

УДК 53:669.017

Структурно-фазовые состояния и свойства поверхности стали 45 после электровзрывного боромеднения и электронно-пучковой обработки

Е.С. Ващук¹, Е.А. Будовских², Л.П. Бащенко², В.Е. Громов², К.В. Аксенова²

¹Филиал Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева (Прокопьевск, Россия)

²Сибирский государственный индустриальный университет (Новокузнецк, Россия)

Structural Phase States and Surface Properties of Steel 45 after Electroexplosive Borocoppering and Electron-Beam Treatment

E.S. Vashchuk¹, E.A. Budovskikh², L.P. Bashchenko², V.E. Gromov², K.V. Aksenova²

¹Branch of the T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (Prokopyevsk, Russia)

²Siberian State University of Industry (Novokuznetsk, Russia)

Работа посвящена повышению микротвердости и износостойкости стали 45 в отожженном состоянии путем комбинированной обработки, включающей электровзрывное боромеднение и последующую электронно-пучковую обработку. Установлено увеличение шероховатости поверхности зоны электровзрывной обработки с ростом поглощаемой плотности мощности и массы порошка бора. Электронно-пучковая обработка приводит к уменьшению шероховатости и появлению на поверхности кратеров вместо следов радиального течения расплава. Строение зоны электровзрывного легирования по глубине включает в себя покрытие, приповерхностный, промежуточный и приграничный слой. Ее общая толщина достигает 25 мкм. Микротвердость поверхности и глубина зоны упрочнения после электровзрывного легирования увеличиваются с ростом поглощаемой плотности мощности и концентрации бора и достигают 1400 HV. Электронно-пучковая обработка приводит к объединению покрытия с приповерхностным слоем, увеличению глубины зоны упрочнения до 80 мкм. Вблизи поверхности формируется структура ячеистой или дендритной кристаллизации, в глубине — зеренная структура. Установлено неоднородное распределение легирующих элементов по объему зоны легирования и выравнивание его при электронно-пучковой обработке. Увеличение поглощаемой плотности мощности и общего времени воздействия электронно-пучковой обработки приводит к росту междендритного расстояния и диаметра зерен. Увеличиваются также размеры мартенситных игл в глубине. Комбинированная обработка приводит к образованию субмикросталлических упрочняющих фаз — боридов FeB, Fe₂B, FeB₂, карбоборида Fe₂₃(C, B)₆ и карбида B₄C.

The paper concerns improving the microhardness and wear resistance of steel 45 by the combined treatment of electroexplosive borocoppering with the subsequent electron-beam treatment. It is found that surface roughness at the area of the electroexplosive treatment increases along with the absorbed power density and the mass of boron powder. The electron-beam treatment leads to a decrease of roughness and appearance of craters instead of radial melt flow traces. The depth structure of the electroexplosive alloying area with a thickness of 25 μm includes a coating layer, near-surface, intermediate, and boundary layers. The surface microhardness and the depth of the hardening zone after the electroexplosive alloying increase along with the absorbed power density and boron concentration and reach the values of 1400 HV. The electron-beam treatment causes merging of the coating and the surface layers and increases the hardening zone depth up to 80 μm. A cellular or dendritic crystallization structure is formed near the surface, and a grain structure is formed in the depth. The inhomogeneous distribution of alloying elements over the volume of the alloying area and its adjustment during the electron-beam treatment are established. The inter-dendritic distances and grain diameters increase as the absorbed power density becomes higher with the increase of the electron-beam treatment exposure time. Also, the size of martensite needles increases in the depth. The combined treatment produces the sub microcrystalline strengthening phases-borides FeB, Fe₂B, FeB₂, carboboride Fe₂₃(C, B)₆, and carbide B₄C. The microhardness level is reduced to 800 HV, and the wear resistance increases up to five times when compared to the wear resistance of the base.

Уровень микротвердости уменьшается до 800 HV, а износостойкость по сравнению с износостойкостью основы увеличивается до пяти раз.

Ключевые слова: электровзрывное боромеднение, электронно-пучковая обработка, элементный и фазовый состав, микротвердость, износостойкость.

