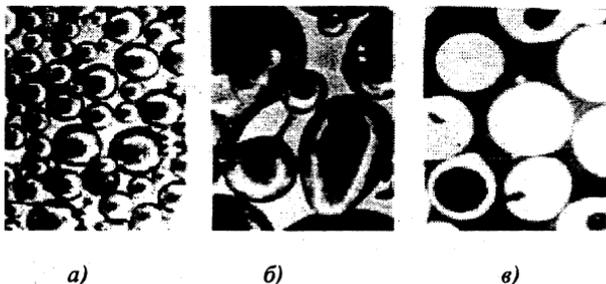


## ДЕФЕКТЫ ПОКРЫТИЙ И НАДЕЖНОСТЬ МАТЕРИАЛА ВОССТАНОВЛЕННОЙ ДЕТАЛИ

*Полоцкий государственный университет  
Новополоцк, Беларусь*

Металлические покрытия представляют собой сложные многокомпонентные неравновесные системы, обладающие избыточной свободной энергией, обусловленной наличием в слоях большого количества микро— и макродефектов структуры в частицах присадочного материала.

Макродефекты — поры и включения в порошковых композициях. Их существование непосредственно связано с границами раздела фаз «твердое тело — газ». Микродефекты распределены с некоторой плотностью в окрестностях макродефектов и обеспечивают локальное термодинамическое равновесие системы порошковый слой — основа. По мере нагревания системы в ней возникают сложные физико—химические процессы, направленные в соответствии с общими принципами термодинамики в сторону уменьшения избыточной свободной энергии. Интенсивность этих процессов возрастает с повышением температуры и существенно зависит от наследственных свойств наносимого порошка (микро— и макродефектов, химически взаимодействующих реагентов и т. д.). На рис. 1 представлены форма и строение частиц порошка различных сплавов.



*Рис. 1. Форма и строение частиц порошка:*

- а) ПГ—СР4 (фракция менее 200 мкм); б) ПГ—СР2 фракция (400–500 мкм);  
в) внутренние поры в частицах порошка ПГ—СР3 ( фракция 200–300 мкм).*

Покрытие, получаемое напылением — это слоистый материал, состоящий из деформированных напыленных частиц, соединенных между собой по контактными поверхностями сварными участками. Напыленный слой формируется из мельчайших

капелек металла сферической формы, покрытых снаружи, в момент удара их о поверхность материала детали, окисной пленкой. Капельки при ударе деформируются и в результате схватывания с основой закрепляются на поверхности.

Структура слоя, сформированного за один проход, неоднородна и определяется различными размерами и энергетическим состоянием — температурой и скоростью частиц, находящихся в периферийной и центральной зоне двухфазового потока, состоящего из частиц порошка и газа. Образование покрытия последовательной укладкой множества деформирующихся частиц неизбежно приводит к появлению микропустот, в первую очередь, на стыках частиц. Покрытие формируется в атмосфере, поэтому микропустоты заполняются газом, что ухудшает свойства границ. Вследствие большой шероховатости покрытия, быстрого растекания и кристаллизации частиц, в зоне контактов с поверхностью ранее нанесенных частиц остаются дефекты и полости, которые образуются также вследствие выделения газов, растворенных в расплавленных частицах [1].

Структура и свойства покрытия зависят от гранулометрического состава напыляемого порошка. С уменьшением размера частиц порошка улучшается заполнение покрытия: плотность его увеличивается, объем микропустот уменьшается, строение покрытия становится более однородным.

К числу дефектов напыленных покрытий относятся отслоение или вздутие покрытия из—за его плохой адгезии к основному металлу, трещины, сплошная пористость, низкая твердость, неоднородность структуры и др.

Для газопламенного напыления часто используются порошки системы Ni—Cr—B—Si, которые являются самофлюсующимися. Покрытия имеют слоистую структуру, и свойства покрытий отличаются от свойств компактных материалов. Для таких покрытий характерны: пониженная прочность сцепления на границах между частицами и слоями, обусловленная неполным схватыванием, а также повышенным содержанием оксидов, нитридов, пор и различных включений в пограничных областях; пористость, возникающая в результате газовыделения и кристаллизации частиц с высокими скоростями, а также выплеска материала покрытия при ударе частиц об основу [2]. Наибольшей пористостью характеризуются поверхностные слои покрытия и слои, прилегающие к основе. Покрытия имеют различную твердость и микротвердость по поверхности и глубине, неоднородный химический состав, большое количество составляющих микроструктуры. В отдельных частицах и во всем покрытии формируются значительные внутренние напряжения, приводящие к образованию микротрещин.

Прочность сцепления газотермических покрытий с поверхностью определяется совместным влиянием структурных дефектов границы раздела и остаточными напряжениями в ее плоскости. Структурные дефекты возникают из—за неполного контакта деформированных напыленных частиц с напыляемой поверхностью и непол-

ного развития физико—химических связей между контактирующими поверхностями. Остаточные напряжения обусловлены в основном различными теплофизическими и физико—механическими свойствами материалов покрытия и основы, а также разной их зависимостью от температуры [3—5].

