ [4, 5].

**Теплофизическая модель.** Будем рассматривать электронный пучок как поверхностный источник теплоты, что уместно при ускоряющих напряжениях  $\sim 30$  кВ и характерно для плазменных источников электронов [4, 5]. Такое допущение возможно на том основании, что при энергиях  $\sim 30$  кэВ длина пробега электрона в веществе составляет  $\sim 10^{-9}$  м (для стали) [8, стр. 12], тогда как толщина термически модифицируемого слоя  $\sim 10^{-3}$  м.

В условиях радиальной симметрии электронного пучка постановка задачи теплопроводности с учетом температурной зависимости теплофизических коэффициентов имеет вид

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

Граничные условия для однослойных материалов:

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

$$-\lambda(T) \frac{\partial T(r, H, t)}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

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

Для однородного по сечению электронного пучка радиуса  $r_f$  распределение  $q$  задается функцией

$$q(r) = \begin{cases} Q, & r < r_f; \\ 0, & r \geq r_f. \end{cases} \quad (5)$$

Условия (3) и (4) отражают отсутствие теплоотвода с обратной и торцевой поверхностями изделия, поскольку электронно-лучевое воздействие осуществляется в вакууме.

Особый технологический интерес представляет анализ результатов импульсного воздействия на двухслойные материалы с различными теплофизическими свойствами. Для таких материалов к граничным условиям (2)–(4) необходимо добавить условие идеальности (или неидеальности) теплового контакта материалов. В случае идеального теплового контакта граничные условия принимают вид

$$\begin{aligned} -\lambda_1(T) \frac{\partial T(r, 0, t)}{\partial z} = q(r), \quad -\lambda_2(T) \frac{\partial T(r, H, t)}{\partial z} = 0, \\ \lambda_1(T) \frac{\partial T(r, H_1, t)}{\partial z} = \lambda_2(T) \frac{\partial T(r, H_1, t)}{\partial z}, \quad H = H_1 + H_2. \end{aligned} \quad (6)$$

Начальное условие для  $i$ -го цикла термообработки может быть представлено в виде функции

$$T_i(r, z, 0) = \begin{cases} T_0, & i = 1; \\ T_{i-1}(r, z, \tau_h + \tau_c), & i > 1. \end{cases} \quad (7)$$

Уравнение (1) совместно с граничными условиями (2)–(4) или (6) и начальным условием (7) решалось численно.

**Результаты моделирования.** В расчетах использовались экспериментальные зависимости теплофизических коэффициентов  $\lambda(T)$  и  $C(T)$  от температуры для стали 45 [9], а также параметры электронного пучка экспериментального плазменного источника электронов [4, 5], обеспечивающего в стационарном режиме мощность пучка до  $5 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>, а в импульсном до  $5 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>. Для иллюстрации особенностей импульсного воздействия в сравнении со стационарным проводился расчет цикла термообработки в выбранном диапазоне температур для некоторого материала (сталь 45). С этой целью расчет температурного поля останавливался при достижении на поверхности заданной температуры (1300 °С) и 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 термообработанного слоя от плотности мощности электронного пучка и суммарного энерговклада в изделие для стационарного и импульсного режимов воздействия.

Как следует из рисунков, в стационарном режиме воздействия с уменьшением плотности мощности электронного пучка крутизна распределения температуры снижается (рис. 1, кривые 1, 4), а толщина термообработанного слоя и общий энерговклад увеличиваются (рис. 2, кривые 1, 4). Это означает, что теоретически даже в стационарном режиме воздействия возможно получение термически обработанного слоя большой толщины. Однако понятно, что при этом остальная часть изделия подвергается значительному разогреву, что в ряде случаев недопустимо [1].

При импульсном воздействии тенденции стационарного режима сохраняются, однако при прочих неизменных условиях глубина термообработанного слоя в значительной степени определяется межимпульсным временным интервалом (временем охлаждения  $\tau_c$ ).

Как показали расчеты, если время охлаждения значительно меньше времени нагрева в цикле термообработки, то распределения температуры в материале при стационарном и импульсном режимах воздействия различаются мало (рис. 1, кривые 1, 2). Значительное утолщение термообработанного слоя достигается в случае, когда энергия, полученная материалом при нагреве ( $\tau_h$ ), успевает перераспределиться, т. е. когда время охлаждения  $\tau_c$  сравнимо или больше времени нагрева  $\tau_h$  в цикле (импульсе) (рис. 1). Однако, как и при стационарном режиме воздействия с малой плотностью мощности (рис. 2, кривая 1), увеличение времени охлаждения  $\tau_c$  приводит к перегреву всего образца за счет повышения общего энерговклада.

