

Математическая модель процесса плазменного распыления пруткового электрода для получения титанового порошка

Р.А. Окулов^{1,2}, С.А. Ильиных¹, М.Н. Захаров¹, С.М. Ахметшин¹

¹Институт металлургии Уральского отделения РАН, Амундсена 101, Екатеринбург, Россия, 620016

²Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Мира 19, Екатеринбург, Россия, 620002

Аннотация. Разработана математическая модель процесса получения порошка титана из стержня методом плазменного распыления. Был проведен натурный эксперимент, результаты которого удовлетворительно согласуются с данными компьютерного эксперимента. Результаты имеют практическую пользу для разработчиков и потребителей соответствующего технологического оборудования.

1. Введение

Перед металлургией стоит ряд актуальных задач, требующих решений. Среди прочих, актуальной задачей является производство металлических порошков. Развитие аддитивных технологий определяет растущий спрос на металлические порошки с заданными свойствами. Например, существует требование к порошковой продукции: химически однородные беспористые сферичные частицы, размер которых колеблется в диапазоне от 20 до 100 мкм. Одним из применяемых на практике методов получения металлических порошков является плазменное распыление металлического электрода (пруток, проволока). Таким методом получают порошки титана и его сплавов, нержавеющей стали и другие [1-4].

На свойства производимого порошка оказывают воздействие множество параметров, например, скорость и температура плазменного потока. В свою очередь, на изменение скорости и температуры потока плазменной струи оказывает воздействие ряд факторов. Важную роль играет геометрия внутреннего канала плазменной установки, которая определяется формой деталей, участвующих в его формировании.

Цель работы заключается в разработке математической (компьютерной) модели установки, адекватно описывающей реальный процесс получения титанового порошка. В число основных узлов, входящих в состав проектируемой установки, входят следующие: плазматрон, источник питания, система водяного охлаждения, компрессор, узел подачи металлического электрода, камера приема порошка, циклон. В рамках данного исследования разработаны математические модели установок, в состав которых входили два различных варианта исполнения конструкции камеры приема порошка. Проведен сравнительный анализ влияния на результат и процесс производства порошка применения конструкций плазменных установок с различными вариантами исполнений конструкций камер. На основании разработанных математических моделей установки станет возможным прогнозирование результата производства порошкового

материала. Результаты исследования представляют практическую пользу для совершенствования технологического оборудования.

2. Описание математической модели и результаты расчетов

При создании математических моделей установки плазменного получения порошка использован программный пакет SolidWorks, позволяющий реализовать решение методом конечных элементов. Оценка влияния размера элемента разбиения сетки конечных элементов на точность выполняемого расчета и обоснования выбора его размера представлен в работе [5].

Обзор применяемых в производственной практике конструкций камер приема порошка и выбор наиболее применимых для моделирования приведен в работе [6]. Схемы исследуемых конструкций камеры приема порошка в составе плазменной установки (с указанием размеров) представлены на рисунке 1. Выявлены достоинства и недостатки каждой из рассматриваемых конфигураций. К недостаткам первого варианта (рисунок 1 а) относится сложность реализации возможности охлаждения поверхности камеры в связи с ее большой площадью. Второй вариант (рисунок 1 б) исполнения предусматривает наличие дополнительного участка (цилиндрический участок $\varnothing 400 \times 1100$ мм), что позволяет более эффективно использовать поверхность камеры для охлаждения, поскольку основной тепловой удар сосредоточен в верхней зоне и приходится на него. Схему отвода тепла от данного цилиндрического участка путем изготовления полости в стене камеры для водного охлаждения реализовать проще из-за меньшей площади. К достоинствам второго варианта относится и меньший объем внутренней полости камеры, что позволяет экономить газ (гелий или аргон) при использовании защитной газовой среды.

