

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЗАКАЛКИ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ

А.А. Бармин¹, Р.Н. Ризаханов¹, Р.И. Рудштейн^{1,2}

¹ ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»;

² Московский государственный институт электроники и математики

E-mail: nanocentre@kerc.msk.ru

Из всех типов концентрированных потоков энергии (КПЭ) электронно-лучевой способ нагрева обеспечивает наиболее высокую производительность процесса термоупрочнения - до 12 м²/ч со скоростью нагрева до 10⁴ К/с [1]. Ускоренные электроны теряют свою энергию в глубине поверхностного слоя, вследствие чего твердость в глубине износостойкого слоя на 10-15 % выше, чем у поверхности. Благодаря высоким скоростям нагрева и охлаждения (более 1000 К/с) формируется мелкодисперсная структура мартенсита. Создание более высокой твердости в глубине приповерхностного слоя приводит к существенно большему уровню сжимающих внутренних напряжений, что является особенностью объемного характера энерговыделения. Вследствие этого на 30-35 % возрастает предел выносливости деталей с поверхностным слоем, упрочненным потоком электронов. Указанными причинами и обусловлен выбор именно электронно-лучевого метода обработки из всех возможных типов КПЭ.

Оптимизация режима термоупрочнения по существу может быть сведена к решению двух задач:

1) Определению максимально достижимой для конкретного сорта углеродистой стали на данном технологическом генераторе концентрированного электронного потока (ГКЭП) глубины закалки при условии варьирования в допустимых пределах параметров настройки рабочего цикла установки (Задача А);

2) Снижению до минимума времени технологического цикла (максимальному увеличению скорости обработки) для гарантированного достижения некоторой определенной эксплуатационными условиями глубины термической обработки (Задача Б).

Для решения поставленных задач была сформулирована нелинейная оптимизационная задача поиска минимума целевой функции.

При описании процесса закалки без оплавления поверхности используется определенный набор параметров. Это, во-первых, теплофизические величины: температура плавления T_{melt} , температура закалки T_{hard} , коэффициент теплопроводности λ , коэффициент температуропроводности a ; во-вторых, параметры электронно-лучевого технологического процесса: начальный радиус пучка r_0 , ток пучка I , энергия электронов пучка E_0 (или ускоряющее напряжение электронной пушки U), расстояние от выводного окна шлюзовой системы до образца H , линейная скорость перемещения образца v , а также температурное поле T и глубина закаленной зоны x_{hard} . Для каждой конкретной марки стали теплофизические величины известны. В качестве

оптимизационных параметров могут выступать $\mathbf{x} = (I, H, v, x_{hard})$. Начальный радиус пучка r_0 не включен в вектор параметров \mathbf{x} , поскольку в большей степени он задается характеристиками системы транспортировки и вывода потока электронов и варьированию не подлежит. Следует отметить, что обычно ускоряющее напряжение и ток пучка связаны функционально и данная зависимость определяется видом конкретного технологического ГКЭП.

Целевой функцией Задачи А является $f_a(\mathbf{x}) \equiv -x_{hard}$. Минус в приведенном выражении связан с необходимостью нахождения максимума целевой функции. Аналогично для Задачи Б имеем: $f_b(\mathbf{x}) \equiv -v$.

Область допустимого варьирования параметров естественным образом задана технологическими возможностями установки ГКЭП.

Выразим нелинейные ограничения в виде неравенств, справедливых для обеих задач. Максимальная глубина закалки без нарушения геометрии изделия получается в том случае, если при обработке одновременно удастся выполнить следующие условия:

1. Температура на поверхности металла может достигать до температуры плавления T_{melt} : $\max_{0 \leq t < \infty} T(\mathbf{x}, t) \leq T_{melt}$;