Необходимо отметить, что с ростом времени охлаждения  $\tau_c$  и уменьшением плотности мощности электронного пучка  $Q$  скорость охлаждения также снижается. Поэтому при некотором сочетании этих параметров

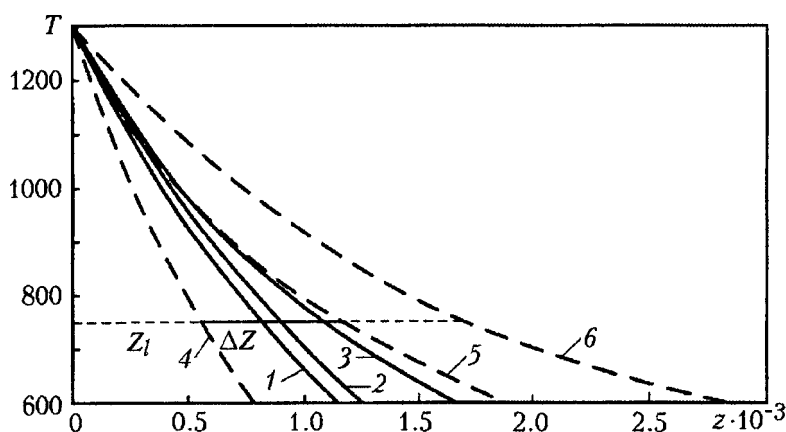


Рис. 1. Распределение температуры по толщине однослойного материала для различных параметров импульса: 1, 2, 3 —  $Q = 2 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>; 4, 5, 6 —  $3 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>; 1, 4 — непрерывный режим воздействия; 1 —  $\tau_h = 0.279$  с; 4 — 0.111; 2, 3, 5, 6 — импульсный режим воздействия; 2 —  $\tau_h = 0.05$  с,  $\tau_c = 0.01$  с; 3 — 0.05 и 0.05; 5 — 0.01 и 0.02; 6 — 0.01 и 0.03.  $T$ , °C;  $z$ , м

скорость охлаждения может оказаться ниже критической величины, при которой может быть реализовано упрочнение данного материала. Следовательно, такой режим термообработки (при малых  $Q$  и  $\tau_c \gg \tau_h$ ) не представляет технологического интереса.

Таким образом, существует некоторый оптимальный диапазон соотношений  $\tau_h$  и  $\tau_c$  для каждого значения плотности мощности, при котором можно достичь значительного увеличения толщины термообработанного слоя без существенного перегрева всего изделия и при приемлемом увеличении общего энергозатрата (рис. 2, кривые 3, 5).

На рис. 3 приведены зависимости градиента температуры и толщины термообработанного слоя от безразмерного параметра, соответствующего удельному времени нагрева ( $\tau_h / (\tau_h + \tau_c)$ ). Как видно из рисунка, выбор соответствующих параметров импульсного режима воздействия позволяет уменьшить градиент температуры в слое при существенном увеличении толщины термообработанного слоя на  $\Delta Z$  (рис. 1). Очевидно, что и в этом случае с ростом числа импульсов общий энергозатрат также будет возрастать.

Из анализа рис. 3 следует также, что существует диапазон параметров  $\tau_h / (\tau_h + \tau_c)$ , для которых возможно удовлетворительное выполнение всех требований.

С технологической точки зрения представляет интерес анализ результатов термического воздействия на двухслойные материалы, особенно если теплопроводности этих материалов значительно различаются. На рис. 4 приведены фрагменты распределения температуры в слое с борсодержащим материалом на стальной подложке (толщина борсодержащего слоя 0.5 мм, стальной подложки 9.5 мм, радиус образца 10 мм, радиус