DOI: 10.14258/izvasu(2021)4-02

Введение

Развитие промышленности расширяет требования к конструкционным и инструментальным материалам, которые в ряде случаев могут быть обеспечены путем упрочнения поверхности. Для этого все более широко применяются концентрированные потоки энергии, такие как лазерное излучение [1], электронные пучки [2], плазменные потоки и струи [3, 4]. Они характеризуются кратковременным и локальным высокоэнергетическим воздействием, приводящим к оплавлению поверхности, и позволяют повышать такие свойства, как, например, износо-, жаро- и коррозионная стойкость, в несколько раз.

Одним из методов упрочнения является электровзрывное легирование (ЭВЛ), заключающееся в модификации структуры и свойств металлов и сплавов. Обработка осуществляется путем формирования при электрическом взрыве проводников многофазной плазменной струи, оплавления ею упрочняемой поверхности и насыщения расплава продуктами взрыва с последующей самозакалкой. Источником легирующих элементов при ЭВЛ является многофазная струя продуктов взрыва, а также порошковые частицы различных веществ, вводимые в область взрыва. Результаты ЭВЛ определяются совместным влиянием на упрочняемую поверхность теплового, силового и химического факторов обработки. Особенности комплексного воздействия на поверхность при ЭВЛ позволяют формировать, например, сплавы системы Fe-Cu с низкой взаимной растворимостью компонентов [5]. При этом возможно провести дополнительную модификацию свойств поверхности после ЭВЛ при последующей электронно-пучковой обработке (ЭПО), вызывающей импульсно-периодическое переплавление поверхности легирования [2]. Это оказывается возможным благодаря тому, что площадь и глубина зоны обработки при ЭВЛ и ЭПО близки друг другу.

В настоящее время процессы формирования структуры и свойств поверхностных слоев металлов и сплавов при ЭВЛ и последующей ЭПО изучены недостаточно. Данная работа посвящена выявлению особенностей формирования рельефа поверхности, распределения элементного и фазового составов

Key words: electroexplosive borocoppering, electron-beam treatment, element and phase composition, microhardness, wear resistance.

по глубине, повышения микротвердости и износостойкости поверхности стали 45 в зависимости от параметров электровзрывного боромеднения и последующей электронно-пучковой обработки.

Методы исследования

Возможность осуществления электровзрывного боромеднения технически чистого железа показана в работе [5]. В литературе имеются сведения о влиянии ЭПО на структуру стали 45 в исходном состоянии [6].

Выбор стали 45 как модельного материала для проведения упрочняющей обработки и исследования формируемых структурно-фазовых состояний и свойств был обусловлен тем, что она используется в промышленности в качестве конструкционного сплава [7] и изучалась после упрочнения поверхности с использованием концентрированных потоков энергии [8–11]. Выбор двухкомпонентного электровзрывного боромеднения вызван тем, что борированные слои обладают не только высокой твердостью, износо- и коррозионной стойкостью поверхности [2, 5], но и хрупкостью, которая может быть уменьшена при использовании боромеднения [12, 13].

Образцы стали для обработки в виде цилиндрических шайб высотой 3...5 мм вырезали из прутка диаметром 20 мм, который был отожжен при температуре 850 °С в течение 1,5 ч. и охлажден вместе с печью. В результате такой термообработки в материале была сформирована структура, представленная зернами структурно-свободного феррита и колониями пластинчатого перлита.

Электровзрывное боромеднение проводили на лабораторной установке ЭВУ 60/10. Электровзрывная обработка позволяет сконцентрировать за короткий промежуток времени (10^{-4} с) высокую плотность мощности (~ 1 ГВт/м²) в тонких (~ 10 мкм) поверхностных слоях материалов и дает возможность провести оплавление и легирование поверхностных слоев без выплеска расплава, развивающегося вследствие неоднородного давления (~ 10 МПа) плазменной струи на облучаемую поверхность. В качестве взрываемого проводника использовали медную фольгу, закрепляемую на электродах плазменного ускорителя коаксиально-торцевого типа. Режимы обработки обеспечивали поглощаемую плотность мощ-

ности q_p , равную 5,5, 6,5, 7,5 и 8,6 ГВт/м². Взрывааемые медные фольги имели толщину 20 мкм и массу, равную 35, 70 и 100 мг. В области взрыва размещали порошок аморфного бора массой 20 и 60 мг. Анализ поверхностных слоев после электровзрывного бормеднения проводили в случае, когда отношение n атомных концентраций бора и меди в струе было равно 1,2, 1,6, 3,4 и 3,5.