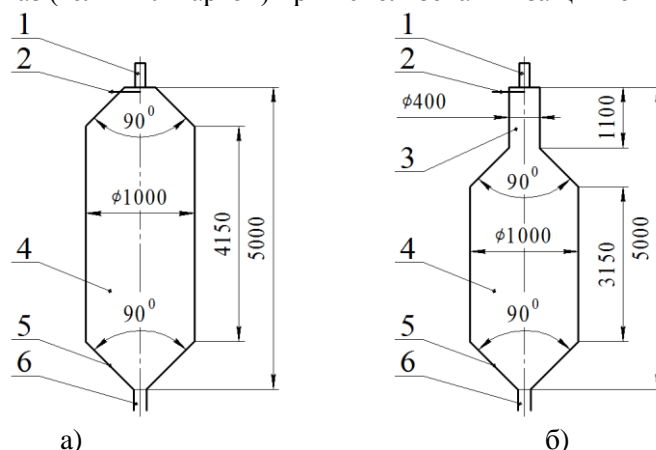


Рисунок 1. Схемы конструкций камеры приема порошка первого (а) и второго (б) вариантов: 1 – плазмотрон; 2 – узел подачи металлического электрода; 3 – вспомогательный участок; 4 – камера приема порошка; 5 – контрольный конический участок камеры; 6 – циклон.

При моделировании модификаций камеры приема порошка учитывали технические возможности промышленного chillera, имеющегося в распоряжение организации, с хладопроизводительностью от 3,7 до 135 кВт. Отвод тепла был смоделирован для каждого из рассматриваемых вариантов, исходя из особенностей конструкции и свойств материала камеры – сталь 12X18Н10Т (ГОСТ 5949), толщина стенки 4 мм.

В качестве вводных исходных данных для проведения расчета приняли следующие: тип газа – аргон, объемный расход газа – 50 л/мин; давление плазмообразующего газа – 1,5 атм.; температура плазмы 7000 К. Моделируемые конструкции плазмотрона и металлического электрода соответствовали реальным объектам, использованным при проведении натурного эксперимента, описанного в данной статье ниже. В состав конструкции рабочего узла плазмотрона входит анод с коническим конфузормым участком с переходом диаметра с 11 до 8 мм длиной 58 мм. Сечение вдоль оси головной части плазмотрона, входящего в состав установки, с целью демонстрации профиля деталей, образующих форму внутреннего канала, представлено на рисунке 2.

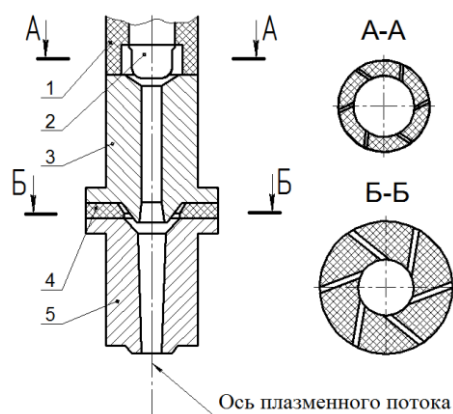


Рисунок 2. Схема сечения вдоль оси головной части плазмотрона: 1, 4 – газовый завихритель; 2 – катод; 3 – межэлектродная вставка; 5 – анод.

В качестве металлического электрода применили пруток из титана ВТ1-0 (ГОСТ 19807), диаметром 3 мм. Массовый расход пруткового материала, подверженного распылению в потоке плазменной струи приняли 10 г/с. Разработанная математическая модель металлического электрода, соответствует образцу, полученному в результате проведенного натурального эксперимента. Изображение образца до и после обработки представлен на рисунке 3.

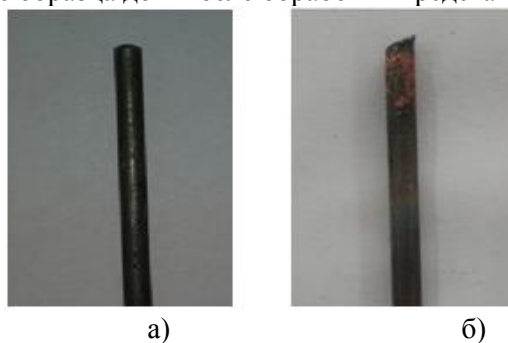


Рисунок 3. Образец электрода до (а) и после (б) обработки.

Целью математического эксперимента было определение:

- среднего значения температуры нагрева внутренней поверхности контрольного конического участка камеры, T_{cp} , (рисунок 1, позиция 5) при устоявшемся процессе;
- массовой интенсивности налипания частиц фракции 60 мкм на внутреннюю поверхность контрольного конического участка камеры, M_{60} ;
- доли налипших частиц фракцией 60 мкм на внутреннюю поверхность контрольного конического участка камеры, Φ_{60} ;
- распределения температуры и скорости вдоль оси плазменного потока на расстоянии 200 мм от торцевой плоскости анода (выход плазмотрона).