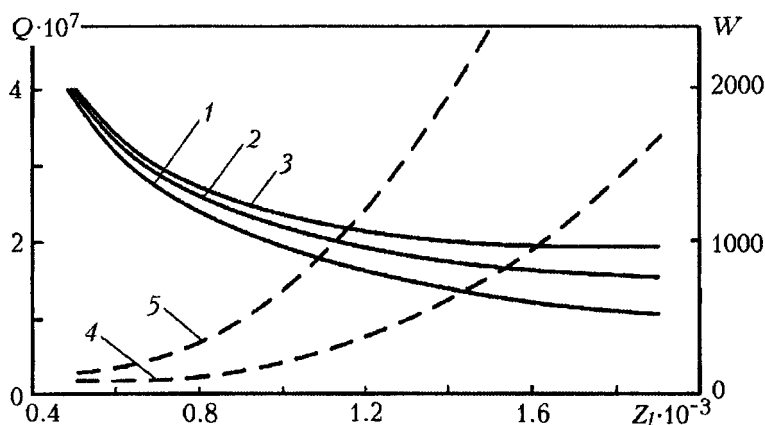


Рис. 2. Зависимость плотности мощности (1, 2, 3) и суммарного энергозатрата (4, 5) от толщины термически обработанного слоя: 1, 4 — стационарный режим воздействия; 2, 3, 5 — импульсный режим воздействия; 2 —  $\tau_h = 0.05$  с,  $\tau_c = 0.03$  с; 3, 5 — 0.05 и 0.1 с.  $Q$ , Вт/м<sup>2</sup>;  $Z_l$ , м

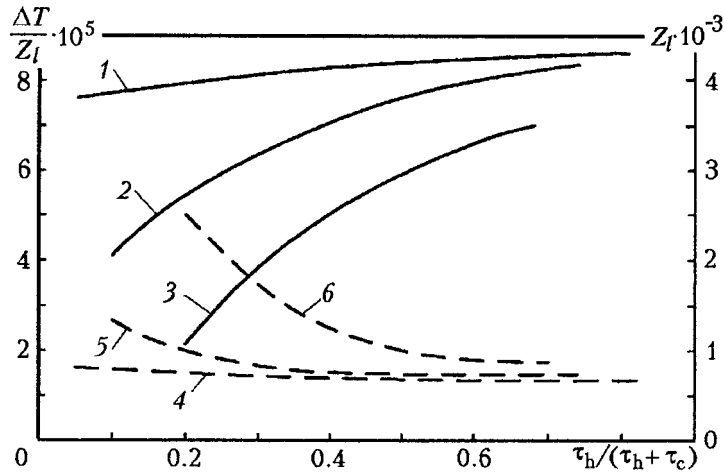


Рис. 3. Зависимости градиента температуры в термообработанном слое и толщины слоя от удельного времени нагрева ( $Q = 3 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>): 1, 2, 3 – градиент температуры в слое; 4, 5, 6 – толщина слоя; 1, 4 –  $\tau_h = 0.05$  с; 2, 5 – 0.03; 3, 6 – 0.01

электронного пучка 3 мм). Вследствие низкой теплопроводности борсодержащего покрытия обеспечить получение термообработанного слоя большой толщины затруднительно. Однако и в этом случае использование импульсного режима воздействия позволяет увеличить толщину слоя (рис. 4, кривые 4, 5) или уменьшить градиент температуры в слое (повысить однородность свойств по толщине).

В целом и в случае двухслойных материалов с различными теплофизическими параметрами проявляются указанные ранее закономерности. Поэтому для таких материалов можно также определить диапазон параметров электронно-лучевого воздействия, в котором достигается управление характеристиками термообработанного слоя.

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

### Выводы

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

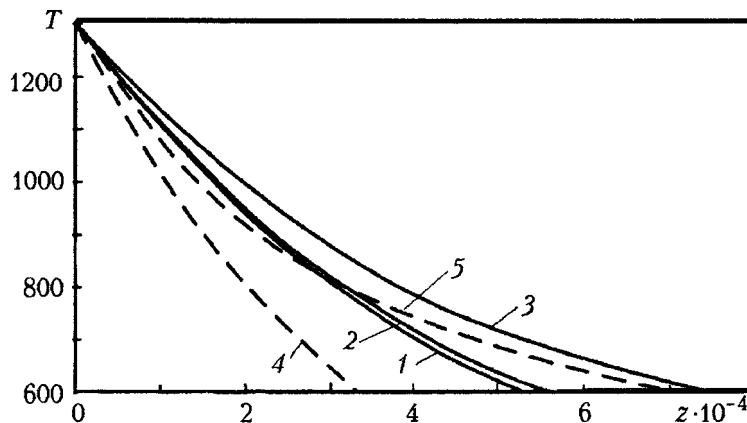


Рис. 4. Распределение температуры по толщине слоя борсодержащего материала на стальной подложке: 1, 4 – стационарный режим воздействия; 2, 3, 5 – импульсный режим воздействия; 1, 2, 3 –  $Q = 2 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>; 4, 5 –  $3 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>; 2 –  $\tau_h = 0.05$  с;  $\tau_c = 0.01$  с; 3 – 0.05 и 0.05; 5 – 0.01 и 0.02. T, °C; z, м