Последующую ЭПО поверхности легирования осуществляли на установке Института сильноточной электроники СО РАН «Соло» при следующих основных параметрах: поглощаемая плотность мощности q_e составляла 2,0, 2,5 и 3,0 ГВт/м², длительность импульсов τ — 100 и 200 мкс; частота их следования $f=0,3$ Гц; число импульсов N — 5 и 10 имп. Обработку осуществляли в среде аргона рабочей камеры при давлении 0,02 Па. Отметим, что ЭВЛ и ЭПО имеют сопоставимые значения поглощаемой плотности мощности, глубины и диаметра зоны воздействия на облучаемую поверхность.

Исследования структуры упрочненных слоев проводили с использованием методов световой (Olympus GX 51) и электронной сканирующей (Carl Zeiss EVO50) микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа, оптической интерферометрии (Zygo New View TM 7300), рентгеноструктурного анализа (ДРОН-2,0, ARL X'TRA). Упрочнение поверхности оценивали по уровню микротвердости (HVS-1000A) и износостойкости в условиях сухого трения скольжения.

Результаты и их обсуждение

Исследования методами микроскопии и оптической интерферометрии показали, что на поверхности зоны ЭВЛ формируется покрытие с высокоразвитым рельефом. Оно образовано конденсированными частицами продуктов взрыва медной фольги и порошка бора из тыла струи, которые конденсируются на поверхности. В структуре рельефа выделяются следы радиального течения расплава из центра зоны легирования к периферии, обусловленного неоднородным силовым воздействием плазменной струи на поверхность, приводящим к конвективному перемешиванию расплава. При увеличении поглощаемой плотности мощности радиальное течение становится более выраженным. Увеличение массы порошка бора в три раза приводит к увеличению параметра шероховатости R_a от 2,5 до 6,4 мкм.

Последующая ЭПО при всех режимах сопровождается плавлением поверхности и объединением покрытия с нижележащей зоной легирования. При этом параметр шероховатости R_a уменьшается от 5,6 до 2,5 мкм, следы радиального течения исчезают, наблюдается образование кратеров. Увеличение поглощаемой плотности мощности и времени импульсов ЭПО приводит к уменьшению параметра шероховатости R_a и глубины кратеров, увеличению их диаметра d . При увеличении числа импульсов ЭПО значения R_a и d увеличиваются (рис. 1).

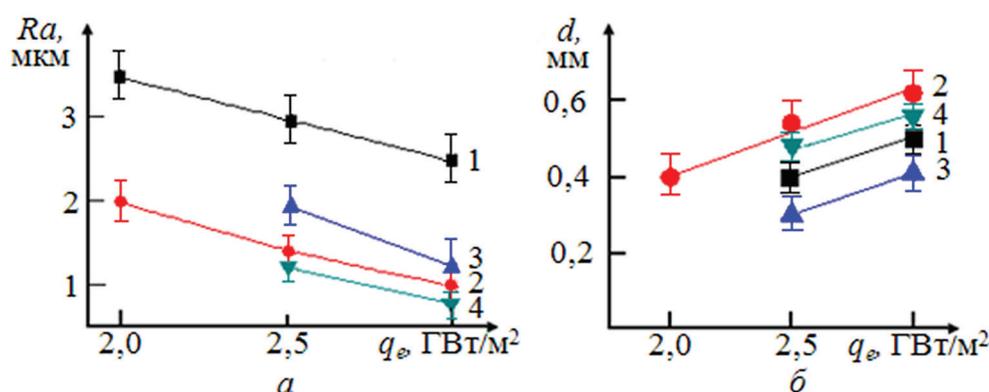


Рис. 1. Зависимость параметра шероховатости R_a (а) и диаметра d кратеров (б)

от поглощаемой плотности мощности ЭПО:

1 — $\tau=100$ мкс, $N=10$ имп.; 2 — $\tau=200$ мкс, $N=10$ имп.;

3 — $\tau=100$ мкс, $N=5$ имп.; 4 — $\tau=200$ мкс, $N=5$ имп.

