

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ЧАСТИЦ АЛЮМОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА В ДВУХФАЗНОМ ДЕТОНАЦИОННО-ГАЗОВОМ ПОТОКЕ

А.А. Ситников, А.В. Собачкин, В.И. Яковлев, М.В. Логинова,
Н.А. Макарова, А.П. Свиридов

Работа посвящена определению скоростей и температур частиц алюмоматричного композита в двухфазном потоке при детонационно-газовом напылении. Расчет скорости и температуры предварительно был выполнен в среде AnsysWorkbench. Проверка значений, полученных при моделировании, проводилась с помощью экспериментально-диагностического комплекса методом измерения скорости по трассерам частиц (PTV). Установлено, что оптимальные режимы напыления (высокая скорость и относительно невысокая температура) достигаются при гранулометрическим составе алюмоматричного композита 40...63 мкм.

Ключевые слова: композиционный материал, детонационно-газовое напыление, моделирование, высокоскоростная съемка.

Получение наиболее качественных покрытий из всех методов газотермического напыления обеспечивают высокоскоростные потоки частиц детонационно-газового напыления (ДГН) [1]. Одной из проблем в указанной области является оптимизация режима нанесения покрытий, которая определяется набором взаимосвязанных аэродинамических, теплофизических и химических параметров, что обуславливает необходимость применения комплексного подхода к процессам контроля в импульсных высокотемпературных двухфазных газовых потоках. На качество покрытий значительное влияние оказывает также гранулометрический состав напыляемого материала и конечная температура частиц порошка [2-5].

Для выхода на оптимальный режим ДГН используется метод многократных пробных напылений. Однако некоторое количество входных параметров в технологии могут быть неконтролируемыми, что приводит к неполной воспроизводимости результата напыления и отражается на качестве покрытия. Подобный метод является весьма трудоемким, продолжительным и дорогостоящим, поэтому рациональным является предварительное моделирование процессов, происходящих в стволе установки детонационно-газового напыления. Для проверки значений, полученных при компьютерном моделировании, можно использовать специальный экспериментально-диагностический стенд, который поз-

воляет определять выходные скоростные и температурные параметры [6].

Целью данной работы является определение значений скорости и температуры частиц алюмоматричного композита в двухфазном детонационно-газовом потоке методом моделирования в среде AnsysWorkbench и выполнением экспериментального исследования на стенде визуального исследования параметров потока частиц.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала для детонационного напыления были выбраны порошковые материалы, состоящие из алюминиевой матрицы с равномерно распределенными в ней наноразмерными частицами по типу углеродных наноструктур [7]. Применение подобных материалов обусловлено разработкой технологии детонационно-газового напыления антифрикционных покрытий поршня ДВС.

Была разработана методика проведения виртуального эксперимента по процессу движения двухфазного потока (продукты детонации и частицы порошка) в камере и стволе установки детонационного напыления и проведено исследование линий тока частиц порошка. Исследование проводилось конечно-элементной методикой «вычисляемая жидкостная динамика» (Computational Fluid Dynamics - CFD) в среде AnsysWorkbench. Моделирование движения частиц осуществлялось для частиц алюминия.

Математическая модель основана на уравнениях Навье-Стокса:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k) = 0,$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = S_i,$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} ((\rho E + P)u_k + q_k - \tau_{ik}u_i) =$$

где u_i – компоненты вектора скорости газа;

ρ , P – плотность и давление газа;

S_i – внешние объемные силы;

E – полная энергия единичной массы газа;

Q_H – тепло, выделяемое в единичном объеме газа;

τ_{ik} – тензор вязких сдвиговых напряжений;

q_k – тепловой поток.

При моделировании горения использовалась модель конечной скорости химических реакций. В этом случае химическая реакция горения описывается как совокупность элементарных реакций.

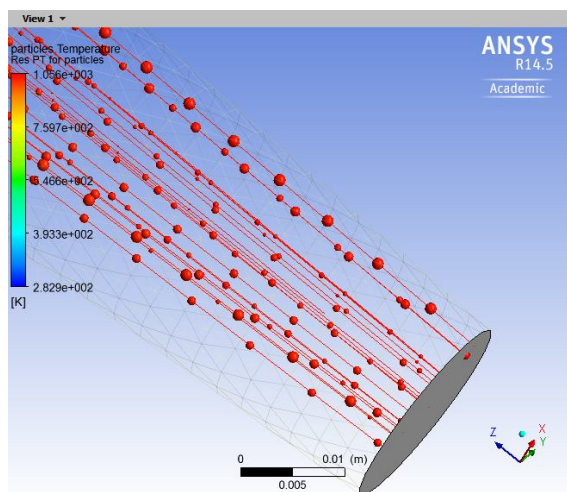
Основным параметром, варьируемым при моделировании процесса детонационно-газового напыления алюмоматричных композитов, являлся гранулометрический состав порошкового материала (0...40 мкм, 40...63 мкм, 63...100 мкм, 100...160 мкм).