2. Закалка происходит во всей области, где температура материала выше температуры закалки T_{hard} (температуры фазового перехода с учетом сдвига критической точки) в течение временного интервала $\Delta\tau_{kin}$, определенного посредством кинетических уравнений [2] для данного материала:

$$\Delta t(T(x, t) \geq T_{hard}) \geq \Delta\tau_{kin}.$$

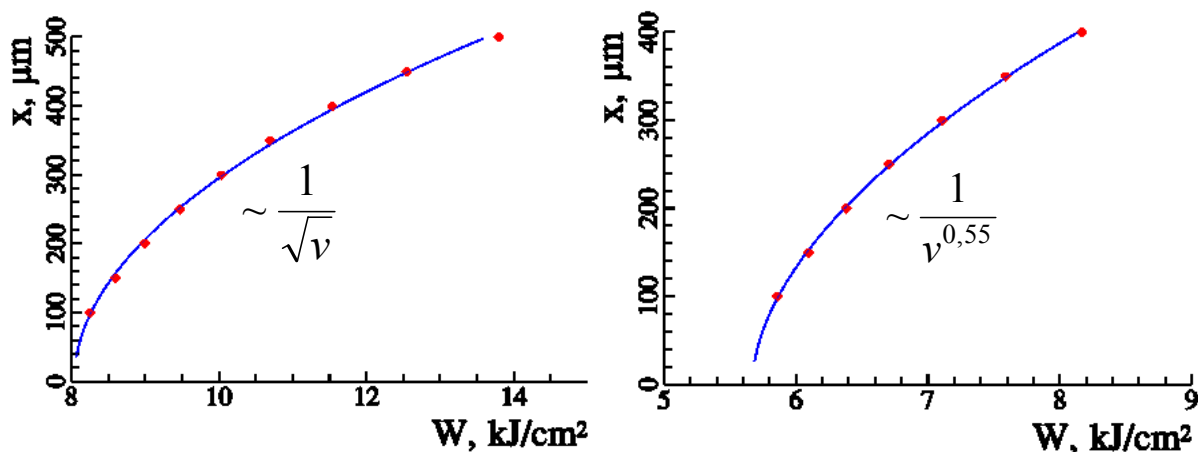


Рис.1 Зависимость минимально заданной глубины закалки от удельной поверхностной энергии $W = 2(1 - \eta)UI / (\sqrt{\pi}dv)$ (где η - коэффициент отражения электронов от поверхности образца, d - диаметр пучка) оптимального режима с максимальной скоростью для лазерного (слева) и электронно-лучевого (справа) источников.

В рамках работы разработана численная реализация описанной процедуры нелинейной оптимизации [3,4] режима закалки и проведены расчеты технологически заданной минимальной глубины закалки для эквивалентного источника тепла лазерного типа (рис. 1 слева) с температурным

полем [5]

$$T(M, t) - T_0 = \frac{2Q}{c\rho(4\pi a)^{3/2}} \int_0^t \frac{d\tau}{\sqrt{\tau(\tau+t_0)}} \times \exp\left\{-\frac{x^2}{4a\tau} - \frac{y^2}{4a(\tau+t_0)} - \frac{[z-z_0-v(t-\tau)]^2}{4a(\tau+t_0)}\right\}, t_0 = \frac{1}{4ak},$$

где Q – суммарная мощность; k – коэффициент сосредоточенности источника; c – удельная теплоемкость; ρ – плотность; $a = \lambda/c\rho$ – коэффициент температуропроводности; λ – коэффициент теплопроводности; $M \equiv M(x, y, z)$; и сравнимого по мощности эквивалентного источника тепла электронно-лучевого типа (рис. 1 справа) с температурным полем

$$T(M, t) - T_0 = \frac{A}{c\rho} \int_0^t \frac{d\tau}{(1+4a(t-\tau)/\beta)\sqrt{1+4a(t-\tau)/\alpha}} \left\{ \exp\left[-\frac{(x-x_{\max})^2}{\alpha+4\alpha(t-\tau)}\right] + \exp\left[-\frac{(x+x_{\max})^2}{\alpha+4\alpha(t-\tau)}\right] \right\} \times \exp\left\{-\frac{y^2+(z-z_0-v\tau)^2}{\beta+4a(t-\tau)}\right\},$$

где A , α и β – нормировочные константы, которые могут быть найдены посредством сопоставления аппроксимации теплового источника с расчетом, выполненным методом Монте-Карло; x_{\max} – глубина максимального энерговыведения.

Оказалось, что возможно получить аналитические выражения вида зависимости заданной глубины закалки от максимальной скорости обработки для лазерного ($\sim 1/\sqrt{v}$) (что согласуется с [6]) и электронно-пучкового ($\sim 1/v^\alpha$, $0,5 \leq \alpha \leq 1$, $E_0 < 0,4 \text{ МэВ}$) типов КПЭ.

