

УДК 621.9.004.12 (035)

В. А. Оковитый, зав. лаб., д-р техн. наук, **Ф. И. Пантелеенко**, д-р техн. наук, проф.

В. А. Асташинский, В. В. Оковитый

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

Тел./Факс: (017)293-92-23; E-mail: scvmed@bntu.by

ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА В СИСТЕМЕ ПОКРЫТИЕ-ОСНОВАНИЕ НА ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ НЕРАВНОВЕСНЫХ СТРУКТУР ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

В работе рассмотрены вопросы влияния температуры в системе базового покрытия на формирование элементов неравновесных структур композитных плазменных покрытий. При этом установлено, что получение неравновесного состояния структуры возможно с использованием плазменных покрытий с особыми параметрами процесса, обеспечивающего сверхбыстрое охлаждение частиц расплавленного материала. Следует отметить, что возможности процессов получения таких структур в плазменных покрытиях не достаточно исследованы. Это относится в первую очередь к покрытиям из композитных порошков на основе керамики.

Ключевые слова: температурный режим, основание системы, неравновесная структура, параметры процесса, плазменное покрытие

INFLUENCE OF TEMPERATURE REGIME IN THE COATING-BASIS SYSTEM FOR FORMING ELEMENTS OF NON-EQUILIBRIUM STRUCTURES OF PLASMA COATINGS

The paper studied the influence of temperature in the base-coat system on the formation of elements of nonequilibrium structures of composite plasma coatings. Production of non-equilibrium state of the structure is possible with plasma spraying coatings with specific process parameters, ensuring ultra-fast cooling of the melt particles sprayed material. It should be noted that the possibilities and processes for producing such structures in the plasma sprayed coatings are not well understood. This applies primarily to the coatings from composite powders based on ceramics.

Keywords: temperature mode, the system cover-base, non-equilibrium structure, process parameters, plasma coating

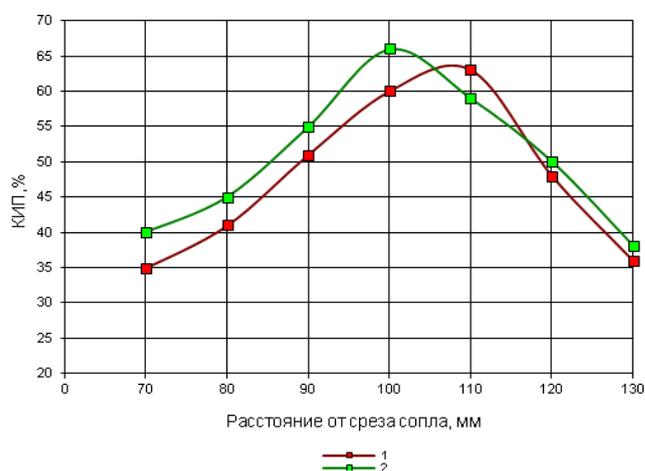
Введение. Получение неравновесных состояний структур возможно при плазменном напылении покрытий с определенными технологическими параметрами, обеспечивающими сверхбыстрое охлаждение расплава частиц напыляемого материала. Необходимо отметить, что возможности и процессы получения таких структур при плазменном напылении покрытий изучены недостаточно. Это относится прежде всего к покрытиям из композиционных порошков на основе керамики [1-8].

Учитывая актуальность проблемы, целью представленных исследований является изучение процессов и разработка технологических основ формирования неравновесных структур плазменно - напыленных композиционных частиц на основе керамики. Для достижения поставленной цели предусмотрено исследовать влияние температурного режима напыления на формирование таких структур плазменных покрытий из керамических порошков. Решение указанных задач нашло отражение в представленном статье. При этом в качестве объекта исследований служили плазменные покрытия $Al_2O_3-Cr_2O_3-TiO_2$ –твердая смазка, перспективные для защиты деталей от изнашивания в неблагоприятных условиях трения при граничной смазке, повышенных контактных нагрузках и температурах.

При обосновании технологических приемов проанализированы возможности увеличения количества соударяющихся с подложкой композиционных частиц порошка в жидкофазном состоянии, т.е.увеличение мощности дуги плазматрона. Это можно

достичь за счет оптимизации режимов напыления или применением специальной насадки плазматрона конструкции БНТУ [9]. В процессе плазменного напыления действует большое число факторов, оказывающих влияние на свойства получаемых покрытий. Важнейшими из них при прочих равных условиях являются: расход плазмообразующего и транспортирующего газов, расход распыляемого порошка, дисперсность порошка, ток электрической дуги (подводимая мощность), дистанция напыления.