После ЭПО поверхность зоны ЭВЛ имеет дендритную структуру кристаллизации. Исследования при большом увеличении показали, что при $N=10$ имп., $q_e=2,0$ и 2,5 ГВт/м² и $\tau=100$ и 200 мкс количество зерен с дендритной кристаллизацией заметно больше, чем с ячеистой кристаллиза-

цией, а при $q_e=3,0$ ГВт/м² формируется только структура дендритной кристаллизации (рис. 2). С ростом q_e и τ среднее расстояние λ_1 между ячейками и осями первого порядка дендритов и средний диаметр зерен D увеличиваются в 1,5...2,0 раза.

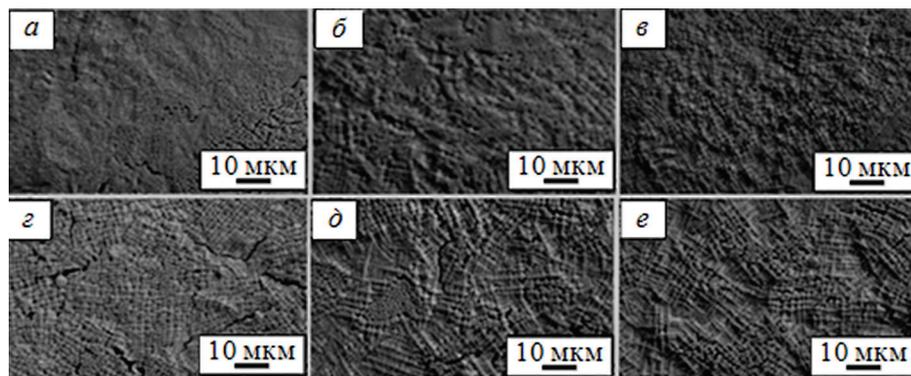


Рис. 2. Структура поверхности легирования после электронно-пучковой обработки при $N=10$ имп., $\tau=100$ (а–в) и 200 нс (г–е), при q_e , равных 2,0 (а, г), 2,5 (б, д) и 3,0 (в, е) ГВт/м². Сканирующая электронная микроскопия

Микроскопический анализ структуры зоны легирования на прямых и косых шлифах позволяет выделить по ее глубине четыре слоя с измененной структурой. Это поверхностный слой толщиной несколько микрометров, обусловленный осаждением на поверхности обработки конденсированных частиц плазменной струи, приповерхностный и промежуточный слои (рис. 3а).

От основы зона ЭВЛ отделена зоной термического влияния, условную границу которой определяли по колониям осветленного перлита. В промежуточном слое вблизи границы зоны ЭВЛ с основой формируется подслои толщиной несколько микрометров с волнистыми границами. Его происхождение можно связать с радиальным течением расплава вдоль поверхности. Общая толщина зоны легирования достигает 25 мкм.

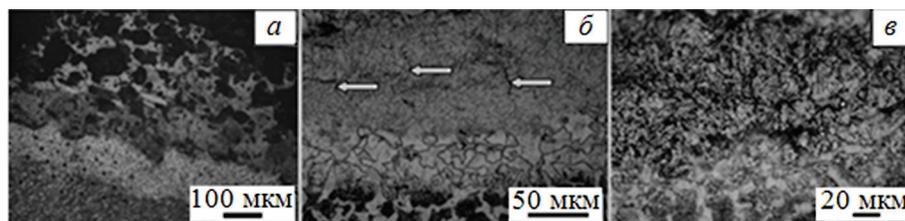


Рис. 3. Структура стали 45 после ЭВЛ при $q_p=6,5$ ГВт/м², $n=3,4$ (а) и последующей ЭПО при $N=10$ имп., $q_e=2,0$ ГВт/м², $\tau=100$ нс (б) и $q_e=2,5$ ГВт/м², $\tau=200$ нс (в). Стрелки на б указывают на микротрещины. Световая микроскопия, косые шлифы

