

**ВЛИЯНИЕ ОБОЛОЧКИ НА НАГРЕВ ПЛАКИРОВАННЫХ ЧАСТИЦ
ПРИ ПЛАЗМЕННОМ НАПЫЛЕНИИ**

И. В. Смирнов, д-р техн. наук

Национальный технический университет Украины «КПИ», г. Киев

Аннотация. Рассмотрены особенности нагрева плакированных частиц в плазменной струе при напылении. Обобщена математическая модель нагрева частицы порошка с оболочкой при плазменном напылении с учетом согласования температуры плазменной струи и частицы во времени. С помощью аналитического решения установлено влияние толщины оболочки на прогрев ядра плакированной частицы.

Ключевые слова: плакирующая оболочка, частица, плазменная струя, теплопроводность, краевая задача.

Анотація. Розглянуто особливості нагрівання плакованих частинок у плазмовому струмені при напиленні. Узагальнено математичну модель нагрівання частинки порошку з оболонкою при плазмовому напиленні з урахуванням узгодження температури плазмового струменя та частинки в часі. За допомогою аналітичного розв'язку встановлено вплив товщини оболонки на прогрів ядра плакованої частинки.

Ключові слова: плакувальна оболонка, частинка, плазмовий струмінь, теплопровідність, крайова задача.

Abstract. The heating features of the coated particles in a plasma stream when spraying have been considered. The mathematical heating model of powder particle with a shell when plasma spraying is generalized. It takes into the account the time matching of plasma stream temperature and a particle. Using the analytical solution the influence of the shell thickness on heating of the coated particle is determined.

Keywords: cladding layer, particle, plasma stream, thermal conductivity, boundary problem.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

При плазменном напылении большое внимание уделяется установлению оптимального температурного режима частиц напыляемого порошка, зависящего от множества факторов, связанных, в первую очередь, с кинетическими и теплофизическими параметрами как плазменной струи, так и напыляемого материала. Задача усложняется в случае использования для напыления керамических порошков из-за их специфических физических свойств и термодинамической неустойчивости. Даже термодинамически стойкие оксиды склонны к значительной диссоциации при температуре нагрева частиц, близкой к температуре плавления. Между степенью диссоциации и теплотой образования оксидов наблюдается некоторая корреляция. В порядке возрастания термодинамической устойчивости оксиды можно расположить в следующей последовательности: $\text{SiO}_2 \rightarrow \text{Cr}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{Cr}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{TiO}_2 \rightarrow \text{ZrO}_2 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3$.

При тепловых потоках порядка $10^8 \dots 10^9$ Вт/м², которые реализуются при плазменном напылении, температурные перепады в частицах оксидов могут достигать $10^7 \dots 10^9$ К/м. В этом случае температура поверхности частицы может превышать температуру плавления с сохранением в центре твердого ядра. Наличие таких градиентов температуры приводит к значительному возрастанию времени прогрева всей частицы до необходимой температуры плавления.

На развитие температурных процессов, и как следствие, фазовых превращений значительное влия-

ние может оказывать металлическая оболочка, покрывающая керамическую частицу и обеспечивающая, в свою очередь, повышение адгезионно-когезионных свойств напыленных покрытий. Изменяя условия теплообмена с помощью плакирующей оболочки на частицах порошка, можно сближать или разделять процессы их нагрева, плавления и испарения при напылении [3].

**АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
И ПУБЛИКАЦИЙ**

Теоретические и экспериментальные исследования температурного режима напыляемых частиц в плазменной струе проводились многими учеными [8]. При этом температурно-временные зависимости, согласующие температуру плазменной струи и время пребывания напыляемой частицы в высокотемпературной зоне, учитывались недостаточно. Существующие зависимости можно использовать лишь на начальном этапе пребывания частицы в плазменной струе, когда разница температур и скоростей струи и частицы достаточно велика.

При решении задач, связанных с газотермическим напылением, необходимо знать строение плазменной струи, а также законы изменения температуры и скорости по радиусу и по оси струи. Результаты данных исследований, в том числе с помощью математического моделирования, представлены в работах [9, 12]. Комплексное компьютерное моделирование как плазменной струи, так и процесса напыления реализовано в программных пакетах CSPSP, Plasma 2000,

MARC [11]. Однако ограниченность используемых в данных пакетах баз данных материалов, конструктивных и технологических параметров плазмотронов не позволяет исследовать процесс напыления в нестандартных условиях за пределами предлагаемых диапазонов, в том числе при использовании композиционных (плакированных) порошков.

