

УДК 621.375.826

## Экспериментальное исследование газопорошкового потока при лазерной наплавке с использованием различных технологических насадок

*Асютин Р. Д., студент  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»*

*Научный руководитель: Ставертий А.Я., ассистент  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана  
[bauman@bmstu.ru](mailto:bauman@bmstu.ru)*

Для исследования комбинированного параметра, зависящего как от расхода газа, типа газа, так и от формы и размеров частиц, был создан лабораторный стенд (рис. 1). Стенд состоит из технологической головы (1), неподвижного источника света щелевого типа (4), видеокамеры (1). Источник света представляет из себя диодный светильник зеленого света со светимостью 2000 Лм. Светильник создает излучение зеленого цвета, выходящее через специальную щель в корпусе. Ширина щели составляет 2 мм. Ширина луча, освещающего поток порошка – тоже 2 мм, поскольку поток сыпается непосредственно возле щели, и расходимость луча пренебрегаем по причине его малости.

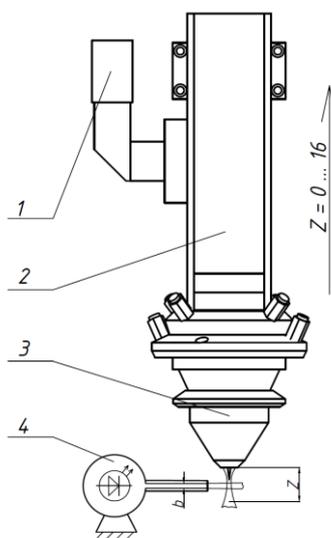


Рис. 1. Схема стенда для измерений газопорошкового потока по сечениям

Способ подачи порошка в общем случае влияет на время его пребывания при высоких температурах, и, как следствие - на формирование ванны и свойства металла после кристаллизации. Кроме того, в зависимости от конструкции насадки, скорость частиц порошка может изменяться в широких пределах [1, 2, 3]. Температура частиц при этом тоже значительно меняется. Например, при малых скоростях потока и длинных сопловых насадках, порошок перегрет под лучом, часть легкоплавких легирующих элементов может выгореть ещё до образования общей ванны расплава. Некоторые элементы, такие как карбиды кремния и вольфрама, поглощают излучение определенной длины волны практически полностью и часто сгорают до попадания в покрытие. В связи с этим, необходимо подавать их под наиболее тупым углом к подложке, сводя время пребывания под лучом к минимуму.

Выделяют несколько основных способов подачи порошковых материалов в зону лазерного воздействия: боковая подача, многоструйная и коаксиальная подача порошка. В данной работе рассматриваем два способа подачи порошков: коаксиальный и четырехструйный.

**Многоструйная подача (MultiJet)**, рис. 2. Подача из нескольких трубочек является развитым методом боковой подачи, обеспечивает симметрию подачи порошка относительно направления движения. Обычно в конструкциях таких головок используют 4 трубочки, расположенных осесимметрично (рис. 3). На выходе из трубочек частицы порошка имеют скорость выше, чем при других способах подачи. Как результат, такой метод подачи не чувствителен к направлению передвижения относительно подачи порошка и допускает наклон головы в широких пределах, до 45 градусов от вертикали. Это упрощает обработку крупногабаритных деталей без их перемещения в пространстве. Недостатком схемы является сравнительно низкая эффективность использования порошковых материалов относительно коаксиальной схемы подачи порошка (рис. 4).

