

УДК 621.793.72

Исследование характеристик двухфазного потока методом бесконтактной диагностики

А.В. Воронцовский, А.А. Ходыкин

В настоящее время одним из наиболее современных методов поверхностной обработки деталей машин является газотермическое напыление. Технология включает в себя целый ряд процессов, которые представляют собой воздействие на напыляемый материал с целью ускорения и нагрева его частиц. Однако влияние режимных параметров технологических установок на скорость и температуру частиц до сих пор изучено недостаточно. В данном исследовании проведено тестирование системы AccuraSpray-G3 бесконтактной диагностики двухфазного потока с целью определения пригодности ее применения для анализа дозвуковых двухфазных потоков. Получены зависимости скорости и приращения температуры частиц конденсированной фазы от основных режимных параметров технологической установки. Результаты исследования свидетельствуют о возможности использования системы AccuraSpray-G3 для анализа двухфазных потоков с целью оптимизации режимов работы технологических установок. Результаты исследований будут полезны при совершенствовании технологии электродуговой металлизации.

Ключевые слова: газотермическое напыление, электродуговая металлизация, двухфазный поток, бесконтактная диагностика.

The study of two-phase flow characteristics by a non-invasive method

A.V. Voronetskiy, A.A. Khodykin

One of the pioneer methods of surface processing of machine part is gas thermal spraying. The technology includes a variety of processes affecting sprayed-on materials in order to accelerate and heat their particles. However, the influence of the operating conditions of processing units on the speed and temperature of particles has not been adequately studied. In this work, the AccuraSpray-G3 system for non-invasive diagnostics of a two-phase flow is tested to ensure its application to the analysis of subsonic two-phase flows. The relationships between the speed and temperature of the particles in the condensed phase and the main operating conditions of processing units are obtained. The results of the study show the efficiency of using the AccuraSpray-G3 system for the analysis of two-phase flows in order to optimize the modes of operation of processing units. The results of research will be useful for improving the electric arc metal spraying technology.

Keywords: thermal spraying, electric arc metal spraying, two-phase flow, non-invasive diagnostics.

В последние десятилетия одним из важнейших путей развития отечественной промышленности является конверсионное применение достижений ракетного двигателестроения. Использование



ВОРОНЕЦКИЙ
Андрей Владимирович
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

VORONETSKIY
Andrey Vladimirovich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)



ХОДЫКИН
Александр Алексеевич
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

KNODYKIN
Aleksandr Alekseevich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)

в мирных целях колоссального объема расчетных и экспериментальных данных по исследованию рабочих процессов в камерах сгорания жидкостных ракетных двигателей, ракетных двигателей на твердом топливе, гидрореактивных двигателей позволяет решить целый ряд проблем в смежных отраслях машиностроения.

Одним из наиболее интересных направлений конверсионного применения разработок ракетного двигателестроения является создание технологических установок для сверхзвукового газопламенного напыления (СГН). Использование данного метода позволяет получать покрытия с характеристиками, недостижимыми для традиционных и более распространенных процессов газотермического напыления, таких как газопламенное проволочное и порошковое напыление, плазменное напыление, электродуговая металлизация и др.

Исследование влияния режимных параметров процессов газотермического напыления на скорость и температуру частиц — одна из основных задач оптимизации технологических установок с целью повышения качества напыляемых покрытий.

Применение современных средств бесконтактной диагностики двухфазных потоков позволяет получить большой объем экспериментальных данных, измеренных с высокой точностью. Такие установки можно условно разделить на два типа: с высоким (Теснар DPV-2000) и низким (Теснар PlumeSpector) пространственным разрешением сенсора. Используемая в настоящей работе система AccuraSpray-G3 сочетает в себе свойства обоих типов, позволяя измерять как интегральные характеристики струи (яркость, форму), так и скорость и температуру частиц двухфазного потока.

На данном этапе исследования был проведен ряд экспериментов на дозвуковой двухфазной струе. Моделирование струи выполнялось с помощью установок электродуговой металлизации. Принцип работы этих установок заключается в следующем [1]. Две проволоки подаются с одинаковой заданной скоростью через контактные наконечники, обеспечивающие подвод напряжения к проволокам и направляющими их с высокой точностью в зону кон-

такта. В зоне контакта проволоки оплавляются и с помощью потока сжатого газа расплавленный металл распыливается (атомизируется). В результате образуется струя высокотемпературных частиц. Таким образом электродуговой металлизатор в данном случае применялся в качестве генератора струи светящихся частиц. Для атомизации расплавленного металла используется воздух или азот.