Легирование элементы в объеме зоны легирования распределяются неоднородно (рис. 3а), что свидетельствует о незавершенности перемешивания расплава после внесения в него частиц меди и бора и обусловлено импульсным характером ЭВЛ. ЭПО приводит к дополнительному перераспределению бора и меди (рис. 3б). При этом в приповерхностном и промежуточном слоях зоны легирования формируется зеренная структура (рис. 3в). В приповерхностном слое зоны ЭВЛ наблюдаются многочисленные частицы упрочняющих фаз субмикронного диапазона (рис. 4а). После ЭПО с увеличением общего времени нахождения поверхностного слоя в жидком состоянии размеры частиц упрочняющих фаз увеличиваются так же, как и игл мартенсита в глубине (рис. 5в, г).

Рентгеноструктурный анализ показал, что в результате электровзрывного боромеднения на поверх-

ности стали сформировалась смесь, состоящая из α -Fe, Cu и упрочняющих фаз FeB, $Fe_{23}(C, B)_6$. С увеличением поглощаемой плотности мощности q_p наблюдается уменьшение содержания α -Fe и увеличение содержания γ -Fe и Cu, что свидетельствует об увеличении степени легирования расплава медью. Влияние ЭПО сводится к растворению боридов в слое, уменьшению содержания аустенита, перераспределению меди и увеличению содержания α -Fe. В частности, с ростом поглощаемой плотности мощности q_e содержание α -фазы и метастабильной фазы $Fe_{23}(C, B)_6$ увеличивается, а при увеличении длительности импульсов исчезают пики γ -Fe и $Fe_{23}(C, B)_6$. Согласно металлографическим исследованиям, это является следствием увеличения глубины зоны легирования и перераспределения легирующих элементов по ее объему.

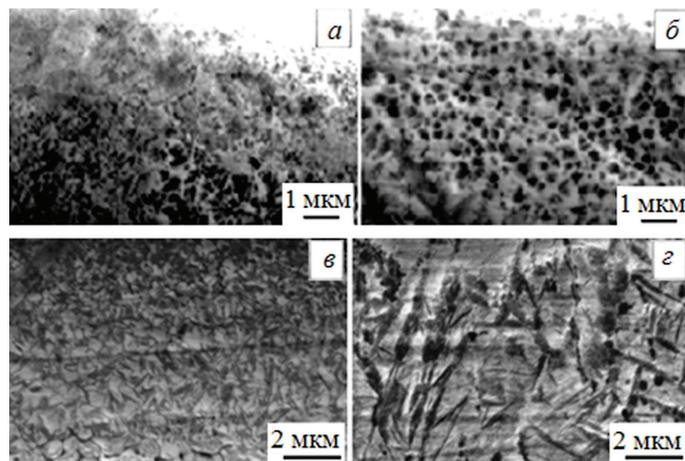


Рис. 4. Структура приповерхностного (а, б) и промежуточного (в, г) слоев зоны легирования после ЭПО:

а — после ЭВЛ при $q_p=8,6$ ГВт/м², $n=3,5$;
 б — после ЭПО при $N=5$ имп., $\tau=00$ мкс, $q_e=2,5$ ГВт/м²;
 в — после ЭПО при $N=10$ имп., $\tau=200$ мкс, $q_e=2,0$ ГВт/м²;
 г — после ЭПО при $N=10$ имп., $\tau=200$ мкс, $q_e=2,5$ ГВт/м².
 Сканирующая электронная микроскопия. Прямые шлифы

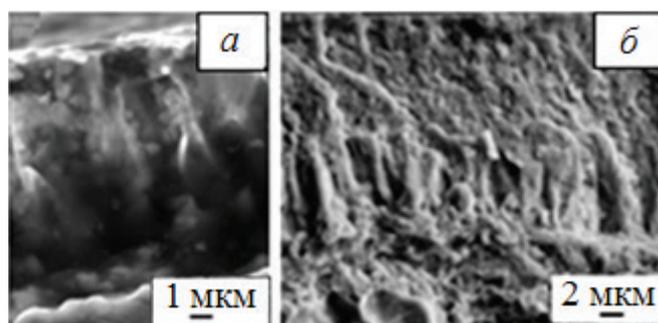


Рис. 5. Структура изломов стали 45 после ЭВЛ при $n=3,5$, $q_p=6,5$ ГВт/м² (а) и после ЭПО при $q_e=2,5$ ГВт/м², $\tau=100$ мкс и $N=10$ имп. Сканирующая электронная микроскопия

