

## СОЗДАНИЕ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ НА ШТАМПАХ СОЧЕТАНИЕМ ЛАЗЕРНОЙ И ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТОК

Девойно О. Г., Кардаполова М. А., Дубовик А. М., Федорук Г. Ф.,  
Лукашевич О. Н.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь,  
[scvdmmed@bntu.by](mailto:scvdmmed@bntu.by)*

Рассматривается вариант комбинированной обработки для формирования износостойких покрытий, включающий в себя сочетание предварительной лазерной обработки и последующего электроискрового легирования.

В результате воздействия лазерного излучения на поверхности образуются параллельно расположенные упрочненные дорожки, которые ложатся с определенным коэффициентом перекрытия. Кроме того, лазерная обработка приводит к насыщению структуры металла двойниками и дислокациями, уменьшению балла зерна, измельчению карбидов. Последующая обработка поверхности методом электроискрового легирования твердосплавным электродом с расположением упрочняющих дорожек перпендикулярно направлению следов лазерной обработки способствует получению слоистых высокоизносостойких слоев с перекрытием неупрочненных зон. Сплошность покрытия при этом составляет 90-100 % и регулируется. Суммарная глубина упрочненного слоя в зависимости от режимов находится в пределах 300-500 мкм.

Основными причинами, вызывающими ограничение глубины упрочненного слоя, являются: накопление внутренних напряжений, в том числе за счет образования в легированном слое новых фаз с различными коэффициентами термического расширения; образование ультрадисперсной структуры [1]. В процессе лазерной обработки и электроискрового легирования фазовые и структурные превращения, происходящие в металлах и сплавах, сопровождаются значительными объемными изменениями и, как следствие, возникают остаточные напряжения [1]. Чаще всего при электроискровом легировании возникают растягивающие напряжения. С увеличением толщины в легированном слое возникают трещины, обусловленные остаточными напряжениями в покрытии [1,2].

Целью работы является изучение влияния предварительной лазерной обработки и последующего электроискрового легирования на комплекс физико-механических свойств.

Для исследований использовались образцы стали X12M в закаленном состоянии [2]. После низкого отпуска при температуре 160°C была получена мартенситная структура. Твердость поверхностного слоя 62...63 HRC, сердцевины 40...45 HRC. Лазерная обработка проводилась на непрерывном лазере Комета-2 с последовательным увеличением энерговыклада. Электроискровое легирование осуществляли на установке ЭФИ – 46А. Установка работает на шести режимах, оснащена генератором импульсов. Для исследований был выбран твердый сплав ВК – 8. Режимы обработки выбирались исходя из рекомендаций [3], где отмечено, что упрочнение инструментальных сталей наблюдается в интервале плотностей энергии 0,5·10<sup>3</sup> - 2·10<sup>3</sup> Дж/см<sup>2</sup>.

Сопоставление полученных данных позволяет сделать вывод о том, что последовательное упрочнение лазером и электроискровое легирование приводит к образованию непосредственно у поверхности высоколегированного слоя, состоящего в основном из карбидов вольфрама WC, W<sub>2</sub>C и карбидов хрома Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>.

Увеличение количества карбидов хрома объясняется тем, что в процессе лазерной обработки поверхности происходит значительная активация поверхности, образуется энергонасыщенный слой с множеством вакансий и дислокаций. Это создает хорошие условия для прямой и обратной диффузии. В результате в процессе электроискрового

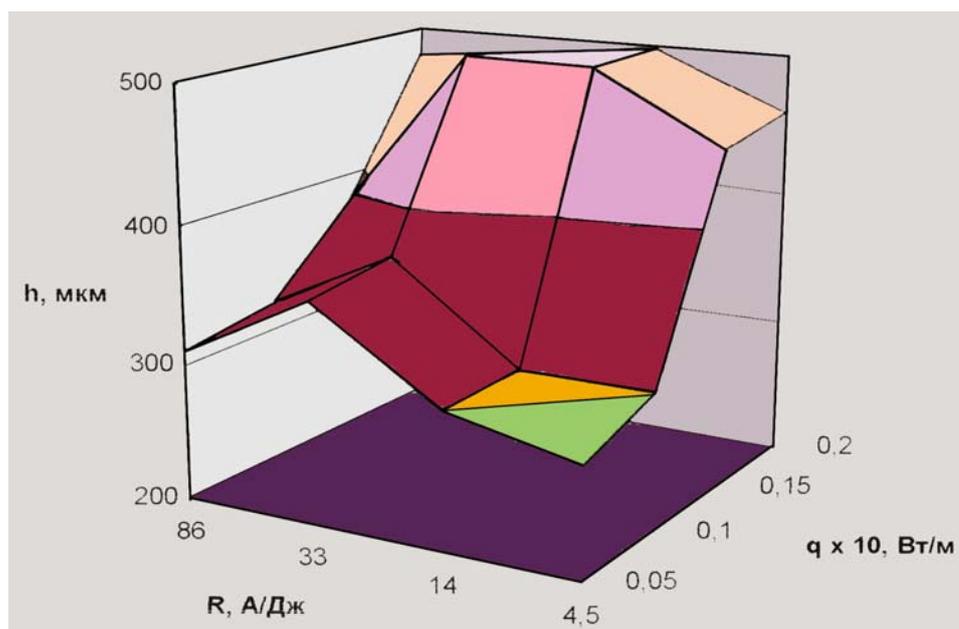
легирования кроме обычной диффузии элементов электрода в активированную подложку наблюдается активная диффузия хрома в зону микрорасплава при электроискровом легировании с образованием карбидов хрома, имеющих текстурированную кристаллическую решетку.