В настоящей работе тестирование установки AccuraSpray-G3 проводилось в процессе исследования влияния режимов работы установки на параметры частиц конденсированной фазы.

Экспериментальная установка. Одним из основных элементов экспериментальной установки является металлизатор FlexiArc 300 производства компании Sulzer Metco AG (Швейцария), предназначенный для ручной работы в различных общеинженерных применениях. В состав металлизатора входит источник питания с максимальным рабочим током 300 А, толкающий пневматический привод, ручной пистолет LD/U2 с тянущим пневматическим приводом, устройство размотки проволоки. Общий вид металлизатора представлен на рис. 1, а основные технические характеристики приведены ниже:

| Параметр | Значение |
|---|---------------------------|
| Первичный ток, А | < 23 |
| Номинальная мощность, кВА | < 14 |
| Вторичный ток, А | 300 |
| Напряжение, В | 18—42 |
| Напряжение разомкнутой цепи, В | 21—47 |
| Цикл загрузки (при максимальном токе), % | 100 |
| Охлаждение | Воздушное конвективное |
| Давление подачи атомизирующего воздуха (максимальное), бар | 10 |
| Расход атомизирующего воздуха, н.л/мин ... | 1 500 |
| Расход воздуха на привода, н.л/мин | 350 |

Система измерения. Для измерения параметров двухфазного потока (температуры и скорости частиц) использовалась диагностическая система AccuraSpray-G3 производства компании Теснар (Канада). Система AccuraSpray-G3 производит постоянную запись, отображает и сравнивает относительно установленных



Рис. 1. Металлизатор FlexiArc 300

пользователем предельных значений шесть параметров генерируемых технологической установкой струи с напыляемыми частицами:

- 1) среднюю температуру частиц;
- 2) среднюю скорость частиц;
- 3) пространственное положение струи;
- 4) ширину струи;
- 5) максимальную яркость струи;
- 6) интегральную интенсивность излучения струи.

Кроме этого система позволяет контролировать температуру самой сенсорной головки и температуру поверхности напыляемого образца.

Общий вид системы AccuraSpray-G3 представлен на рис. 2, а основные технические параметры системы приведены ниже:

| Параметр | Значение |
|--|-------------|
| Диапазон измеряемых скоростей, м/с | 5—1 000 |
| Погрешность измерения скорости, % | 0,5 |
| Диапазон измеряемых температур, °С: | |
| головка <i>L</i> | 900—4 000 |
| головка <i>H</i> | 1 300—4 000 |
| Погрешность измерения температуры, % ... | 2 |

В состав диагностической системы AccuraSpray-G3 входят блок управления и сенсорные головки для измерения параметров высокотемпературных (от 1 300 °С) и низкотемпературных (от 900 °С) двухфазных потоков. Блок управления оцифровывает видеосигналы и сигналы с датчиков, выполняет расчеты и выводит результаты через системный интерфейс. Графический интерфейс изображает на дисплее все относящиеся к процессу данные.

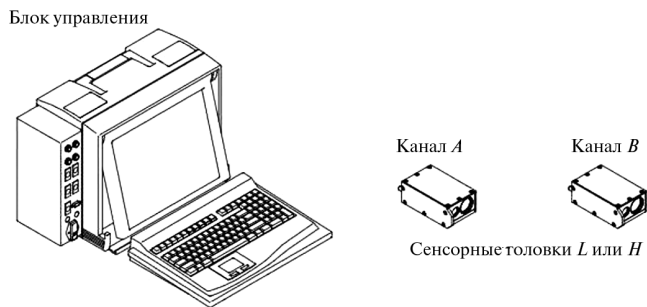


Рис. 2. Система диагностики двухфазных потоков AccuraSpray-G3

Принцип работы сенсорной головки схематично показан на рис. 3 [2, 3].

Сдвоенный оптоволоконный элемент AccuraSpray-G3 1 получает оптический сигнал от двух различных точек, имеющих пространственную ориентацию вдоль оси потока частиц 2. Таким образом одна и та же частица последовательно попадает в поле зрения датчиков 3 и 4, причем сигнал от датчика 3 приходит с некоторой задержкой τ . Поскольку расстояние между точками измерения фиксировано и составляет 3 мм, скорость частиц автоматически вычисляется по величине задержки времени τ .

