

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ  
МЕЗОСТРУКТУРНОУПОРЯДОЧЕННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ**© 2011 В.И. Богданович<sup>1</sup>, В.А. Барвинок<sup>1</sup>, И.А. Докукина<sup>1</sup>, В.Г. Небога<sup>2</sup><sup>1</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)<sup>2</sup>ФГУП ГНП РКЦ “ЦСКБ-Прогресс”, г. Самара

Поступила в редакцию 12.05.2011

В статье рассмотрены особенности формирования структурны плазменных газотермических покрытий, получившей название мезоструктурноупорядоченной. Показано влияние этой структуры на обеспечение высоких эксплуатационных свойств при переменных механических и термических нагружениях поверхности. На основе математического моделирования процесса удара и последующего пластического деформирования напыляемой частицы получено аналитическое соотношение, устанавливающее связь степени деформации частицы и коэффициента ее объемной трансформации со скоростью частицы и механическими характеристиками для случая пластического упрочняемого материала.

Ключевые слова: плазменные мезоструктурноупорядоченные покрытия, удар, пластическое деформирование, прочность связей, дислокации, математическое моделирование

Известно [1, 2], что плазменные газотермические покрытия нашли достаточно широкое применение для защиты поверхности ответственных деталей различных изделий машиностроения от высокотемпературной газовой коррозии (теплозащитные и термобарьерные покрытия), от повышенного износа поверхностей трения (износостойкие и антифрикционные покрытия), от повышенной газовой, пылевой или каплеударной эрозии (эрозионностойкие покрытия) и т.д. Такое многофункциональное применение плазменных покрытий для защиты конструкционных материалов от воздействия различных внешних факторов связано с возможностью использования в этом методе очень широкой номенклатуры напыляемых порошковых материалов и возможностью выбора наиболее эффективного материала для конкретных условий эксплуатации изделий, а также связано с высокой технологичностью метода и возможностью управления эксплуатационными свойствами покрытий в процессе их нанесения [1-4]. Однако, высокая эффективность плазменных покрытий в снижении мощности воздействия внешних

факторов на конструкционный материал в значительной степени определяется и особенностями их структуры.

В настоящей статье рассмотрены особенности формирования структуры плазменных газотермических покрытий из порошковых материалов, ее влияние на эксплуатационные свойства изделий с покрытиями и, на основе результатов математического моделирования процесса пластического деформирования напыляемых частиц при ударе, сформулированы рекомендации по получению мезоструктурноупорядоченных плазменных покрытий с экстремальным комплексом эксплуатационных свойств.

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТРУКТУР  
И ИХ ВЛИЯНИЕ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ  
ИЗДЕЛИЙ**

Характерная структура плазменного газотермического покрытия толщиной (0,3-0,6) мм имеет слоистый характер и состоит из дискообразных кристаллитов, расположенных вдоль поверхности конструкционного материала, горизонтальных и вертикальных границ между кристаллитами и микропустот (закрытых пор), расположенных в области вертикальных границ кристаллитов (рис. 1 а,б). Толщина каждого дискообразного кристаллита составляет (2-10) мкм и в (10-20) раз меньше его характерного горизонтального размера. Вертикальные границы кристаллитов ограничены с двух сторон монолитным материалом других дискообразных кристаллитов. В связи с этим покрытие не имеет сквозных пор, а процентное содержание закрытой пористости варьируется

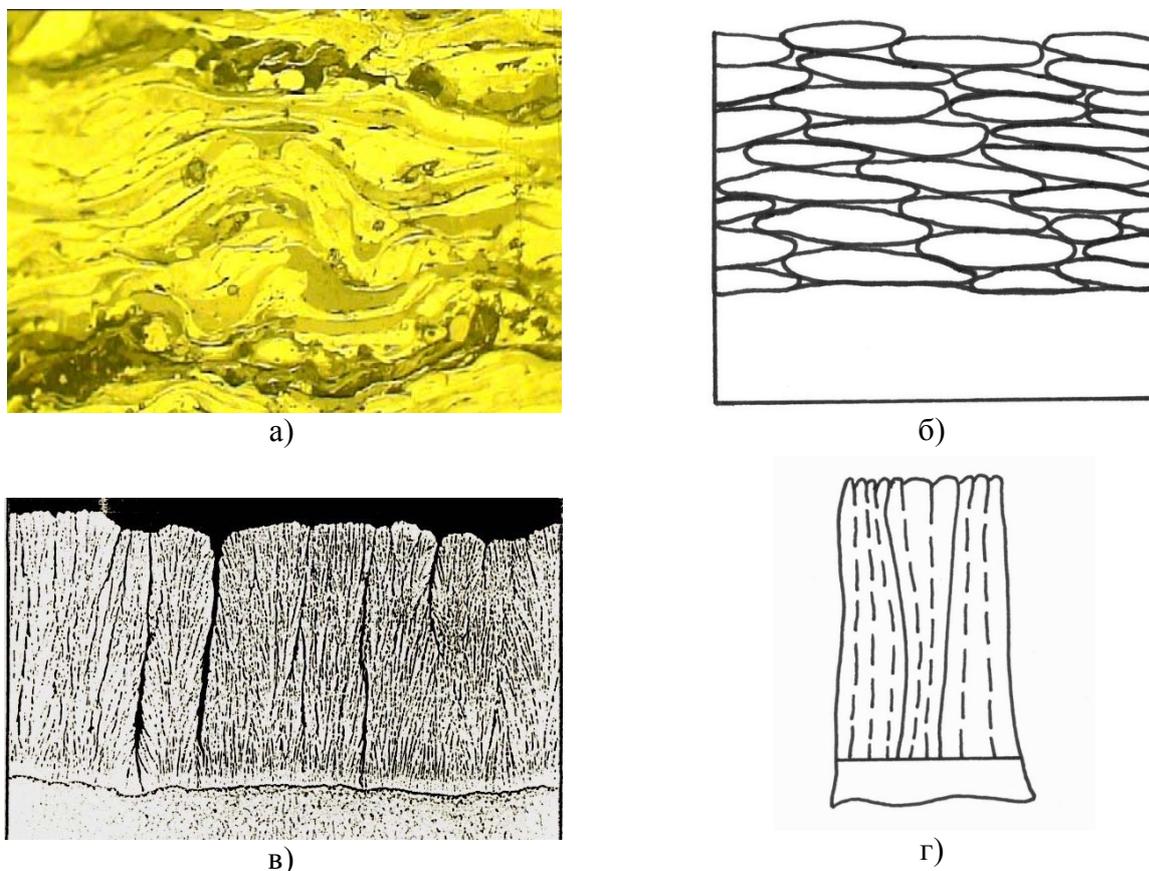
*Богданович Валерий Иосифович, доктор технических наук, профессор кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении. E-mail: bogdanovich@ssau.ru*