Детальный анализ физико-химических аспектов напыления и применения плакированных порошков приведен в [2, 4]. Математическое моделирование и исследование физики процессов нанесения плазменных покрытий из композиционных плакированных порошков выполнены в [5, 6]. В этих работах решена задача Стефана для случая плавления двухслойной композиционной частицы при ее транспортировке в плазменной струе дугового плазмотрона. Установлен диапазон параметров, обеспечивающий проплавление плакирующей оболочки Ni и разогрев твердого ядра частиц карбида титана-хрома. При этом показано, что нагрев частиц плакированных порошков в плазменной струе должен быть в определенном интервале – для обеспечения, с одной стороны, проплавления тугоплавкого керамического ядра, а с другой – сокращения потерь металлической оболочки путем испарения.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ – исследование влияния плакирующей оболочки на температурный режим керамических частиц в плазменной струе с помощью математических моделей теплопроводности.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Большинство керамических оксидов частично спектрально-прозрачны, поэтому в общем случае их нагрев описывается уравнением, содержащим кондуктивную и радиационную составляющие. Однако для частиц диаметром менее 100 мкм для любого времени нагрева и диаметром менее 3 мкм при времени нагрева не более 3 мс радиационную составляющую в уравнении энергии можно не учитывать. В этом случае оно сводится к уравнению теплопроводности, конкретный вид которого зависит от строения и формы частицы.

При моделировании процесса нагрева частицы в плазменном потоке исходили из следующих предположений: частица имеет сферическую форму и распределение в ней температуры имеет сферическую симметрию; частица является однородным, изотропным телом; внутренние источники тепла отсутствуют. В [9] было показано, что время сфероидизации частицы в потоке плазмы – порядка 10^{-8} с, тогда как время разогрева частицы превышает 10^{-4} с. Следовательно, предположение о сферической форме частицы приемлемо.

Если допустить, что все термодинамические коэффициенты на определенном этапе полета частицы в плазменной струе постоянны и равны средним зна-

чениям в рассматриваемом диапазоне температур, то математическую модель можно сформулировать следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(rT)}{\partial t} &= a \frac{\partial^2(rT)}{\partial r^2} \text{ при } r \in [0, R]; \\ \frac{\partial(rT_1)}{\partial t} &= a_1 \frac{\partial^2(rT_1)}{\partial r^2} \text{ при } r \in [R, R_1]; \\ T_1(R, t) &= T(R, t); \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=R} &= \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R}; \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=R_1} &= \left[\alpha \left(\frac{H_{\text{пл}}}{C_r} - T_1 \right) - \varepsilon \sigma T_1^4 \right] \Big|_{r=R_1}; \\ \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} &= 0, T < \infty; \\ T_1(r, 0) &= T(r, 0) = T_0. \end{aligned}$$

где $a = \frac{\lambda}{c\rho}$; $a_1 = \frac{\lambda_1}{c_1\rho_1}$; λ , c , ρ и λ_1 , c_1 , ρ_1 – коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, плотность материала ядра и оболочки соответственно; α – коэффициент теплообмена; $H_{\text{пл}}$ – энтальпия плазменной струи; C_r – эквивалентная теплоемкость; ε – коэффициент черноты поверхности частицы; σ – постоянная Стефана–Больцмана; T_0 – начальная температура частицы; R_1 , R – внешний и внутренний радиусы оболочки соответственно.

Ранее было установлено [10], что для проведения точных расчетов температуры нагрева керамических частиц необходимо согласовывать температуру плазменной струи и время пребывания напыляемой частицы в высокотемпературной зоне. С этой целью были построены графические зависимости изменения температуры плазменной струи $T_{\text{пл}}$ от времени пребывания в ней напыляемой частицы t . Полученные зависимости аппроксимировались полиномом второй степени вида $T_n = A + Bt + Ct^2$ с коэффициентом достоверности аппроксимации R не менее 0,99. В [5] распределение температуры в тонкой оболочке представлено в виде двух первых членов разложения $T_1(t, r)$ в ряд по степеням $\frac{1}{r}$ и получено решение третьей краевой задачи для уравнения теплопроводности, описывающей изменение температуры ядра в потоке плазмы постоянной температуры. Аналитическое решение данной краевой задачи при условии изменения температуры плазмы, аппроксимированного квадратичными полиномами, приведено в [1]. Данное решение позволяет определить температуру в двухслойной частице при различных радиусе и толщине оболочки. С учетом этого получен график изменения максимума температуры, достигаемого частицей оксида алюминия радиусом 25 мкм, плакированной

оболочкой из меди, в зависимости от внешнего радиуса, т. е. при неизменном радиусе ядра и меняющейся толщине оболочки (рис. 1).

