

3. Получение требуемых свойств материалов по текстурированной структуре, создание материалов с заданной анизотропией свойств.

Решение этих задач в полной мере невозможно без расчета теплофизических параметров, характеризующих процесс вакуумно-плазменного нанесения покрытий. Поэтому целесообразно разработать математическую модель процесса теплофизического взаимодействия частицы с основой, учитывающую особенности формирования таких покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Елютин, В. П. О механизме сцепления плазменных покрытий с подложкой / В. П. Елютин, В. И. Костиков, Ю. А. Шестерин // ФХОМ. – 1969. – №3. – С. 23–25.
2. Дубасов, А. И. Термический цикл в контакте между напыляемой жидкой частицей и подложкой / А. И. Дубасов, В. В. Кудинов // ФХОМ. – 1970. – № 5. – С. 19–22.
3. Дубасов А., И. Термическое взаимодействие частиц с подложкой при нанесении покрытий напылением / А. И. Дубасов, В. В. Кудинов, М. Х. Шоршоров // ФХОМ. - 1971. – №6. – С. 29–34.
4. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 487 с.
5. Иванов, Е. М. Теплофизика процессов плазменного напыления защитных покрытий / Е. М. Иванов // ФХОМ. — 1982. — № 4. —С. 60–64.

УДК 621.793.79

Чигринова Н.М.¹, Ловыгин С.И.²

МЕХАНИЗМЫ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ В ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ПОКРЫТИЯХ ПРИ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ИНТЕНСИВНОСТИ И ОЧЕРЕДНОСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

1. Белорусский национальный технический университет

2. ОХП Институт сварки и защитных покрытий

Минск, Беларусь

В статье приведены результаты исследования комплексного влияния параметров интегральной обработки, включающей электроискровое легирование материала с ультразвуковым воздействием, на структурообразование сформированного при этом покрытия, при изменяющейся интенсивности и очередности электромеханических воздействий. Показано, что преимущественное влияние на механизмы структурообразования обработанного указанным методом материала оказывает ультразвуковая активация обрабатываемой поверхности.

Введение

Одной из основных задач современного промышленного комплекса является внедрение в производство новых технологий, позволяющих значительно увеличить срок службы производственного оборудования, свести к минимуму затраты на ремонт вышедших из строя деталей машин и механизмов, решить задачи ресурсосбережения и импортозамещения. Это становится возможным в случае применения упрочняющих и восстановительных технологий.

Развитие техногенной цивилизации инициирует как разработку новых, так и оптимизацию уже известных технологий. К числу современных методов поверхностной

обработки металлических поверхностей относится электроискровое легирование (ЭИЛ), позволяющее получать поверхностные структуры с уникальными физико-механическими и трибологическими свойствами.

Типовая технология электроискрового легирования достаточно успешно применяется для защиты рабочих поверхностей деталей машин и оборудования, металлорежущего инструмента и штамповой оснастки от интенсивного абразивно-механического износа вследствие формирования в критических зонах износостойких покрытий на основе твердосплавных материалов или специально синтезированных интерметаллидных систем.

Этот процесс экономичен, его отличает существенно меньшая энергоемкость и стоимость покрытия по сравнению с газотермическими и ионно-плазменными методами, лазерной обработкой, а также отсутствие возможных потерь первоначальных свойств изделия из-за проведения операций нанесения ЭИЛ-покрытий при низкотемпературных режимах.

Однако в типовом методе ЭИЛ, несмотря на многочисленные исследования и разработки по его совершенствованию, и сегодня имеются нерешенные задачи. Выпускаемое специализированное оборудование имеет ограниченный набор характеристик по мощности, диапазону регулирования частоты и амплитуды колебаний электрода, что приводит к получению покрытий с нерегулярной структурой, неравнотолщинностью, высокой шероховатостью и пористостью, малой толщине наносимого слоя покрытия, ограничивая тем самым область их применения.

