

УДК 621.785.54

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ В ПОВЕРХНОСТНЫХ
СЛОЯХ УГЛЕРОДИСТОЙ ПОСЛЕ КОМБИНИРОВАННОЙ
ОБРАБОТКИ****DISTRIBUTION OF MICROHARDNESS IN CARBON SURFACE
LAYERS AFTER COMBINED TREATMENT**

А.В. Ионина, к.т.н., доцент кафедры ИТиЭД,
Филиал Федерального Государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Кузбасский государственный
технический университет имени Т.Ф. Горбачева»
в г. Новокузнецке, г. Новокузнецк

Аннотация. В статье исследуется комбинированная обработка углеродистой стали 45, сочетающая электровзрывное легирование (ЭВЛ) и электронно-пучковую обработку. ЭВЛ позволяет создать градиентную нанокompозитную структуру с глубиной модифицированного слоя до 20–40 мкм. Последующая электронно-пучковая обработка устраняет дефекты и перераспределяет легирующие элементы, что приводит к увеличению глубины зоны упрочнения до 55–60 мкм. Установлено, что энергия и количество импульсов влияют на микротвердость поверхности, достигая максимальных значений до 1200 HV. Этот метод демонстрирует потенциал для повышения износостойкости и адаптации свойств поверхностных слоев под конкретные условия эксплуатации.

Ключевые слова: электровзрывное легирование, электронно-пучковая обработка, углеродистая сталь, микротвёрдость, легирование, поверхностная модификация.

Annotation. The article examines the combined treatment of carbon steel 45, combining electro-explosive alloying (EVL) and electron beam processing. EVL allows you to create a gradient nanocomposite structure with a modified layer depth of up to 20-40 microns. Subsequent electron beam treatment eliminates defects and redistributes alloying elements, which leads to an increase in the depth of the hardening zone to 55-60 microns. It is established that the energy and the number of pulses affect the microhardness of the surface, reaching maximum values up to 1200 HV. This method demonstrates the potential for increasing the wear resistance and adapting the properties of the surface layers to specific operating conditions.

Keywords: electro-explosive alloying, electron beam processing, carbon steel, microhardness, alloying, surface modification.

При поверхностном легировании основы с помощью концентрированных потоков энергии происходит одновременное плавление материала и насыщение его легирующими элементами. Однако более глубокие слои, находящиеся в жидком состоянии меньше времени, чем верхние, получают меньшую степень легирования. Эта особенность позволяет согласовать свойства модифицированных слоев с основой и вызывает интерес к разработке новых методов их формирования. Одним из таких методов является электровзрывное легирование (ЭВЛ), которое включает импульсное оплавление поверхностных слоев с помощью плазменной струи, образованной из продуктов электрического взрыва проводников (рис.1, а). В результате формируется градиентная нанокompозитная структура с улучшенными свойствами, площадью упрочнения до $1\text{--}10\text{ см}^2$ и глубиной $20\text{--}40\text{ мкм}$. Высокая степень легирования тонких слоев позволяет проводить комбинированную обработку, включающую ЭВЛ и дополнительное воздействие, например, электронно-пучковую обработку, которая изменяет структурное состояние зоны легирования [1, 2].

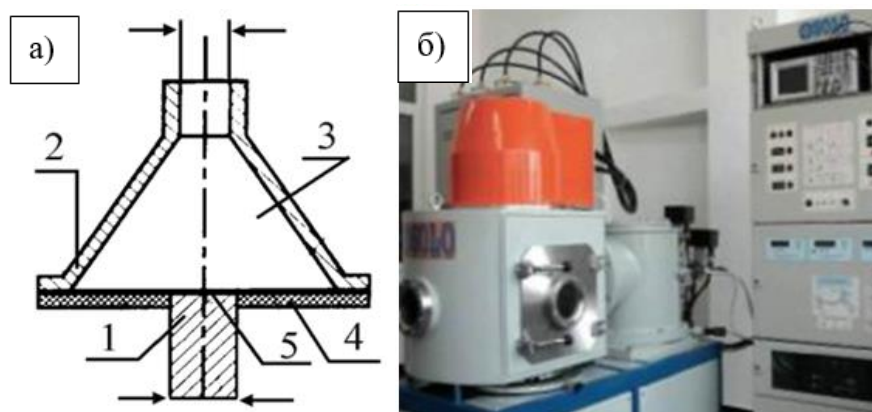


Рисунок 1. (а) – схема импульсного плазменного ускорителя:
1 – внутренний электрод; 2 – внешний электрод; 3 – компрессионная камера; 4 –
изолирующая подставка; 5 – взрываемый проводник и
(б) вакуумная импульсная электронно-пучковая установка «СОЛО»

Образцы углеродистой стали 45, находящиеся в отожженном состоянии с феррито-перлитной структурой, подвергались различным видам электровзрывного легирования: алитированию, бороалитированию, алитированию с армированием зоны легирования порошковыми частицами ультрадисперсного карбида кремния, а также меднения. Электровзрывная обработка проводилась с помощью импульсов длительностью 100 мкс при поглощаемой плотности мощности $4,5\text{ ГВт/м}^2$. Это позволяло эффективно насытить поверхностные слои легирующими элементами и сформировать зону легирования глубиной 15 мкм , ниже которой находилась зона термического влияния толщиной $7\text{--}8\text{ мкм}$, представленная осветленным перлитом.