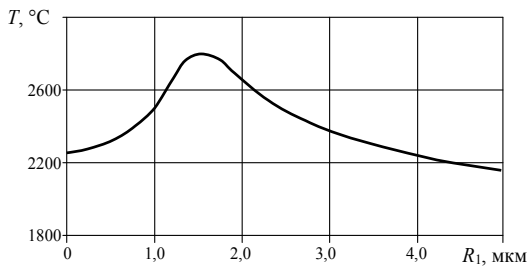


Рис. 1. Зависимость максимальной температуры частицы оксида алюминия радиусом 25 мкм, плакированной медной оболочкой, от ее внешнего радиуса

Из рис. 1 следует, что наличие медной оболочки толщиной 1,5 мкм способствует максимальному увеличению температуры ядра, а при толщине оболочки более 4 мкм частица оксида алюминия может не расплавиться. Задаваясь различными диаметрами плакированной частицы при неизменном диаметре ядра, можно установить влияние толщины оболочки на время достижения плакированной частицей требуемой температуры, например температуры плавления ядра.

Схематическое определение оптимальной толщины оболочки показано на рис. 2, где приведены графики изменения температуры частиц до момента достижения максимума и температуры плазменной струи у поверхности частиц в зависимости от времени. Участки убывания температуры не показаны, чтобы не загромождать рисунок.

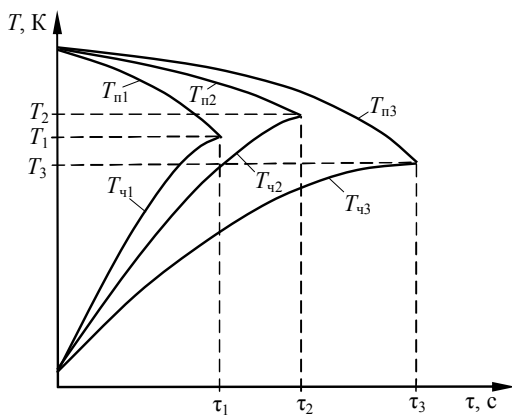
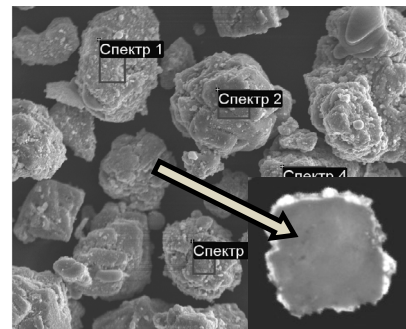


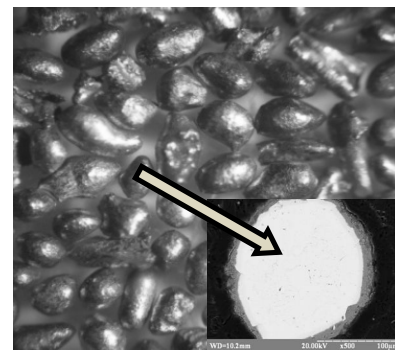
Рис. 2. Изменение температуры плакированной частицы T_c и плазменной струи T_n во времени: индексы 1, 2, 3 соответствуют толщине оболочки 1, 1,5, 3 мкм

Из рис. 2 видно влияние динамики движения плакированных частиц на температуру их нагрева. В данном случае изменение скорости частиц происходит за счет увеличения их массы пропорцио-

нально толщине оболочки. Соотношение диаметра и толщины оболочки для различных частиц иллюстрирует рис. 3.



a



б

Рис. 3. Морфология и микрошлиф частиц плакированного порошка: *a* – оксида алюминия с оболочкой из титана толщиной 1,5 мкм; *б* – карбида вольфрама с оболочкой из меди толщиной 3 мкм

Так, например, при наличии медной оболочки толщиной 1,5 мкм на ядре оксида алюминия диаметром 50 мкм его масса увеличится на 48 %, при оболочке из титана такой же толщины масса ядра увеличится на 19 % (рис. 3, *a*). Столько же привеса по массе образуется при оболочке из меди толщиной 3 мкм на частицах карбида вольфрама (рис. 3, *б*).