*Барвинок Виталий Алексеевич, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении. E-mail: barvinok@ssau.ru.*

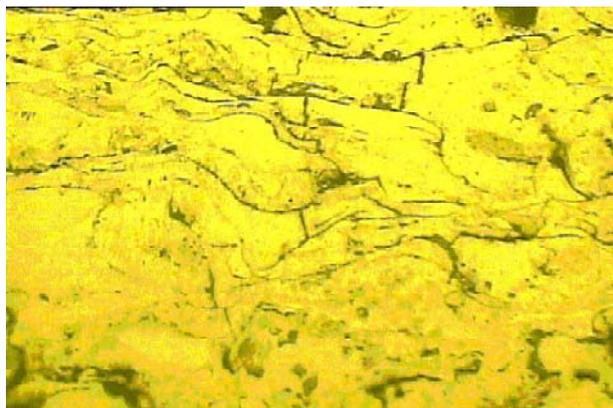
*Докукина Ирина Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении. Небога Вадим Геннадьевич, начальник производства.*

режимами напыления в пределах (2-12)%. Практика показывает, что такие покрытия из соответствующих материалов гарантируют эффективную защиту конструкционных материалов от коррозии, в том числе, и от высокотемпературной газовой коррозии. Адгезионная и когезионная прочность покрытия на сжатие и сдвиг значительно превышает аналогичные показатели прочности покрытия на растяжение. Однако, как показывает практика, адгезионная прочность покрытия на отрыв, диагностируемая величиной превышающей (25-45) МПа, и когезионная прочность на растяжение, составляющая только (0,4-0,8) прочности монолитного материала, обеспечивают их работоспособность во всех известных случаях сложного высоконагруженного применения из-за их эксплуатации в условиях действия сжимающих или сдвигающих внешних механических усилий. Одной из главных особенностей такой структуры плазменных покрытий является ее высокая демпфирующая способность к знакопеременным механическим и температурным напряжениям, а также способность локализовать усталостные повреждения и микротрещины внутри зерна кристаллита не давая им возможности прорасти до конструкционного материала основы (рис. 2).

Такая структура плазменных покрытий кардинально отличается от структуры покрытий, получаемых осаждением атомарных и ионных потоков в вакууме (термическое, электронно-лучевое или ионно-плазменное осаждение) или атомарных потоков в гальванохимических методах (рис.1 в, г). В этом случае микроструктура покрытий имеет столбчатый характер. Каждый отдельный столб структуры состоит из нескольких кристаллитов меньшего диаметра (рис. 1 г, границы столбов показаны сплошной линией, а кристаллитов – пунктирной). Границы между столбами и кристаллитами начинаются на поверхности покрытия и заканчиваются на поверхности основы, причем когезионная прочность между кристаллитами существенно выше когезионной прочности между столбами структуры. Физическая причина появления такой столбчатой структуры объясняется технологической наследственностью при встраивании адсорбированных атомов в активные центры роста кристаллической фазы покрытия [5]. Наличие в их структуре вертикальных границ приводит к созданию каналов для проникновения ионов кислорода и других химических элементов к защищаемым конструкционным материалам, а сами



**Рис. 1.** Металлографический поперечный шлиф структуры плазменного газотермического покрытия (а) и покрытия, полученного конденсацией атомарного потока (электронно-лучевое напыление) (в), и схемы расположения кристаллитов в их структуре (б,г)



**Рис. 2.** Мезоструктурноупорядоченное плазменное покрытие после длительных испытаний термоциклированием с локализованными усталостными трещинами внутри кристаллитов структуры

вертикальные границы столбов при толщине более (5-10) мкм являются причиной снижения предела выносливости изделия с покрытием по сравнению с изделием без покрытия.

