

Т.В. Михайловская, В.А. Тутык, А.И. Михалев  
**РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
ОБРАБОТКИ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ  
МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЛЕТОЧНО-АВТОМАТНОЙ  
МОДЕЛИ**

*Аннотация. Рассмотрены параметры клеточно-автоматной модели предназначенной для определения скорости затвердевания расплава в зоне работы электронной газоразрядной пушки работающей в импульсном режиме.*

*Ключевые слова. Электронная газоразрядная пушка, клеточные автоматы, импульсный режим работы, скорость затвердевания, режим работы, скорость сканирования поверхности.*

**Введение.**

В силу того, что электронно-лучевая обработка представляет собой перспективное направление упрочнения деталей машин и инструментов, применение которого часто позволяет заменить дорогостоящие легированные стали дешевыми конструкционными [1], актуальность приобретают вопросы расчета технологических параметров данной технологии.

**Анализ предыдущих публикаций и постановка задачи.**

Как известно кинетическая энергия электронного пучка может быть введена в приповерхностную область материалов посредством ее превращения в тепло, что, в свою очередь, может привести к изменению химического состава или структуры материала в зоне сканирования электронным пучком [2].

Такие свойства металлов, как прочность и твердость, наряду с химическим составом и однородностью материала, определяются его кристаллической структурой и размерами зерен. Эти свойства тесно связаны с особенностями способа получения материала и, в первую очередь, с условиями затвердевания, а также со способами его дальнейшей обработки [3].

Напряжения, действующие в изготовленной детали при ее эксплуатации, как правило, распределены так, что предъявляют повы-

© Михайловская Т.В., Тутык В.А., Михалев А.И., 2009

шенные требования к механическим свойствам именно поверхностных слоев детали. Во многих из таких случаев, локальные переплав или закалка участков детали с помощью электронных пучков позволяют получить значительное локальное улучшение свойств материала и тем самым повысить эксплуатационные показатели детали в целом.

При обработке с расплавлением материал в области, ограниченной воздействием электронного пучка, кратковременно нагревается до температуры выше точки плавления. Последующее охлаждение за счет отдачи тепла теплопроводностью в соседние, оставшиеся холодными области, влечет за собой чрезвычайно высокие скорости затвердевания. Что обеспечивает образование структуры в значительной степени отличной от той, которая получается при нормальном ходе процесса затвердевания: существенно расширяются границы растворимости для твердых растворов, морфология интерметаллических соединений может измениться таким образом, что первоначально хрупкие материалы становятся пластичными. Кроме того, достигается значительное измельчение структуры и разрушение сегрегации [4].

В настоящее время в технике и научных исследованиях важное значение приобретают вопросы расчета и моделирования [5], что, безусловно, касается не только численного моделирования потенциальных полей в электронных газоразрядных пушках и расчета на его основе конструкции электронных газоразрядных пушек [6] а, и расчета технологических параметров обработки электронным пучком поверхности металлических материалов.

Целью работы является расчет параметров технологии сканирования поверхности подложки электронным пучком с учетом ее нагрева и проплавления при наличии фазового перехода с использованием клеточно-автоматной модели.

Результаты исследований. Для расчета технологических параметров сканирования поверхности подложки электронным пучком использовалась математическая модель тепловой обработки поверхности, построенная на основании разработанной клеточно-автоматной модели затвердевания с учетом фазового перехода [7].

Схематическое изображение процесса сканирования поверхности пучком электронов представлено на рис. 1. Электронный пучок движется вдоль направления сканирования, при этом в зоне действия пучка происходит бомбардировка поверхности электронами. Темпера-

тура бомбардируемой поверхности повышается, и в зависимости от мощности происходит либо модификация поверхности переплавом, либо облагораживающая закалка [4].

