УДК 53.082.5

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ИССЛЕДОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ ДЕТОНАЦИОННОГО ПОТОКА ПРИ НАПЫЛЕНИИ ЧАСТИЦ

А.В. Еськов, В.И. Яковлев

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова E-mail: alesc@newmail.ru

Показана возможность применения системы ввода изображения в ЭВМ на базе ПЗС с электронным затвором и временем экспозиции 35,5 мкс в составе комплекса оптического контроля характеристик детонационного потока напыления частиц на установке «Катунь-М». Приводятся результаты контроля скоростей частиц по длине их треков на изображении, динамика образования газовой пробки в начальный момент времени появления потока на срезе ствола установки и корневого угла потока.

Поиск путей интенсификации процесса нанесения покрытий на поверхности и автоматического управления процессом требует разработки основ технологии детонационного напыления. Важнейшей стадией процесса детонационного напыления является распространение детонационной волны (ДВ) в стволе детонационной установки и взаимодействие порошка с ДВ и высокоскоростным газовым потоком продуктов сгорания. Анализ физических явлений на этой стадии позволяет более обоснованно подходить к выбору режимов напыления. Изучение литературных источников показывает, что протекание процессов детонационного напыления исследовалось как экспериментально, так и теоретически. Несмотря на значительное число публикаций, посвященных детонационному нанесению покрытий, практически отсутствуют теоретические и экспериментальные исследования динамики двухфазного потока, течения двухфазного потока, возникающего при выходе из канала в затопленное пространство, и его взаимодействия с преградой (подложкой, на которую наносится порошок), что позволит определять энергетические параметры процесса. Сравнительный анализ некоторых характеристик и процессов соединения материалов, наносимых газотермическим напылением, на основе работ [1-3] подтверждает преимущества детонационно-газовых покрытий, среди которых можно выделить высокую прочность сцепления с напыляемой поверхностью, низкую пористость.

Процесс напыления отличается ярко выраженной нестационарностью, уровень которой оказывает существенное влияние на выбор технологических параметров оборудования. Изучение отечественных и зарубежных публикаций дает далеко не полную информацию по технологии нанесения детонационных покрытий. В приводимых режимах получения покрытий из одного и того же материала имеются существенные расхождения в значениях параметров напыления. Это можно объяснить тем, что детонационное напыление представляет собой сложный многопараметрический процесс. Отдельные экспериментальные однофакторные зависимости, приводимые в ряде публикаций, выполнены для каких-либо конкретных условий напыления, либо на определенном оборудовании, поэтому не всегда правильно и полно отражают

закономерности, присущие исследуемому процессу. Кроме того, представленные рекомендации затруднительно применять при изменении условий и оборудования. Выбору технологии и оборудования должен предшествовать анализ закономерностей, свойственных процессу детонационного напыления покрытий [2].

М.Х. Шоршоровым и Ю.А. Харламовым [3] выдвинута концепция образования покрытия при детонационном напылении, рассматривающая дислокации как активные центры, в пределах которых осуществляется химическое взаимодействие. Авторы выдвигают предположение, согласно которому увеличение давления в зоне контакта приводит к интенсификации пластической деформации подложки или частицы напыляемого материала и к увеличению плотности дислокации и, как следствие этого, интенсификации процессов взаимодействия между материалом покрытия и основы. Учет интенсивности пластической деформации подложки при расчете прочности сцепления не противоречит кинетическим представлениям, поскольку пластическая деформация является термоактивизированным процессом. Следует отметить, что механизм формирования покрытий при детонационном методе напыления находится в стадии разработки, представленные данные основаны на результатах феноменологических исследований, явно упрощают физико-химическую природу и требуют более глубокого исследования. Разработка оптимальных технологических процессов напыления должна выполняться с учетом рационального соотношения между скоростью и температурой напыляемых частиц.

Отличительной чертой детонационно-газового напыления от всех других известных газотермических видов нанесения покрытий является наличие ДВ. Явление детонации в газах представляет собой распространение волны горения с вполне определенной для каждой горючей смеси скоростью порядка 1...4 км/с [4]. Газовая детонация обнаружена в 1881–1890 гг., в связи с взрывами метана в угольных шахтах. Изучением детонации занимались Бертло, Вьемм, Маллеро Ле-Шателье и др. В бывшем СССР фундаментальные исследования проводили К.И. Щелкин, Я.Б. Зельдович, Р.И. Солоухин, С.М. Когарко, Б.В. Войцеховский и др. Результатами экспериментальных исследований установлено [5–8], что:

- Скорость распространения детонации в трубах зависит от состава смеси, изменяется от 1000 до 4000 м/с; в несколько раз превышает скорость звука в этих смесях при обычных температурах и давлениях и является постоянной для данной смеси.
- 2. Скорость детонации мало зависит от материала трубы.
- 3. Скорость детонации слабо зависит от изменения начальной температуры газовой смеси.
- 4. Скорость детонации возрастает при повышении начального давления смеси.
- Для каждой газовой смеси есть оптимальное соотношение компонентов, при котором скорость детонации достигает своего максимального значения.

