

материала полезно также предоставить обучающемуся возможность не только высказать свою точку зрения, но и подтвердить свое понимание изучаемого содержания. Одним из наиболее действенных способов повышения эффективности усвоения теоретического материала является использование видеотрегментов, которые бы подкрепляли информацию конкретным визуальным представленным примером.

Таким образом, можно сделать вывод, что для повышения восприятия и понимания студентами теоретического материала необходимо использовать интересные методы изложения материала, включать обучающихся в работу и вести с ними активный диалог, который сопровождается различными афоризмами, примерами из жизни и видеотрегментами.

УДК 621.762.4

Кривошеев Е.А.

**МОДИФИКАЦИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО  
ПОРОШКОВОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ  
НА НЕГО КОМПРЕССИОННЫМИ  
ПОТОКАМИ ГЕНЕРИРУЕМЫМИ  
КВАЗИСТАЦИОНАРНЫМ ПЛАЗМЕННЫМ  
УСКОРИТЕЛЕМ**

*БНТУ, Минск*

*Научный руководитель Асташинский В.М.*

Актуальность исследований обусловлена проблемой улучшения эксплуатационных свойств порошковых газотермических покрытий, которые находят все более широкое применение. Улучшение свойств может быть достигнуто модифицированием структуры нанесенных материалов. При локальном варьировании структуры создаются предпосылки оптимального сочетания свойств различных участков покрытий. Оптимальное сочетание соответствует функциональному назначению нанесенных материалов. Эффективное модифицирование структуры покрытий без изменения свойств подложки возможно путем их обработки высококонцентрированными потоками энергии. К основным направлениям такой обработки относятся следующие технологии: 1) плазменное оплавление

130

покрытий; 2) воздействие импульсами плазмы; 3) оплавление электронным лучом; 4) оплавление лазерным лучом.

После оплавления плазмой увеличивается размер основной фазы твердого раствора с уменьшением микротвердости покрытия. Вместе с тем снижается пористость с возрастанием макротвердости. Снижение пористости, активизация диффузионных процессов при плазменной обработке обуславливают получение плотного покрытия с повышенной когезионной и адгезионной прочностью. Одним из недостатков рассмотренной технологии является наличие зоны термического влияния на основном металле изделия.

Указанный недостаток отсутствует при обработке покрытий импульсами плазменной струи. Источником импульсных потоков может служить плазменный инжектор с коаксиальной системой электродов. Плазмообразующий газ – азот, величина запасаемой энергии в емкостном накопителе –  $9 \times 10^3$  Дж. Другим примером импульсно-плазменной обработки является способ нанесения твердых покрытий, запатентованный ОАО «Череповецкий сталепрокатный завод». Другим примером импульсно-плазменной обработки является способ нанесения твердых покрытий, запатентованный ОАО «Череповецкий сталепрокатный завод». Одним из разработчиков оплавления электронным лучом является Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск. Оплавление покрытия электронным лучом осуществляется в вакууме (0,3 Па) с применением сканирующего пучка электронов от пушки с плазменным катодом. Манипулятор образцов и изделий располагается внутри вакуумной камеры и позволяет вращать и продольно перемещать изделия относительно электронной пушки. Обработка напыленного сплава Ni–Cr–B–Si–Fe–C–Al (Ni – основа) производится при следующем режиме: ускоряющее напряжение 28 кВ, ток луча 30 мА, скорость перемещения подложки  $1,3 \times 10^{-3}$  м/с, луч развернут в линию. Подложка перемещается нормально развертке луча.

Ширина оплавляемого валика покрытия  $(3-10) \times 10^{-3}$  м, толщина при односторонней обработке  $(0,3-3) \times 10^{-3}$  м.

Металлографические структурные исследования показали, что при обработке электронным лучом имеет место полный переплав материала. Электронно-лучевая обработка приводит к получению

более дисперсной, чем при оплавлении плазмой, структуры твердого раствора, являющегося как правило связующей фазой в композиционных покрытиях.

Снижение пористости, активизация диффузионных процессов при электронно-лучевой обработке способствуют получению плотного покрытия с повышенной прочностью. Оптимальный режим обработки характеризуется образованием микрокристаллических структур в покрытии и граничной с подложкой зоне с замедлением диффузии элементов из подложки в покрытие. Оптимальному режиму соответствуют достаточно высокие значения микротвердости на поверхности, плавное изменение микротвердости в сечении покрытия, граничной зоне и подложке. Одним из недостатков рассмотренной технологии является возможность перегрева поверхностных слоев покрытия.

Что касается лазерного оплавления, то, изменяя параметры излучения и оптимизируя его, достигают минимальной диффузии элементов из подложки, получают плотное покрытие с гладкой поверхностью, дисперсной микроструктурой и необходимой для эксплуатации деталей адгезионной прочностью. Патентование лазерного оплавления имеет место в России и практически во всех развитых странах Западной Европы, США, Японии, что свидетельствует о широком применении упомянутого процесса. В качестве примеров можно привести патенты России, касающиеся способа получения защитного покрытия на изделии из жаростойкого (жаропрочного) сплава и способа обработки поверхностей трения, а также патент Германии, касающийся процесса изготовления сегментообразных режущих покрытий.

Структура оплавленных лазером слоев характеризуется дисперсностью, отсутствием окисных включений и пор. Оплавленная зона отличается несколько меньшими значениями микротвердости по сравнению с плазменным напылением. Следует отметить, что характер распределения легирующих элементов по глубине оплавленной зоны характеризуется равномерностью, за исключением границы зоны оплавления.

Эта важная особенность лазерной обработки, обеспечивающей кратковременное расплавление напыленного слоя и последующее охлаждение с высокими скоростями, что способствует сохранению

легирующих элементов, содержащихся в предварительно нанесенных напылением покрытиях, и их равномерному распределению в объеме наплавки. К недостаткам лазерной обработки относятся низкий коэффициент преобразования энергии луча в тепловую и малая производительность процесса.

С учетом проведенного анализа можно отметить следующее: основные тенденции развития упрочняющей обработки газотермических покрытий высококонцентрированными потоками энергии проявляются в создании технологий воздействия на покрытия потоком плазмы, а также импульсами плазменной струи, электронным и лазерным лучами с целью оплавления и уплотнения напыленных материалов, управления и модифицирования их структуры; обработка импульсами плазменной струи, электронным и лазерным лучами с большими скоростями нагрева и охлаждения локальных объемов покрытия позволяет модифицировать структуру напыленного материала с ее упрочнением без формирования зоны термического влияния на основном металле изделия, что исключает нежелательное изменение свойств подложки.

Воздействие серий импульсов компрессионных плазменных потоков позволяет осуществлять послойную обработку пористых напыленных покрытий с постепенным их оплавлением по всей толщине за счет повышения теплопроводности предыдущих и преимущественного нагрева неуплотненных последующих глубинных слоев. При этом достигается возможность существенного повышения работоспособности наиболее распространенных износостойких покрытий. Такая возможность реализуется за счет формирования износостойкой структуры поверхностных слоев и получения структуры с упрочненными когезионными и адгезионными связями граничных с подложкой слоев покрытий.