В процессе наплавки как в наплавленном металле, так и в околошовной зоне могут возникать дефекты [4,6—9], которые снижают эксплуатационную способность наплавленного металла. Дефекты различают по месту расположения и причинам возникновения.

К первой группе относят дефекты, образующиеся в связи с особенностями металлургических и тепловых процессов наплавки: трещины, поры, шлаковые включения и др.

Ко второй группе относят дефекты, возникающие из—за нарушений режима наплавки, неисправности оборудования, низкой квалификации персонала: подрезы, подвороты, наплывы, отслоения и др.

Наиболее распространены при наплавке трещины. Их подразделяют на кристаллизационные, холодные и околошовные. Кристаллизационные трещины возникают в процессе первичной кристаллизации наплавленного металла и их расположение, как правило, совпадает с направлением роста столбчатых кристаллитов. Физическая неоднородность металла покрытия связана с несовершенством его кристаллической решетки. Особенно много дефектов возникает при дендритной кристаллизации, характерной для наплавленного металла. Ветви дендритов имеют различную пространственную ориентацию, а кристаллиты — блочную структуру, усиливаемую из—за скопления между ветвями дендритов примесей и дислокаций. При наплавке кристаллизующийся металл находится под воздействием растягивающих напряжений, возникающих вследствие несвободной усадки наплавленного металла, который в процессе охлаждения подвержен пластической деформации. При кристаллизации некоторое время металл находится в твердожидком состоянии. Если нарастание напряжений опережает повышение пластичности металла, возникают межкристаллические разрушения. Если же процесс нарастания напряжения происходит тогда, когда металл уже прошел твердожидкое состояние и приобрел достаточную прочность и пластичность, то возникшие напряжения лишь вызовут пластическую деформацию и образование кристаллизационных трещин не произойдет [2,6].

Холодные трещины в наплавленном металле образуются при сравнительно невысокой температуре ( 200 °С). Они возникают тогда, когда металл, казалось бы, уже приобрел высокие прочностные свойства. Характерная черта появления холодных трещин — замедленное их развитие в течение нескольких часов и даже суток. Затем при достижении определенной величины трещины развиваются мгновенно, взрывоподобно, с характерным звуковым эффектом. Холодные трещины возникают как по границам зерен, так и по телу зерна.

Околошовные трещины подразделяют на горячие и закалочные. Горячие трещины при некоторых условиях образуются во время наплавки на участках сплавления и перегрева околошовной зоны. Трещины развиваются по границам зерен основного металла и могут распространяться в наплавленный слой. Образование горячих трещин в околошовной зоне объясняют сосредоточением на границах зерен вредных примесей, образующих легкоплавкие включения и прослойки. Закалочные трещины в околошовной зоне появляются в результате возникновения напряжений, обусловленных образованием мартенсита и высоких давлений, создаваемых водородом, заполнившим микроскопические пустоты в кристаллических решетках.

Поры в наплавленном металле представляют собой округлые пустоты, расположенные отдельными группами или цепочками внутри металла и на его поверхности. Поры возникают в процессе первичной кристаллизации. Шлаковые включения образуются вследствие плохой очистки от шлака поверхности предыдущих слоев при многопроходной наплавке; затекания шлака в несплошности металла, возникающие в результате подворотов, наплывов и других дефектов; применения электродов с чрезмерно тугоплавким покрытием; большой скорости наплавки и т. д. Размеры шлаковых включений могут быть от микроскопических до частиц диаметром несколько миллиметров [6, 10]. Форма их бывает округлой и вытянутой.

Качество покрытия при наплавке по слою порошка под флюсом в значительной степени зависит от толщины порошкового слоя. При толщине слоя порошка более 6–9 мм нарушается устойчивость дуги, в наплавленном металле появляются такие дефекты, как наплывы и несплавления [11].

Детали машин и элементы конструкций обычно содержат как врожденные дефекты и трещины, так и возникшие при обработке, изготовлении и транспортировке; все они подчиняются некоторой закономерности распределения по количеству и размерам. Это распределение в совокупности с локальным напряженным состоянием и средой определяют потенциальные центры возникновения трещины. Чаще всего трещина берет начало от какого-нибудь небольшого поверхностного дефекта детали по истечении инкубационного периода конечной продолжительности. Затем трещина растет под совместным влиянием приложенной нагрузки и окружающей среды. После того как трещина достигла критической глубины, происходит быстрое разрушение.