Основная сложность заключается в распознавании «правильных» частиц, т. е. имеется

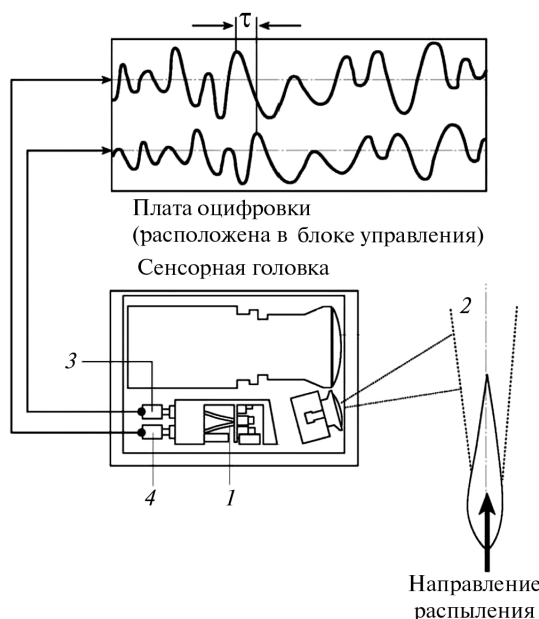


Рис. 3. Принципиальная схема сенсорной головки системы AccuraSpray-G3

в виду процедура выбраковки ложных сигналов, которые не идентифицируются с одной и той же частицей. В результате этой процедуры система формирует осредненный показатель (коэффициент корреляции), оценивающий относительное количество «правильных» частиц. Паспортная точность регистрации параметров частиц достигается, когда коэффициент корреляции превышает значение 0,9.

Температура частиц измеряется с помощью встроенного в систему двухволнового пирометра. Принцип двухволновой пирометрии основан на использовании закона Планка, согласно которому полная энергия $E(\lambda_i)$, излучаемая сферическими частицами, выражается формулой [4]

$$E(\lambda_i) = \frac{K\varepsilon(\lambda_i)c^2\lambda_i^{-5}}{e^{k_2/(\lambda_i T_1)}}$$

где K — интегральная константа, учитывающая оптические свойства системы; $\varepsilon(\lambda_i)$ — коэффициент излучения при длине волны λ_i ; c — скорость света; k_2 — постоянная Планка.

Из предположения, что значения λ_1 и λ_2 выбраны достаточно близко и $\varepsilon(\lambda_i) \approx \varepsilon(\lambda_2)$, можно записать

$$R = E(\lambda_1) / E(\lambda_2) = (\lambda_1 / \lambda_2)^{-5} e^{\frac{k_2}{T}(1/\lambda_2 - 1/\lambda_1)},$$

тогда температура частицы описывается формулой

$$T = \frac{k_2(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_1\lambda_2} \frac{1}{\ln R + 5\ln(\lambda_1 / \lambda_2)}.$$

Анализ экспериментальных данных. В серии проведенных экспериментов были получены зависимости скоростей частиц напыляемого материала от давления атомизирующего воздуха $p_{\text{возд}}$, напряжения U и дистанции напыления x . В качестве материала для напыления использовалась проволока Metcoloy 2 диаметром 1,62 мм составом Fe + 13Cr + 0,5Mn + 0,5Ni + 0,25Si.

Основное окно программного обеспечения, выводящееся на экран дисплея системы AccuraSpray-G3, показано на рис. 4. Измерения проводились на головке типа Н, предназначенной для высокотемпературных процессов газотермического напыления. При настройке сис-

темы были выбраны следующие параметры измерительной головки:

- время выдержки 1/256 с;
- коэффициент усиления 64.



Рис. 4. Основное окно системы AccuraSpray-G3

Диапазоны измеряемых величин, параметры пика кривой интенсивности, а также диапазон допустимых значений коэффициента корреляции приведены в таблице.