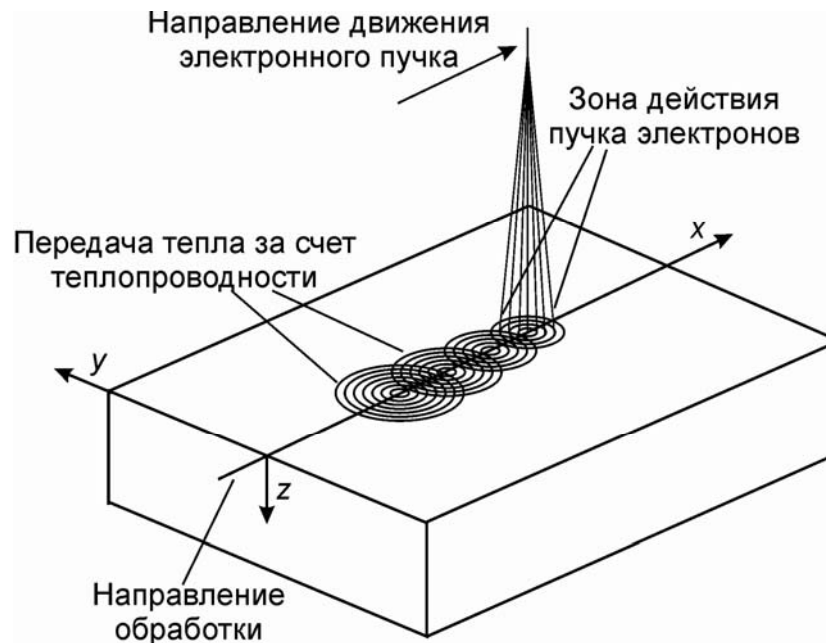


Рис. 1. Сканирование поверхности электронным пучком

Рассматриваемая электронная газоразрядная пушка характеризуется следующими параметрами: ускоряющее напряжение –  $40 \text{ кВ}$ ; импульсный режим работы; удельная мощность –  $10^8 \text{ Вт/м}^2$ ; длительность импульса –  $\tau_u = 10 \text{ мкс}$ , частота следования импульсов –  $100 \text{ Гц}$ ; скорость сканирования электронного пучка лежит в диапазоне  $10^{-2} \dots 10^{-1} \text{ м/с}$ . В электронной газоразрядной пушке используются магнитная фокусирующая и отклоняющая системы. В качестве рабочего газа поддуваемого в пушку используется инертный газ гелий.

При моделировании модификации поверхности использовались следующие параметры электронной пушки и пучка электронов: электронная газоразрядная пушка работает при ускоряющем напряжении  $40 \text{ кВ}$  в импульсном режиме. Удельная мощность составляет  $10^8 \text{ Вт/м}^2$ , длительность импульса  $\tau_u = 10 \text{ мкс}$ , частота следования импульсов  $100 \text{ Гц}$ . Скорость сканирования электронного пучка  $2 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$ . Диаметр пучка  $1 \text{ мм}$ . Образец выполнен из конструкционной стали 20.

При программной реализации модификации поверхности проведен расчет для трехмерной модели. В силу симметричности решения относительно направления сканирования пучка, расчет выполнялся для половины образца с учетом граничного условия осевой симметрии (тепловой поток равен нулю).

Параметры образца моделирования:

– геометрические размеры: длина 4 мм; ширина 4 мм за счет осевой симметрии 2 мм; высота 0.5 мм.

– теплофизические параметры конструкционной стали 20 приведены в таблице. Для описания фазового перехода использовались соответствующие правила для клеточных автоматов [8].

Таблица

Теплофизические параметры конструкционной стали 20

Теплофизический параметр	Солидус	Ликвидус
Плотность, $кг/м^3$	7500	7000
Удельная теплоемкость, $Дж/кг К$	750	920
Коэффициент теплопроводности, $Вт/м К$	47	47
Температурный интервал фазового перехода $T_s = 1390^{\circ}C$ , $T_l = 1505^{\circ}C$ , скрытая теплота фазового перехода $L = 250 кДж/кг$ .		

– граничные условия: на оси симметрии и боковых поверхностях тепловой поток равен нулю  $\partial T/\partial n = 0 Вт/м^2$ , на верхней поверхности задано граничное условие конвективного теплообмена: коэффициент теплообмена –  $\alpha = 150 Вт/(м^2 К)$ , температура окружающей среды –  $T_{out} = 50^{\circ}C$ .

– начальная температура объекта сканирования  $T = 50^{\circ}C$ .

Параметры клеточно-автоматной модели:

– шаг по  $x$  и  $y$  выбран 0,2 мм, из соображения наглядности визуализации результатов. Шаг по  $z$  принят  $10^{-5}$  м исходя из физических предпосылок, поскольку глубина проплавления при сканировании поверхности электронным пучком составляет  $10^{-6}$  м.

– Количество клеток по оси  $x$  – 20, по оси  $y$  – 10, вдоль оси  $z$  – 500.

– Расчетное время 0,1 с, шаг по времени  $5 \cdot 10^{-8}$  с определен из критерия устойчивости клеточно-автоматного алгоритма для термодинамической модели.

– За расчетное время электронная пушка делает 9 выстрелов, длительность импульса одного выстрела составляет 300 расчетных интервалов, период между выстрелами 200 000 итераций по времени. На рисунке 2 приведена визуализация процесса обработки поверхности с использованием электронной газоразрядной пушки. Рис. 2 (а) представляет собой температурное поле (в градусах Кельвина) на поверхности образца после 9 выстрелов электронной пушки, представленное в виде цветовой карты, на которой черному цвету соответствует температура 323K ( $50^\circ\text{C}$ ), белому 2100K ( $1827^\circ\text{C}$ ). Рис. 2 (b) температурное поле образца вдоль оси сканирования представленное в виде цветовой карты. На рис. 2 (c) представлено распределение температуры на поверхности образца вдоль оси сканирования, после каждого выстрела. График зависимости глубины проплавления от времени работы пучка приведен на рис. 2 (d), глубина проплавления определялась в центре действия пучка и составляет  $2 \cdot 10^{-6}$  м.

Скорость затвердевания сплава в зоне модификации поверхности сканирующим электронным пучком составляет 4000 K/c и соответствует формированию в расплавленном слое мелкозернистой структуры, отличной от той, которая формируется при нормальном ходе процесса затвердевания и характеризуется повышенными прочностными характеристиками [1].