Отказ материала с покрытием в значительной степени определяется наличием дефектов в металле и материале покрытия, а также их взаимодействие с частицами присадочного материала. Механическая обработка таких деталей приводит к изменениям структуры поверхностного слоя; ранее скрытые дефекты и поры выходят на поверхность, являясь очагами разрушения [12, 14]. Наличие дефектов обусловлено как технологией изготовления изделия, так и эксплуатацией его. Н.А. Махутов и др. предложили [13, 15] непровары, поры, несплавления и другие дефекты при расчетах показателей надежности рассматривать как трещины. Если обозначить критический

размер дефекта  $a_c$ , размер дефекта в момент времени  $t$  —  $a_t$  и считать их фиксированными случайными величинами, то вероятность безотказной работы  $R(t)$  материала с покрытием можно представить в виде вероятности:

$$R(t) = 1 - F(t) = P\{a_t, J a_c\} = \int_0^1 [1 - F(a_t, Q_t)] f_c(a_c, Q_c) da_c,$$

где  $F(t)$  — функция распределения ресурса;  $f_c(a_c, Q_c)$  — плотность распределения критического размера дефекта;  $Q_c, Q_t$  — векторы параметров распределения, зависящие от времени  $t$  [15]. В качестве аппроксимирующей функции плотности распределения размера дефекта можно использовать: двухпараметрический закон Вейбулла — Гнеденко, распределение Эрланга, законы нормального и равномерного распределения. Размер критического дефекта можно найти через характеристики статической трещиностойкости. Функция риска  $h(t)$  определяется из выражения

$$h(t) = F'(t) / (1 - F(t)),$$

где  $F'(t)$  — производная функции распределения ресурса по времени  $t$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Анциферов В.Н., Бобров Г.В., Дружинин Л.К. и др. Порошковая металлургия и напыленные покрытия. — М.: Металлургия, 1987. — 792 с.
2. Клименко С.А., Муковоз Ю.А., Полонский Л.Г. и др. Точение износостойких защитных покрытий. — Киев: Техника, 1997. — 142 с.
3. Куприянов И.Л., Геллер М.А. Газотермические покрытия с повышенной прочностью сцепления. — Мн.: Наука и техника, 1976. — 234 с.
4. Витязь П.А., Ивашко В.С., Манойло Е.Д. и др. Теория и практика газопламенного напыления. — Мн.: Наука і тэхніка, 1993. — 295 с.
5. Витязь П.А., Ивашко В.С., Ильющенко А.Ф. и др. Теория и практика нанесения защитных покрытий. — Мн.: Беларуская навука, 1998. — 583 с.
6. Шехтер С.Я., Резницкий А.М. Наплавка металлов. — М.: Машиностроение, 1982. — 71 с.
7. Ивашко В.С., Куприянов И.Л., Шевцов А.И. Электротермическая технология нанесения защитных покрытий. — Мн.: Наука і тэхніка, 1996. — 375 с.
8. Шипко А.А., Поболь И.Л., Урбан И.Г. Упрочнение сталей и сплавов с использованием электронно-лучевого нагрева. — Мн.: Наука і тэхніка, 1995. — 280 с.
9. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н. Оборудование и технология лазерной обработки материалов. — М.: Высш. шк., 1990. — 159 с.
10. Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление. — М.: Машиностроение, 1985. — 240 с.
11. Дорожкин Н.Н., Петюшев Н.Н. Дуговая газопорошковая наплавка. — Мн.: Беларусь, 1989. — 94 с.
12. Завистовский В.Э. Механика разрушения и прочность материалов с покрытиями. — Новополоцк: Изд-во ПГУ, 1999. — 144 с.
13. Филонов И.П., Медведев А.И. Вероятностно-статистические методы оценки качества в машиностроении. — Мн.: Тесей, 2000. — 128 с.
14. Завистовский В.Э. Физические основы расчета на надежность восстановленных деталей машин // Современные методы проектирования машин. Расчет, конструирование и технология

изготовления. Сборник научных трудов. Вып.1. В 3—х Т.— Т.2. — Мн.: УП «Технопринт», 2002.— с.358— 360. 15. Махутов Н.А., Кокшаров И.И., Лепихин А.М. Применение численных методов расчета показателей надежности элементов конструкций с повреждениями // Проблемы прочности, 1991, № 5.— с. 3 – 8.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (2002 год, грант Т01—088).

УДК 621.793.1

И.А. Иванов, И.С. Фролов, Ж.А. Мрочек, С.А.Иващенко

## **ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА ХОЛЛОВСКОГО ИСПАРИТЕЛЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ТОЛЩИНЫ И МИКРОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТИ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ КОНДЕНСАТОВ**

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

Среди различных факторов, влияющих на функциональные свойства вакуумно-плазменных защитных покрытий, является толщина и микрогеометрия поверхности осажденного слоя. В камерах электродуговых вакуумных установок плотность потока материала расходуемого электрода неоднородна по объему вакуумной камеры. Исследованию пространственно-временного распределения толщины покрытий на поверхности металлизированных деталей посвящен ряд работ [1, 2]. Для случая однокомпонентного плазменного потока разработаны номограммы определения толщины покрытия в зависимости от расположения образца в камере установки. Однако, случаи осаждения многокомпонентных потоков и влияние пространственного распределения их плотности на другие технологические параметры покрытий не исследовались.

Цель статьи — исследовать влияние пространственного распределения плотности плазменного потока электродуговых испарительных устройств на формирование толщины и микрогеометрии поверхности многокомпонентных вакуумных конденсатов, оценить влияние различных факторов и предложить эффективные меры по увеличению равномерности формируемых покрытий.

Схема эксперимента проводимого для оценки влияния положения детали в вакуумной камере на некоторые свойства и технологические параметры вакуумных элек-