Последующую электронно-пучковую обработку проводили на специальной установке «SOLO» (рис 1, б), разработанной в ИСЭ СО РАН (г. Томск). Плотность энергии импульсов составляла 20 Дж/см², а количество импульсов длительностью 50 мкс варьировалось от 10 до 200. Этот режим обработки обеспечивал переплавление исходной модифицированной поверхности на глубину до 5–7 мкм, что способствовало интенсивным диффузионным процессам и изменению структуры зоны легирования.

После дополнительной электронно-пучковой обработки наблюдалось увеличение глубины модифицированной зоны, а четкая граница между зоной легирования и основой становилась менее выраженной. По глубине образцов выявлялся ряд слоев толщиной около 10–15 мкм, что указывало на активные диффузионные процессы в зоне воздействия. С увеличением количества импульсов электронно-пучковой обработки микротвердость поверхности снижалась, а глубина зоны повышенной микротвердости увеличивалась, достигая 55–60 мкм. Микротвердость непосредственно на поверхности была несколько ниже, чем в глубине. Например, при обработке десятью импульсами пик микротвердости (875 HV) наблюдался на глубине около 30 мкм, а после пятидесяти импульсов – на глубине около 10 мкм (рис. 2). Таким образом, комбинированная обработка, включающая электровзрывное легирование и последующую электронно-пучковую обработку, позволяет не только повысить микротвердость поверхностных слоев, но и оптимизировать их структуру и свойства, что делает этот метод перспективным для повышения износостойкости и адаптации материалов под конкретные условия эксплуатации.

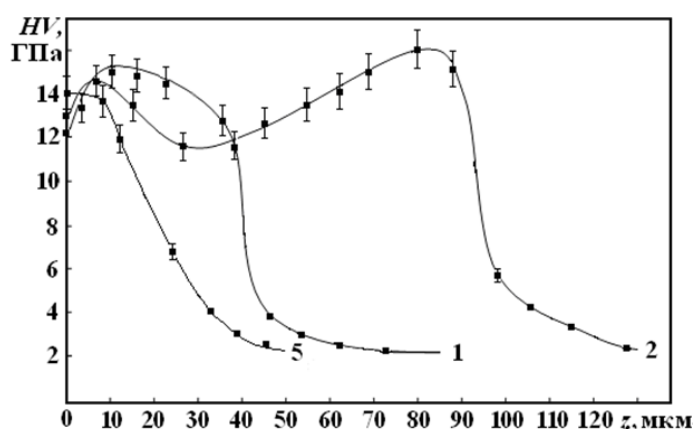


Рисунок 2. Распределение микротвёрдости по глубине зоны электровзрывного бороалитирования и последующей ЭПО стали 45: 1 – режим 1 ЭПО; 2 – режим 2 ЭПО; 3 – электровзрывное бороалитирование без ЭПО

В заключении можно отметить, что в статье исследуется комбинированная обработка углеродистой стали 45, включающая

электровзрывное легирование (ЭВЛ) и последующую электронно-пучковую обработку (ЭПО). ЭВЛ позволяет сформировать градиентную нанокompозитную структуру с улучшенными свойствами, площадью упрочнения до 1–10 см² и глубиной 20–40 мкм. Последующая ЭПО обеспечивает переплавление модифицированной поверхности, способствуя диффузионным процессам и изменению структуры зоны легирования. Обработка проводилась с использованием различных легирующих элементов. Результаты показали увеличение глубины модифицированной зоны и снижение четкости границы между зоной легирования и основой. Микротвердость поверхности снижалась с увеличением количества импульсов ЭПО, а глубина зоны повышенной микротвердости увеличивалась до 55–60 мкм. Таким образом, комбинированная обработка является перспективным методом для повышения износостойкости и адаптации материалов под конкретные условия эксплуатации. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию параметров обработки и применение этого метода для других материалов.

Список используемой литературы

1. Влияние электронно-пучковой обработки на микротвердость зоны электровзрывного меднения стали 45 / А. В. Вострецова, Е. С. Ващук, С. В. Карпий [и др.] // Физика прочности и пластичности материалов: Сборник тезисов, Самара, 23–25 июня 2009 года. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2009. – С. 131.
2. Повышение микротвердости углеродистой стали при различных видах одно- и двухкомпонентного электровзрывного легирования / А. В. Вострецова, С. В. Карпий, Е. А. Будовских, В. Е. Громов // Металлургия: новые технологии, управление, инновации и качество: Труды Всероссийской научно-практической конференции, Новокузнецк, 07–10 октября 2008 года / Под редакцией Е.В. Протопопова. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2008. – С. 218-220.
3. Микротвердость поверхности и структура конструкционной стали после обработки концентрированным плазменным потоком и импульсным электронным пучком / Е. С. Ващук, Д. А. Романов, А. В. Ионина, К. В. Аксенова // Фундаментальное и прикладное материаловедение: Труды XX Международной научной школы-конференции, Барнаул, 17 октября 2023 года. – Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2023. – С. 62-71.