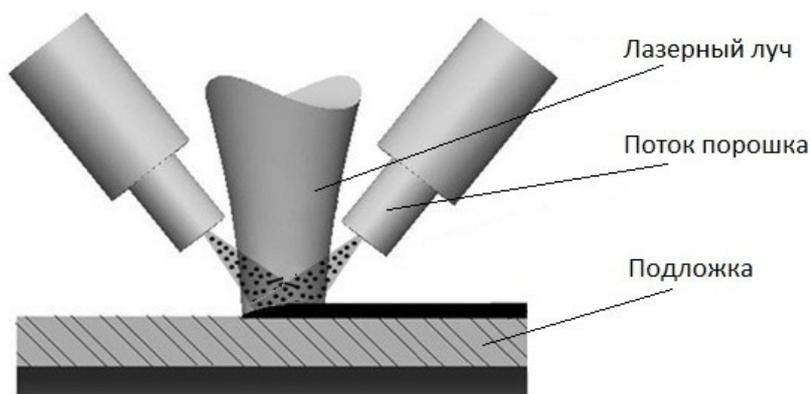


Рис. 2. Схема наплавки с многоструйной подачей порошковых материалов



Рис. 3. Четырехструйное сопло

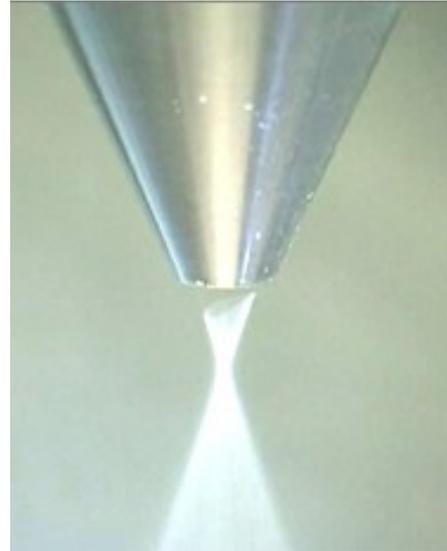


Рис. 4. Коаксиальное сопло

**Коаксиальная подача** (рис. 5) - это метод для обработки деталей более аккуратным способом, чем при многоструйной подаче. Помимо осесимметричности пучка, такой метод позволяет получить наиболее тонкий газопорошковый поток, позволяющий наносить валики шириной от 200 - 300 мкм. Диаметр лазерного луча может составлять не более 0,3 мм, а эффективность использования порошка может достигать 70%, чего не обеспечивают методы с многоструйной подачей. Такие технологические параметры позволяют обрабатывать очень чувствительные к перегреву, тонкостенные детали с минимальным тепловым воздействием и высоким качеством наплавленного слоя.

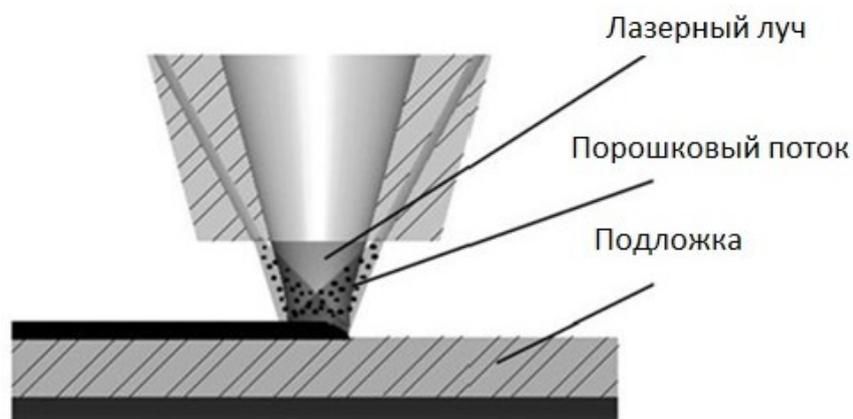


Рис. 5. Схема наплавки с коаксиальной подачей порошковых материалов

## Исследование влияния формы и размеров частиц порошка

В данной работе представлено исследование способа подачи порошковых материалов различных формы, состава и размера частиц. В таблице 1 указаны основные параметры порошковых материалов, важные для технологии. Рассматривался ряд порошковых материалов, используемых для создания композиционных покрытий. В случае создания покрытий из комбинации порошковых материалов, необходимо знать поведение отдельных составляющих при их подаче тем или иным методом, с помощью сопел различной геометрии.

Таблица 1

Параметры порошков, исследованных в работе

Марка	Размер частиц	Плотность материала, г/см <sup>3</sup>	Форма частиц
Al12Si	-80 +50	2,5	Овальные, с сателлитами
SiC	-100 +83	3,2	Колотые

Порошковый материал Al12Si – алюминиевый сплав, используемый для ремонта деталей из алюминиевых сплавов, а также для получения композиционных материалов типа Al12Si – SiC, обладающих высокой износостойкостью при низком удельном весе. Порошок имеет частицы сферической формы, с наличием небольшой доли сателлитов и частиц неправильной формы (рис. 6).

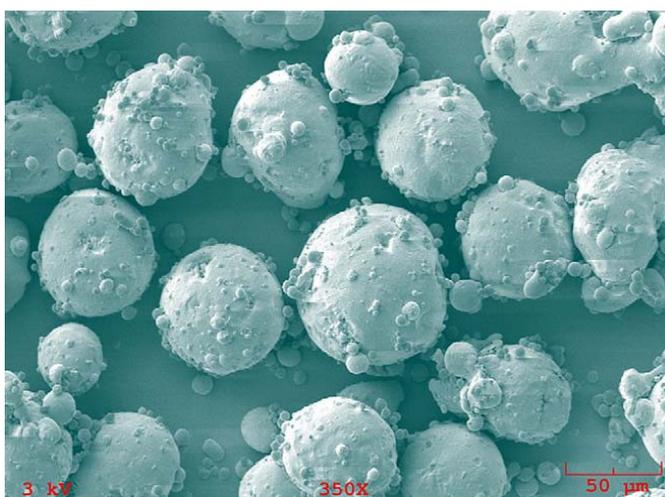


Рис. 6. Частицы порошка Al12Si, фото производителя

Порошковый материал SiC – химически чистый карбид кремния, получают дроблением кристаллов и дальнейшим рассевом по фракциям. К отличительным

