



УДК: 621.785

РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННОГО МЕТОДА МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ 45

С.Ю. Филимонов¹⁾, Ю.Ф. Иванов²⁾, В.Е. Громов³⁾, Е.А. Будовских³⁾

¹⁾ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
пр. Ленина, 30, Томск, 634050, Россия, e-mail: ZMAN3@ya.ru

²⁾ Институт сильноточной электроники СО РАН,
пр. Академический 2/3, Томск, 634055, Россия.

³⁾ Сибирский государственный индустриальный университет,
ул. Кирова 42, Новокузнецк, 654007, Россия.

Аннотация. Анализируются результаты, полученные при исследовании образцов стали 45, подвергнутой электровзрывному легированию алюминием или медью с последующей импульсной электронно-пучковой обработкой. Выявлены режимы комбинированной обработки,кратно повышающие поверхностно-чувствительные свойства стали.

Ключевые слова: сталь 45, электровзрывное легирование, электронно-пучковая обработка, структура, поверхностно-чувствительные свойства.

1. Введение. Создание новых объёмно-легированных материалов, являющееся до сих пор основным способом повышения надёжности и долговечности деталей механизмов и машин, становится всё более проблематичным из-за дефицита и дороговизны легирующих добавок, существенно повышающих стоимость высоколегированных сплавов. В этих условиях оказывается экономически и технически целесообразно развивать принципиально иной подход к созданию материалов, при котором служебные характеристики детали обеспечиваются применением экономичных низколегированных сплавов, а специальные свойства поверхности – сплошным или локальным формированием на ней легированных слоев или нанесением покрытий, свойства которых соответствуют эксплуатационным требованиям.

Перспективным в настоящее время способом обработки поверхности металлов и сплавов, является метод электровзрывного легирования (ЭВЛ), в котором инструментом воздействия на поверхность являются импульсные плазменные струи, формируемые при разряде ёмкостных накопителей энергии через проводники. В этом случае рабочее вещество ускорителя плазмы служит как для нагрева поверхностных слоёв металлов, так и для их легирования [1]. Одновременно с легированием образца, на его поверхности практически всегда формируется покрытие, являющееся, как правило, высокопористым, содержащим большое количество капельной фракции, микрократеров и микротрещин, что существенно снижает служебные характеристики обработанной детали [1]. Для устранения данных негативных последствий нами было предложено проводить облучение поверхности ЭВЛ высокоинтенсивным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия [2, 3].

Целью настоящей работы являлось установление оптимальных (с точки зрения поверхностно-чувствительных свойств) режимов электронно-пучковой обработки поверхности электровзрывного легирования стали 45.

2.Материал и методики исследования. В качестве материала подложки использовалась сталь марки Ст.45 с феррито-перлитной структурой. Электровзрывное легирование осуществлялось путём электрического взрыва алюминиевых или медных фольг толщиной 20 мкм



на установке ЭВУ 60/10. Условия для осуществления импульсного жидкофазного легирования задавались величиной зарядного напряжения накопителя энергии ускорителя, диаметром канала сопла и расстоянием от его среза до образца, которые составили соответственно 2,3 кВ, 20 и 20 мм. При этом глубина и радиус зоны легирования были максимальными. Время обработки 100 мкс, поглощаемая плотность мощности на оси струи $4,5 \text{ ГВт/м}^2$, давление в ударно-сжатом слое вблизи поверхности 11,2 МПа. Толщина зоны легирования в её центральной области $\sim 25 \text{ мкм}$ [1]. Электронно-пучковую обработку (ЭПО) поверхности легирования осуществляли на лабораторной установке "Solo" [4, 5] при следующих основных параметрах облучения: плотность энергии пучка электронов 10-30 Дж/см²; длительность импульса воздействия пучка 50 мкс; частота следования импульсов 0,3 Гц; число импульсов воздействия 2÷200. Обработка осуществлялась в рабочей камере в атмосфере аргона при давлении $\sim 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ Тор}$. Исследования структуры поверхности облучения проводилось на растровом электронном микроскопе Quanta 600 FEG. Изменение механических характеристик материала характеризовали микротвёрдостью и износостойкостью. Микротвёрдость определяли по методу Виккерса на автоматическом микротвёрдомере DM-8 при нагрузке 0,98 Н по 80÷100 отпечаткам. Испытания на износ проводили на высокотемпературном трибометре High-temperature Tribometer (CSM-Instruments), результаты испытания наблюдали с помощью профилометра.