Успешным разрешением множества из перечисленных выше проблем, не устраняемых типовым методом ЭИЛ, является разработка технологии, сочетающей электроискровое легирование с дополнительным ультразвуковым воздействием на материал (ЭИЛ с УЗВ) на разных стадиях формирования функциональных покрытий [1]. Именно данный метод позволяет получать покрытия улучшенного качества, со сниженным уровнем напряжений в структуре, без их последующей механической доработки. При этом обеспечивается более высокая степень упрочнения материала с одновременным снижением уровня остаточных напряжений в нем, уменьшение количества механических и структурных дефектов, стабилизация структуры и рельефа обрабатываемой поверхности.

Использование ультразвука в качестве дополнительного воздействия на анодно-катодные составляющие процесса активизирует поверхности анода и катода, интенсифицируя тем самым диффузионные потоки в контактной области и стабилизируя их, уплотняет и выравнивает поверхность, на которой под воздействием ультразвуковой обработки формируется более равнотолщинный и однородный слой более мелких (благодаря ультразвуку) капель материала анода [2].

Материалы и методы исследований

Исследования по изучению влияния роли и периодичности применения ультразвука при комбинированной ЭИЛ+УЗВ обработке металлических поверхностей выполнялись с использованием установки «Alier-55» и разработанного ультразвукового устройства, состоящего из генератора, блока питания и ультразвукового преобразователя (рис. 1).

Нанесение покрытий производилось по нескольким схемам, позволяющим зафиксировать различия в механизмах структурообразования при типовом легировании стальной основы – ЭИЛ и комбинированной обработке, сочетающей электроискровой метод и дополнительное ультразвуковое легирование – ЭИЛ с УЗВ, осуществляется на разных стадиях образования покрытий.

Эксперименты осуществляли на установке «Alier-55», обрабатывая поверхность с энергией импульсов 4,3 Дж и частотой их следования 100 Гц, и ультразвуковым устройстве с энергией импульсов 4,3 Дж и частотой следования импульсов 22 кГц.

В качестве образцов-катодов использовались кубики размером 10x10x10 из конструкционной стали 45. Легирующими анодами выбраны электроды из титановольфрамкобальтового сплава Т15К6. Выбор этого материала обусловлен возможностью формирования гетерогенной структуры покрытий с наиболее высокой и равномерной микротвердостью по сечению – в верхних упрочненных зонах ее значения достигают 19000 – 21000 МПа, а также большей термостойкостью карбидов титана по сравнению, например, с карбидами вольфрама, и менее интенсивным выгоранием углерода при массопереносе карбидов на поверхность металлической основы. Этот выбор и более высокие характеристики поверхности при обработке стальной основы данным легирующим анодом связан со структурными изменениями, происходящими в процессе ЭИЛ – с образованием метастабильных фаз с мелкокристаллической и аморфной структурой при высоких скоростях охлаждения.

О механизмах и особенностях структурообразования, определяемых не только энерго-механическими режимами обработки, но в значительной степени динамикой и стабильностью процессов массопереноса материала анода на катод, можно косвенно судить по характеру и интенсивности прироста массы образцов-катодов.

Поэтому с целью контроля происходящих при различных схемах изменений указанного параметра использовали гравиметрический метод, производя измерение массы катода через каждую минуту легирования при помощи весов аналитических марки АДВ-200 с погрешностью $\pm 2 \times 10^{-4}$ г.

Толщину полученных покрытий определяли с использованием микрометра МК 0-25 с точностью до 0,01 мм.



Рис. 1. Ультразвуковое устройство:

- 1 – ультразвуковой генератор; 2 – наконечник с электродом; 3 – концентратор;
- 4 – пьезопластины; 5 – установка «Alier-55»; 6 – обрабатываемая деталь;
- 7 – вибратор установки «Alier-55» (частота 600 Гц)

Результаты и их обсуждение

При исследовании закономерностей формирования поверхностного слоя электродными материалами из твердых сплавов в первой группе образцов, обработанных типовым методом ЭИЛ, установлена их явная зависимость от состава, исходной структуры и изменения параметров серийного оборудования [3].