Экспериментальный стенд визуального исследования параметров потока частиц при детонационном напылении покрытий позволяет в масштабе реального времени контролировать скорости частиц потока.

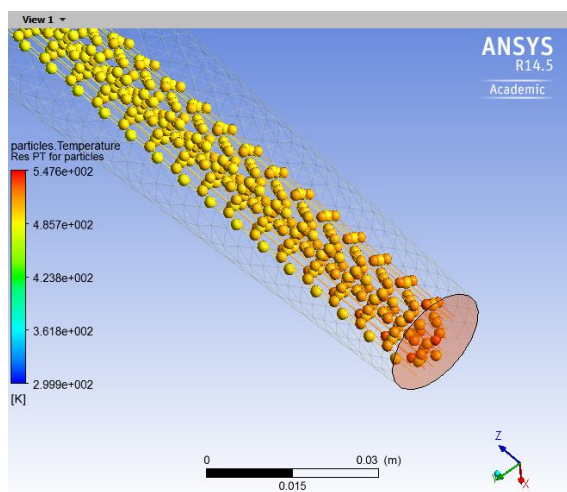
Скорости частиц в импульсном потоке детонационного напыления измеряются PTV-методом (PTV, Particle Tracking Velocimetry – измерение скорости по трассерам частиц) [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изменение температуры порошковых частиц, полученных при моделировании, представлено на рисунке 1. Представленные изображения описывают температуру частиц алюмоматричного материала на выходе из конического ствола установки газодетонационного напыления.



а) размер частиц 0...40 мкм, температура достигает свыше 1000 °С



б) размер частиц 100...160 мкм, температура достигает 540 °С

Рисунок 1 – Моделирование изменения температуры частиц в процессе движения в двухфазном потоке в зависимости от размерной группы напыляемого материала.

Результаты моделирования показывают, что выбирать для напыления алюмоматричного композита частицы размерами меньше 40 мкм нецелесообразно ввиду практически полного испарения частиц порошка в результате движения в двухфазном потоке. Данный вывод подтверждается и экспериментальным путем – при напылении порошкового материала дисперсностью менее 40 мкм прирост толщины покрытия несущественен.

Результаты моделирования скорости частиц в двухфазном потоке представлены на рисунке 2.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ЧАСТИЦ АЛЮМОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА В ДВУХФАЗНОМ ДЕТОНАЦИОННО-ГАЗОВОМ ПОТОКЕ

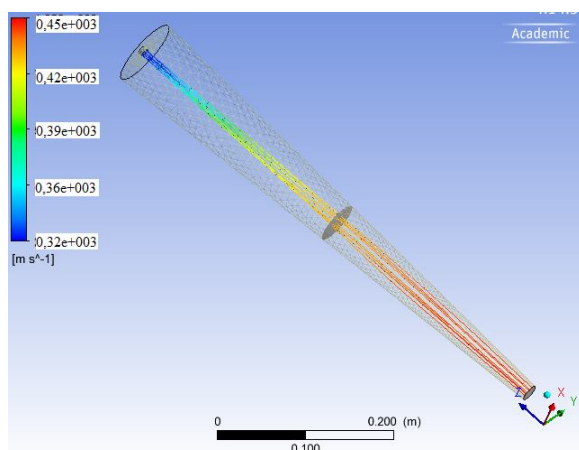


Рисунок 2 – Моделирование изменения скорости частиц алюмоматричного материала в процессе движения в двухфазном потоке.

Характерные снимки движения частиц, полученные на экспериментальном стенде визуального исследования параметров потока частиц при детонационном напылении в масштабе реального времени, представлены на рисунке 3.

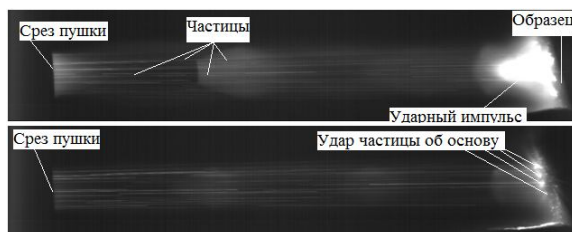


Рисунок 3 – Столкновение частиц напыляемого порошка с основой

Зная масштаб изображения, по длине треков частиц и времени экспозиции $T_{\text{нак}}=160$ мкс определялась скорость частиц в потоке, которая составила порядка 400 м/с для времени $T=1-5$ мс, через каждые 500 мкс. На рисунке 4 приводится пример изображения треков частиц потока с рассчитанной скоростью.

