

Наноструктурирование поверхностного слоя стали: комплексный подход

Филимонов Семён Юрьевич

Место работы: Томский политехнический университет

Научная специализация: материаловед

Научный руководитель: Иванов Юрий Федорович, д.ф.-м.н., в.н.с. лаборатории плазменной эмиссионной электроники Института сильноточной электроники СО РАН

Аннотация научная

Создание современных перспективных материалов конструкционного назначения путем обработки концентрированными потоками энергии, позволяющей, формируя оптимальные структурно-фазовые состояния в поверхностных слоях,кратно повышать эксплуатационные свойства изделий. Последнее достигается путем образования многофазных поверхностных слоев с нано- и субмикрористаллической структурой в результате низкоинтенсивного электровзрывного легирования и последующего импульсного аккумулирования энергии ($\sim 1 \text{ МВт/см}^2$) в субмиллисекундном диапазоне времени в приповерхностном объеме стали при облучении ее импульсным интенсивным электронным пучком. Представлены результаты исследования поверхностного слоя стали, демонстрирующие формирование нанофазной структуры в ходе комплексной обработки.

Аннотация для неспециалистов

Идея комплексной обработки стали заключается в следующем. На первом этапе поверхность образца (можно использовать любые материалы – металлы, сплавы, керамики) подвергается электровзрывному легированию, т.е. насыщению поверхностного слоя атомами другого материала. Метод электровзрывного легирования – это метод, в котором мы подаем большое напряжение на очень тонкую токопроводящую пластинку, в результате чего она взрывается, т.е. устраиваем своеобразное короткое замыкание. В результате взрыва большая часть материала переходит в состояние плазмы, меньшая – формирует мелкие (субмикро- и наноразмерные) капли расплавленного и застывшего материала. Сформированный таким образом поток вещества, обладающий большой энергией, направляется на обрабатываемый образец. Варьируя параметры работы электровзрывной установки, можно с помощью налетающего потока вещества нагревать поверхность образца вплоть до плавления. Элементы плазмы, формирующей передний фронт потока (потому что она легкая) внедряются в поверхностный слой образца (научный термин – легирует), изменяя его элементный состав, и, тем самым, его служебные характеристики. Мелкие капли долетают до образца в последнюю очередь и формируют на его поверхности неоднородное по толщине покрытие с большим количеством трещин. Нетрудно догадаться, что такая поверхность никому не нужна, даже учитывая то, что она стала прочнее исходной примерно в 3-4 раза, поэтому более 50% упроченного слоя удаляется (сошлифовывается, стравливается в кислотах), а это ни что иное как потеря зачастую дорогостоящего легирующего материала. Одновременно с выравниванием поверхности образца (часто это очень трудоемкая, экологически грязная операция) уменьшается толщина модифицированного слоя, что снижает значение выполняемой работы. Решением, позволяющим легко и просто избавиться (с пользой для дела) от такой пленки является дополнительный переплав поверхностного слоя материала. При этом элементы пленки перейдут в поверхностный слой образца, увеличив в нем количество легирующего элемента, т.е. еще больше улучшив его служебные свойства. Для того, чтобы расплавить поверхностный слой, не изменяя объема материала, мы использовали поток электронов, ускоренных до соответствующей (применительно к нашей проблеме) энергии, т.е. использовали так называемую электронно-пучковую обработку. Суть последней заключается в следующем: импульсный электронный пучок микросекундной длительности попадает на

поверхность образца, нагревая её до температуры плавления. Затем тепло с поверхности уходит вглубь образца. Таким образом, происходит быстрый нагрев и остывание поверхности образца, в результате которых меняются её свойства. Результаты, полученные при такой комплексной обработке (электровзрывное легирование и электронно-пучковая обработка) поверхности стали, представлены ниже.

Почему и зачем написана эта работа?

Данная работа написана с целью популяризации результатов, полученных при использовании комплексной обработки, позволяющейкратно (до 10 раз) повысить служебные характеристики промышленных материалов. Используя малогабаритное, экологически чистое, не очень сложное в эксплуатации оборудование, данная обработка позволяет формировать поверхностные слои, по свойствам не уступающие специально созданным (следовательно, дорогостоящим) материалам.

Что рассматривается в работе и какую цель и задачи она преследует?