Результаты представлены в таблице 1 и на рисунке 4.

Таблица 1. Результаты математического эксперимента.

| Вариант исполнения конструкции камеры | Внутренний объем камеры (m^3) | T_{cp} (К) | M_{60} ($г/с \cdot m^2$) | Φ_{60} (%) |
|---------------------------------------|-----------------------------------|--------------|------------------------------|-----------------|
| Первый | 3,52 | 645,7 | 0,12 | 4,21 |
| Второй | 2,87 | 375,6 | 0,05 | 1,82 |

В результате анализа представленных данных пришли к выводу о том, что использование конструкции с дополнительным цилиндрическим участком $\varnothing 400 \times 1100$ мм (второй вариант, рисунок 1) позволяет более эффективно использовать поверхность камеры для охлаждения,

поскольку основной тепловой удар сосредоточен в верхней зоне. Интенсивное охлаждение указанной зоны приводит к понижению средней температуры в камере, вследствие чего происходит более быстрое остывание частичек во всем диапазоне производимых в процессе распыления прутка фракций порошка. Реализовать на практике отвод тепла в конструкции камеры первого варианта исполнения является затруднительным и менее технологичным с точки зрения изготовления системы охлаждения. Кроме того, внутренний объем камеры второго варианта меньше на 18,5% по сравнению с камерой первого, что приводит к экономии расхода защитных газов, применяемых для создания среды в которой возможен процесс производства титановых порошков.

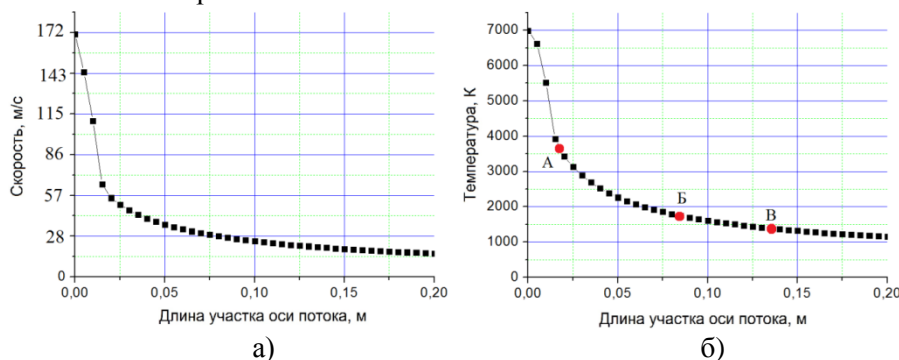


Рисунок 4. Изменения скорости (а) и температуры (б) вдоль оси струи потока, где: точки А (вольфрам), Б (сталь) и В (медь) по данным натурального эксперимента.

3. Натурный эксперимент

С целью верификации результатов части математического эксперимента провели натурный. На базе ИМЕТ УрО РАН функционирует плазменная установка, применяемая для получения металлических порошков. Конструкция плазматрона, параметры металлического электрода и прочие вводные данные, используемые в теоретических исследованиях, описанных выше, соответствуют реальным объектам, участвующим при проведении натурального эксперимента. Подробнее о конструкции лабораторной установке сказано в работах [7-8].

Цель натурального эксперимента заключалась в определении температуры плазменной струи вдоль ее оси для последующего соотнесения полученных данных с результатами компьютерного эксперимента. Для этого отобрали прутки диаметром 3 мм из материалов: медь М1 (ГОСТ 859), Сталь 10 (ГОСТ 1050) и вольфрам лантанированный (ТУ 48-19-27). При выборе материалов руководствовались тем, что они имеют различную температуру плавления. Прутки поочередно размещали в манипуляторе перпендикулярно оси потока плазменной струи таким образом, чтобы один конец прутка находился на оси, а второй был зажат в манипуляторе. Манипулятор располагали на расстоянии 0,5 м от плазматрона. Далее манипулятор, смонтированным в него прутком, постепенно перемещали с постоянной скоростью 50 мм/мин параллельно оси плазменного потока по направлению к плазматрону. Расстояние от прутка до торцевой плоскости анода (выход плазматрона) регистрировали. Использовали пирометр оптический (тип ЭОП-66 №240 ГОСТ 5.278), которым фиксировали температуру поверхности свободного конца прутка. В момент, когда на поверхности прутка начиналось плавление – снимали данные со шкалы пирометра и фиксировали расстояние от прутка до плазматрона. Провели три натуральных эксперимента. Результаты были усреднены и сопоставлены с результатами расчетов. Данные представлены в таблице 2 и на рисунке 4 б. Сравнительный анализ результатов натурального и теоретического экспериментов показал удовлетворительную сходимость.