свойствам необходимо отнести высокую температуру плавления, высокую твердость (зависит от кристаллической решетки и способа получения), высокую химическую стойкость при температурах до 1500 градусов Цельсия. Внешний вид порошковых частиц представлен на рис. 7. Размер фракций крабида кремния, рассмотренный в данном исследовании – от 83 до 100 мкм. Частицы имеют преимущественно колотую форму.

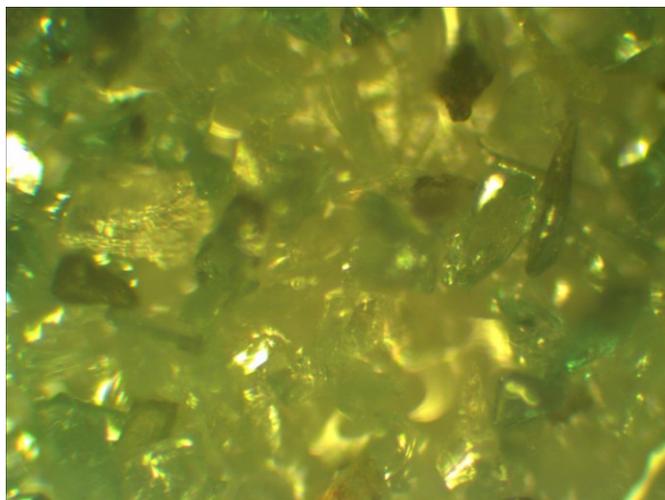


Рис. 7. Частицы порошка SiC, увеличение 100 крат

#### **Описание оборудования**

В данной работе использовалась технологическая голова для наплавки с фокусным расстоянием линзы 200 мм. Голова позволяет устанавливать различные модули для подачи порошковых материалов коаксиально (рис. 8) и с помощью четырех струйной подачи (рис. 9).

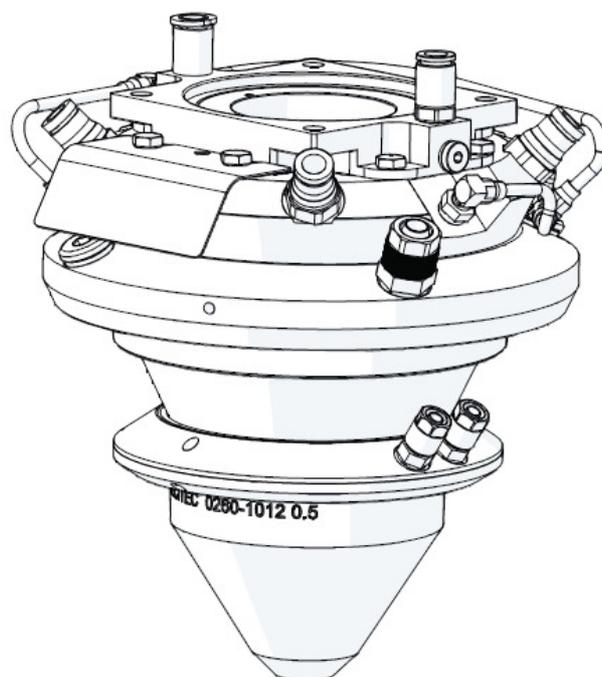


Рис. 8. Модуль для коаксиальной подачи порошковых материалов

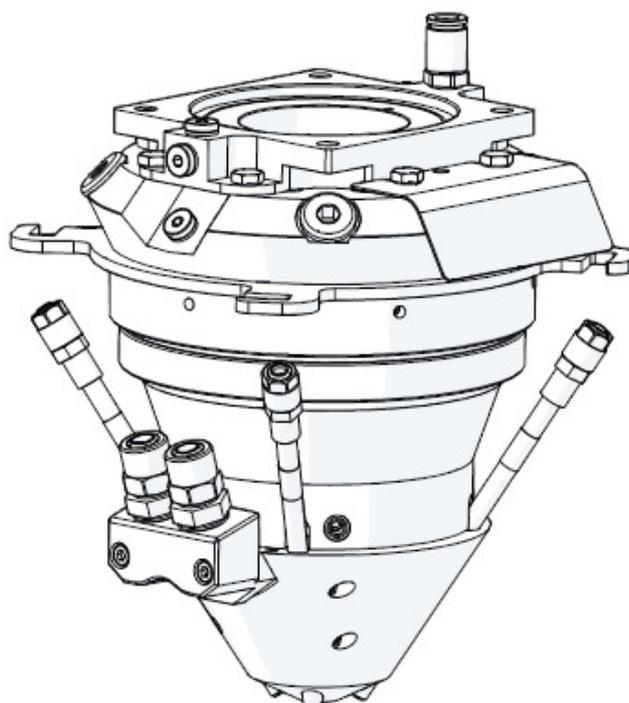


Рис. 9. Модуль для четырехструйной подачи порошковых материалов

### **Порядок измерений**

Исследуемый порошок подается в технологическую голову с помощью порошкового питателя необходимым газом: аргоном, азотом или гелием.