В данной работе рассматриваются результаты, полученные при исследовании структуры и свойств стали, подвергнутой комплексной обработке, позволяющей существенно увеличивать служебные характеристики материала путем формирования в поверхностном слое многофазной (в том числе) наноразмерной структуры.

Цель работы – показать перспективность разрабатываемого нами комплексного метода обработки.

Задачи, решаемые в данной работе: путем структурно-фазовых исследований и проведения механических испытаний выявить оптимальный режим электронно-пучковой обработки стали, подвергнутой электровзрывному легированию алюминием (алитированию).

Введение

Создание новых объемно-легированных материалов, являющееся до сих пор основным способом повышения надежности и долговечности деталей механизмов и машин, становится все 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. Развитие технологии поверхностного упрочнения металлов и сплавов в настоящее время связывают с разработкой комбинированных процессов, включающих, к примеру, термодиффузионное легирование поверхности детали с использованием лазерного излучения и последующее азотирование. Наряду с лазерным, 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 емкостных накопителей энергии через проводники. В этом случае рабочее вещество ускорителя плазмы служит как для нагрева поверхностных слоев металлов, так и для их легирования.

Рассмотрение проблемы

В качестве материала подложки использовали сталь марки Ст.45 с феррито-перлитной структурой. Электровзрывное легирование осуществляли путем электрического взрыва алюминиевых фольг толщиной 20 мкм. Условия для осуществления импульсного жидкофазного легирования задавали величиной зарядного напряжения накопителя энергии

ускорителя, диаметра канала сопла и расстояния 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 ее центральной области $\sim 25 \text{ мкм}$ [1]. Электронно-пучковую обработку поверхности легирования осуществляли на лабораторной установке «Solo» [2] при следующих основных параметрах облучения: плотность энергии пучка электронов 20 Дж/см^2 ; длительность импульса воздействия пучка 50 мкс; частота следования импульсов 0,3 Гц; число импульсов воздействия 2...200. Обработка осуществлялась в инертной (аргон) среда рабочей камеры при давлении $\sim 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ Тор}$. Исследования структуры поверхности облучения, поверхности хрупких изломов, поверхности травленого шлифа («косой» шлиф) модифицированных образцов проводили методами оптической и электронной сканирующей микроскопии. Изменение механических характеристик материала характеризовали микротвердостью, определяемой по методу Виккерса при нагрузке 0,98 Н по 80...100 отпечаткам. Точность измерения составила 7%. Обработка результатов статистического анализа структуры материала осуществляли на персональном компьютере с использованием пакета программ «Origin Pro 8.0».

Результаты исследования и их обсуждение

Как отмечалось выше, продукты электрического взрыва проводника представляют собой многофазную систему, включающую как плазменный компонент, так и конденсированные частицы различной дисперсности. В связи с этим, наряду с легированием электровзрывная обработка приводит к формированию на обрабатываемой поверхности высокодефектного покрытия (рис. 1, а). Толщина покрытия изменяется в пределах от 2 до 15 мкм. Под покрытием располагается модифицированный слой стали, имеющий столбчатую