Распределение микротвердости по глубине зоны электровзрывного боромеднения является монотонно падающим (рис. 6). При этом максимальная микротвердость наблюдается в тонком поверхностном слое. В приповерхностном слое на глубине до 15...20 мкм градиент

микротвердости маленький, и с учетом ошибок измерений можно говорить об усредненном значении микротвердости в этом слое. В промежуточном слое микротвердость быстро падает до ее значения в объеме стали на уровне 200 HV.

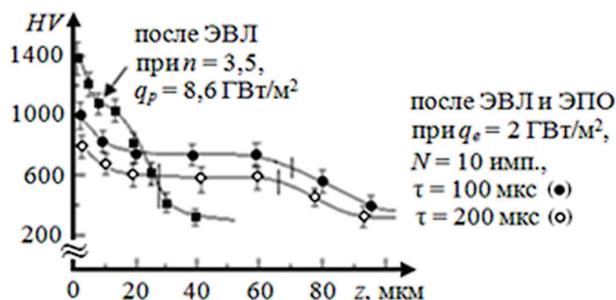


Рис. 6. Распределение микротвердости по глубине зоны обработки стали 45 после ЭВЛ и последующей ЭПО. Вертикальные штрихи на графиках соответствуют глубине зоны легирования

С ростом q_p от 6,5 до 8,5 ГВт/м² при ЭВЛ микротвердость поверхности линейно увеличивается от 4,5 до 6,0 и от 5,4 до 7,2 раза при $n=1,6$ и 3,5 соответственно (рис. 7а). Влияние на микротвердость поглощаемой плотности мощности тем более сильное, чем выше концентрация бора в плазменной струе. Поведение микротвердости в приповерхностном слое отличается от ее поведения на поверхности тем, что при низком содержании бора зависимость микротвердости от поглощаемой плотности не проявляется. С ростом поглощаемой плотности мощности глубина зоны

легирования и толщина приповерхностного слоя с высоким уровнем упрочнения с ростом концентрации бора в плазменной струе увеличиваются в 1,5 и 2,0 раза соответственно (рис. 7б). При последующей ЭПО глубина упрочнения возрастает более чем в три раза до 80 мкм, при этом микротвердость уменьшается, оставаясь на высоком уровне. Максимальная микротвердость на поверхности и в приповерхностном слое после обработки составляет 1000 и 800 HV при времени импульсов 100 и 200 мкс соответственно.

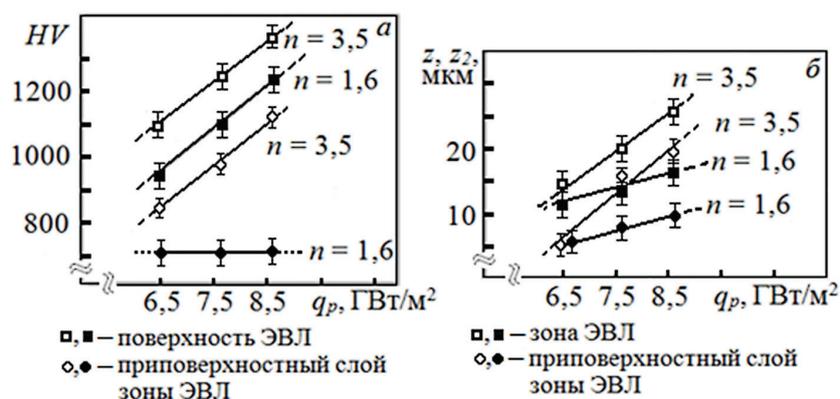


Рис. 7. Изменение микротвердости (а), глубины z зоны ЭВЛ и глубины приповерхностного слоя z_2 (б) после обработки в различных режимах

Испытания на износостойкость поверхностных слоев в условиях истирания без смазки показали, что комбинированная обработка, сочетающая ЭВЛ и ЭПО, приводит к увеличению износостойкости по сравнению с основой в 4...5 раз в зависимости от режима обработки.