Структура плазменных газотермических покрытий также существенно отличается от структуры монолитных конструкционных материалов, состоящих из объемных кристаллитов с высокой прочностью их связи между собой через общие границы. Такие высокопрочные границы между кристаллитами, часто содержащие выделения различных фаз, не ограничивают рост усталостных микротрещин, а только в ряде случаев тормозят их разрастание. Надо отметить, что структуру подобную слоистой дискообразной структуре плазменных покрытий часто создают в приповерхностном слое изделий для повышения их предела выносливости, обрабатывая поверхность методами поверхностного пластического деформирования (ППД). Однако, возможности этих методов в создании дискообразных кристаллитов в монолитных материалах существенно меньше, чем возможности метода осаждения плазменных покрытий из порошковых материалов. Хотя наводимые методами ППД сжимающие остаточные напряжения сами являются эффективным приемом повышения выносливости изделий и эти методы можно использовать для отдельных видов плазменных покрытий.

Часто при разработке плазменных покрытий встречается мнение о необходимости повышения качества плазменных покрытий за счет их уплотнения и создания беспористых структур. Наш опыт показывает [6], что такая структура эффективна только в качестве небольшого по толщине слоя на типовой структуре плазменного покрытия специального назначения (например, теплозащитного), так как беспористая монолитная

структура по всей толщине плазменного покрытия приводит к существенному снижению его долговечности эксплуатации при знакопеременных механических и термических напряжениях по сравнению с типовой структурой покрытия.

Физическая природа образования слоистой структуры из дискообразных кристаллитов при получении плазменных покрытий связана с последовательным осаждением ускоренных и нагретых в плазменной струе частиц порошкового материала, которые из-за удара о поверхность и последующей пластической деформации приобретают дискообразную форму (рис. 3).

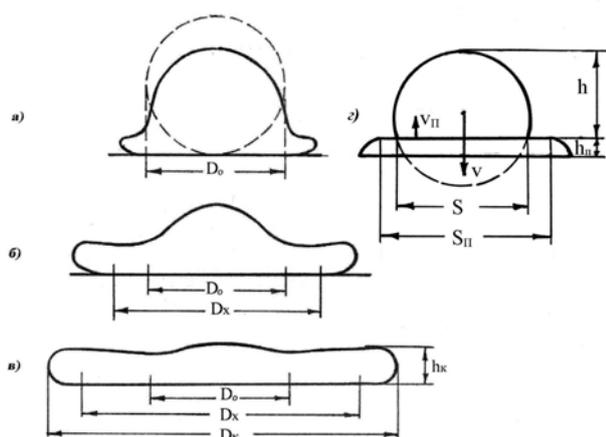
В зависимости от вида напыляемого материала, его дисперсности и режима напыления степень деформации частицы порошка и количество микропустот может значительно изменяться, приводя к существенному изменению структуры и свойств плазменных покрытий. По предложению авторов статьи специфическая структура плазменных покрытий с явно выраженной слоистостью и дискообразной формой кристаллитов получила название мезоструктурноупорядоченной, а плазменные покрытия с такой структурой – плазменные мезоструктурноупорядоченные покрытия. Количественной характеристикой такой мезоструктурной упорядоченности покрытия  $\chi$ , определяемый как отношение среднего характерного размера дискообразного кристаллита в горизонтальном направлении к его средней толщине (рис. 3):

$$\chi = D_k / h_k . \quad (1)$$

Коэффициент мезоструктурной упорядоченности покрытия (1) связан со степенью деформации напыляемых частиц  $k_D = h_k / D_0$ , например, для частиц имеющих форму близкую с шаровой, очевидным соотношением:

$$\chi = \sqrt{2/3 k_D^3} . \quad (2)$$

Максимальное значение коэффициента мезоструктурной упорядоченности покрытия  $\chi$  можно оценить, например, по данным работы [4], в которой определена степень деформации расплавленных частиц диаметром (100-200) мкм для 20 видов металлов при скорости удара (20-40) м/с. Выбор таких значений скоростей удара определялся отсутствием дробления частиц при ударе и слабым влиянием дальнейшего увеличения скорости удара на их степень деформации и прочность схватывания с основой. Полученные в этой работе значения степеней деформации частиц  $k_D = 0,1-0,05$  соответствуют значениям коэффициента мезоструктурной упорядоченности  $\chi = 26-74$ . В реальных процессах плазменного напыления используются не расплавленные, а частично оплавленные частицы с существенно



**Рис. 3.** Схема деформирования напыляемой частицы после ее удара об основу:

а – стадия действия импульсного давления; б – деформация под действием напорного давления; в – окончательный вид затвердевшей частицы; г – схема для математической модели деформирования частиц

более высокой твердостью, чем металлы, а частицы порошка имеют достаточно большой разброс по дисперсности, а следовательно, и по скорости осаждения и температурам нагрева [7]. Это приводит к тому, что структура реальных покрытий содержит различные по степени деформации кристаллиты (рис. 1а). Следовательно, полученные значения коэффициента мезоструктурной упорядоченности определяют верхний предел для реальных покрытий.