ВЫВОДЫ

1. Развитая математическая модель нагрева частицы порошка с оболочкой при плазменном напылении, учитывающая согласование температуры плазменной струи и частицы во времени, позволила установить влияние толщины оболочки на прогрев ядра плакированной частицы.

2. Оптимальная толщина медной определена оболочкой на уровне 1,5 мкм (48 % мас.) для частицы оксида алюминия диаметром 50 мкм.

3. При этой величине достигается максимальный прогрев тугоплавкого керамического ядра, что способствует получению качественных плазменных покрытий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Андрейцев, А. Ю.** Моделирование нагрева частицы порошка с оболочкой при газотермическом напылении [Текст] / А. Ю. Андрейцев, И. В. Смирнов // Тез. докл. междунар. науч. конф. «Современные проблемы математики и ее приложения в естественных науках и информационных технологиях». – Х., 2011. – С. 215–216.
- [2] Газотермические покрытия [Текст] / В. Н. Анциферов, А. М. Шмаков, С. С. Агеев, В. Я. Буланов ; под ред. В. Н. Анциферова. – Екатеринбург : УИФ «Наука», 1994. – 318 с.
- [3] Газотермическая обработка керамических оксидов [Текст] / М. Н. Бодяко, Ф. Б. Вурзель, Е. В. Кремко [и др.] ; под ред. О. В. Романа. – Минск : Наука и техника, 1988. – 223 с.
- [4] Газотермическое напыление композиционных порошков [Текст] / А. Я. Кулик, Ю. С. Борисов, А. С. Мнухин, М. Д. Никитин. – Л. : Машиностроение, 1985. – 199 с.
- [5] Математическое моделирование нагрева порошкового композиционного материала в плазменной струе [Текст] / В. А. Барвинок, В. И. Богданович, И. А. Докукина, В. Л. Китайкин, А. Н. Плотников // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2001. – № 2. – С. 197–203.
- [6] Математическое моделирование и физика процессов нанесения плазменных покрытий из композиционных плакированных порошков [Текст] / В. А. Барвинок, В. И. Богданович, И. А. Докукина, А. Н. Плотников. – М. : Междунар. центр науч. и техн. информации, 1998. – 96 с.
- [7] **Михатулин, Д. С.** Гетерогенные потоки: газодинамика, теплообмен, эрозия [Текст] : препринт ИВТАН № 2-402 / Д. С. Михатулин, Ю. В. Полежаев, И. В. Репин. – М., 1997. – 87 с.
- [8] Нанесение покрытий плазмой [Текст] / В. В. Кудинов, П. Ю. Пекшев, В. Е. Белашенко [и др.]. – М. : Наука, 1990. – 406 с.
- [9] Нагрев и испарение частиц в струе низкотемпературной плазмы [Текст] / Ю. Н. Лохов, В. А. Петруничев, А. А. Углов, И. И. Швыркова // Физ. и хим. обраб. материалов. – 1974. – № 6. – С. 52–56.
- [10] **Смирнов, И. В.** Аналитическое определение скорости и температуры частиц оксидной керамики в процессе плазменного напыления [Текст] / И. В. Смирнов, А. Ю. Андрейцев, А. В. Черный // Вестник ХНТУ. – 2009. – № 2(35). – С. 403–410.
- [11] Формирование газотермических покрытий: теория и практика [Текст] / А. Ф. Ильющенко, В. А. Оковитый, С. П. Кундас, Б. Форманек ; под общ. ред. А. Ф. Ильющенко. – Минск : Бестпринт, 2002. – 480 с.
- [12] **Cheng, K.** Comparison of laminar and turbulent plasma jet characteristics – a modeling study [Text] / Kai Cheng, Xi Chen, Wenxia Pan // Plasma Chem. Plasma Process. – 2006. – Nr 26. – P. 211–235.

© І. В. Смірнов

Надійшла до редколегії 23.04.13

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. В. Ф. Квасницький