В этом случае на сталях формируется упрочненный слой, имеющий структуру твердых растворов и легирующих элементов в железе с выделением дисперсных частиц фаз легирующих элементов. При этом в материале сохраняются мелкое зерно и достаточно высокая плотность дислокаций [4, 5]. Покрытия, полученные после такой обработки, в основном аустенитные. За счет выделения большого количества теплоты у поверхности металла происходит быстрое его насыщение атомами химических элементов легирующего электрода и газовой среды с образованием новых фаз (карбидов, интерметаллидов), что подтверждается рентгенофазовым анализом. Согласно данным рентгенофазового анализа в состав эвтектики входят карбиды типа Me_3C [4].

Исследование влияния ЭИЛ на фазовый состав покрытий показало, что обработка электродом Т15К6 приводит к появлению в поверхностном слое карбида титана (TiC) с кубической решеткой [6]. При этом в сечении покрытий присутствуют три структурные зоны: зона исходного зарождения, на поверхности упрочняемого образца (мелкодисперсная структура); зона роста в перпендикулярном плоскости образца направлении с образованием столбчатых зерен, замедляющегося по мере приближения к свободной поверхности покрытия; зона дендритов с более дисперсной морфологией. Встречаются участки дендритов, окруженных аустенитно-карбидной эвтектикой.

Следует подчеркнуть, что структурообразование при ЭИЛ характеризуется формированием структур сверхбыстрой закалки, при этом фиксируется метастабильное высокотемпературное состояние металла или сплава, и таким образом кинетика процессов, описываемая в равновесных условиях кристаллизации диаграммами состояния, нарушается.

Покрытие, сформированное стандартным ЭИЛ имеет неоднородную структуру, с большим количеством пор, каверн и микротрещин (рис. 2). Топография упрочненных по данной схеме слоев отличается большим количеством структурных несовершенств, оплавленных участков с микротрещинами, раковин и каверн с показателем сплошности около 75 %, и увеличенной пористостью. На поверхности сформированного покрытия обнаруживаются частицы материала анода размером 0,5–1,0 мм



Рис. 2. Микроструктура покрытия, полученного типовым ЭИЛ

Это объясняется тем, что материал анода, как правило, представляет собой сплав, который под воздействием энергии электроразрядной плазмы в период ЭИЛ расплавляется весьма неравномерно и при механическом биении анода о поверхность катода разновеликие отрывающиеся капли, оседая на упрочняемую поверхность и кристаллизуясь, формируют неравномерные по толщине и шероховатости покрытия. При этом, чем крупнее капля, чем толще создаваемое покрытие, тем больше различия в коэффициентах теплопроводности и теплоотвода между осевшей каплей материала анода и поверхностью катода, что и вызывает появление трещин [1]. Это и приводит к формированию электроискровых покрытий с большим количеством дефектов на поверхности.

Покрытие, сформированное с применением УЗВ независимо от его очередности в процессе его формирования – плотное, сплошное, без пропусков и структурных несовершенств (рис. 3). При изучении особенностей структурообразования в таких покрытиях отмечается высокая степень упрочнения материала, что иллюстрируется топографией их поверхности, где протяженные участки, соседствующие с зонами, насыщенными карбидами, представляют собой либо мелкодисперсную фазу, либо являются участками с аморфной структурой (рис. 3).

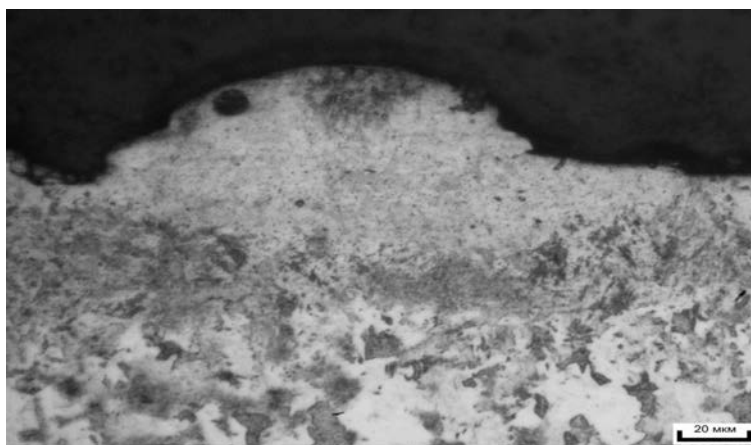


Рис. 3. Микроструктура покрытия, полученного комбинированным методом по схеме ЭИЛ+УЗВ

Анализ очередности УЗ-воздействия на характер структурообразования в анодно-катодной зоне выполняли при изучении *SEM-изображений* топографии покрытий, полученных по однократной схеме ЭИЛ+УЗВ и многократной обработке ЭИЛ+УЗВ, выполненных на сканирующем электронном микроскопе MIRA.