Настройки максимальных и минимальных значений системы AccuraSpray-G3

| Параметр | Значение | |
|----------------|-------------|--------------|
| | Минимальное | Максимальное |
| Интенсивность | 300 | 600 |
| Положение пика | -7,5 | 4,5 |
| Ширина | 15,0 | 30,0 |
| Высота пика | 5,00 | 15,00 |
| Корреляция | 0,6 | 1,0 |
| Скорость, м/с | 5 | 50 |

Результаты измерений представлены на рис. 5. Для тестирования системы диагностики наибольший интерес представляет оценка возможности регистрации незначительных изменений температуры частиц при высоком уровне их абсолютных значений. Поэтому на рисунке приведены зависимости именно приращений температур от исследуемых параметров. Зависимости скорости частиц даны в абсолютных величинах.

Несмотря на то, что в исследованном диапазоне изменения параметров процесса скорость

частиц изменяется незначительно, диагностическая система AccuraSpray-G3 обеспечивает возможность выявления основных функциональных зависимостей.

Если говорить о зависимости скорости частиц от давления атомизирующего воздуха (рис. 5, а), то полученный характер кривой вполне понятен, поскольку при повышении $p_{\text{возд}}$ увеличивается расход воздуха и, соответственно, растет скорость потока в выходном сопле металлатора.

Кривая зависимости скорости частиц от дистанции напыления имеет максимум в области 120 мм (рис. 5, б), что можно объяснить следующим образом. На начальном участке струи скорость газа достаточно высока и имеет место интенсивное ускорение частиц потоком воздуха. Однако по мере размывания ядра струи скорость воздуха начинает заметно снижаться, что сопровождается торможением частиц. Полученные зависимости скорости частиц

от давления атомизирующего воздуха и дистанции напыления качественно соответствуют данным, представленным в работах [5, 6]. Следует отметить, что изменение напряжения практически не оказывает влияния на скорость частиц (рис. 5, в).

Зафиксированное увеличение приращения температуры частиц при повышении давления атомизирующего воздуха (см. рис. 5, а) обусловлено ростом скорости частиц, т. е. частицы не так быстро охлаждаются (от начальной температуры) за счет меньшего времени пребывания в струе воздуха. Прирост температуры частиц составил 152 °С, что говорит о значительном влиянии давления атомизирующего воздуха на температуру частиц.

Влияние дистанции напыления на приращение температуры частиц (при постоянном давлении атомизирующего воздуха) объясняется достаточно просто. По мере движения частиц в потоке воздуха идет процесс их постоянного охлаждения.

Зависимость приращения температуры частиц от напряжения имеет возрастающий характер с локальным максимумом в районе 28 В. Это, по всей видимости, связано с ростом сопротивления материала проволоки при повышении температуры. При достижении определенного значения увеличение напряжения не вызывает роста температуры частиц.

Выводы

1. Проведено тестирование работы диагностической системы AccuraSpray-G3 при изменении скорости и температуры частиц к-фазы дозвукового двухфазного потока. Для моделирования струи использован воздушный металлатор FlexiArc 300.

2. Показано, что не смотря на незначительный диапазон изменения скорости частиц диагностическая система AccuraSpray-G3 обеспечивает возможность выявления основных функциональных зависимостей исследуемого процесса.

3. Получены зависимости скорости и температуры частиц от дистанции напыления и режимных параметров металлатора, что позво-

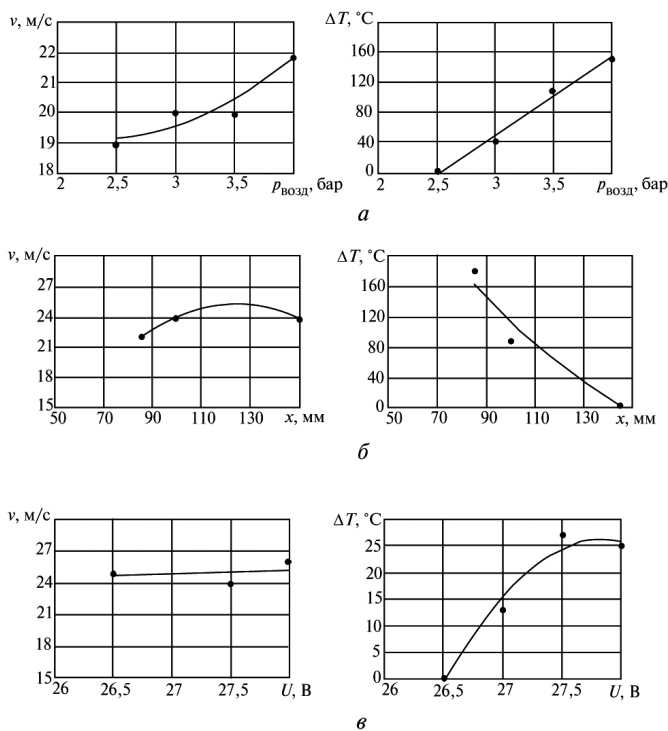


Рис. 5. Зависимости скорости и приращения температуры частиц от основных параметров процесса:

а — $U = 30$ В, $x = 150$ мм; б — $U = 30$ В, $p_{\text{возд}} = 4$ бар;
в — $x = 150$ мм, $p_{\text{возд}} = 4$ бар

ляет разрабатывать рекомендации по оптимизации процесса.

