

МЕХАНИКА МАШИН

УДК 621.79.03

**ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ СОПЛОВОЙ СИСТЕМЫ АППАРАТОВ
ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ НА УСЛОВИЯ РАСПЫЛЕНИЯ
ПРОВОЛОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ**© 2021 г. В. М. Гусев¹, О. Ю. Елагина¹, Н. С. Нестеренко^{1,*}, А. Г. Буклаков¹¹ *Российский государственный университет нефти и газа, Москва, Россия***e-mail: nesterenko.n@gubkin.ru*

Поступила в редакцию 27.10.2020 г.

После доработки 17.02.2021 г.

Принята к публикации 24.02.2021 г.

В статье рассмотрено конструктивное влияние соплового вооружения металлаторов (сопло трубка, сопло диафрагма) на геометрию и физические особенности потока транспортного газа при давлении системы 0.4 и 0.5 МПа, что влияет на механику перемещения и диспергирования напыляемого материала. В статье представлен начальный этап оценки влияния технологических параметров режима электродуговой металлизации на воздействие транспортируемого распыляемого материала, дробление, испарение, геометрию, как прогнозируемую результирующую процесса.

Ключевые слова: электродуговая металлизация, сопло диафрагма, сопло трубка, динамическое давление, скорость потока газа, число вебера, дробление капли

DOI: 10.31857/S0235711921030056

Процесс электродуговой металлизации (ЭДМ) заключается в распылении потоком сжатого воздуха двух электропроводных проволок, между которыми горит электрическая дуга. Под действием струи транспортирующего газа расплавленный металл эвакуируется с электродов, дробится на мелкие капли и переносится на обрабатываемую поверхность. В зависимости от скорости истечения газа и его плотности изменяется динамическое давление на эвакуируемый материал. Это приводит к изменению условий его диспергирования и переноса к поверхности изделия, что в свою очередь определяет такие характеристики качества газотермического покрытия как адгезионная прочность и пористость покрытия. Как показано в работах [1–3] изменение динамического давления на различном расстоянии от сопла металлатора характеризуется нелинейной зависимостью.

Целью настоящей статьи являлось исследование влияния конструкции сопла металлатора на изменение динамического давления и диспергирование распыляемого материала при ЭДМ.

Расчетный анализ влияния параметров потока газа на диспергирование капли для различных сопловых устройств металлаторов. Электродуговые металлаторы работают при подаче воздуха на входе в сопловое устройство под давлением P_1 в пределах 0.4–0.7 МПа, что соответствует критическому режиму его истечения при выходе из сопла. Его давление на срезе сопла P_2 устанавливается выше давления наружной среды и зависит исключительно от показателя адиабаты воздуха, который для двухатомных газов равен 0.528 [5].

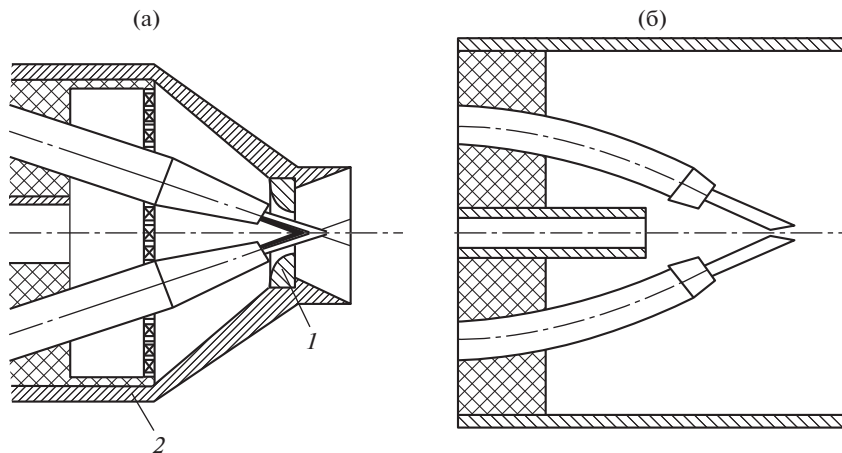


Рис. 1. Конфигурация соплового вооружения электродугowych металлаторов (1): (а) – сопло-диафрагма; (б) – сопло-трубка.

На степень расширения воздуха и величину давления на срезе сопла P_2 влияет конструкция сопла металлатора. Наиболее широко распространены два вида сопловых устройств электродугowych металлаторов: сопло-трубка и сопло-диафрагма с острой кромкой (рис. 1).

Каждый вариант имеет свои положительные и отрицательные свойства.