В случае формирования покрытия в один слой по схеме ЭИЛ+УЗВ за один проход зафиксирован очень тонкий рельеф поверхности с меньшей шероховатостью, нежели в покрытии, сформированном без применения УЗВ или по многократной схеме ЭИЛ+УЗВ (рис. 4).

Из представленных *SEM-изображений* видно, что обработанная однократно по схеме ЭИЛ+УЗВ поверхность содержит мелкодисперсные включения, которые представляют собой диспергированные карбиды титана, вольфрама и кобальта и отдельные карбидные конгломераты в виде двойных и тройных карбидных систем (рис. 4, а).

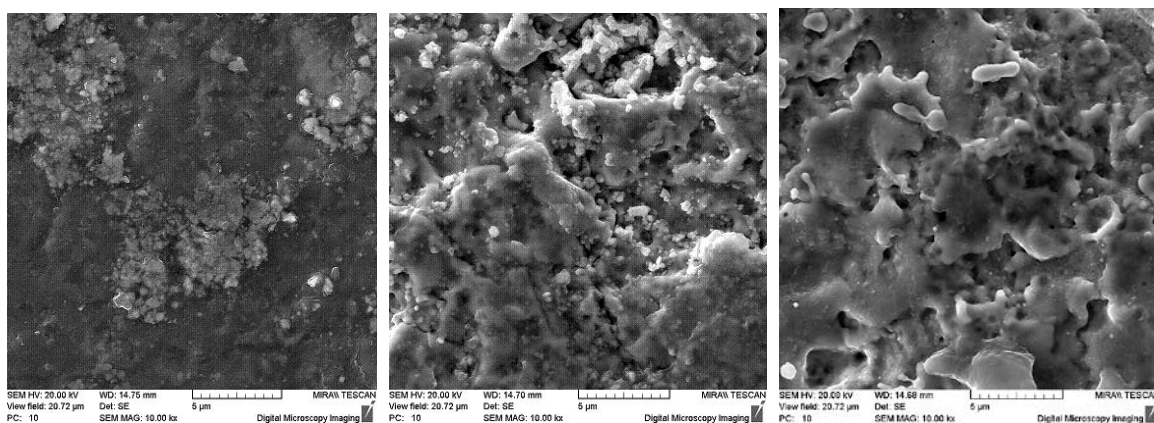


Рис. 4. Топография поверхности покрытия на поверхности стали 45, полученного электродом Т15К6:

а) ЭИЛ + УЗВ (однократно); б) ЭИЛ + УЗВ (многократно); в) без применения УЗВ

При изучении топографии многослойного покрытия, сформированного согласно многократной схеме ЭИЛ+УЗВ, установлено, что при данной обработке создается покрытие с более значительными перепадами рельефа поверхности и различным характером формы элементов микронеровностей и, в связи с этим, существенно большей шероховатостью. Это вызвано, по всей вероятности, накоплением микродефектов покрытия во время многоциклового электроискровой обработки в процессе многократной ЭИЛ+УЗВ, что сказывается на окончательном качестве сформированной поверхности покрытия (рис. 4, б). Кроме того, такие слои покрытия содержат поры, количество которых возрастает с увеличением содержания углерода в электродах. Механизм появления пор обусловлен выделением газа СО при «кипении» расплава. Количество и размер пор существенно уменьшается по мере приближения к стальной основе.

Заключение

Выявлена очевидная зависимость характера структурообразования электроискровых покрытий от величины энергетического и механического воздействий на материал катода. При увеличении уровня энергетического воздействия и сочетании выбранного электрического режима обработки (5-04, с энергией импульса 1,8 Дж) и электродного материала (титановольфрамкобальтовый сплав Т15К6) обеспечивает *жидко-капельный характер* переноса его на катод, и, как следствие, позволяет формировать электроискровые покрытия увеличенной толщины.

