

Пиролитический графит растворялся в жидком Si с образованием SiC (в присутствии дисперсных добавок).

Состав и толщина исходных покрытий в полученных порошках – композициях определялись режимами распыления и скоростью осаждения конденсата, что позволяло получать слоистое покрытие кристаллов алмаза в виде наноструктурных слоев из SiC, Si + C, Al и пиролитического графита. Регулирование технологическими параметрами распыления осуществляли в пределах  $U = 450–650$  В,  $I = 1,8–2,5$  А. Локализация плазмы в прикатодном пространстве обеспечивает получение большой плотности ионного тока и высоких скоростей распыления при низких рабочих давлениях. Использовали индукции неоднородного магнитного поля в диапазоне 0,03–0,05 Тл при давлении плазмирующего газа (аргона) 0,3–0,6 Па, что обеспечивает саморегулирование магнитной системы за счет использования двухсекционной катушки. Это открывает возможности управления процессом распыления и стабилизации разряда независимо от вида распыляемого материала от металлов (Al, Ti, Ni, Co, Cu, Mo и т.д.) до графита и кремния. Осаждение конденсата происходит при пониженной кинетической активности и зарядности, что обеспечивает формирование покрытия при низких температурах (не выше 70 °С). Высокая теплопроводность ( $\lambda$  более 1000 Вт/м·К) алмаза создает условия аморфизации конденсируемых тонкопленочных (10–20 нм) покрытий из смеси наночастиц и кластеров кремния и углерода.

Образование аморфного SiC объясняется известными структурными моделями – кристаллической, поровой и кластерной, а для тонких покрытий удачно описывается моделью Бернала, которая предполагает отсутствие взаимного проникновения атомов. Максимально допустимая толщина, при которой в покрытия Si+C формируется аморфная структура, составляет 20 нм на кристаллах АСМ14/10, что определяется интенсивностью отвода тепла для создания условий формирования аморфной структуры ( $v = 60$  °С/моль).

УДК 621.793

## **ПОЛУЧЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ СЛОИСТЫХ ПОКРЫТИЙ НА ФЕРРОАБРАЗИВНЫХ ПОРОШКАХ МАГНЕТРОННЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ**

В.Н. Ковалевский, д-р техн. наук, проф., С.В. Григорьев,  
А.Е. Жук, Л.Ф. Керженцева, канд. техн. наук, доц.  
Белорусский национальный технический университет  
(г. Минск, Республика Беларусь)

Целью работы являлось исследование процессов модифицирования поверхности частиц порошков на железной основе при магнетронном напылении композиционных катодов, а также разработка процессов получения ферро–

абразивных порошков – композитов со слоистыми покрытиями для магнитно-абразивной обработки.

Получение ферроабразивных порошков – композитов для магнитно-абразивной обработки, обеспечивающей шероховатость поверхности в пределах  $Ra = 0,7–2$  нм, сводится к созданию на поверхности ферромагнитных частиц (ферросилиция или феррохрома ПХ30) покрытия, в котором сочетается высокая твердость, стойкость к истиранию, способность выдерживать ударные нагрузки о поверхность обрабатываемых материалов (например, пластин кремния).

Для создания порошков используется комбинированная технология, сочетающая технологию модифицирования и упрочнения поверхности ферромагнитных частиц и технологию вакуумного нанесения абразивных нанопокровтий SiC за счет магнетронного распыления композиционных катодов, имеющих в составе кремний, углерод, алюминий и никель в разных вариантах.

На равномерность нанесения слоистого покрытия оказывает влияние форма поверхности порошка. Порошки ферросилиция в исходном состоянии имели каплевидную форму, в то время как порошки феррохрома в исходном состоянии имели чешуйчатую форму. Чешуйчатая форма частиц порошка не является оптимальной для процессов нанесения покрытий на поверхность частиц из-за сложностей с перемешиванием частиц при магнетронном напылении, а также неравномерностью нанесения материала покрытия на частицы порошка сложной формы.