Технологическая голова расположена вертикально. Выходящий из нее порошковый поток подсвечивается специальным образом и регистрируется камерой. В результате на ней отображаются только те частицы, которые пролетают в данном сечении газопорошкового потока. Перемещая голову ступенчато вдоль оси и последовательно регистрируя такие изображения, получаем картину распределения частиц в газопорошковом потоке.

Зная масштаб изображений, можем получить с приемлемой для технологии точностью такие параметры газопорошкового потока как фокусное расстояние технологической оснастки по порошку, минимальный диаметр газопорошкового потока, размер «перетяжки» той или иной оснастки, относительную плотность частиц газопорошкового потока в различных его сечениях. На рис. 10 указаны наиболее важные параметры газопорошкового потока:

$L_0$  – расстояние, на котором после вылета из сопла газопорошковый поток смыкается, образуя сплошную фигуру без отверстия в центре, если рассматривать сечение.

$Z_{min}$  – расстояние, на котором диаметр потока имеет минимальный диаметр, а следовательно, максимальную плотность. Обычно данное расстояние рассматривают как рабочее, с максимальным коэффициентом использования порошка.

$L_{rab}$  – зона потока, насадка в которой обеспечивает формирование стабильного валика, без перегрева порошковых частиц и с оптимальным коэффициентом порошкового материала.

$D_{min}$  – минимальный диаметр газопорошкового потока, достигаемый в данном сопле при использовании данного порошка. Этот диаметр характеризует возможность получения валиков минимальной ширины с эффективным использованием порошка.

Перечисленные параметры необходимы для эффективного назначения конкретной насадки в определенной технологии обработки. Размер перетяжки, например, влияет на стабильность процесса нанесения покрытия.

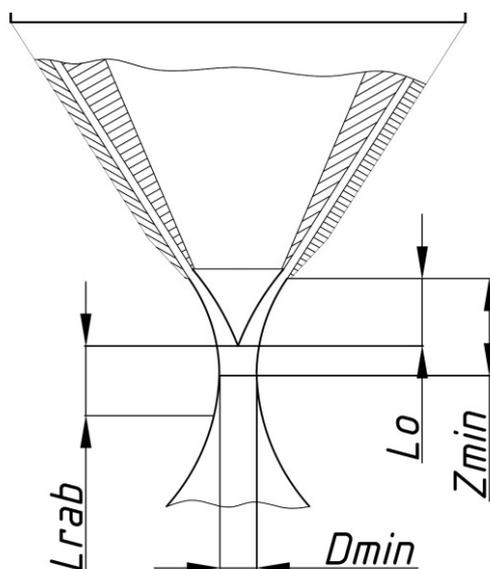
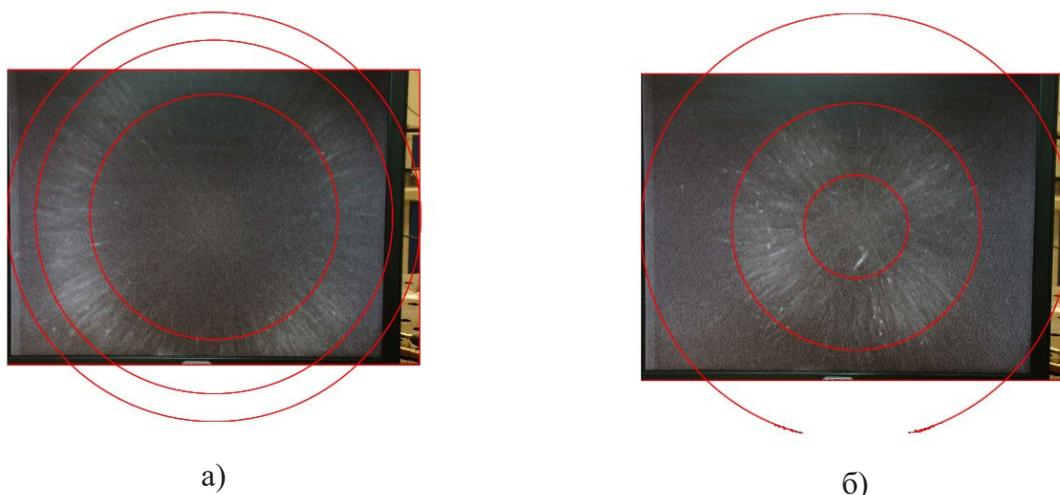