Адгезионная и когезионная прочность плазменных покрытий определяется площадью поверхности частиц, на которой прошло химическое взаимодействие с контактируемой поверхностью, и степенью этого химического взаимодействия. Учитывая, что средняя интегральная температура покрытия в процессе напыления обычно не превышает (200-300) °С основным периодом времени образования химических связей являются промежутки времени ударного взаимодействия и последующего деформирования каждой высоконагретой напыляемой частицы. При этом площадь поверхности, на которой образуются химические связи, является площадью контакта частицы с нижерасположенным слоем. В цитированной выше работе [4] было экспериментально установлено, что схватывание (химическое взаимодействие) протекает не по всей площади контакта цилиндрического диска с поверхностью, а по некоторой площади круга диаметра  $D_x$  (рис. 3). Причем схватывание по этой площади неравномерное, а имеет явно выраженные максимумы на множестве кольцевых полосок с общим центром в месте начала контакта деформируемой частицы. Отношение диаметра  $D_x$  к диаметру с деформированной частицы  $D_k$  для

различных сочетаний материалов лежит в диапазоне  $D_x / D_k = (0,4-0,9)$ . Следовательно, прочность связи каждой отдельной частицы, определяемая площадью круга диаметром  $D_x$  в значительной степени зависит от степени деформации напыляемой частицы или величины контактной площади дискового кристаллита. Таким образом, коэффициент мезоструктурной упорядоченности покрытия также в значительной степени характеризует потенциальную адгезионную и когезионную прочность получаемого покрытия.

Насколько же эта потенциальная прочность будет реализована в реальном процессе определяется прочностью схватывания каждой отдельной частицы с основой. В целом этот процесс схватывания должен соответствовать процессам сварки или пайки в твердой фазе и должен состоять из следующих основных стадий: образование физического контакта на максимально возможной площади поверхности частицы с основой; активации этой контактной поверхности; протекания токохимической реакции; развития объемного взаимодействия. Однако, в отличие от сварочных процессов, процессы при напылении характеризуются очень коротким циклом и отсутствием технологических приспособлений, обеспечивающих сжатие свариваемых поверхностей, что приводит к целому ряду особенностей. Для характеристики этих особенностей, необходимо дать оценку протекания физико-химических процессов при взаимодействии напыляемой частицы с основой.

### АНАЛИЗ ЭТАПОВ ТЕРМОСИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦЫ И ОСНОВЫ

Чтобы оценить, в каком состоянии – расплавленном или твердом – протекает процесс деформации первоначально полностью расплавленной или частично оплавленной частицы, оценим время ее кристаллизации  $t_{кр}$  на основании известного соотношения [4]:

$$t_{кр} = h_k^2 / a(2\beta)^2, \quad (3)$$

где  $h$  – толщина расплава,  $a$  – коэффициент температуропроводности материала покрытия,  $\beta$  – корень характеристического уравнения кристаллизации.

Учитывая, что  $\beta = (0,4-0,8)$  в широком диапазоне материалов и температур кристаллизации,  $a = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$  и  $a = 6,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$  для никеля и окиси циркония, получим для частиц с  $D_0 = 40 \text{ мкм}$  при  $h_k = 0,2D_0$  время кристаллизации для никеля  $t_1 \geq t_{кр} = (1,5 - 5,9) \cdot 10^{-5} \text{ с}$  и для окиси циркония  $t_1 \geq t_{кр} = (0,4 - 1,5) \cdot 10^{-4} \text{ с}$ , соответственно. При этом термический цикл напыляемой частицы на основе можно описать следующим образом. В момент удара и растекания

частицы температура контакта частицы и основы принимает значение, соответствующее твердому состоянию материала частицы и основы. Процесс кристаллизации частицы занимает время не менее  $t_1$ , а затем за время порядка (40-100)  $t_1$  частица остывает почти до температуры основы.

Удар частицы об основу приводит к возбуждению в материале основы и частицы волн напряжений сжатия, генерируемых увеличивающейся в размерах областью контакта частицы с поверхностью основы. Максимальное давление на фронте этих волн определяется соотношением [8-10]:

$$\sigma_u = ZZ_{осн} v / (Z + Z_{осн}), \quad (4)$$

где  $Z = \rho \cdot c$ ,  $Z_{осн} = \rho_{осн} \cdot c_{осн}$ ,  $\rho$ ,  $\rho_{осн}$ ,  $c$ ,  $c_{осн}$  - динамические импедансы, плотности и скорости звука материалов частицы и основы, соответственно,  $v$  - скорость частицы.

Время действия этого ударного давления в материале оценивается временем происхождения волны по материалу частицы  $t_y \cong 2D_0/c$ , что для  $D_0 = 40$  мкм и  $c = (3-5)10^3$  м/с составляет  $t_y = (1-3) \cdot 10^{-8}$  с. Это время много меньше времени кристаллизации частицы и, следовательно, за время действия ударного давления термическое состояние напыляемой частицы не изменяется и не изменяется величина контактной температуры. Если напыляемая частица движется с не очень большой скоростью и при ударе находится в упругом состоянии (малая температура нагрева), то через время  $t_y$  она отразится от поверхности.

Развиваемое ударное давление (4) при скоростях частицы (50-200) м/с составляет значительную величину. Например, для случая расплавленных напыляемых частиц металла ( $c = 3 \cdot 10^3$  м/с,  $c_{осн} = 5 \cdot 10^3$  м/с,  $\rho \cong \rho_{осн} = 8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>) оно составляет  $\sigma_u = (750 - 3000)$  МПа. Верхняя граница этих значений напряжений превышает ударную прочность конструкционных материалов и может приводить к хрупкому разрушению и возникновению хрупких трещин в конструкционных материалах, а также дроблению недогретых напыляемых частиц. В связи с этим определенное недоумение вызывают работы, в которых напыляемые частицы в недогретом состоянии стремятся разогнать до скоростей (500-800) м/с.