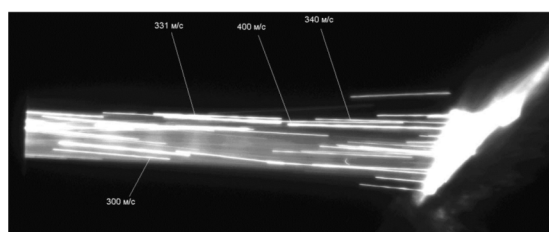


Рисунок 4 – Изображения треков частиц ($T_{\text{нак}}=160$ мкс, $T_k=4$ мс)

При расчете длины трека в данной работе предполагается, что трек остается от одной частицы. Толщина некоторых треков на изображении больше диаметра частиц используемого порошка, что может объясняться 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.

Погрешность определения длины трека зависит от кратности увеличения оптической системы и погрешности расчета длины по пикселям. Для используемого объектива Индустар-61П/3-МС и расстояния до импульсного дисперсного потока 1 м, масштаб изображения составлял 69×4 пикселя на 0,01 м изображения или 8 % относительной погрешности.

ВЫВОДЫ

1. В среде AnsysWorkbench проведено моделирование процесса движения частиц алюмоматричного композиционного материала в стволе установки детонационно-газового напыления. Установлено, что оптимальной дисперсной группой для напыления является размер частиц 40...63 мкм.

2. Определены экспериментальные значения скорости частиц в двухфазном потоке при детонации. В начале цикла напыления скорости возрастают до 400 м/с к $T_k=1$ мс, при T_k от 1 до 4,5 мс практически сохраняют свое значение около 400 м/с и после $T_k=4,5$ мс в конце цикла напыления – убывают. Выявлена средняя скорость частиц алюмоматричного материала (355,8 м/с).

3. Результаты моделирования в среде AnsysWorkbench и экспериментального определения скоростей движения частиц алюмоматричного композиционного материала коррелируют друг с другом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Собачкин А. В., Попова А. А., Назаров И. В. Структура и свойства газодетонационных покрытий различного функционального назначения на основе порошков слоистых механокомпозиатов с металлической и интерметаллидной матрицей // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 6 (102). С. 16–22.

2 Попова А. А., Собачкин А. В., Назаров И. В., Яковлев В. И., Логинова М. В., Ситников А. А., Ша-

рафутдинов М. Р., Ляхов Н. З. Динамическая дифрактометрия фазовых превращений при высокотемпературном синтезе в порошковых механоактивированных системах в условиях объемного воспламенения // Известия РАН. Серия физическая. 2013. Т. 77. № 2. С. 140–143.

3. Собачкин А.В., Назаров И.В., Яковлев В.И., Ситников А. А., Ярцев П. С. Морфология покрытий из многокомпонентных, предварительно механоактивированных порошков СВС-композитов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2012. № 3 (56). С. 141–144.

4 Собачкин А. В., Яковлев В. И., Ситников А. А. Применение методов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и механоактивационной обработки для создания новых наплавочных материалов // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 9. С. 17–22.

5. Ситников А. А., Яковлев В. И., Собачкин А.В., Сейдуров М. Н., Татаркин М. Е. Покрытия из механоактивированных СВС-материалов для рабочих органов сельскохозяйственных машин, наплавленные ручным дуговым способом // Ползуновский вестник. 2012. № 1/1. С. 273–277.

6. Еськов А.В., Яковлев В.И. Автоматизированный экспериментальный комплекс исследования и контроля детонационного потока при напылении частиц // Известия Томского политехнического университета. 2007. Т. 311. № 2. С. 130-134.

7. Yakovlev V. I., Sobachkin A. V., Sitnikov A. A. Application of Self-Propagating High-Temperature Synthesis and Mechanoactivating Treatment for Producing Multi-Component Composite Alloying Materials // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 379. P. 173–177.

8. Гуляев П. Ю., Евстигнеев В. В., Яковлев В.И., Полторыхин М. В., Шарлаев Е. Способ определения скоростей частиц в продуктах детонации и взрыва // Патент РФ № 2193781, на изобретение по заявке № 2000125631/28, приоритет от 11.10.00.

Ситников А. А. – ректор, д.т.н., профессор, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, E-mail: sitalan@mail.ru;

Собачкин А. В. – с.н.с. ПНИЛ СВС, к.т.н., АлтГТУ им. И.И. Ползунова, E-mail: anicpt@rambler.ru;

Яковлев В. И. – доцент кафедры НТТС, к.т.н., АлтГТУ им. И.И. Ползунова, E-mail: anicpt@rambler.ru;

Логина М. В. – с.н.с. ПНИЛ СВС, к.т.н., АлтГТУ им. И.И. Ползунова, E-mail: anicpt@rambler.ru;

Макарова Н. А. – ассистент кафедры НТТС, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, E-mail: anicpt@rambler.ru;

Свиридов А. П. – аспирант, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, E-mail: anicpt@rambler.ru