Согласно теории гидродинамики [7, 9], детонация обусловлена движением по реагирующей газовой смеси ударной волны (УВ). Если во фронте УВ амплитуда больше некоторой величины, то волна при своем распространении способна за фронтом возбуждать интенсивную химическую реакцию, протекающую в соответствии с законом Аррениуса. Таким образом, распространение ДВ обуславливается движением фронта УВ, зоны химической реакции и продуктов детонации, которые имеют объем, во много превышающий объем исходного горючего вещества. В настоящее время имеется большое количество работ (обзор приводится в [10]), которые основаны на численном моделировании неустойчивости и возникновения ячеистых структур ДВ. Для случая детонационного горения пропан-бутановой смеси с кислородом в стехиометрическом соотношении в установке «Катунь-М» образующийся объем продуктов реакции превышает исходный объем примерно в 100 раз. Высокие давления, возникающие при взрыве, и обусловленный ими эффект совершения работы не смогли бы быть достигнуты, если бы химическая реакция взрывчатого превращения не сопровождалась образованием достаточно большого количества газообразных продуктов взрыва. Эти продукты, находящиеся в момент взрыва в чрезвычайно сжатом состоянии, являются теми физическими агентами, в процессе расширения которых осуществляется крайне быстро переход потенциальной энергии взрывчатых веществ в механическую работу или кинетическую энергию движущихся газов.

Экспериментальная установка детонационного газового напыления (УДГН) «Катунь М» предназначена для нанесения покрытий из порошковых материалов на рабочие поверхности различных изделий с целью придания им качественно новых свойств по сравнению с исходным материалом. В качестве детонирующего состава используется пропан-бутан-кислородная смесь. Установка находится в изолированном, вентилируемом боксе для защиты оператора от воздействия УВ и предотвращения возможных чрезвычайных ситуаций, связанных с возможностью самовоспламенения горючих газов. Расход рабочих газов составляет при средней частоте выстрелов в 4 Гц не более: пропан бутановая смесь 2...3,5; кислород 10...12; сжатый воздух 10...15 м³/ч.

Детонационно-газовая установка «Катунь М» (рис. 1) состоит из следующих основных узлов: напылительный блок, состоящий из форкамеры – 1 и (ударной трубы) ствола – 3; 2 – система зажигания (воспламенитель горючей смеси); 4 – порошковый питатель; и блок управления – 7, включающий газораспределительную станцию, систему охлаждения ствола и других нагреваемых элементов конструкции установки, систему локализации сгорания горючей смеси в стволе установки, а так же манипуляторы [2].



Рис. 1. Схема экспериментального комплекса высокоскоростной видеосъемки и контроля пространственных параметров детонационного потока при напылении частиц на базе УДГН «Катунь М»

Блок управления позволяет задавать количество циклов в данной серии напыления, а также обеспечивает старт и остановку работы всей экспериментально-диагностической установки «Катунь М». Через систему дистанционного управления с блока управления осуществляется контроль работы манипуляторов, которые установлены в боксе детонационного напыления, для изменения геометрического положения детали в процессе напыления.

Назначение ствола состоит в направлении и концентрации энергии взрыва горючих веществ на упрочняемую деталь. Отличительной особенностью конструкции ствола установки «Катунь М» является коническая форма внутренней полости с углом раскрытия 4°. Это позволило уменьшить длину ствола до 550 мм. При этом диаметр выходного отверстия составил 20 мм. Для стабилизации газовой струи в выходной части ствола имеется цилиндрический участок диной 50 мм. Ствол при помощи крепежа устанавливается на форкамере. Форкамера – это устройство, используемое для формирования ДВ. Наличие форкамеры обеспечивает высокий уровень однородности газовой смеси подаваемой во внутренние полости установки, что в свою очередь обеспечивает стабилизацию детонационного потока в ствольной части установки. Выход газа из пространства форкамеры в ствол осуществляется через сопло Лаваля. Заполнение горючей смесью и продувка внутренних полостей установки осуществляется непосредственно через форкамеру. Инициирование детонации производится при помощи электроискрового разряда в свече зажигания, установленной на боковой поверхности форкамеры. Для осуществления одного цикла напыления горючая смесь полностью заполняет форкамеру и через сопло Лаваля часть ствола детонационной установки.