С целью экспериментального изучения структуры и свойств материалов при оптимизации режимов электронно-пучковой обработки был создан прототип установки (рис. 2), включающий в себя: 1 – преобразователь; 2 – источник высокого напряжения; 3 – источник электронов (электронная пушка, ускоритель); 4 – устройство вывода; 5 – система сканирования пучком; 6 – система электропитания; 7 – вакуумная система; 8 – пульт управления; 9 – электронный пучок; 10 – обрабатываемое изделие; 11 – система охлаждения; 12 – система первичного электропитания.

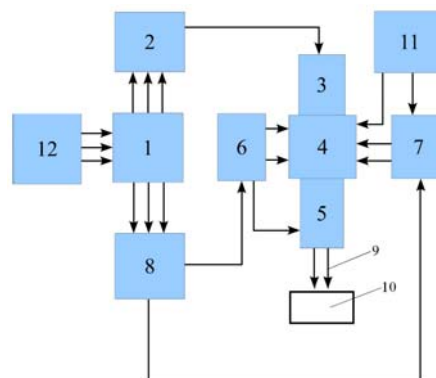
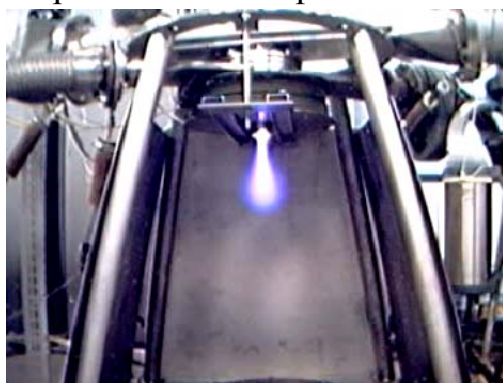


Рис. 2 Технологическая установка на основе ГКЭП: внешний вид (слева) и структурная схема (справа).

Созданная электронно-лучевая установка позволяет производить исследования упрочнения образцов КПЭ с варьированием большого числа параметров обработки, таких как: ток пучка, энергия электронов, относительная

скорость перемещения образца, расстояние между выходным сечением устройства вывода и обрабатываемым образцом.

Одним из основных требований при электронно-пучковой закалке является

равномерность глубины закаленной зоны и отсутствие дефектов на поверхности. Чтобы достичь таких результатов, необходимо использовать однородный приповерхностный источник тепла. Однако реальный электронный пучок, выведенный в атмосферу, такого равномерного нагрева обеспечить не может. Необходимы устройства, преобразующие структуру электронного пучка в однородное распределение. Ими могут являться магнитно-механические сканирующие системы, не изменяющие фазовый состав пучка, но многократно перемещающие его по зоне нагрева с высокой частотой (около 70 Гц) и создающие за время термического цикла закалки в среднем равномерный тепловой источник. В этом случае в тепловой задаче о закалке необходимо учитывать не только пространственную, но и временную структуру теплового источника.

В рамках работы была реализована схема воздействия, при которой с помощью ГКЭП в воздушной атмосфере генерировался электронный пучок, ориентированный вертикально вниз, а обработка образца стали М76В проводилась за один проход сканирования с образованием одной полосы упрочнения.

На рис. 3 приведены снимки границы раздела упрочненного и исходного участков поверхности образца рельсовой стали (слева), а также следы индентирования алмазной пирамидкой этих участков поверхности (справа). Начальная микротвердость составляла около 200-260 НV. После обработки она повысилась в среднем в 2,5-3 раза.