4. Выводы

В результате исследования получены значения средней температуры нагрева внутренней поверхности контрольного конического участка камеры приема порошка для двух рассмотренных вариантов исполнения конструкции, а также установлена доля налипших

частиц фракции 60 мкм на внутреннюю поверхность контрольного конической участка камер. Основываясь на представленных данных можно руководствоваться при выборе формы проектируемой конструкции камеры приема порошка или при проведении модернизации уже существующей. Результаты имеют практическую пользу для разработчиков и потребителей соответствующего технологического оборудования.

Проведен натурный эксперимент с целью верификации данных полученных путем компьютерного моделирования. Результаты сравнительного анализа показали удовлетворительную сходимость.

Работа выполнена по Государственному заданию ИМЕТ УрО РАН в рамках Программы фундаментальных исследований государственных академий.

Таблица 2. Значения расстояний от прутка до торцевой поверхности анода плазмотрона при достижении температуры плавления на его поверхности по результатам теоретического и натурального экспериментов.

| Материал прутка | Теоретический эксперимент (мм) | Натурный эксперимент (мм) | Относительная погрешность (%) |
|-----------------|--------------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| Медь М1 | 141 | 135 | 4,44 |
| Сталь 10 | 82 | 85 | 3,53 |
| Вольфрам | 19 | 20 | 5,00 |

5. Литература

- [1] Струков, Н.Н. Разработка технологии плазменного распыления прутковых материалов в камере с противотоком: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.10 – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2012. – 126 с.
- [2] Neikov, O. Non-ferrous powder production: Manufacturing methods and properties of copper, aluminium, titanium and nickel powders // Powder Metallurgy Review, 2014. – P. 65-87.
- [3] Leyens, C. Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications / C. Leyens, M. Peters // WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2003. – P. 513.
- [4] Захаров, М.Н. Возможности применения порошкового материала, полученного из отходов механической обработки слитков титанового сплава вт-22 / М.Н. Захаров, О.Ф. Рыбалко, О.В. Романова, Б.Р. Гельчинский // Цветные металлы. – 2018. – № 3. – С. 75-79.
- [5] Матушкин, А.В. Совершенствование системы газовихревой стабилизации электродуговых плазмотронов для резки металлов: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.10 – Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2017. – 132 с.
- [6] Ноздрин, И.В. Разработка научных основ и технологий плазмометаллургического производства нанопорошков борида и карбида хрома: дис. ... док. техн. наук: 05.16.06 – Новокузнецк: Сибирский государственный университет, 2015. – 323 с.
- [7] Окулов, Р.А. Влияние формы внутреннего канала плазмотрона на процесс получения порошка для аддитивных технологий / Р.А. Окулов, К.И. Сарсадских, С.А. Ильиных, М.Н. Захаров // Сборник тезисов конференции: Четвертый междисциплинарный научный форум с международным участием "Новые материалы и перспективные технологии. – 2018. – Т. 3. – С. 641-644.
- [8] Окулов, Р.А. Компьютерное моделирование влияния формы внутреннего канала плазмотрона на скорость и температуру плазменной струи с целью совершенствования конструкции установки для получения металлических порошков / Р.А. Окулов, М.Н. Захаров // Сборник: Актуальные проблемы порошкового материаловедения материалы международной научно-технической конференции, посвященной 85-летию со дня рождения академика В.Н. Анциферова, 2018. – С. 161-165.

Mathematical model of the process of the plasma pulverization of the rod electrode to produce of titanium powder

R.A. Okulov^{1,2}, S.A. Ilinykh¹, M.N. Zakharov¹, S.M. Akhmetshin¹

¹Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Amundsen street 101, Ekaterinburg, Russia, 620016

²Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Mira street 19, Ekaterinburg, Russia, 620002

Abstract. A mathematical model of the process of production of titanium powder from a rod by plasma pulverization has been developed. A full-scale experiment was performed, the results of which are in satisfactory agreement with the data of a computer experiment. The results are of practical benefit to developers and consumers of the corresponding technological equipment.