При фазовом анализе обнаружена важная особенность структуры - аксиальная кристаллографическая текстура, то есть преимущественная ориентировка определенного кристаллографического направления большинства кристаллитов покрытия. У фазы  $Cr_7C_3$  к поверхности образца ориентирована плоскость (331), а у карбида  $Cr_{23}C_6$  - плоскость (531) как обычно у кубических структур, нормально поверхности ориентировано направление с теми же индексами (531). Обнаруженное явление аналогично текстуре, обнаруживаемой в диффузионных хромокарбидных слоях после диффузионного хромирования высокоуглеродистых сталей.

Известно, что между степенью совершенства аксиальной кристаллографической текстуры и рабочими свойствами поверхностей (например износостойкостью) существует положительная корреляция.

Изменение микротвердости по глубине образцов подтверждает образование слоистой износостойкой зоны у поверхности глубиной 250...450 мкм с максимальной микротвердостью у поверхности до 16 ГПа и высокой микротвердостью по глубине слоя до 11...12 ГПа.

Суммарная глубина упрочненного слоя в зависимости от режимов находится в пределах 300-500 мкм (рис.1). Причем с увеличением энергии импульса с  $R = 4,5$  А/Дж до  $R = 86$  А/Дж глубина верхнего наносимого слоя возрастает.



**Рис. 1.** Зависимость глубины упрочненного слоя от режимов ступенчатой обработки

Слой состоит из четырех зон. Первая зона – «белый слой», полученный после электроискрового легирования на основе твердого сплава ВК-8. Вторая зона – зона отпуска, незначительная по величине. Третья – зона термического воздействия лазерной обработки, оканчивающаяся четвертой зоной – зоной отпуска. Зоны вторая и четвертая предположительно могут способствовать улучшению демпфирующих свойств материала.

Были исследованы остаточные напряжения в поверхностном слое по оригинальной методике. Результаты показывают, что напряжение во всех упрочненных образцах

имеют положительный знак (растягивающие). Напряжения являются результатом неблагоприятного сочетания упругих деформаций, вызванных быстрым охлаждением, фазовыми превращениями и другими факторами. Истинные значения напряжений не достигают предела прочности твердого раствора, так как отсутствуют микротрещины. В свою очередь при лазерной обработке при плотностях мощности (до  $2 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>) у всех сталей в поверхностном слое формируются растягивающие макронапряжения, и уменьшающиеся у стали Х12М к границе зоны термического воздействия.

При малых плотностях мощности, когда обрабатываемый материал нагревается ниже температуры плавления, в поверхностном слое развиваются довольно большие растягивающие напряжения, причем область их распространения соизмерима с глубиной зоны термического воздействия. С увеличением плотности мощности лазерного излучения, сопровождающимся появлением на поверхности тонкого слоя оплавленного металла, наблюдается снижение растягивающих напряжений и выравнивание их по глубине, и появляются сжимающие напряжения [1].

Сталь Х12М в отличие от сталей ХВГ, У8А,45 при всех плотностях мощности имела растягивающие остаточные напряжения (причем наименьшие при плотности мощности 200 кВт/см<sup>2</sup>) [1]. В работе [1] установлено, что снижение напряжений и более равномерное распределение их по толщине способствует увеличению толщины покрытия, его адгезионной прочности.

Для оценки остаточных напряжений в упрочненном слое после ступенчатой обработки использовались образцы из стали Х12М. Гистограмма прогибов образцов при различных условиях обработки приведена на рисунке 2.