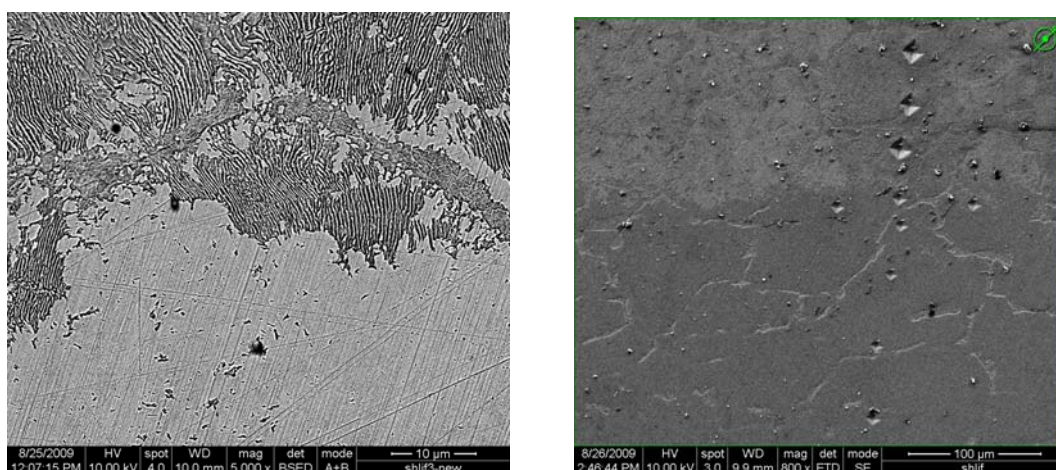


Рис. 3. Граница раздела упрочненного и исходного участков поверхности образца рельсовой стали (слева), следы алмазной пирамидки на упрочненном и исходном участках поверхности (справа).

Полученные экспериментальные данные (соответствующие мощности потока 10 кВт диаметром 3 мм и расстоянию до образца 60 мм) о зависимости глубины упрочненного слоя от удельной поверхностной энергии [7] подтверждают расчетные. Как видно из рис. 4, данная зависимость носит

обратно степенной характер ($\sim 1/\nu^\alpha$, $0,5 \leq \alpha \leq 1$). Это позволяет, зная параметры обработки, прогнозировать свойства упрочненного слоя, не проводя дополнительных исследований.

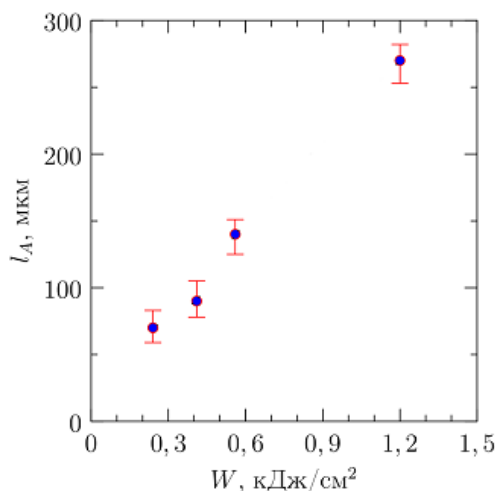


Рис. 4. Зависимость глубины закаленного слоя от удельной энергии электронного потока. Кружки — расчетные точки, интервалы — диапазоны экспериментальных данных.

1. П.И.Остроменский, В.А.Аксенов, Б.В.Коротаев и др. Перспективы применения высокоэнергетических технологий для повышения боковой износостойкости рельсов // Актуальные проблемы транспорта азиатской части России, Под ред. К.Л. Комарова, М.Х. Ахметзянова. Новосибирск: Издательство СГУПС, 2001. С. 92-98.
2. В.Г.Щукин, В.В. Марусин Моделирование энергопоглощения в стали при обработке мощными высокочастотными импульсами различной частоты // Прикладная механика и техническая физика. 2004. Т.45. №6. С. 154-168.
3. Т.Р.Runarsson, X.Yao Search biases in constrained evolutionary optimization//IEEE Trans. On Systems, Man, and Cybernetics Part C. 2005. Vol. 35, no. 2. P. 233-243.
4. M. J. D.Powell Direct search algorithms for optimization calculations // Acta Numerica. 1998. No. 7. 287-336.
5. В.С.Майоров Лазерное упрочнение металлов// лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок, Под ред. В.Я. Панченко. М: ФИЗМАТЛИТ, 2009, 664 с. ISBN: 978-9221-1023-5.
6. А.Г.Григорьянц, А.Н.Сафонов Методы поверхностной лазерной обработки: в 7 книгах. М.: Высшая школа, 1987. Т.3. 191 с.
7. И.М.Полетика, М.Г.Голковский, М.Б.Перовская Электронно-лучевая закалка поверхностного слоя стали вне вакуума // Физическая мезомеханика. 2006. №9. С. 181-184.