3. Результаты исследования и их обсуждения.

3.1. Электровзрывное легирование алюминием

и последующая электронно-пучковая обработка. С целью оптимизации параметров воздействия, электронно-пучковую обработку образцов осуществляли по двум режимам. Во-первых, варьировали плотность энергии пучка электронов (ES) в пределах от 10 до 30 Дж/см² при неизменных длительности импульса воздействия ($\tau = 50 \text{ мкс}$), частоте следования импульсов ($f = 0,3 \text{ Гц}$) и количестве импульсов воздействия ($N = 10 \text{ имп.}$). Во-вторых, варьировали количество импульсов воздействия (N) в пределах от 2 до 200 имп. при неизменных плотности энергии пучка электронов ($ES = 20 \text{ Дж/см}^2$), длительности импульса воздействия ($\tau = 50 \text{ мкс}$) и частоте следования импульсов ($f = 0,3 \text{ Гц}$). Первоначальный анализ режимов осуществляли, измеряя микротвёрдость поверхности. Максимальное значение микротвёрдости наблюдалось в режиме $ES = 20 \text{ Дж/см}^2$; $\tau = 50 \text{ мкс}$; $f = 0,3 \text{ Гц}$, при 10 импульсах воздействия электронного пучка, и составило 8 ГПа, что в 4 раза превосходит микротвёрдость исходной стали.

Высокоскоростные плавление и последующее охлаждение, вызванные электронно-пучковой обработкой поверхности электровзрывного легирования, сопровождается формированием на поверхности облучения системы микротрещин, разбивающих поверхность на блоки со средними размерами $D = 60 \text{ мкм}$ (рис. 1 а). В объёме блоков наблюдается структура дендритной кристаллизации; средние размеры дендритов $d = 250 \text{ нм}$ (рис. 1 б). Как следует из анализа изображения структуры, представленной на Рис. 1 б, форма дендритов близка к равноосной. Для определения изменения износостойкости проводился тест, в ходе которого на обработанной поверхности образца делался трек. Определялась глубина и площадь трека (посредством количества вещества, унесённого в ходе теста), а по отношению этих значений для образца до и после обработки, определяли, как изменялась износостойкость материала.

Усреднённая площадь трека (количество вещества, унесённого в ходе теста) на необработанной стали составила 4070 мкм^2 (рис. 2 а), усреднённая площадь трека для стали, подвергнутой ЭВЛ алюминием и последующей ЭПО, составила 823 мкм^2 (рис. 2 б) для лучшего режима ЭПО ($N = 25 \text{ импульсов}$, $ES = 20 \text{ Дж/см}^2$, $f = 0,3 \text{ Гц}$, $\tau = 50 \text{ мкс}$).

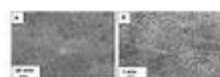


Рис. 1. Структура поверхности образца стали Ст.45 после электровзрывного легирования и последующей электронно-пучковой обработки в режиме $ES = 20 \text{ Дж/см}^2$; $\tau = 50 \text{ мкс}$; $f = 0,3 \text{ Гц}$, $N = 10$ импульсов.

Следовательно, износостойкость поверхности стали 45 после комбинированной обработки увеличивается в ~ 5 раз, что является весьма хорошим результатом. Одновременно с увеличением износостойкости и микротвёрдости, комбинированная обработка сопровождается существенным (более чем в 10 раз) снижением шероховатости модифицируемой поверхности. Если после ЭВЛ величина шероховатости поверхности легирования составила $3,77 \text{ мкм}$, то последующая ЭПО понизила степень шероховатости до $0,275 \text{ мкм}$.

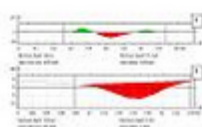


Рис. 2. Изображение, полученное в ходе измерения износостойкости: а) поверхности исходной стали 45, б) поверхности стали 45, обработанной комбинированным методом (электровзрывное легирование алюминием + высокоинтенсивное электронно-пучковое облучение).