Наибольший интерес для процесса получения покрытий представляет тот диапазон скоростей частиц и температур их нагрева, когда после удара напыляемой частицы начинается ее пластическая деформация и растекание по поверхности в результате выделения кинетической энергии направленного движения частицы при ее торможении преградой.

Важным экспериментальным фактом, установленным при исследовании такого процесса

пластической деформации частицы является то, что верхняя часть даже жидкой частицы (частицы расплава металла или капли воды) сохраняет свою форму после удара и эта уменьшающаяся часть частицы продолжает двигаться как единое целое [4, 8, 10, 11]. Однако, на основании этого факта, зафиксированного сверхскоростной видеосъемкой, в [4] делается не верное утверждение, что эта часть частицы продолжает двигаться со скоростью частицы до удара, в действительности эта часть движется как единое целое с уменьшающейся скоростью, и только для расплавленных частиц возможно движение их верхней части со скоростью удара.

Под действием инерционного движения верхней части частицы ее нижняя часть пластически деформируется и растекается вдоль поверхности. Действующие в этой области напорное давление, оцениваемое величиной

$$\sigma_n = \rho \cdot v^2, \quad (5)$$

передается контактной поверхности и обеспечивает сжатие поверхностей, по которым протекают топохимические реакции образования химических связей. Время действия такого давления сжатия можно приближенно оценить временем, в течение которого вертикальный размер частицы уменьшается от  $D_0$  до  $h_k$  и это изменение происходит с уменьшающейся скоростью от  $v_0$  до величины близкой к нулю, то есть:

$$t_n = 2(D_0 - h_k) / v_0. \quad (6)$$

Время такого деформирования для частиц с  $D_0 \leq 100$  мкм и  $v_0 \geq 50$  м/с не более  $t_n = 4 \cdot 10^{-6}$  с, что на порядок меньше времени кристаллизации частицы (3). Следовательно, для расплавленных частиц процессы ее удара и деформирования происходят без изменения агрегатного состояния частицы при постоянном значении температуры контакта, а процесс ее кристаллизации можно рассматривать независимо от ее деформирования в уже сформированном дискообразном кристаллите. Если же частица в первоначальном состоянии не расплавлена, то возможность независимого рассмотрения динамики деформирования и значительного изменения температуры в ней за счет контакта с "холодной" основой определяется критерием Пекле  $Pe$ , равным отношению времени выравнивания температуры в системе  $t_T \cong D_0^2/a$  и времени ее деформирования (6):

$$Pe = t_T / t_n = 2D_0 v_0 / a > 10^3. \quad (7)$$

Следовательно, процессы удара и последующего деформирования частицы с высокой точностью можно рассматривать при некоторой постоянной температуре частицы, равной ее начальному значению, а процессы последующей теплопередачи и ее охлаждения уже в сформированной частице.

Таким образом, проведенный анализ и выполненные оценки позволяют сделать выводы о возможности рассмотрения несвязанных задач моделирования при ударе и распространении упругих волн в частице, ее пластическом деформировании и растекании и последующей кристаллизации и охлаждении до температуры основы.

Все эти стадии трансформации шарообразной частицы в дискообразный кристаллит оказывают значительное влияние на прочность ее приваривания к основе. Высокая кинетическая энергия частицы и ее достаточная пластичность (из-за нагрева) обеспечивает образования достаточно большой площади контакта и физический контакт поверхности частицы и основы. Однако, физический контакт поверхности является только необходимым условием возникновения химических связей, образования которых возможно только после их активации.

По современным представлениям такая активация заключается в создании на поверхности активных центров, на которых происходит образование химических связей. Установлено [4], что при сварке и пайке в твердой фазе роль таких активных центров играют дислокации, выходящие на контактируемые поверхности при их совместном пластическом деформировании. В [4] было показано, что ударные напряжения, возникающие в расширяющейся области контакта (рис.2) напыляемой частицы с основой, способствуют выходу дислокаций на контактную поверхность и активируют процесс схватывания между атомами в узлах кристаллических решеток. Было также экспериментально установлено, что дислокации, изначально существовавшие на поверхности, не являются центрами схватывания, а более того, выступают в роли препятствий для такого схватывания. В частности, роль дислокаций, смещенных на поверхность вследствие действия ударного напряжения наглядно видна в виде кольцевых образований центров схватывания после разделения таких поверхностей [2, 4]. Отметим, что установление этих фактов потребовало определенной корректировки взглядов на роль и режимы абразивной механической обработки поверхностей перед нанесением покрытия. В такой обработке должна создаваться не только развитая шероховатость поверхности, но и высокая степень наклепа приповерхностного слоя с высокой плотностью дислокаций, которые при ударном нагружении выйдут на поверхность. Плотность дислокаций, выходящих на контактную поверхность при ударе растет с ростом скорости напыляемой частицы, но как уже отмечалось, увеличение этой скорости выше определенных

пределов ведет к диспергированию расплавленных и дроблению твердых частиц, а также к эрозионному повреждению напыляемой поверхности или образованию в приповерхностном слое микроповреждений материала.

Для обеспечения условий протекания топочимических реакций на этих активных центрах требуется выдержка контактных поверхностей в прижатом состоянии при определенной, обычно достаточно высокой, температуре в течение времени достаточного для завершения топочимического процесса схватывания. Как показано в поведенном анализе такие условия создаются автоматически, если режимы напыления обеспечивают пластическую трансформацию напыляемой частицы в дискообразный кристаллит структуры. Следовательно, мезоструктурная упорядоченность плазменного покрытия в определенной степени является гарантией достижения высокой адгезионной и когезионной прочности.

