

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ
ОБРАБОТКИ СТАЛИ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ
ИЗНОСОСТОЙКОСТИ**

М. П. Бугаец, В. А. Тутык, Е. И. Литвиненко

Национальная металлургическая академия Украины

1. Постановка проблемы и ее связь с важнейшими научными и техническими задачами

Последние 15-20 лет характеризуются интенсивным поиском путей повышения износостойкости машин и инструмента, работающих в различных отраслях народного хозяйства.

С целью повышения износостойкости деталей машин в практике нашли применение различные методы обработки поверхности металлов: индукционная обработка, термохимическая обработка, наплавка, нанесение покрытий, электронно-лучевая модификация, лазерная обработка, плазменная и др. Особенно благоприятно оказалось влияние высококонцентрированных источников энергии (ВИЭ) при модификации поверхностей стали. Однако влияние параметров модификации поверхности при нагреве на микроструктуру слоя с помощью высококонцентрированных источников энергии изучены недостаточно.

Электронно-лучевое модифицирование успешно конкурирует с другими методами благодаря следующим преимуществам:

- универсальности (можно обрабатывать практически любые материалы);
- экологической чистоте (процесс протекает в высоком вакууме, электронный луч не вносит загрязнений и не подвержен износу, контроль с его помощью, как правило, является неразрушающим);
- управляемости (можно легко регулировать энергию, фокусировку, модуляцию и отклонение электронных пучков, причем малая инерционность позволяет быстро перемещать луч с одного участка на другой и обеспечивать высокую скорость обработки и локальность воздействия)
- возможности проведения обработки в среде реакционных газов с целью получения насыщенного слоя.

Для успешного применения электронно-лучевой обработки с целью нагрева под закалку необходимо знание закономерностей воздействия электронного пучка на различные марки стали. Поэтому вопрос определения закономерностей электронной обработки и расчета параметров является актуальным.

2. Анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы, определение нерешенных частей общей проблемы

К методам модифицирования структуры поверхностных слоев относятся методы высокоэнергетического воздействия на поверхность стали, обеспечи-

вающие закалку тонких поверхностных слоев путем высокоскоростного нагрева и последующего быстрого охлаждения: лазерная, плазменная, электронно-лучевая закалка, закалка с использованием токов высокой частоты [1—3]. Общим для всех способов поверхностной закалки является сверхскоростной нагрев поверхностного слоя детали до температуры выше критической точки Ас3 с последующим быстрым охлаждением для получения мартенсита. Однако все эти методы имеют существенные отличия, достоинства и недостатки применительно к конкретным задачам, видам материалов, требований и условий эксплуатации. Методы воздействия высококонцентрированных потоков энергии на материалы интенсивно развиваются на протяжении последних 50 лет [4].

Как показывает анализ литературы, повышение твердости не всегда связано с повышением износостойкости стали [5]. При анализе износостойкости сталей выявилась особенность – одной механической характеристике соответствует несколько значений износостойкости. Поэтому ни одна из гостированных механических характеристик не является критерием оценки износостойкости [6]. Электронно-лучевое модифицирование влияет на изменение поверхностной энергии путем формирования особого микроструктурного состояния поверхности стали.

3. Постановка задачи

Установить закономерности изменения параметров электронно-лучевого нагрева и их влияние на формирования свойств поверхности рельсовой стали с использованием электронно-лучевого нагрева.

4. Изложение основного материала исследований и обоснование полученных научных результатов

Носителем энергии для нагрева поверхности стали при электронно-лучевой обработке является электронный луч. Для формирования потока

электронов используется газоразрядная электронная пушка высоковольтного тлеющего разряда типа ЭП ВТР-100, предназначенная для генерации и формирования технологического электронного пучка максимальной мощностью 100 кВт, ускоряющим напряжением 30 кВ, с диаметром пятна в фокусе пучка 12-15 мм [7].

При бомбардировке поверхности стали пучком электронов за время dt dF электрически изолированного тела пучок с плотностью тока j_F переносится электрический заряд

$$dq^* = j_F dF dt \quad (1)$$

Поскольку часть заряда, пропорциональная dq^* покидает зону действия пучка путем вторичной эмиссии и отражения электронов, в поверхностном слое остается заряд

$$dq = (1 - c_e) j_F dF dt \quad (2)$$

Здесь коэффициент c_e отражает влияние всех ремиссионных эффектов и зависит от рода обрабатываемого материала, от качества его поверхности, от угла между осью пучка и нормалью к поверхности и от уже имевшейся степени заряженности обрабатываемого материала. Коэффициент c_e может принимать значения от 0 до 10.

Из практики электронно-лучевой обработки [4] для стали c_p равен около 0,25, тогда

$$dq = 0.75 j_e dF dt \quad (3)$$

Объем материала, в котором происходит преобразование энергии электронного пучка

$$V = \frac{d_F^2}{4} \pi S \quad (4)$$

где d_F - диаметр фокусного пятна или диаметр пучка в зоне его действия, S - глубина проникновения электронного пучка в материал.