Рис. 10. Схема газопорошкового потока в зоне обработки

В ходе исследований проведена последовательная продувка серии насадок для коаксиального сопла и четырехструйного сопла. Все коаксиальные сопла представляют из себя комбинации насадок: внутренней и внешней. Внутренняя насадка защищает поток от лазерного луча, внешняя насадка формирует газопорошковый конус на выходе из сопла и значительно влияет на конечные параметры потока. Угол при вершине конуса всех рассмотренных сопел составляет 64 градуса. Поскольку все оснастки расположены в одной плоскости, условия наплавки (диаметр луча и распределение интенсивности) являются одинаковыми. Ниже приведены результаты исследований для различных комбинаций насадок с их размерами.

Измерения проводились по снимкам, полученным с коаксиальной камеры. Рис. 11 показывает, на каком расстоянии от среза сопла находится перетяжка порошка.



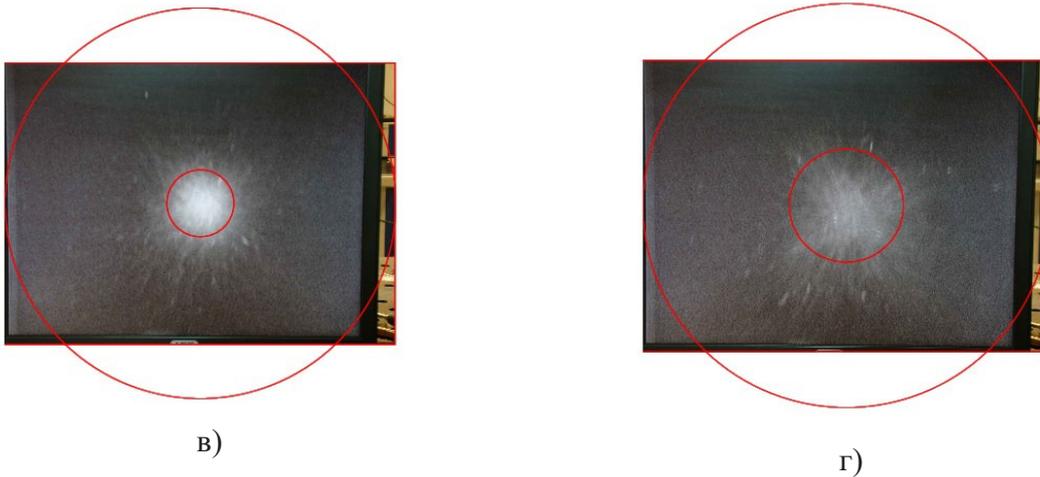


Рис. 11. Изображения с коаксиальной камеры расстояние от сопла: а) 3 мм, б) 6 мм, в) 12мм, г) 15 мм

Из полученных изображений с коаксиальной камеры по формуле:

$$x = px / D, [\text{пиксель} / \text{мм}]$$

Где  $px$  – размер изображения сопла на рисунке в мм,

$D$  – диаметр внутреннего сопла

Зная масштаб, измеряем каждый диаметр в пикселях рисунка ( $D_{\text{изм}}$ ) и пересчитываем его в истинный размер газпорошкового потока в каждом конкретном сечении:

$$R = D_{\text{изм}} / 2 \cdot x$$

### Коаксиальное сопло S 0. 5

Размеры наконечника исследуемого коаксиального сопла представлены на рис. 12.

В результате исследований установлено, что частицы порошка, вылетающие из сопла, образуют ярко выраженный конус с перетяжкой и вторым, внутренним конусом, как и представлено на эскизе. Результатом измерений стало распределение газпорошкового потока в масштабе и с размерами, привязанными к конкретной комбинации сопел.

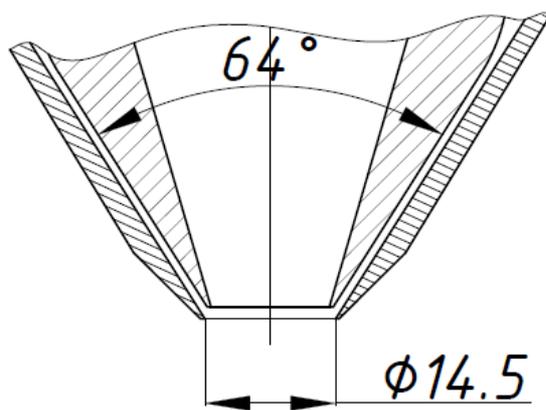


Рис. 12. Эскиз рабочей части сопла S 0.5

Из графика (рис. 13) видно, что размеры потока на выходе из сопла близки к геометрическим размерам самого сопла. Фокус газопорошкового потока находится на расстоянии около 11 мм от среза сопла, минимальный диаметр потока порошка составляет 2 мм.