#### **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТЕПЕНИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НАПЫЛЯЕМЫХ ЧАСТИЦ**

Будем считать, что частица в форме шара, нагретая до температуры  $T_0$ , ударяется о плоскость и деформируется на ней. От области контакта возбуждаются упругие и следующие за ними пластические волны сжатия, распространяющиеся в материале шара. В результате в материале шара образуется фронт пластической волны, перемещающийся вверх и разделяющий частицу на упругую и пластическую зоны (рис. 3 г). Материал частицы из пластической зоны, вследствие инерционного движения упругой области как сплошного твердого тела с уменьшающейся скоростью, выдавливается этой областью и растекается по поверхности. Процесс трансформации шара в дискообразный кристаллит завершается при уменьшении скорости движения упругой области до величины, при которой деформацию материала при переходе через фронт можно считать упругой.

В общем случае математическое моделирование такого процесса представляет значительные трудности из-за сложности описания процесса растекания материала вдоль поверхности удара. Однако, для задач технологии получения мезоструктурно-упорядоченных покрытий достаточным на первом этапе является установление взаимосвязи доли напыляемой частицы, которая перешла в пластическое состояние, с такими параметрами как скорость, температура, размер и механические характеристики частицы. При этом долю пластически сформированно-

го материала можно описать степенью ее пластического деформирования.

Анализ литературных данных показывает, что процесс удара дискретных частиц по поверхности является предметом значительных теоретических и экспериментальных исследований в области изучения эрозии и ударного повреждения конструкционных материалов [8-11]. В рамках таких исследований обычно определяют механические напряжения на контактной поверхности конструкционного материала. Наиболее полные исследования такого процесса проведены численным методом для случая удара капли воды по конструкционному материалу [10, 11]. В таких исследованиях также анализируется эволюция формы капли в процессе удара. Однако, в приведенной выше постановке задача математического моделирования трансформации напыляемых частиц ранее в публикациях не рассматривалась, за исключением некоторых этапов этого процесса, результаты которых проанализированы в работе [2]. Наиболее близкой по сути к поставленной задаче моделирования является классическая задача пластической деформации цилиндра при ударе (так называемая задача Тейлора), решение которой используется для определения свойств материалов при динамическом нагружении. Эта задача о цилиндре использует ряд экспериментально обоснованных допущений, которые также будут использованы при математическом моделировании пластической деформации шара при ударе [9].

Будем считать, что напыляемая частица имеет форму шара с диаметром  $D_0 = h_0$  и ударяется об абсолютно жесткую плоскость (рис. 3 г). В результате удара в материале шара возникает область в пластическом состоянии, фронт которой плоский и перемещается против направления удара со скоростью  $v_{II}(t)$ . Будем пренебрегать упругими деформациями по сравнению с пластическими. Движение материала шара выше фронта пластической области будем рассматривать как движение сплошного твердого тела с уменьшающейся скоростью  $v(t)$  за счет действия силы торможения со стороны сечения шара  $S(t)$  на фронте пластической волны. Это движение будем рассматривать в одномерной постановке, характеризуя процесс перемещения фактической высотой  $h(t)$  этой области шара. Материал шара перед фронтом пластической зоны находится в напряженном состоянии с величиной напряжений равных пределу текучести материала при сжатии  $\sigma_s$ , а после прохождения фронта приобретает напряжения, соответствующие модели жестко-пластического упрочняемого материала:

$$\sigma = \sigma_s + c\varepsilon^m, \quad (8)$$

где  $c$  и  $m$  – параметры упрочнения материала,  $\sigma$  и  $\varepsilon$  – текущие напряжения и деформации в упрочненном материале за фронтом пластичности.

При переходе через фронт пластической зоны, в соответствии с гидродинамической теорией пластичности, возникает разрыв в сечении материала. Сечение  $S(t)$  равно сечению шара увеличивается до  $S_{II}(t)$  сразу за этим фронтом. Скоростью течения материала в направлении действия удара за фронтом пластичности (в лагранжевых координатах) будем пренебрегать.

Тогда в соответствии со сделанными допущениями уравнение движения верхней недеформированной пластической части шара в некоторый момент времени  $t$  можно записать в виде:

$$\rho V(t) \cdot \frac{dv}{dt} = -\sigma_s S(t), \quad (9)$$

где  $V(t)$  – объем этой части шара и  $S(t)$  – площадь контактной поверхности этой части шара на фронте пластичности.

Используя соответствующие соотношения для шара, преобразуем отношение  $S(t)/V(t)$  к виду:

$$f(t) = \frac{S(t)}{V(t)} = 2 \left( \frac{1}{h} - \frac{1}{3h_0 - 2h} \right). \quad (10)$$

Фактический геометрический размер этой части в направлении удара изменяется за счет ее движения со скоростью  $v(t)$  и движения фронта пластичности вверх со скоростью  $v_{II}(t)$ , то есть:

$$-\frac{dh}{dt} = v + v_{II}. \quad (11)$$

Деформацию материала при переходе через фронт пластичности определим следующим образом. Некоторый столбик материала выше фронта высотой  $|\Delta h| = (v + v_{II})\Delta t$  переходит в столбик высотой  $\Delta h_{II} = v_{II}\Delta t$  после прохождения фронта. Тогда величина деформации материала будет:

$$\varepsilon = (|\Delta h| - \Delta h_{II})/\Delta h_{II} = v/(v + v_{II}). \quad (12)$$