Оптимизация параметров напыления. Оптимизация параметров напыления проводилась на основании получения максимального коэффициента использования материала [10-12]. На оптимальных режимах для $Al_2O_3 - Cr_2O TiO_2+15\%$ ($MoS_2 - Ni$) (расход плазмообразующего газа водорода -8 л/мин, расход плазмообразующего газа аргона -40 л/мин ток- 450А, дистанция напыления-100 мм, фракция порошка 40-63 мкм, расход порошка 2,5 кг/час, относительная скорость перемещения подложки $V_{п-300}$ мм/с) получены покрытия с КИМ-66%.



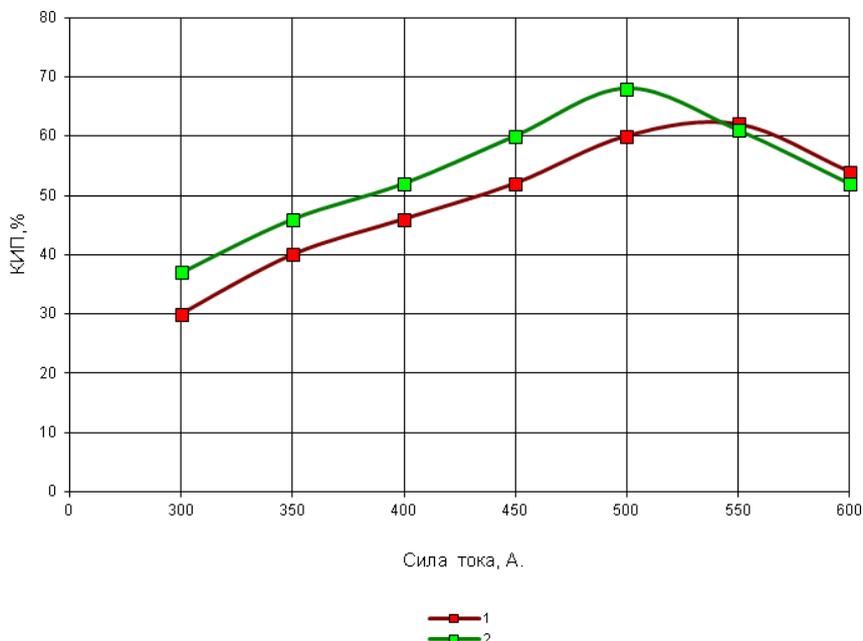
1 - с фракцией 63...100 мкм ; 2 - с фракцией 40...63 мкм;
($I=450$ А, $R_{Ar}=50$ л/мин , $R_{H_2}=8$ л/мин, $R_{пор.}=2,5$ кг/час)

Рисунок 1. Зависимость КИМ, % от дистанции напыления L , мм для порошков $Al_2O_3 - Cr_2O TiO_2+15\%$ ($MoS_2 - Ni$)

Согласно известным режимам напыления композиций $Al_2O_3 - Cr_2O TiO_2+15\%$ ($MoS_2 - Ni$), оптимизированным по коэффициенту использования распыляемого порошка, мощность дуги плазматрона составляет 37,5 кВт [13]. Для аморфизации структуры покрытий предусмотрено повышение мощности от 37,5 до 48 кВт. Верхний предел обусловлен, как показали предварительные эксперименты, чрезмерным перегревом и последующим разбрызгиванием соударяющихся с подложкой частиц.

Общий недостаток плазматронов - интенсивное турбулентное перемешивание потока плазмы с окружающим холодным газом, что приводит к уменьшению скорости и снижению температуры частиц напыляемого материала. В результате возрастает вероятность появления недогретых частиц в зоне формирования покрытия. А также протекание неконтролируемых химических реакций с воздухом. Плазматрон с насадкой позволяет улучшить защиту плазменного потока от воздействия атмосферы. Внутри насадки вдоль ее стенок через систему отверстий в концевой части в насадку подается нагретый инертный газ (Ar). Воздух вокруг плазменной струи вытесняется,

происходит дополнительное сжатие плазмы, в результате чего в покрытии снижается содержание кислорода и повышается эффективность осаждения материала.