Заключение

Установлено увеличение шероховатости поверхности зоны электровзрывного боромеднения с ростом поглощаемой плотности мощности и массы порошка бора. Последующая ЭПО приводит к уменьшению шероховатости и появлению на поверхности кратеров вместо следов радиального течения. Строение зоны ЭВЛ по глубине включает в себя покрытие, приповерхностный, промежуточный и приграничный слой. Общая толщина зоны легирования достигает 25 мкм. Последующая ЭПО приводит к объединению покрытия с приповерхностным слоем, увеличению глубины зоны упрочнения до 80 мкм. Вблизи поверхности формируется структура ячеистой или дендритной кристаллизации, в глубине — зеренная структура.

Установлено неоднородное распределение легирующих элементов по объему зоны легирования и выравнивание его при последующей ЭПО. Увеличение поглощаемой плотности мощности и общего времени воздействия ЭПО приводит к росту междендритного расстояния и диаметра зерен. Увеличиваются также размеры мартенситных игл в глубине.

Улучшение физико-механических свойств зоны легирования обусловлено формированием закалочных структур, включающих субмикроструктурные упрочняющие фазы боридов FeB, Fe₂B, FeB₂, карбоборида Fe₂₃(C, B)₆ и карбида B₄C. Микротвердость поверхности и глубина зоны упрочнения после ЭВЛ увеличиваются с ростом поглощаемой плотности мощности и концентрации бора и достигают 1400 HV. При последующей ЭПО уровень микротвердости уменьшается до 800 HV. Комбинированная обработка, сочетающая ЭВЛ и ЭПО, приводит к увеличению износостойкости по сравнению с износостойкостью основы до пяти раз.

Библиографический список

1. Белый А.В., Калиниченко А.С. Девойно О.Г. Кукарко В.А. Инженерия поверхностей конструкционных материалов с использованием плазменных и пучковых технологий. Минск, 2017.
2. Денисова Ю.А., Иванов Ю.Ф., Иванова О.В. и др. Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутого электронно-ионно-плазменным методам обработки / под общ. ред. Н.Н. Ковалы и Ю.Ф. Иванова. Томск, 2016.
3. Углов В.В., Шиманский В.И., Асташинский В.М., Черенда Н.Н. Модификация титана при воздействии компрессионными плазменными потоками. Минск, 2017.
4. Багаутдинов А.Я., Будовских Е.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов. Новокузнецк, 2007.
5. Цвиркун О.А., Будовских Е.А., Багаутдинов Я.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. Морфологические особенности кристаллизации поверхностных слоев железа и никеля при электровзрывном легировании // Изв. вузов. Черная металлургия. 2007. № 6.
6. Иванов Ю.Ф., Колубаева Ю.А., Коновалов С.В., Коваль Н.Н., Громов В.Е. Модификация поверхностного слоя стали при электронно-пучковой обработке // Металловедение и терм. обраб. металлов. 2008. № 12.
7. Зубченко А.С., Колосков М.М., Каширский Ю.В. и др. Марочник сталей и сплавов / под ред. В.Г. Сорокина. М., 2003.
8. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технические процессы лазерной обработки. М., 2006.
9. Крукович М.Г., Прусаков Б.А., Сизов И.Г. Пластичность борированных слоев. М., 2010.
10. Марусин М.В., Шукин В.Г., Марусин В.В. Поверхностное легирование углеродистой стали медью при высокоэнергетической индукционной обработке // Физика и химия обраб. материалов. 2010. № 5.
11. Марусин М.В., Шукин В.Г., Филимоненко В.Н., Марусин В.В. Борирование стали при индукционной обработке // Физика и химия обраб. материалов. 2003. № 4.
12. Бурнышев И.Н., Валиахметова О.М., Мутагарова С.А. К вопросу борирования сталей // Вестн. ИжГТУ. 2007. № 4.
13. Баландин Ю.А. Упрочнение поверхности штамповых сталей диффузионным борированием, боромеднением и борохромированием в псевдооживленном слое // Металловедение и терм. обработка металлов. 2005. № 3.