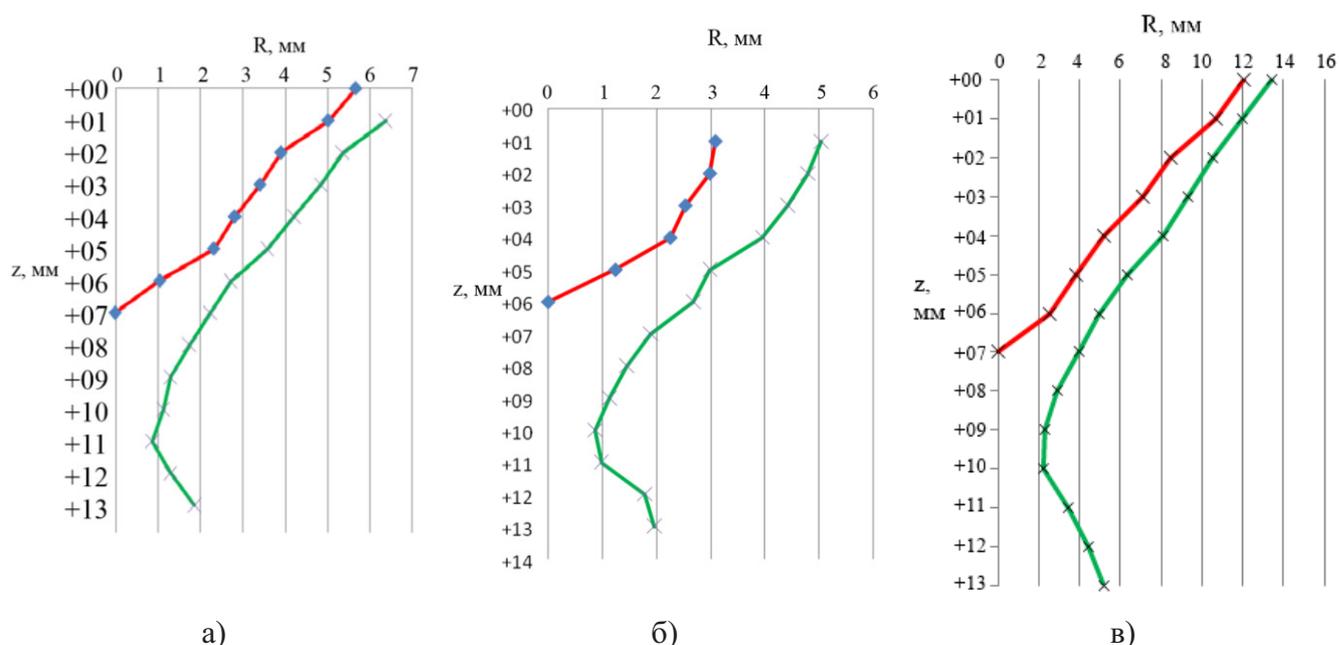


Рис. 13. Измерения газопорошкового потока от сопла S 0,5 (красная кривая – внутренняя огибающая потока, зеленая кривая – внешняя огибающая потока):  
а) для порошка SiC, б) для порошка Al12Si, в) для порошка Al12Si+SiC

Перетяжка на коаксиальном сопле S0,5 для разных порошков представлена в таблице 2.

## Параметры потока для сопла S0.5

	Расстояние от среза сопла до перетяжки, мм	Минимальный диаметр потока, мм
SiC	от 9 до 12	1.8
Al12Si	от 9 до 11	1.8
SiC+Al	от 9 до 10	4.1

**Коаксиальное сопло S 1.0**

Размеры наконечника исследуемого коаксиального сопла представлены на рис. 14.

Данное сопло отличается от предыдущего выходным диаметром внешней насадки.