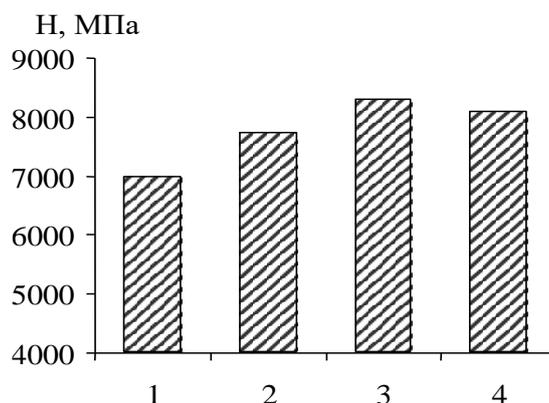
1- с фракцией с фракцией 63...100 мкм; 2- с фракцией 40...63 мкм;
($L=100$ мм; $R_{Ar}=50$ л/мин, $R_{H_2}=8$ л/мин $R_{пор.}=2,5$ кг/час)

Рисунок 2. Зависимость КИП, % от силы тока электрической дуги I , для порошков $Al_2O_3-25\%TiO_2-25\%Cr_2O_3-15\%MoS_2$

Перечисленные преимущества плазмотрона с насадкой способствуют возрастанию эффективности нагрева и увеличению количества соударяющихся с подложкой композиционных частиц порошка в жидкофазном состоянии. Одновременно снижается нагрев подложки, что ускоряет теплоотвод и охлаждение на ней жидкофазных частиц. Все это относится к положительным факторам аморфизации формируемого покрытия. Вместе с тем существенным недостатком насадки является трудоемкость ее изготовления. В источнике [14] подробно описан плазмотрон с насадкой, разработанный в БНТУ(Минск).

Регулирование температурного режима. Что касается регулирования температурного режима путем изменения тепловой ситуации на подложке, то оно предусмотрено за счет варьирования толщины наносимого композиционного покрытия и дополнительного охлаждения подложки струей сжатого воздуха. В первом случае скорость охлаждения частиц покрытия на подложке регулируется объемом порового пространства наносимой композиции, затрудняющего теплоотвод от жидкофазных частиц вглубь покрытия. Во втором случае наряду со струей сжатого воздуха возможно дополнительное охлаждение подложки за счет ее контакта с металлом, характеризующимся высокой теплопроводностью. Практический опыт такого охлаждения известен в сварочном производстве. Вместе с тем его реализация как при сварке-наплавке, так и при плазменном напылении затрудняется решением проблем, обусловленных созданием скользящего контакта при нанесении покрытий на

цилиндрических поверхностях широкой номенклатуры деталей, обычно вращающихся в процессе нанесения. При варьировании температурного режима критерием оценки степени неравновесности (аморфизации) покрытий служит возрастание микротвердости. Режимы плазменного напыления композиционных покрытий с варьированием температурного режима в системе "напыленные частицы - подложка" приведены на рисунках 1 и 2. Согласно изменениям тока мощность дуги плазмотрона изменяется от 22,5 до 45 кВт плазмотрона. Результаты исследований, полученные по разработанной методике, приведены на рисунке 3. Приведенные на рисунке 3 экспериментальные данные представляют собой усредненные значения микротвердости. Согласно рисунку 3 при повышении мощности дуги плазмотрона до 37,5 кВт происходит практически монотонное увеличение микротвердости напыленных покрытий. Это объясняется более интенсивным прогревом распыляемых частиц в осевой зоне плазменной струи. Возрастает количество соударяющихся с подложкой композиционных частиц порошка в жидкофазном состоянии. Создаются благоприятные начальные условия для сверхбыстрого охлаждения жидкофазных частиц на подложке с аморфизацией структуры формируемого покрытия и увеличением его микротвердости. Вместе с тем дальнейшее повышение мощности дуги плазмотрона до 45 кВт вызывает снижение степени аморфизации и уровня микротвердости покрытия, что, очевидно, связано с возрастающим перегревом и эффектом разбрызгивания соударяющихся с подложкой частиц. По мнению специалистов соударяющиеся с подложкой расплавленные частицы деформируются и затвердевают в виде дисков толщиной до 15 мкм при скоростях охлаждения, обеспечивающих аморфизацию (значительная деформация при существенном уменьшении толщины и увеличении площади растекания расплющенной частицы активизирует ее теплообмен с подложкой). В случае разбрызгивания вторичные частицы с пониженной температурой и приближенной формой тел вращения практически не деформируются и затвердевают на подложке при скоростях охлаждения, которые на два порядка меньше, чем в предыдущем случае. Это вызывает снижение степени аморфизации и уровня микротвердости покрытия. Наряду со снижением степени аморфизации при разбрызгивании возможны потери композиционного материала с нежелательным уменьшением коэффициента ис-