Установлено, что ультразвуковое воздействие частотой 22 кГц в операциях нанесения электроискровых покрытий позволяет формировать покрытия с существенно меньшим объемом структурных несовершенств, со сплошностью 100 %. На поверхности покрытия видимые дефекты не наблюдаются, структура поверхности мелкодисперсная, отсутствует сквозная пористость.

При этом очередность дополнительной ультразвуковой обработки также оказывает заметное влияние на качество и рельеф образуемого покрытия, что позволяет управлять процессом формирования функциональных покрытий прогнозируемого качества.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чигринова, Н. М. Интенсификация процессов микро-плазмоискрового упрочнения и восстановления металлических изделий повышенной точности электромеханическим воздействием / Н. М. Чигринова. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. 310 с. с приложениями на 265 с. Минск. Октябрь 2010.

2. Чигринова, Н. М. Роль ультразвука в механизмах анодно-катодных взаимодействий при электроискровом легировании / Н. М. Чигринова, С. И. Ловыгин, В. Е. Чигринов // Наука и техника. – 2016. – Т. 15, № 5. – С. 380 – 390.

3. Лазаренко, Б. Р. Электроискровой способ изменения исходных свойств металлических поверхностей [текст] / Б. Р. Лазаренко, Н. И. Лазаренко // М.: Изд-во АН СССР, 1958. – 117 С.

4. Машков, Ю. К. Исследование наноструктурных покрытий, синтезируемых методом электроискровой обработки [текст] / Ю. К. Машков, Д. Н. Коротаев, М. Ю. Байбарацкая, Б. Ш. Алимбаева // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85. – №. 10. – С. 75–79.

5. Коротаев, Д. Н. Субструктурное поверхностное упрочнение деталей трибосистем методом электроискрового легирования [текст] / Д. Н. Коротаев, Е. В. Иванова // Перспективные материалы. – 2011. – №. 2. – С. 98–102.

6. Верхотуров, А. Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании [текст] / А. Д. Верхотуров // – Владивосток: Дальнаука, 1995. – 323 С.

УДК 621.923.4

Шелег В.К.¹, Жигалов А.Н.²

**ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ УДАРНОЙ НАГРУЗКИ
ПРИ ПРЕРЫВИСТОМ РЕЗАНИИ НА СТОЙКОСТЬ ТВЕРДОСПЛАВНОГО
ИНСТРУМЕНТА, УПРОЧНЕННОГО АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ ЗВУКОВЫМ
МЕТОДОМ**

1. Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

2. Барановичский государственный университет

Барановичи, Беларусь

Показаны результаты экспериментальных исследований влияния интенсивности распределения припуска в пределах заданного поля допуска обрабатываемых заготовок на износ режущего зуба фрезы, упрочненного аэродинамическим звуковым методом (АДУ). Показано, что метод АДУ значительно расширяет технологические возможности твердосплавных пластин, позволяя вести ими обработку при прерывистом резании при более тяжелых, с наличием большого количества ударов и значительной величины изменяющегося припуска, условиях, при которых производитель пластин не рекомендует их применение.

Процесс прерывистого резания, связанный со входом и выходом режущей кромки инструмента в процессе обработки, является сложным процессом резания, который протекает в наиболее тяжелых условиях из-за явлений удара при врезании инструмента в заготовку и выходе из нее, частого циклического изменения температурного поля на режущем клине инструмента при рабочих и холостых ходах, неблагоприятного расположения режущего клина инструмента в процессе стружкообразования и других явлений [1]. Особенно явно проявляются явления, свойственные процессам прерывистого резания, при фрезеровании. Значительное снижение стойкости при прерывистом резании не позволяет в ряде случаев обрабатывать заготовки большой площади, с требуемой производительностью, без смены инструмента. Подобные случаи на производстве оборачиваются не только потерей времени и дополнительными затратами, но и снижением качества обработанной поверхности, а в отдельных случаях приводят к браку. Процесс прерывистого резания является сложным и многофакторным процессом, кото-