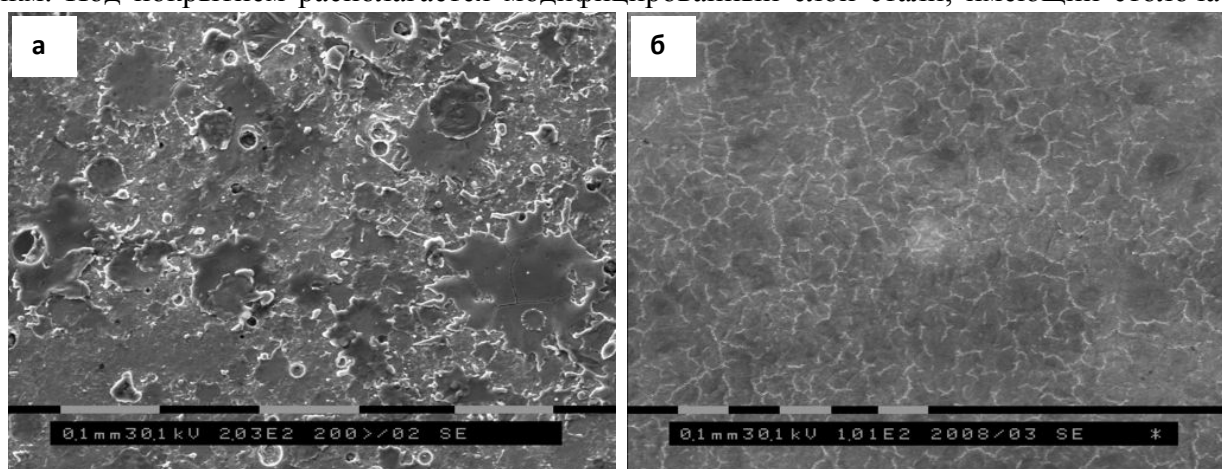


Рис. 1. Структура поверхности стали Ст.45, подвергнутой электровзрывному легированию алюминием (а) и последующей импульсной электронно-пучковой обработке ($E_S = 20 \text{ Дж/см}^2$; $\tau = 50 \text{ мкс}$; $N = 10 \text{ имп.}$; $f = 0,3 \text{ с}$).

структуру. Толщина данного слоя составляет 10-15 мкм. При хрупком изломе стали наблюдается расслаивание модифицированного слоя: видны микротрещины, располагающиеся вдоль границы раздела покрытие-металл и слоя со столбчатой структурой-основной объем стали.

Последующее облучение образца электронным пучком субмиллисекундной длительности в режиме многоимпульсного воздействия приводит к плавлению поверхностного слоя. При определенных режимах работы электронного источника наблюдается формирование гладкой поверхности с минимальным количеством микрократеров (рис. 1, б).

Жидкофазное перемешивание покрытия и подложки, выполненное в условиях высокоскоростного нагрева и охлаждения, сопровождается существенным изменением прочностных свойств стали. Анализ профилей микротвердости приповерхностного слоя показывает, что электровзрывное легирование стали алюминием приводит к формированию приповерхностного слоя толщиной ~ 20 мкм с повышенными значениями микротвердости (рис. 2, а, кривая 1). Последующая обработка стали электронным пучком приводит, в зависимости от количества импульсов воздействия, к увеличению толщины упрочненного слоя до 45...60 мкм (т.е. в 2...3 раза), (рис. 2, а, кривые 2-5). Наиболее протяженный слой с высоким уровнем микротвердости фиксируется в материале после 10 импульсов обработки электронным пучком. С увеличением количества импульсов воздействия электронного пучка толщина упрочненного слоя и его твердость снижаются. На профиле микротвердости отчетливо выявляется максимум, положение которого в объеме модифицированного слоя с увеличением количества импульсов облучения смещается к поверхности обработки (рис. 3, б).

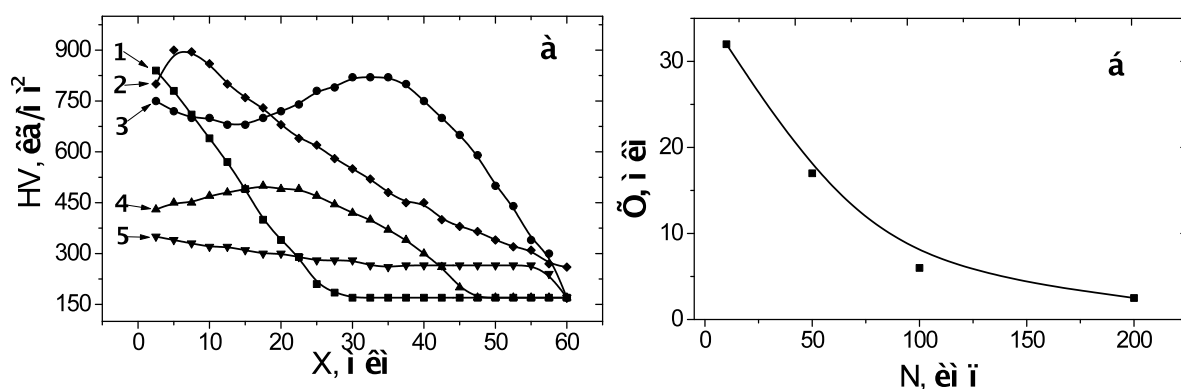


Рис. 2. Профиль микротвердости (а) и положение объемного максимума микротвердости (б) стали Ст.45, подвергнутой ЭВЛ алюминием и последующей электронно-пучковой обработке. На (а) кривая 1 – профиль микротвердости стали после ЭВЛ, кривые 2-5 после ЭВЛ и электронно-пучковой обработки при различном количестве импульсов воздействия электронного пучка ($E_s = 20$ Дж/см²; $\tau = 50$ мкс; $f = 0,3$ Гц); кривая 2 – $N = 100$ имп.; 3 – 10 имп.; 4 – 50 имп.; 5 – 200 имп.