3.2 Электровзрывное легирование стали 45 медью

и последующая электронно-пучковая обработка. В результате выполненных исследований установлено, что одновременно с электровзрывным легированием медью на обрабатываемой поверхности формируется покрытие переменной толщины, содержащее большое количество микрокапель. В отдельных случаях выявляются микрократеры и микротрещины. Наличие многочисленных микрокапель на поверхности легирования обусловлено тем, что продукты электрического взрыва металлической фольги представляют собой многофазную систему, состоящую как из металлической плазмы, так и микрокапельной фракции. Электронно-пучковая обработка, не изменяя элементный состав материала, позволяет преимущественно, путём высокоинтенсивного термического воздействия, осуществить скоростную гомогенизацию поверхностного слоя.

В результате выполненных исследований установлено, что плавление поверхностного слоя образца (слоя, подвергнутого электровзрывному легированию) фиксируется при плотности энергии пучка электронов $ES \sim 15 \text{ Дж/см}^2$. Это приводит, с одной стороны, к удалению микротрещин, микрократеров и наплывов меди, с другой стороны, к формированию некоторого количества капель меди сферической формы, размеры которых изменяются в пределах единиц микрометров.

Высокоскоростная кристаллизация расплава сопровождается формированием дендритной структуры. Установлено, что строение дендритов зависит от плотности энергии пучка электронов. При обработке стали электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов $15 \div 20 \text{ Дж/см}^2$ преимущественно формируется дендритная структура с осями первого порядка (на поверхности облучения наблюдается так называемая структура ячеистой кристаллизации) (рис. 3 а); при большей плотности энергии пучка электронов дендриты имеют оси первого и второго порядка (рис. 3 б). Очевидно, что строение дендритной структуры определяется скоростью охлаждения расплава.

Исследования микротвёрдости поверхности стали 45 после комбинированной обработки позволили выявить оптимальный режим ($\tau = 50 \text{ мкс}$; $f = 0,3 \text{ Гц}$, $N = 10$ импульсов, $ES = \text{Дж/см}^2$), при котором микротвёрдость поверхности достигает $\sim 12 \text{ ГПа}$, что в ~ 6 раз превышает микротвёрдость исходной стали 45.

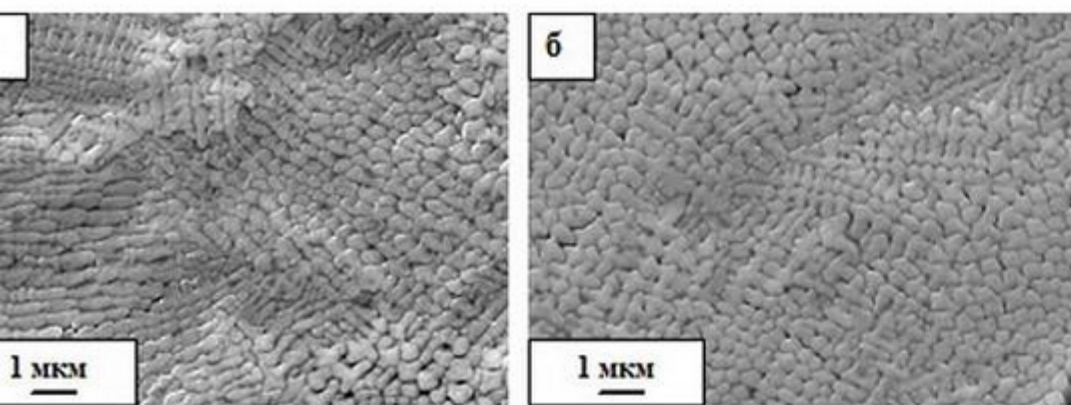


Рис. 3. Изображение структуры дендритной кристаллизации стали 45, подвергнутой электровзрывному легированию и последующей электропучковой обработке при $ES = 20 \text{ Дж/см}^2$ (а) и $ES = 30 \text{ Дж/см}^2$ (б).

Износостойкость поверхности комбинированной обработки измерялась также как и в предыдущем разделе. Усреднённая площадь трека для стали, подвергнутой ЭВЛ медью и последующей ЭПО составила 855 мкм^2 (рис. 4) при лучшем режиме ЭПО ($N = 5$ импульсов, $E = 30 \text{ Дж/см}^2$, $f = 0,3 \text{ Гц}$, $\tau = 50 \text{ мкс}$). Следовательно, износостойкость после обработки увеличивается в ~ 5 раз, что очень близко к результатам, полученным для ЭВЛ алюминия и последующей ЭПО. Величина шероховатости образцов стали 45 после ЭВЛ составляла

3,77 мкм, после электронно-пучковой обработки 1,1 мкм. Следовательно, и в данном случае наблюдается эффект выравнивания поверхности комбинированной обработки.