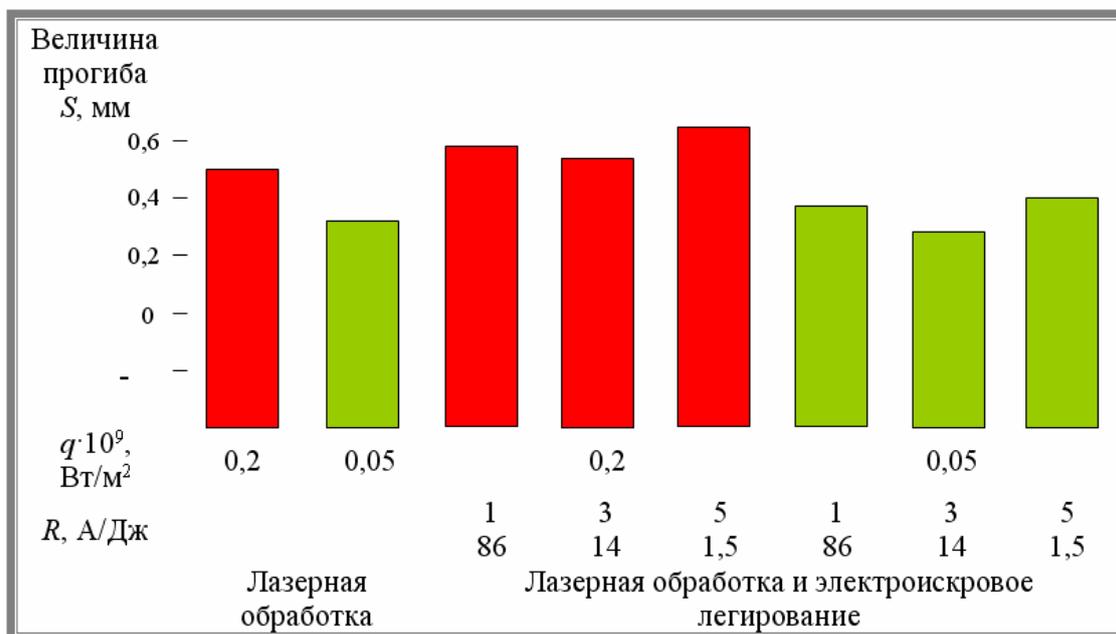


Рис. 2. Величина прогиба образцов при различных видах обработки

### Выводы

Обобщая проведенные исследования можно сделать вывод, что в результате ступенчатого упрочнения лазерной обработкой с последующим электроискровым легированием в приповерхностном слое возрастает количество карбидов хрома; вновь образовавшиеся карбиды хрома обладают достаточно совершенной аксиальной текстурой; предварительная лазерная обработка электроискровых покрытий позволяет получить мелкодисперсную структуру материала подложки, что исключает значительный рост зерна и, следовательно, появление микротрещин; в результате последующего электро-

искрового легирования у поверхности образуется слоистая износостойкая зона глубиной 250...450 мкм с максимальной микротвердостью у поверхности до 16 ГПа и высокой микротвердостью по глубине слоя до 11...12 ГПа; в приповерхностном слое формируются растягивающие напряжения, причем в образцах, упрочненных лазером с электроискровым легированием несколько ниже, чем в образцах без лазерной обработки, что позволяет предположить о влиянии лазерной обработки на суммарные напряжения.

### Список литературы

1. Коваленко В.С., Верхотуров А.Д., Головкин Л.Ф., Подчерняева И.А. Лазерное и электроэрозионное упрочнение материалов. М.: Наука, 1986. 276 с. 2. Полевой С.Н., Евдокимов В.Д. Упрочнение металлов : справочник. – М.: Машиностроение, 1986. 320 с. 3. Верхотуров А.Д., Подчерняева И.А., Прядко Л.Ф., Егоров Ф.Ф. Электродные материалы для электроискрового легирования. – М.: Наука, 1988.- 224 с.

## ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПЛАЗМЕННАЯ ПОЛИМЕРИЗАЦИЯ

Хамчуков Ю. Д.

*ИТА НАН Беларуси, Витебск. Беларусь,*  
[Khamch@tut.by](mailto:Khamch@tut.by)

Создание наноразмерных функциональных покрытий методами вакуумных ионноплазменных технологий представляет способ создания наноструктурных материалов для получения макросвойств у изделий, изготовленных с их применением. В данной работе будут рассмотрены некоторые физические и химические аспекты формирования тонких функциональных покрытий с использованием ионноплазменных методов, допускающих модификацию получаемых покрытий по составу и структуре. Основу для таких покрытий могут составить структуры, образованные углеродом и политетрафторэтиленом.

Существует метод получения защитных покрытий, который примыкает к реактивному осаждению. Это полимеризация в плазме. В этом методе формирование структурных элементов материала покрытий, веществ, составляющих этот материал, осуществляется благодаря диссипации потоков подводимой энергии [1]. Книга, с одноименным названием [1], содержит данные, имеющие значительный интерес для развития теоретических основ синтеза полимеров в разряде. Во-первых, тлеющий разряд низкого давления рассмотрен на микро и макроуровнях, проведена связь скорости осаждения полимерных пленок на поверхность твердых тел с их структурой и свойствами. Во-вторых, модели процесса полимеризации, протекающей по ступенчатому механизму, рассмотрены с привлечением структурных и энергетических характеристик мономеров, свойств и параметров тлеющего разряда в реакторах проточного типа. Важным представляется и автором неоднократно подчеркивается уникальность полимеров в виде тонких пленок, полученных полимеризацией в плазме. Для них наблюдается существенное (на порядок) превосходство диэлектрических характеристик над соответствующими характеристиками полимеров, полученных традиционными способами. Впервые обобщен в книге опыт исследования структуры и свойств плазмополимеризованных пленок методами ИК спектроскопии, рентгеноэлектронной спектроскопии.