Система охлаждения служит для защиты от теплового воздействия рабочих газов на форкамеру, ствол и другие части установки. Для охлаждения в форкамере имеются входные и выходные каналы, обеспечивающие циркуляцию охлаждающей жидкости, при этом каналы непосредственно подключаются к каналам охлаждения ствольной части установки.

Доставка порошка в поток осуществляется радиальным способом, в плоскости перпендикулярной направлению потока. Для этого на боковой поверхности ствола имеется 9 отверстий, расположенных друг от друга на расстоянии 100 мм. В результате, возможно, производить регулировку глубины загрузки порошкового материала в ствол установки, при помощи установки дозирующего устройства в одно из них. Напыляемый порошковый материал помещается в бункер дозатора. Транспортировка порошкового материала в детонационный поток производится транспортирующим агентом, в роли которого выступает сжатый воздух, поступающий при давлении 150...200 кПа. Установка расхода напыляемого материала производится с помощью изменения объема под выходным отверстием бункера. Для предотвращения проникновения во внутренние каналы дозатора продуктов детонации и негативного воздействия их на порошковой материал применяется запорная игла. Открытие иглы производится за счет пневмопривода, по сигналу от блока управления. Дозатор универсален и может быть использован для различного рода порошковых материалов с размерами частиц от ~0 до 200 мкм.

Газораспределительная станция обеспечивает приготовление, подачу и контроль расхода горючей смеси, а также обеспечивает продувку ствола инертным газом (воздухом), перед очередным выстрелом. Газовая смесь подается непосредственно в форкамеру установки.

Технические характеристики установки «Катунь М»: расход рабочих газов – кислород – 6 м³/ч, пропан-бутан – 1,5 м³/ч, сжатый воздух – 12 м³/ч, расход воды – 0,25 м³/ч, потребляемая мощность – 3 кВт, производительность – 0,2...1,0 м²/ч.

Экспериментальное изучение процесса развития и структуры импульсного нестационарного потока напыляемых частиц в газовой струе, представляет важную научно-техническую задачу [6, 8, 11, 12]. В Алтайском научно-инновационном центре порошковых технологий при АлтГТУ им. И.И. Ползунова для диагностики и контроля процесса напыления покрытий на установке «Катунь М», применяется цифровая быстродействующая система ввода изображений VS-CTT-285/X/E-2001/M, производства ЗАО «НПК Видеоскан», г. Москва. Основные технические характеристики системы: формат изображения – 1360×1024; размер пикселя (мкм) – 6,45×6,45; размер ССD матрицы (мм) – 6,6×8,8, электронный затвор; время накопления $T_{\text{нак}}$ (экспозиция) – 35,5 мкс – 132 с±0,07 нс; АЦП – 10 (8) разрядов, предусмотрен режим внешней синхронизации. Система предусматривает применение различных объективов и установку светофильтров. Приведенные ниже экспериментальные изображения получены с использованием объектива Гелиос-44М.

При появлении пламени на выходе из ствола – 3 (рис. 1), регистрируемого фотодатчиком – 9, блок синхронизации – 8 вырабатывает импульс, по которому изображение потока напыляемых частиц – 5 из цифровой видеокамеры – 10 передается в ЭВМ – 11 для дальнейшей обработки. В блоке синхронизации – 8 предусмотрена возможность осуществлять задержку импульса видеокамеры – 10 относительно момента появления пламени на выходе из ствола – 3 дискретно по 10 мкс от 0 до 5 с.

Система ввода изображений VS-CTT-285/X/Е-2001/М в составе комплекса высокоскоростной видеосъемки и контроля пространственных параметров детонационного потока при напылении частиц применялась в нескольких направлениях экспериментальных исследований. При съемке процесса вылета газовых продуктов детонации из ствола установки без напыляемых частиц фиксировались скачки уплотнения вытекающего газа с определенной периодичностью, которая имеет зависимость от времени развития газового потока. Первый скачек уплотнения находится на расстоянии двух калибров (40 мм) от среза ствола установки. Через время задержки старта электронного затвора системы VS-CTT-285 относительно момента появления пламени на срезе ствола установки *Т*_{зал}=2 мс, наблюдается 4−5 газовых уплотнений, первое из которых на расстоянии два калибра от среза ствола, следующие расположены равномерно на расстоянии 100...120 мм. Через *Т*_{зад}=4 мс наблюдается до 10 уплотнений, далее при времени $T_{33\pi}$ более 4 мс – газовых уплотнений не наблюдается, хотя газ еще продолжает вытекать. На рис. 2 приведен пример изображения потока без частиц – $T_{\text{нак}} = 35,5$ мкс, $T_{\text{зал}} = 4$ мс. Слева свечение начинается на срезе ствола, справа подложка, расположенная под углом 45° к оси потока.