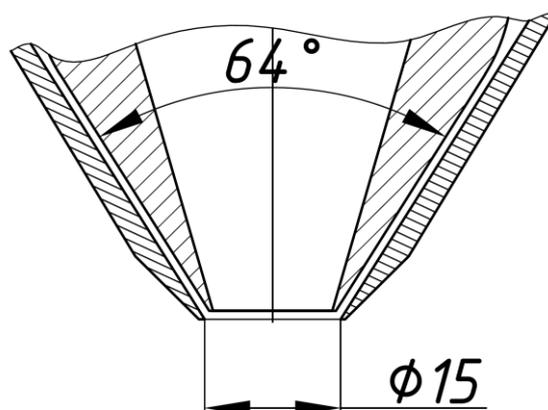


Рис. 14. Эскиз рабочей части сопла S 1.0

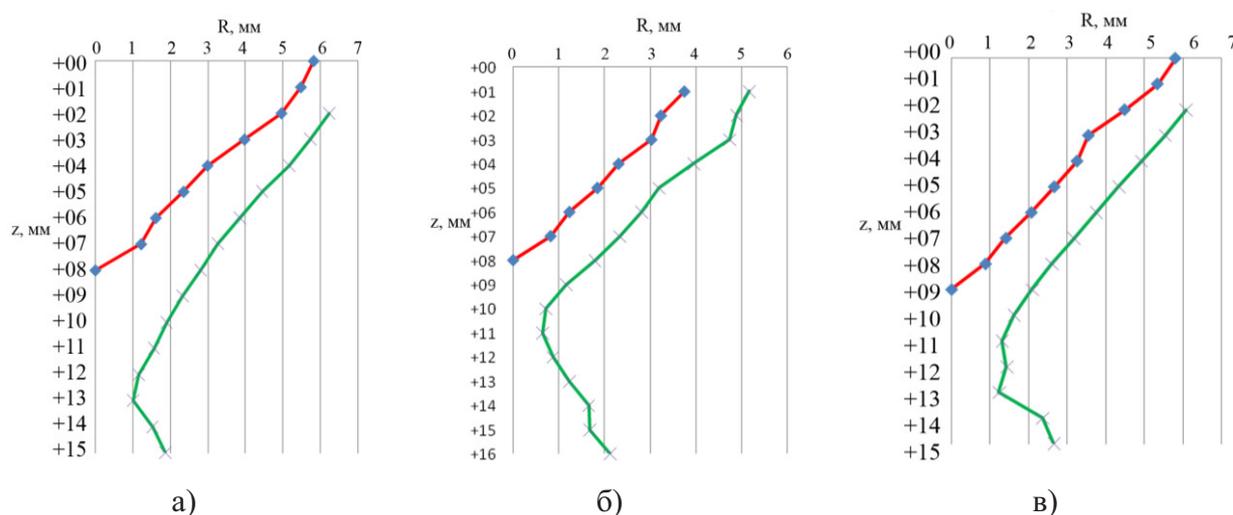


Рис. 15. Измерения газопорошкового потока от сопла S 1,0 (красная кривая – внутренняя огибающая потока, зеленая кривая – внешняя огибающая потока):

а) для порошка SiC, б) для порошка Al12Si, в) для порошка Al12Si+SiC

Перетяжка на коаксиальном сопле S 1,0, для различных порошков представлена на рис. 15 и в таблице 3.

Таблица 3

Параметры потока для сопла S1.0

	Расстояние от среза сопла до перетяжки. мм	Минимальный диаметр потока, мм
SiC	от 12 до 13	2
Al12Si	от 10 до 12	1.2
SiC+Al	от 11 до 13	2.4

### Четырехструйное сопло

Размеры наконечника исследуемого коаксиального сопла представлены на рис. 16. Порошок в сопле подают четыре отдельных трубочки с диаметром 2 мм. Угол наклона трубочек составляет 64 градуса от нормали к поверхности.

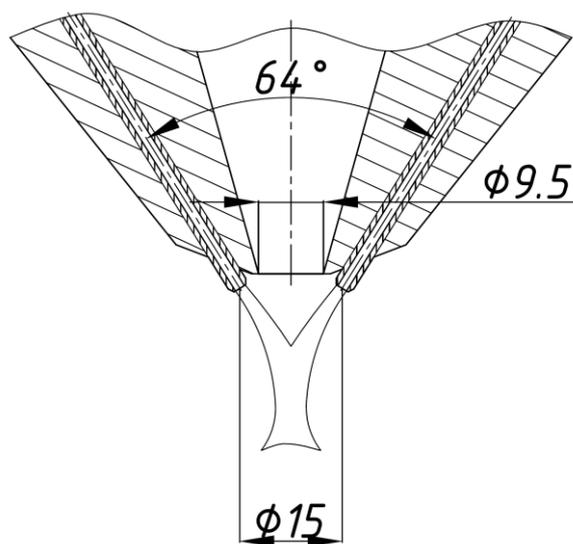


Рис. 16. Эскиз рабочей части четырехструйного сопла

Перетяжка на четырехструйном сопле, для различных порошков представлена на рис. 17 и в таблице 4.