В качестве следующего этапа исследований предполагается измерение параметров сверхзвуковых двухфазных потоков.

Литература

- [1] Fauchais P., Vardelle A., Dussoubs B. Quo Vadis Thermal Spraying? *Journal of Thermal Spray Technology*, 2001, vol. 10, pp. 44–66.
- [2] Blain J., Pouliot L., Nadeau F., Lamontagne M., Moreau C. Optimization of Sensor Optics for Industrial Thermal Spray Sensors. *Proceedings of the 2007 International Thermal Spray Conference*. Beijing (PRC), May 14–16, 2007, pp. 832–836.
- [3] Bobzin K., Ernst F., Zwick J., Richardt K., Schmitt R., Doeren J. Increase of Process Robustness Through Offline Process Control and Noise Factor Influence Reduction. *Proceedings of the 2007 International Thermal Spray Conference*, Beijing (PRC), May 14–16, 2007, pp. 855–859.
- [4] Fincke J.R., Haggard D.C., Swank W.D. Particle Temperature Measurement in the Thermal Spray Process. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2001, vol. 10, pp. 255–266.
- [5] Hale D.L., Swank W.D., Haggard D.C. In-Flight Particle Measurements of Twin Wire Electric Arc Sprayed Aluminum. *Journal of Thermal Spray Technology*, 1998, vol. 7, pp. 58–63.
- [6] Planche M.P., Liao H., Coddet C., Belfort F. In flight particles analysis for the characterization of the arc spray process. *Proceedings of the*

2005 International Thermal Spray Conference, Basel (Switzerland), May 2–4, 2005, pp. 647–651.

References

- [1] Fauchais P., Vardelle A., Dussoubs B. Quo Vadis Thermal Spraying? *Journal of Thermal Spray Technology*, 2001, vol. 10, pp. 44–66.
- [2] Blain J., Pouliot L., Nadeau F., Lamontagne M., Moreau C. Optimization of Sensor Optics for Industrial Thermal Spray Sensors. *Proceedings of the 2007 International Thermal Spray Conference*. Beijing (PRC), May 14–16, 2007, pp. 832–836.
- [3] Bobzin K., Ernst F., Zwick J., Richardt K., Schmitt R., Doeren J. Increase of Process Robustness Through Offline Process Control and Noise Factor Influence Reduction. *Proceedings of the 2007 International Thermal Spray Conference*, Beijing (PRC), May 14–16, 2007, pp. 855–859.
- [4] Fincke J.R., Haggard D.C., Swank W.D. Particle Temperature Measurement in the Thermal Spray Process. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2001, vol. 10, pp. 255–266.
- [5] Hale D.L., Swank W.D., Haggard D.C. In-Flight Particle Measurements of Twin Wire Electric Arc Sprayed Aluminum. *Journal of Thermal Spray Technology*, 1998, vol. 7, pp. 58–63.
- [6] Planche M.P., Liao H., Coddet C., Belfort F. In flight particles analysis for the characterization of the arc spray process. *Proceedings of the 2005 International Thermal Spray Conference*, Basel (Switzerland), May 2–4, 2005, pp. 647–651.

Статья поступила в редакцию 03.07.2013

Информация об авторах

ВОРОНЕЦКИЙ Андрей Владимирович (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Ракетные двигатели». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: voron@bmstu.ru).

ХОДЫКИН Александр Алексеевич (Москва) — аспирант кафедры «Ракетные двигатели». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: phantom5@mail.ru).

Information about the authors

VORONETSKIY Andrey Vladimirovich (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor of «Rocket Engines» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: voron@bmstu.ru).

KHODYKIN Aleksandr Alekseevich (Moscow) — Post-Graduate of «Rocket Engines» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: phantom5@mail.ru).