2. Поиск оптимального режима термической обработки возможен для каждого конкретного материала с учетом соответствующих температурных зависимостей теплофизических коэффициентов, наличия подложки, геометрических параметров изделия и т. д., что можно осуществить в рамках предложенной модели на основе разработанного программного обеспечения.

3. Результаты моделирования иллюстрируют расширение возможностей упрочняющих технологий при использовании импульсного термического электронно-лучевого воздействия.

### Обозначения

$C(T)$  — удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К);  $H$  — толщина обрабатываемого материала, м;  $H_1, H_2$  — толщины слоев, м;  $Q$  — плотность мощности электронного пучка, Вт/м<sup>2</sup>;  $q(r)$  — плотность мощности, Вт/м<sup>2</sup>;  $R$  — радиус обрабатываемого материала, м;  $r$  — радиальная координата, м;  $r_f$  — радиус пятна воздействия, м;  $T$  — температура материала, °С;  $T_0$  — начальное значение температуры материала, °С;  $T_i(r, z, 0)$  — начальное распределение температуры в материале для  $i$ -го цикла термообработки;  $T_{i-1}(r, z, \tau_h + \tau_c)$  — распределение температуры в материале, установившееся в результате  $i-1$ -го цикла термообработки;  $t$  — время воздействия, с;  $W$  — суммарный энерговклад, Дж;  $z$  — координата, изменяющаяся по толщине материала, м;  $\Delta Z$  — приращение толщины термообработанного слоя при импульсном воздействии в сравнении с непрерывным режимом при той же плотности мощности, м;  $Z_l$  — толщина термически обработанного слоя, м;  $\lambda(T)$  — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $\lambda_1(T)$  — коэффициент теплопроводности первого слоя;  $\lambda_2(T)$  — коэффициент теплопроводности второго слоя;  $\tau_c$  — межимпульсный интервал, с;  $\tau_h$  — время нагрева материала в течение одного импульса воздействия, с. Индексы: 0 — начальное значение; 1, 2 — номер слоя термообрабатываемого материала; с — охлаждение; f — пятно воздействия; h — нагрев; i — порядковый номер цикла термообработки.

### Литература

1. Шинко А. А., Поболь И. Л., Урбан И. Г. Упрочнение сталей и сплавов с использованием электронно-лучевого нагрева. Минск: Наука і тэхніка, 1995.
2. Рыкалин Н. Н. Лазерная обработка материалов. М.: Машиностроение, 1975.
3. Рыкалин Н. Н. Основы электронно-лучевой обработки материалов. М.: Машиностроение, 1978.
4. Груздев В. А., Залесский В. Г., Антонович Д. А., Голубев Ю. П. Плазменный источник электронов с пучком большого сечения // ИФЖ. 2002. Т. 75, № 3. С. 166–170.
5. Антонович Д. А., Голубев Ю. П., Залесский В. Г., Маник А. Г. Плазменный электронно-ионный источник для термической модификации поверхностей материалов // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: Сб. науч. тр./Под ред. С. А. Астапчика, П. А. Витязя. Минск: Технопринт; Новополоцк: ПГУ, 2001. С. 369–372.
6. Залесский В. Г., Снарский А. С., Сороговец В. И. Особенности электронно-лучевого воздействия на бор-содержащие износостойкие наплавленные покрытия // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: Сб. науч. тр./Под ред. С. А. Астапчика, П. А. Витязя. Минск: Технопринт; Новополоцк: ПГУ, 2001. С. 378–381.
7. Глытенко А. Л., Любов Б. Я. Импульсно-периодический нагрев металлов // ИФЖ. 1987. Т. 53, № 4. С. 642–648.
8. Назаренко О. К., Кайдалов А. А., Ковбасенко С. Н. и др. Электронно-лучевая сварка / Под ред. Б. Е. Патона. Киев: Наукова думка, 1987.
9. Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М. и др. Физические величины: Справочник / Под ред. И. С. Григорьевой, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.