Рис. 4. Изображение, полученное в ходе измерения износостойкости поверхности стали 45, обработанной комбинированным методом (ЭВЛ медью + ЭПО).

4. Заключение. Выполнена комбинированная обработка стали 45, заключающаяся в электровзрывном легировании поверхности алюминием или медью и последующем облучении высокоинтенсивным электронным пучком. Проведены исследования структуры и поверхностно-чувствительных свойств (микротвёрдость, износостойкость, шероховатость). Выполнен анализ полученных результатов. Установлено, что:

- 1) ЭПО поверхности стали 45 сопровождается кратным снижением степени шероховатости как после электровзрывного алитирования, так и после электровзрывного меднения;
- 2) комбинированная обработка поверхности стали 45, включающая электровзрывное алитирование и последующую электронно-пучковую обработку, в оптимальном режиме сопровождается ростом микротвёрдости (в ~ 4 раза) и износостойкости (в ~ 5 раз);
- 3) комбинированная обработка поверхности стали 45, включающая электровзрывное меднение и последующую электронно-пучковую обработку, в оптимальном режиме сопровождается ростом микротвёрдости (в ~ 6 раза) и износостойкости (в ~ 5 раз).

Работа выполнена в рамках государственного контракта № 14.740.11.0986 "Проведение поисковых научно-исследовательских работ в целях развития общероссийской мобильности в области технических и инженерных наук" по теме: "Новые функциональные материалы и покрытия для энергетики и двигателестроения" на базе ИОиИЦ "Наноструктурные материалы и нанотехнологии" с использованием аналитического оборудования Центра коллективного пользования "Диагностика структуры и свойств наноматериалов" ИИУ БелГУ.

Литература

1. Багаутдинов А.Я., Будовских Е.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов / А.Я. Багаутдинов. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2007. – 301 с.
2. Иванов Ю.Ф., Карний С.В., Морозов М.М., Коваль Н.Н., Будовских Е.А., Громов В.Е. Структура, фазовый состав и свойства титана после электровзрывного легирования и электронно-пучковой обработки / Ю.Ф. Иванов. – Новокузнецк: Изд-во ИПК, 2010. – 173 с.



3. Формирование структурно-фазовых состояний металлов и сплавов при электровзрывном легировании и электронно-пучковой обработке / Е.А. Будовских, Е.С. Ващук, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, Н.Н. Коваль, С.Ю. Филимонов / Под ред. В.Е. Громова. – Новокузнецк: Изд-во "Интер-Кузбасс 2011. – 212 с.
4. Иванов Ю.Ф., Коваль Н.Н. Низкоэнергетические электронные пучки субмиллисекундной длительности: получение и некоторые аспекты применения в области материаловедения / Гл.13 в книге "Структура и свойства перспективных металлических материалов". – С.345-382 / Под ред. А.И. Потекаева. – Томск: Изд-во ИТЛ, 2007. – 580 с.
5. Koval N.N., Sochugov N.S., Devyatkov V.N. Grigoryev V.P., Arslanov I.R., Mikov A.V., Podkovyrov V.G., Kensuke Uemura. Automated power-complex for materials by electron beam // Известия вузов. Физика. – 2006. – 8. – Приложение. – С.51-54.

DEVELOPMENT OF A COMBINED METHOD OF STEEL 45 SURFACE MODIFICATION

S.Yu. Filimonov¹⁾, Yu.F. Ivanov²⁾, V.E. Gromov³⁾, E.A. Budovskih³⁾

¹⁾ National Research Tomsk Polytechnic University,
Lenina av., 30, Tomsk, 634050, Russia, e-mail: ZMAN3@ya.ru

²⁾ Institute of High Current Electronics SB RAS,
Akademicheskyy av., 2/3, Tomsk, 634055, Russia.

³⁾ Siberian State Industrial University,
Kirova st., 42, Novokuzneck, 654007, Russia.

Abstract. Results obtained at the research of steel 45 samples are analyzed when they are submitted to the electroexplosive doping of aluminum or copper with the following pulse electron beam treatment. Regimes of combined treatment which give a multiple increment of steel surface-sensitive properties are revealed.

Key words: steel 45, electroexplosive doping, electron-beam treatment, structure, surface-sensitive properties.