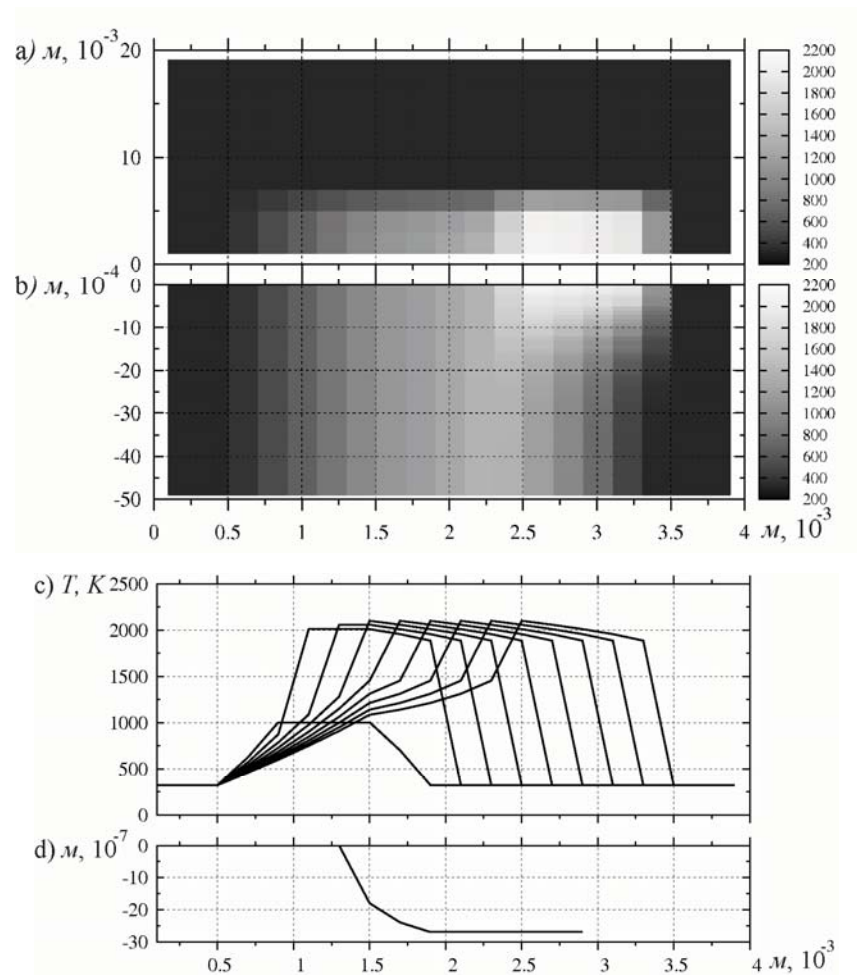


Рис. 2. Визуализация процесса модификации поверхности с использованием электронной газоразрядной пушки:

- а) температурное поле зоны обработки (вид сверху);
- б) температурное поле зоны обработки (вдоль движения пучка);
- в) распределение температуры на поверхности образца после 1–9 выстрелов электронной пушки;
- г) глубина проплавления металлической поверхности

### Выводы

1. Реализована компьютерная модель обработки поверхности электронным пучком с использованием математической модели затвердевания при наличии фазового перехода на основе клеточных автоматов.

2. Получены температурные поля зоны обработки поверхности при сканировании электронным пучком поверхности изделия из конструкционной стали 20. На основании температурных полей опреде-

лена глубина проплавления поверхности, которая равна  $2 \cdot 10^{-6}$  м, что соответствует экспериментальным данным.

3. На основании температурных полей, полученных в ходе моделирования, определена скорость затвердевания поверхности, которая для данного эксперимента составляет  $4000 \text{ K/s}$ . Это и обеспечивает формирование мелкозернистой структуры с повышенными прочностными характеристиками.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мирошниченко И.С. Закалка из жидкого состояния / И.С. Мирошниченко. – М.: Металлургия, 1982. – 168 с.
2. Молоковский С.И., Сушков А.Д. Интенсивные электронные и ионные пучки. – Л.: Энергия, 1972. – 272 с.
3. Лейкин А.Е., Родин Б.И. Материаловедение. – М. «Высшая школа», 1971. – 416 с.
4. Вайнгард У. Введение в физику кристаллизации металла. – М.: Мир, 1967. – 172 с.
5. Приходько Э.В., Тогобицкая Д.Н. Роль информационных технологий в повышении качества металлопродукции // Современные проблемы металлургии. – 2001. – Том 3. – С. 450 – 462.
6. Тутык В.А., Михайловская Т.В. Моделирование потенциальных полей в электронных пушках // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных трудов. – 2004. – Выпуск 1 (30). – С. 62 – 70.
7. Михайловская Т.В., Михалев А.И. Трехмерная клеточно-автоматная модель процесса затвердевания металлов и сплавов // Сучасні проблеми металургії. Наукові праці. 2006. – Том 9. – С. 102 – 112.
8. Михайловская Т.В. Применение клеточных автоматов для математического моделирования фазового перехода в эвтектических сплавах // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных трудов. 2007. – Выпуск 5 (53). – С. 162 – 170.