Произведя множество снимков детонационного потока, выясняется, что в фиксированное время *T* развития потока количество газовых уплотнений и их расположение в пространстве сохраняется, что позволяет по интенсивности излучения определить координаты максимумов уплотнений и попытаться использовать их в дальнейшем для проверки результатов какого-либо численного моделирования движения ДВ. Отмечается заметно более высокая яркость летящих частиц порошка по сравнению с яркостью газа без частиц порошка и не существенное (практически отсутствует) влияние газовых уплотнений на изменение траекторий частиц.



Рис. 2. Экспериментальный кадр газового потока без частиц на УДГН «Катунь М» (Т_{нак}=35,5 мкс, Т_{зад}=4 мс)

Следующим направлением использования системы ввода изображений стало изучение газовой пробки в начальный момент вылета газового потока из ствола УДГН «Катунь М», существующей 0,2...1 мс от момента выхода пламени из ствола установки. Затем пробка переставала существовать, растворяясь в пространстве вокруг образовавшегося «туннеля» в покоящейся газовой среде окружающего воздуха. По «туннелю» далее развивается поток напыляемых частиц. На рис. 3 изображен пример газовой пробки $(T_{\text{нак}}=35,5 \text{ мкс}, T_{\text{зал}}=0,5 \text{ мс})$. Из изображения виден характер загиба светящейся области во фронте потока - газовой пробки и завихрения внешней оболочки в следе за фронтом потока. Яркость свечения газовой пробки зависит от количества горючей смеси, закачанной в УДГН. Перед фронтом потока видны треки частиц порошка, довольно существенно рассеянных относительно оси потока, что обусловлено высокой концентрацией газа в центре свечения. Изображение получено без применения светофильтров, перегрузка по яркости ПЗС-элемента камеры наблюдается внизу у среза ствола УДГН и при ударе частиц о подложку (из экспериментальных кадров, не приведенных в данной работе), что свидетельствует о максимальном количестве лучистой энергии, выделяющейся в этих зонах.



Рис. 3. Экспериментальный кадр газовой пробки (*T_{нак}=35,5 мкс, T_{зад}=0,5 мс*)

Зная масштаб изображения, по длине треков частиц и времени экспозиции $T_{3KC}=35,5$ мкс определялась скорость частиц в потоке, которая составила в среднем более 400 м/с для времени T=1...5 мс, через каждые 500 мкс. На рис. 4 приводится пример изображения треков частиц потока с рассчитанной ско-

ростью. Из литературы [13] известно, что частицы могут начать реагировать между собой еще в стволе УДГН, а также следовать друг за другом в результате возникновения детонационных ячеек. Рассчитывая длину трека, в данной работе предполагается, что трек остается от одной частицы. Толщина некоторых треков на изображении больше диаметра частиц используемого порошка, что можно объяснять параллаксом оптической системы камеры. Некоторые треки имеют периодически повторяющиеся пульсации яркости, что объясняется вращением частиц вокруг своей оси, параллельной оси потока, обусловленное форм-фактором частиц. Приведенные выше утверждения носят гипотетический характер и подлежат дальнейшим исследованиям.



Рис. 4. Пример изображений треков частиц (Т_{нак}=35,5 мкс, Т_{зад}=4 мс)

На рис. 5 приведено значение средней скорости частиц в потоке по времени цикла напыления. Измерения проводились по длине треков частиц с учетом выше отмеченных допущений. Каждая точка рассчитывалась как среднее значение по трем пяти трекам на изображении. Из графика видно, что в начале цикла напыления скорости возрастают до 400 м/с к T=1 мс, при T от 1 до 4,5 мс практически сохраняют свое значение около 400 м/с и после T=4,5 мс в конце цикла напыления — убывают.