1, 2, 3, 4 – мощности дуги плазмотрона 22,5 кВт, 30, 37,5 и 45 кВт;

Рисунок 3. Средние значения микротвердости напыленных покрытий Al_2O_3 -25% TiO_2 -25% Cr_2O_3 -15% MoS_2 в зависимости от нагрева частиц в плазменном потоке

пользования распыляемого порошка. Таким образом, для увеличения количества неравновесных (аморфизированных) элементов структуры покрытий Al_2O_3 -25% TiO_2 -25% Cr_2O_3 -15% MoS_2 . оптимальное значение мощности дуги плазмотрона составляет 37,5 кВт.

С учетом вышеизложенных результатов исследований нанесены плазменные покрытия Al_2O_3 -25% TiO_2 -25% Cr_2O_3 -15% MoS_2 , напыленные по оптимизированной технологии, способствующей аморфизации структуры нанесенных композиций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стабильные и метастабильные равновесия в металлических системах / под ред. М. Е. Дриц. М. – 1995.
2. Достанко, А. П. Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники / А. П. Достанко, С. П. Кундас, С. В. Бордусов, М. Н. Босяков, И. В. Свадковский, А. Ф. Ильющенко, Л. П. Ануфриев, Lugscheider E. – Минск, 2000. – Т. 1.
3. Аморфные металлические материалы / под ред. А. И. Манохина. – М., 1994.
4. Витязь, П. А. Теория и практика нанесения защитных покрытий. / П. А. Витязь, В. С. Ивашко, А. Ф. Ильющенко, А. И. Шевцов, Е. Д. Манойло – Минск, 1998.
5. Ильющенко, А. Ф. Формирование газотермических покрытий: теория и практика / А. Ф. Ильющенко, В. А. Оковитый, С. П. Кундас, Б. Форманек. – Минск: Беспринт, 2002. – 480 с.
6. Ильющенко, А. Ф. Формирование износостойких плазменных покрытий на основе композиционных самосмазывающихся материалов / А. Ф. Ильющенко, В. А. Оковитый, А. И. Шевцов. – Минск: Беспринт, 2005. – 253 с.
7. Витязь, П. А. Основы нанесения износостойких, коррозионностойких и теплозащитных покрытий / П. А. Витязь, А. Ф. Ильющенко, А. И. Шевцов – Минск: Беларус. наука, 2006. – С. 205-243, 280-300, 314-351.
8. Ильющенко, А. Ф. Плазменные покрытия на основе керамических материалов / А. Ф. Ильющенко, В. А. Оковитый, А. И. Шевцов. – Минск: Беспринт, 2006. – 316 с.
9. Пат. на полезную модель. 10210 Респ. Беларусь, МПК Н 05Н 1/00 / Оковитый В. В. – № и 20131083; заявл. 18.12.2013, опубл. 30.08.2014// Афіцыйны бюл. Нац. цэнтр інтэлектуал. Уласнасці №4.
10. Оковитый, В. А. / Плазменные износостойкие покрытия с включением твердой смазки / В. А. Оковитый // Сварочное производство –М., 2002. – №6. –С.41-43, 19.
11. Okovity, V. Plasma wear-resistant coatings with inclusions of a solid lubricant/ Okovity V // J. Welding International.– 2003. – vol.16. – № 11.– P. 918-920.
12. Okovity, V. A. Paramets optimization for plasma spraying and pulsed plasma treatment of surface layers of gas-thermal composite coatings based on multifunctional oxide ceramics / V. A. Okovity. A. I. Shevtsov, V. V. Okovity, V. M. Astashinsky, E. A. Kost-yukevich // High Temperature Material Processes – 2014. – 18(1–2). –P. 45–62.
13. Оковитый, В. А. Оптимизация процесса напыления износостойких покрытий на основе многофункциональной оксидной керамики / В. А. Оковитый, А. Ф. Пантелеенко // “Обработка металлов” – Новосибирск, 2015. – №2(67). – С. 46-54.

Поступила в редколлегию 17.06.2017 г.