С другой стороны из закона сохранения массы при переходе материала через фронт получим для этой деформации соотношение через площади сечения материала с двух сторон фронта пластичности:

$$\varepsilon = (S_{II}(t) - S(t))/S_{II}(t). \quad (13)$$

Закон сохранения импульса при переходе материала через фронт пластичности можно записать в виде:

$$\rho(v + v_{II})v + \sigma_s = \sigma, \quad (14)$$

которое с использованием соотношения (12) и (8) приобретет вид:

$$\rho V^2 = \varepsilon(\sigma - \sigma_s) = c\varepsilon^{m+1}. \quad (15)$$

Используя соотношение  $dv/dt = (dv/dt)(dh/dt)$

и соотношения (11), (12) и (10), преобразуем уравнение движения (9) к виду:

$$d(\rho v^2) = 2\varepsilon\sigma_s f(h)dh. \quad (16)$$

Комбинируя (15) и (16) получаем дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными:

$$\frac{(m+1)c}{2\sigma_s} \varepsilon^{m-1} d\varepsilon = 2 \left( \frac{1}{\bar{h}} - \frac{1}{3-2\bar{h}} \right) d\bar{h}, \quad (17)$$

где введено обозначение  $\bar{h} = h/h_0$ .

Интегрируя это уравнение по  $\varepsilon$  в пределах от  $\varepsilon_0$ , определяемого из (15) при  $v = v_0$ , до  $\varepsilon_k$ , определяемого из условия, что при  $\varepsilon_k$  материал больше не переходит в пластическое состояние, и по  $h$  в пределах от  $h_0$  до  $h_k$ , получим:

$$k_D^2(3-2k_D) = \exp(-\Gamma), \quad (18)$$

где  $k_D = \bar{h}_k = h_k/h_0 = h_k/D_0$  и

$$\Gamma = \frac{(m+1)c}{2\sigma_s m} \left( \left[ \frac{\rho \cdot v_0^2}{c} \right]^{m/(m+1)} - \varepsilon_k^{m/(m+1)} \right). \quad (19)$$

Отметим, что если бы мы рассматривали пластическую деформацию не шара, а цилиндра, то соотношение (18) для цилиндра имело бы вид:

$$k_D = \exp(-\Gamma). \quad (20)$$

Если вместо  $k_D = h_k/h_0$ , имеющего смысл линейной степени деформации частицы, ввести коэффициент объемной степени трансформации напыляемой частицы

$$\xi_D = 1 - (V(h_k)/V_0), \quad (21)$$

то для случая частицы в виде шара значение  $\xi_D$  будет определяться соотношением:

$$\xi_D = 1 - k_D^2(3-2k_D) = \exp(-\Gamma). \quad (22)$$

Для случая деформации частицы в виде цилиндра этот же коэффициент определяется тем же соотношением (22). Отсюда видно, что коэффициент объемной степени трансформации напыляемой частицы (21) не зависит от формы частицы, по крайней мере, для двух крайних случаев шар и цилиндр. Можно предполагать, что и для частиц другой формы, в случае выполнения допущений, сформулированных при постановке задачи моделирования деформации для шара, зависимость коэффициента объемной трансформации напыляемой частицы от параметров процесса определяется тем же соотношением (22). Физически это объясняется тем, что для частицы, форма которой близка к шаровой, коэффициент  $\xi_D$ , определяющий долю материала, трансформированного в пластическое состояние и дискообразный кристаллит структуры, зависит только от механических свойств материала через соотношение (8) и объемную плотность кинетической энергии, затраченной на этот процесс.

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Коэффициенты  $k_D$  и  $\xi_D$  трансформации частицы в дискообразный кристаллит при скорости частицы, достаточный для начала ее перевода в пластическое состояние, зависит не от абсолютного значения скорости частицы  $v_0$  или ее кинетической энергии направленного движения, как обычно предполагалось в теориях плазменного напыления, а зависит от безразмерного критерия

$$B = \frac{(m+1)c}{2m\sigma_s} \left[ \frac{\rho \cdot v_0}{c} \right]^{m/m+1}, \quad (23)$$

который входит в соотношение (18) через экспоненциальную зависимость.

Анализ критерия  $B$  показывает, что при скорости частиц напыления, достаточных для начала их пластического деформирования, наиболее эффективным приемом достижения наибольшей трансформации частиц в дискообразные кристаллиты структуры является не увеличение их скорости, а повышение температуры их нагрева.

Действительно, в критерии (23) параметры  $\sigma_s$ ,  $c$  и  $m$  зависят от температуры нагрева частицы, причём изменение  $\sigma_s$  существенно более значительное с увеличением температуры, чем  $c$  и  $m$ . Для многих материалов величина  $\sigma_s$  уменьшается в (2-3) раза при нагреве до (500-600)°C и до десяти раз и более при температурах (0,8-0,9)  $T_{пл}$ . Величина параметра  $m$  для большинства материалов лежит в диапазоне  $m=0,2-0,4$ . Поэтому, увеличение скорости частицы в (2-4) раза увеличивает критерий  $B$  только на (12-50)%. В тоже время за счет изменения параметра  $\sigma_s$  и в меньшей степени  $c$  при нагреве частицы увеличение критерия  $B$  происходит в разы. Особенно мало эффективно увеличение скорости частиц при значениях критерия  $B \geq 2$  из-за медленного изменения экспоненты (22) в этом диапазоне. Также надо отметить, что увеличение скорости частиц выше определенных значений приводит к тому, что уменьшается время пластической трансформации напыляемой частицы, и это уменьшение времени растет быстрее, чем увеличение скорости (11). В результате существенно сокращается время действия сжатия на контактной поверхности и, следовательно, уменьшается степень завершения топомических реакций образования прочных адгезионных и когезионных связей.