Для придания порошку феррохрома формы, близкой к округлой его подвергали обработке пропусканием через высокотемпературную струю установки газопламенного напыления с охлаждением обработанного порошка в воде. Основная масса частиц приобрела форму, близкую к сферической, однако, часть частиц, которая находилась вне зоны высокой температуры газовой струи осталась чешуйчатой или имела каплевидную форму. В результате данной обработки удалось значительно повысить текучесть порошка и улучшить равномерность нанесения покрытий.

При нанесении покрытий одним из важных этапов является предварительная активация поверхности порошков. Активация поверхности порошков в тлеющем разряде на магнетронной установке происходила в условиях остаточной атмосферы (8–15 Па) при выпрямленном токе ( $U \sim 1500$  В,  $I = 50$  мА) в процессе механического перемешивания частиц порошка. Перемешивание порошка проводили с частотой вращения 25–30 мин<sup>-1</sup> в специальном устройстве в вакуумной камере на расстоянии 100–120 мм от композиционного катода. Эффект обработки зависел от продолжительности процесса.

Использование тлеющего разряда для распыления композиционного катода и создание атомарного потока из смеси атомов Si и C, а также Al на поверхности ферромагнитного порошка при низких температурах (80–120 °С) позволяла формировать износостойкие покрытия толщиной до 160–200 нм из кремния и углерода без химического взаимодействия.

При конденсации многокомпонентных (Si+C+Al) составов на поверхности частиц порошка создаются условия для реализации принципа отдельного синтеза.

Последующая термообработка порошка – композита в интервале температур 850–900 °С в засыпке порошка оксида алюминия приводит к реакционному спеканию в покрытии кремния с углеродом с образованием  $\alpha$ -SiC.

Последовательное нанесение на ферромагнитные частицы нанослоев Ni, а затем Al позволило оценить степень взаимодействия компонентов при нагреве в dilatометре до 1000 °С. Установлен интервал температур при котором образуется алюминид никеля, использование которого при создании порошков – композитов обеспечит отсутствие взаимодействия SiC с железом.

УДК 621.762.8

## **ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ТВЕРДЫЙ СПЛАВ – КОМПОЗИТ (АЛМАЗ – SiC)**

В.Н. Ковалевский, д-р техн. наук, проф.,  
А.Е. Жук, А.В. Ковалевская, канд. техн. наук, доц.,  
Д.Г. Сачава, И.В. Фомихина, канд. техн. наук старш. научн. сотр.  
Белорусский национальный технический университет  
(г. Минск, Республика Беларусь)

Использование субмикронных вольфрамо–кобальтовых твердых сплавов (НЗФ, К01, ТSM05) в промышленной технологии получения инструмента – волокна для волочения высокопрочной проволоки позволяет повысить стойкость рабочей поверхности инструмента и качество проволоки в 1,5–2 раза. Конструирование на макро и микро–уровне позволяет управлять структурообразованием компонентов с учетом сопрягаемости поверхностей (инженерия поверхности), возможна реализация высоких свойств алмаза на истирание с обеспечением повышения жаропрочности его за счет конструкции КМ (алмаз – SiC). Композиционный материал алмаз – SiC – вольфрамо – кобальтовый сплав сочетает в себе свойства и твердого сплава и алмаза – высокую вязкость разрушения, локальную прочность и высокую твердость

В работе выполнены исследования по оценке возможности создания в наиболее нагруженной зоне волокна композиционного материала твердый сплав – композит (алмаз – SiC). С этой целью на порошок АСМ 14/10 наносили покрытие (SiC), а затем сплав ЭП 131, а полученные порошки – композиты смешивали с гранулами твердого сплава с соотношением 50:50 объем %. Полученную смесь исследовали на dilatометре при нагреве до 1400 °С по режиму: 20 °С–300 °С – 5 град/мин от 300 °С до 400 °С – 2 град/мин, при 400 °С и 1400 °С с выдержкой в течение 1 часа. На dilatограмме обнаружено присутствие