Удельная поверхностная мощность распределена в его поперечном сечении по Гауссу – рисунок 1, [4]:

$$q_F^{(r)} = q_{F0} e^{-\frac{r^2}{d_F^2}} = U j_e e^{-\frac{r^2}{d_F^2}} \quad (5)$$

и пучок подводит к детали мощность

$$P = I \cdot U \quad (6)$$

Например, если ускоряющее напряжение $U=30$ кВ и ток $I=1$ А, мощность воздействия составит

$$P = I \cdot U = 30 \text{ кВт}$$

При диаметре фокусного пятна 2 мм удельная мощность составит

$$q = \frac{P}{S} = \frac{30000 \cdot 4}{\pi d_F^2} = 9,5 \cdot 10^9 \text{ Вт/м}^2$$

Преобразование энергии и нагрев металла ограничены приповерхностным слоем, толщина которого равна глубине проникновения электронов S . Для точного расчета применительно к конкретным условиям [4]:

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - \frac{\lambda}{\rho c} \Delta \right] T = \frac{q_A}{\rho c}, \quad \Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} \quad (7)$$

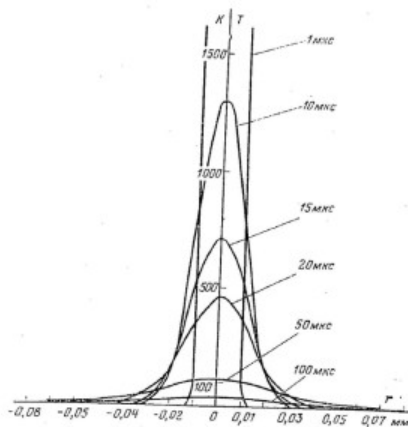


Рис. 2. Распределение температуры в бесконечно протяженной однородной среде в момент действия точечного источника подводимой энергии [4]

Для простоты расчетов источник электронов принимаем точечным и температурное поле в бесконечной однородной среде. Для этого случая решение уравнения (7) имеет вид:

$$T(r, t) = \frac{E_0}{\rho c \sqrt{4\pi a^2 t}} e^{-r^2/4at} \quad (8)$$

где r - расстояние от рассматриваемой точки до точечного источника, E_0 = единичная энергия. Таким образом, основными параметрами электронно-лучевой обработки стали при заданных теплоемкости, плотности и расстоянии от источника излучения до поверхности стали являются удельная мощность и длительность обработки. Расчет необходимой температуры нагрева позволил получить необходимые значения мощности и длительности нагрева рельсовой стали с 0,7% С.

Материал и методика исследования.

Материалом исследования являлись темплеты острьяковых рельсов (рис. 2), подвергнутые индукционной закалке. Темплеты были подвергнуты электронно-лучевому воздействию с мощностью до 6 кВт, продолжительностью 2,5 мин.



Рис. 2. Внешний вид темплета рельса

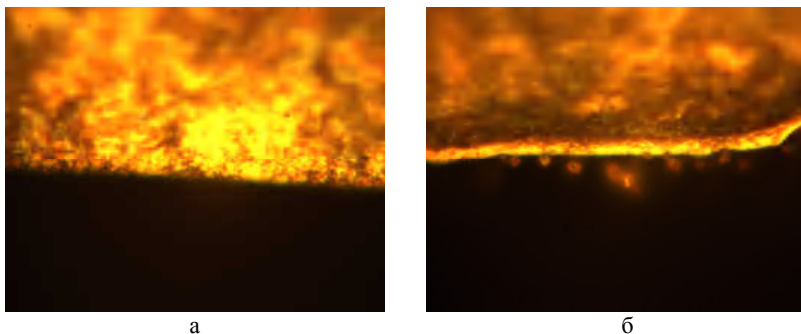


Рис. 3. Микроструктура поверхности рельса а- после индукционной обработки, б – после электронно-лучевого модифицирования, ув.х800

Образец разрезали вдоль направления электронно-лучевой обработки. Плоские поверхности образцов подвергали механическому шлифованию и последующему полированию и химическому травлению в растворе HNO_3 . При изучении макроструктуры на световом микроскопе Неофот -21 выявлен модифицированный слой толщиной 0,001 мм.

Исследования показали повышение износостойкости образца после электронно-лучевой обработки в 1,5-2 раза.

Выводы: исследование закономерностей электронно-лучевого модифицирования и расчет параметров нагрева позволили получить износостойкий модифицированный слой толщиной 0,001 мм, что показывает целесообразность сочетания индукционной и последующей электронно-лучевой обработки.

Использованная литература

1. Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А. Основы электронно-лучевой обработки материалов.- М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.
2. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 302 с.
3. Бабей Ю.И., Бутаков Б.И., Сысоев В.Г.. Поверхностное упрочнение металлов. — К. : Наукова думка, 1995. — 253с с.
4. Шиллер З.Гайзиг У., Панцер З. Электронно-лучевая технология. М.: Энергия.-1985. 528 с.
5. Лазаренко В.К., Прейс Г.А. Износостойкость металлов. М-К.: Машгиз, 1960. – 219 с.
6. Сорокин Г.М. Трибология сталей и сплавов. М.: Недра, 2000. – 317 с.
7. Тутьк В.А. Газоразрядная электронная пушка для низковакуумных электронно-лучевых технологических процессов обработки металлов. Теория и практика металлургии. – 2007, №2-3 (57-58). - С.138-143.