Полученные соотношения и вытекающие из них выводы используются нами в численном моделировании для предварительного выбора диапазона параметров режима напыления, при которых обеспечиваются условия формирования мезоструктурноупорядоченных плазменных покрытий. Особенно эффективен такой анализ при нанесении покрытий из таких высокопрочных материалов как

окислы и карбиды, так как при нанесении покрытий из металлов и сплавов традиционные режимы напыления приводят автоматически к нагреву частиц до температур плавления или оплавления, при которых соблюдаются установленные в настоящей работе рекомендации.

Естественно, окончательный выбор режимов напыления обеспечивается экспериментальным исследованием свойств покрытий в выбранных диапазонах. При этом вид структуры плазменных покрытий (степень и однородность деформации кристаллитов, отсутствие несдеформированных частиц и наличие внутренних пор), диагностируемый на их поперечных шлифах при достаточном увеличении служит подтверждением качества полученных покрытий даже в директивных технологических документах ведущих мировых производителей плазменных покрытий. Надо отметить, что компьютерная обработка изображений таких структур, например, программным комплексом Image Expert Pro 3 позволяет существенно повысить объективность такого контроля и дать количественную оценку мезоструктурной упорядоченности.

Таким образом, проведенные исследования позволили установить новые закономерности, обеспечивающие условия для получения мезоструктурно упорядоченных плазменных покрытий с экстремальным комплексом эксплуатационных свойств.

*Данная работа выполнена в рамках реализации ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009 – 2013 годы.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барвинок В.А. Плазма в технологии, надежность, ресурс. М.: Наука и технологии, 2005. 452 с.
2. Нанесение покрытий плазмой / В.В. Кудинов, П.Ю. Пекиев, В.Е. Белащенко и др. М.: Наука, 1990. 408 с.
3. Барвинок В.А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий. М.: Машиностроение, 1990. 384 с.
4. Кудинов В.В. Плазменные покрытия. М.: Наука, 1977. 184 с.
5. Барвинок В.А., Богданович В.И. Физические основы и математическое моделирование процессов вакуумного ионно-плазменного напыления. М.: Машиностроение, 199. 310 с.
6. Bogdanovich V.I., Barvinok V.A. Strengthening of Heat-insulating Surfaces // NATO Advanced Research Workshop on Nanostructured Thin Films and Nanodispersion Strengthened Coatings. Moscow, Russia, 2003. P. 251-260.
7. Физическое и математическое моделирование динамики движения дисперсных частиц в плазменной струе / В.А. Барвинок, В.И. Богданович, И.А. Докукина, С.Б. Воробьев, Е.К. Савич, В.Г. Небога // Известия Самарского научного центра РАН. Тематический выпуск "Четверть века изысканий и экспериментов по созданию уникальных технологий и материалов для авиастроения УНТЦ – ФГУП - ВИАМ". 2008. Вып. 3. С. 193-202.
8. Динамика удара: пер. с англ./ Зукас Дж.А., Николас Т., Свифт Х.Ф. и др. М.: МИР, 1985.- 296 с.
9. Гольдсмит В. Удар: пер. с англ. М.: Изд-во литературы по строительству, 1965. 448 с.
10. Спринджер Дж. Эрозия при воздействии капель жидкости: пер. с англ. М.: Машиностроение, 1981. 200 с.
11. Перельман Р.Г. Эрозия прочности деталей двигателей и энергоустановок летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1980. 245 с.

## MATHEMATICAL MODELING OF FORMATION MEZOLATTICE-ORDERED OF PLASMA COVERINGS

© 2011 V.I. Bogdanovich<sup>1</sup>, V.A. Barvinok<sup>1</sup>, I.A. Dokukina<sup>1</sup>, V.G.Neboga<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samara State Aerospace University

<sup>2</sup> State Research and Production Space-Rocket Center "TsSKB-Progress", Samara

The article deals with the formation of structural features of the plasma thermal coatings, called mezolattice-ordered. Shows the effect of this structure to ensure high performance properties under variable mechanical and thermal loading of the surface. Based on mathematical modeling of shock and subsequent plastic deformation of sprayed particles, an analytical relation finding relation between the degree of deformation of the particle and the coefficient of volume transformation from the particle velocity and mechanical characteristics for the case of plastic reinforcement material.

Key words: mezolattice-ordered of plasma coverings, impact, plastic deformation, bond strength, dislocations, mathematical modeling.

*Valery Bogdanovich, Doctor of Technics, Professor at the Aircraft Manufacturing and Quality Control in Engineering Department. E-mail: bogdanovich@ssau.ru*

*Vitaly Barvinok, Corresponding Member of RAS, Doctor of Technics, Professor, Head at the Aircraft Manufacturing and Quality Control in Engineering Department. E-mail: barvinok@ssau.ru.*

*Irina Dokukina, Candidate of Technics, Associate Professor at the Aircraft Manufacturing and Quality Control in Engineering Department.*

*Vadim Neboga, Director of Operations.*