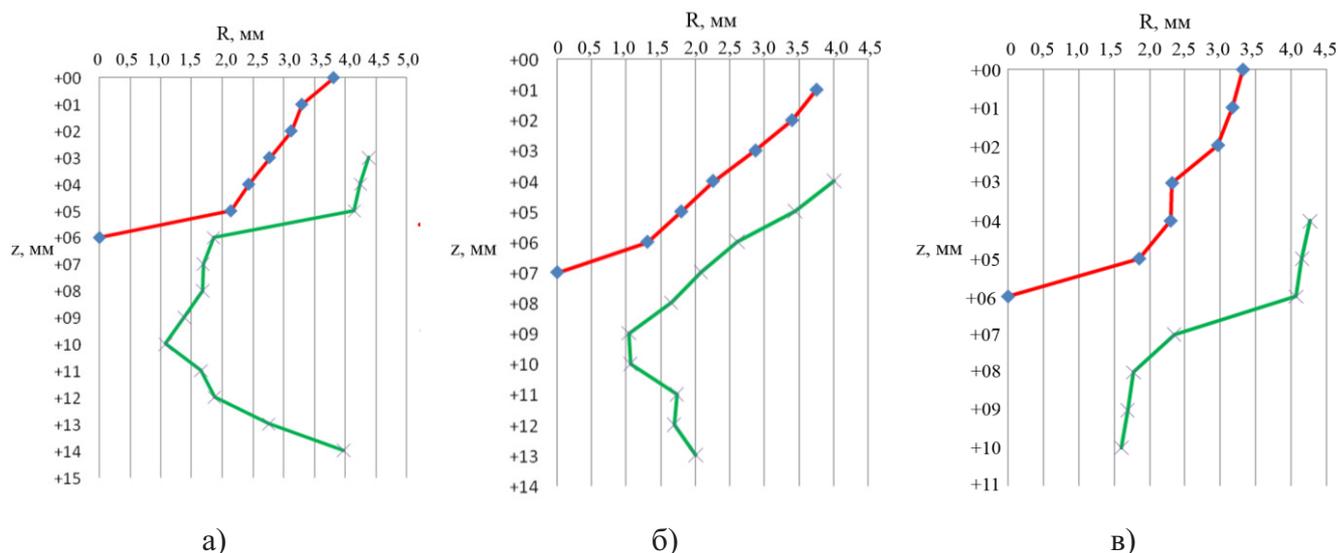


Рис. 17. Измерения газопорошкового потока от четырехструйного сопла (красная кривая – внутренняя огибающая потока, зеленая кривая – внешняя огибающая потока):  
 а) для порошка SiC, б) для порошка Al<sub>12</sub>Si, в) для порошка Al<sub>12</sub>Si+SiC

Таблица 4

Параметры потока для четырехструйного сопла

	Расстояние от среза сопла до перетяжки, мм	Минимальный диаметр потока, мм
SiC	от 9 до 11	2.2
Al <sub>12</sub> Si	от 9 до 10	2.1
SiC+Al	от 8 до 10	3.2

Таким образом, установлено, что наименьшие зазоры между срезом сопла и поверхностью подложки для отдельных порошков и для их смесей не одинаковые. Минимальный диаметр газопорошкового потока для смеси порошков больше, чем диаметр перетяжки для чистых порошков.

### Вывод

В ходе исследования были получены зависимости размера перетяжки от формы частиц порошка. Было установлено, что для порошка SiC диаметр перетяжки минимальный на коаксиальном сопле, максимальный - на четырехструйном сопле. Комбинация порошков подается с наименьшим диаметром перетяжки через сопло S1,0, так как на данной насадке конусы газопорошкового потока практически совпадают.

Поскольку ширина газопорошкового потока при подаче четырехструйным соплом гораздо больше, чем при подаче коаксиальными соплами, использование

четырёхструйных сопел оправдано только при наплавке широким лучом лазера с большой средней мощностью излучения.

Установлено так же, что сферические частицы ( $Al_{12}Si$ ) при подаче через коаксиальные сопла имеют фокусное расстояние ближе к срезу сопла, чем колотые частицы с той же плотностью ( $SiC$ ). Поэтому при наплавке композиционных материалов – смесей алюминия и карбида кремния – необходимо учитывать их несимметричное распространение в конусе газопорошкового потока.

### Список литературы

1. Новиченко Д. Ю. Разработка и исследование процесса прямого лазерного изготовления детали из композиционного материала на основе стали и карбида титана: дис. ... канд. тех. наук. М., 2011. 159 с.
2. Третьяков Р.С. Технологические особенности процесса лазерной модификации поверхностей с коаксиальной подачей порошковых материалов: дис. ... канд. тех. наук. М., 2014. 158 с.
3. Технологические процессы лазерной обработки: Учебное пособие для вузов / А. Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров; ред. А.Г. Григорьянц. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 664 с.