Толщина упрочненного слоя, величина и положение максимума микротвердости в объеме материала, очевидно, связаны с изменением элементного состава и структурно-фазового состояния модифицированного слоя стали.

При анализе поверхности электронно-пучковой обработки данного образца (рис. 3, а) выявляется равноосная структура кристаллизации, средние размеры кристаллитов $d = 250$ нм. Отметим, что при увеличении количества импульсов электронно-пучковой обработки до $N = 200$ имп. выявляется дендритное строение поверхности кристаллизации, средние размеры кристаллитов возрастают до $d = 650$ нм. Данные факты однозначно указывают на снижение скорости охлаждения расплава при увеличении количества импульсов воздействия пучка электронов [3]. При анализе поверхностного слоя методом косого травленого шлифа выявляется ультрадисперсная игольчатая структура, характерное изображение которой приведено на рис. 3, б.

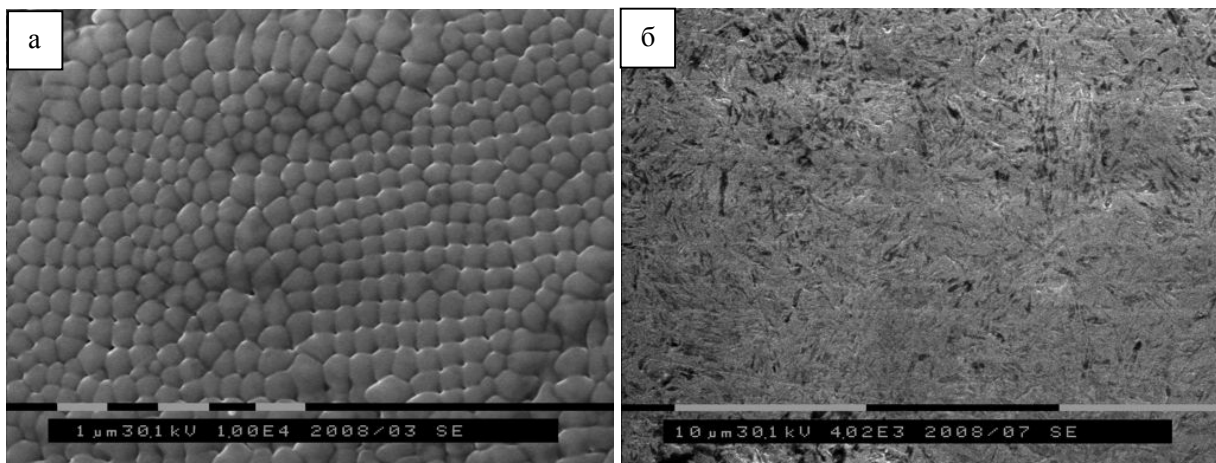


Рис. 3. Структура поверхности (а) и поперечного косо́го шлифа (б) стали Ст.45 после ЭВЛ алюминием и последующей электронно-пучковой обработки; N = 10 имп. воздействия.

Заключение

1. Методами современного материаловедения выполнены исследования структуры и свойств приповерхностного слоя стали Ст.45, подвергнутой электровзрывному легированию алюминием и последующей электронно-пучковой обработке;
2. Установлено, что в результате электронно-пучковой обработки образцов, подвергнутых электровзрывному легированию, наблюдается наноструктурирование поверхности и кратное (в два и более крат) увеличение толщины слоя с повышенным (по сравнению с исходным) значением твердости;

Список использованной литературы

1. Багаутдинов А.Я., Будовских Е.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2007. – 301 с.
2. 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.
3. Мирошниченко И.С. Закалка из жидкого состояния. – М.: Наука, 1982. – 163.