Рис. 5. Значение средней скорости частиц в потоке по времени цикла напыления

Определяя ширину потока на расстоянии 100 мм от среза ствола на каждом изображении для T=0...5 мс через каждые 500 мкс, рассчитывался корневой угол потока частиц, изменение которого во времени представлено на рис. 6. Для УДГН «Катунь М» эмпирически была получена зависимость корневого угла α :

$$\alpha = \frac{L}{2d} \exp(-0, 2t),$$

где L – длина ствола пушки, d – диаметр выходного сечения ствола, t – время развития потока.



Рис. 6. Зависимость корневого угла потока от времени его развития

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кулик А.Я., Борисов Ю.С., Мнухин А.С. и др. Газотермическое напыление композиционных порошков. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1985. – 199 с.
- Яковлев В.И. Экспериментально-диагностический комплекс для физических исследований порошковых СВС-материалов при детонационном напылении: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Барнаул, АлтГТУ, 2003. – 19 с.
- Шоршоров М.Х., Харламов Ю.А. Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий. – М.: Наука, 1978. – 224 с.
- Гуляев П.Ю., Яковлев В.И., Шарлаев Е.В. Математическая модель распространения волны в процессах детонационного нанесения покрытий / Вестник АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – 1999. – № 2. – С. 36–40.
- Новожилов Б.В. Скорость распространения фронта экзотермической реакции в конденсированной фазе. // Доклады АН СССР. – 1961. – Т. 141. – С. 151–154.
- Абдразаков А., Жеенбаев Ж., Конавко Р.И. и др. Определение эпюры скорости плазмы с помощью сферических частиц // 5-я Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы: Тез. докл. – Новосибирск: Наука, 1972. – Т. 2. – С. 141–144.
- Яненко Н.Н., Солоухин Р.Н., Попырин А.И., Фомин В.М. Сверхзвуковые двухфазные течения в условиях скоростной неравновестности частиц. – Новосибирск: Наука, 1980. – 160 с.
- Борисова А.Л., Клименко В.С., Скадин В.Г., Шаривкер С.Ю. Скорость порошка при детонационном напылении покрытий // Порошковая металлургия. – 1979. – № 1. – С. 29–31.

Первый максимум на рис. 6 при времени T=0,3 мс обусловлен наличием плотной газовой пробки в начальный момент времени, рассеивающей частицы в нормальном к оси потока направлении. Второй максимум при T=1...1,2 мс имеет более гладкий характер по сравнению с первым и объясняется максимальной концентрацией частиц в потоке именно в указанный момент времени.

Приведенные в работе результаты получены на УДГН «Катунь М» и применять их для установок с другой геометрией форкамеры, ствола и дозатора следует с осторожностью.

Разработанный экспериментальный комплекс визуального исследования параметров потока частиц при детонационном напылении покрытий, позволяет в масштабе реального времени контролировать скорость частиц потока и корневой угол. Применение системы ввода изображения в ЭВМ VS-CTT-285/X/E-2001/М дает возможность разработки методов контроля и яркостной температуры частиц на подложке и в потоке в режиме реального времени [14].

- Солоухин Р.И. Ударные волны и детонация в газах. М.: Изд-во физ. мат. лит-ры, 1963. – 175 с.
- Топчиян М.Е. Распределение энергии в пересжатых детонационных и ударных волнах и его влияние на их устойчивость // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2005. – Т. 3. http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2005-11-21-001.pdf
- Евстигнеев В.В., Гуляев П.Ю., Полторыхин М.В., Шарлаев Е.В., Яковлев В.И. Исследование зависимости параметров дисперсного потока от временных интервалов загрузки порошка в технологический канал при ДГН // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: Труды I Всерос. науч.-техн. конференции. – Бийск, 2000. – С. 206–207.
- Жуков М.Ф., Лягушкин В.П., Солоненко О.П. Автоматизированный экспериментальный стенд для комплексного исследования высокотемпературных гетерогенных струй. – Новосибирск, 1986. – 69 с. – (Препринт) АН СССР, Сиб. отдел. – НИС ИТФ, 145-86.
- Киселев С.П., Руев Г.А., Трунев А.П. и др. Ударно-волновые процессы в двухкомпанентных и двухфазных средах. – Новосибирск: Наука, 1992. – 261 с.
- Пат. 2099674 РФ. МПК G01J 5/52. Способ измерения яркостной температуры объекта / В.В. Евстигнеев, В.М. Коротких, П.Ю. Гуляев, А.В. Еськов, М.А. Гумиров. Заявлено 01.07.1996; Опубл. 20.12.1997, Бюл. № 35. – 2 с.: ил.

Поступила 14.11.2006 г.