При работе конструкции с соплом-диафрагмой воздух из магистрали поступает в колпак 2. При этом в результате первого расширения давление P_2 уменьшается в 0.528 раза по отношению к давлению на входе в сопло P_1 . Повторное уменьшение давления происходит при прохождении потока через диафрагму. В результате двойного разряжения давление на выходе из сопла-диафрагмы составляет

$$P_2 = 0.277P_1. \quad (1)$$

При использовании сопла-трубки снижение давления P_1 и плотности газа происходит только один раз. Поэтому давление P_2 в сопле-трубке значительно выше, чем при сопле-диафрагме и составляет

$$P_2 = 0.528P_1. \quad (2)$$

Давление P_2 определяет условия формирования капли электродного металла на торце проволоки при их плавлении. Изменение геометрических размеров капли в газовом потоке происходит под действием сил, возникающих в результате динамического давления газа [3, 4]

$$P_{\text{д}} = \frac{C_x \rho W^2}{2}, \quad (3)$$

где: C_x – коэффициент формы тела, принятый для тел шарообразной или цилиндрической формы равным $C_x = 0.4$ [6–8]; W – скорость потока газа, м/с; ρ – плотность набегающего потока, кг/м³.

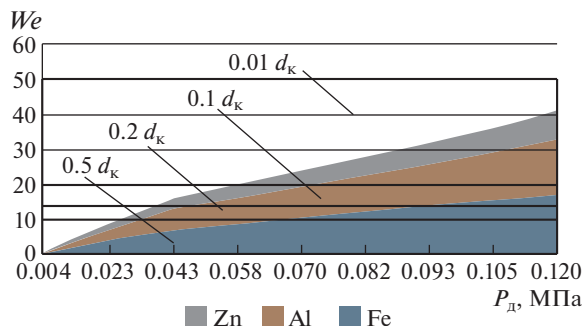


Рис. 2. Изменение критерия Вебера в зависимости от динамического давления для разных металлов при исходном диаметре капли на торце электрода 1.0 мм.

Распад исходной капли характеризуется критерием Вебера (We) и зависит от отношения динамического давления к давлению сил поверхностного натяжения [6, 7]

$$We = \frac{P_d}{P_j} = \frac{P_d d_k}{4\sigma}, \quad (4)$$

где d_k – диаметр исходной капли расплавленного металла, сформированной на торце электрода, м; σ – коэффициент поверхностного натяжения материала электрода при заданной температуре в месте приложения силы, Дж/м².

Коэффициенты поверхностного натяжения расплавленных металлов находятся в интервале 0.73–1.73 Дж/м² и составляют для Al 0.914–0.924 Дж/м²; Zn 0.730–0.814 Дж/м²; Fe 1.720–1.730 Дж/м².

По данным работы [1] исходный размер капли электродного металла, формируемой на торце электрода составляет для алюминия порядка 1 мм, что соответствует эквивалентному диаметру 1.0–0.9 мм. Исходя из этого максимального размера исходной капли электродного металла был выполнен расчет изменения числа Вебера в зависимости от динамического давления по формулам (2)–(4). Диапазоны значений критерия Вебера, определенные для разных металлов показаны на рис. 2.

В зависимости от значения числа Вебера исходная капля расплавленного металла подвергается дроблению.

Режимы дробления и данные по изменению размеров капли в зависимости от числа Вебера, обобщенные по данным разных источников [5, 6, 8] применительно к плазменно-дуговому напылению, показаны в табл. 1.

Экспериментальное исследование по определению динамического давления. С целью определения динамического давления струи воздуха, выходящего из сопловых устройств металлизатора рассматриваемых конструкций, были проведены экспериментальные исследования на модельных образцах. Экспериментальная установка, представленная на рис. 3, включала в себя модель распылительной системы, выполненные с помощью 3Д-печати, устройство для замеров давления в разных положениях и сопловые устройства.

Сопло-диафрагма имело внутренний диаметр 6 мм и длину 70 мм. Сопло-трубка для обеспечения аналогичного проходного сечения для воздуха имеет внутренний диаметр 8 мм. Испытания проводились при исходном давлении воздуха 0.4 МПа и 0.5 МПа.

Для замера динамического давления использовалась заборная трубка с внутренним диаметром 0.75 мм, к которой при помощи шлангов присоединялся манометр KFM с точностью 0.1 кг/см² и вакуумметр МЗМ с точностью 0.25 кг/см². Заборная трубка

Таблица 1. Сводная информация для процесса диспергирования капли напыляемых материалов методом ЭДМ

Критерий Вебера	Фактический размер капли	Критерий Вебера	Фактический размер капли
$We < 8$	$d_{\Phi} = d_{\kappa}$	$20 \leq We < 50$	$d_{\Phi} = \frac{d_{\kappa}}{100}$
$8 \leq We < 10$	$d_{\Phi} = \frac{d_{\kappa}}{2}$	$50 \leq We < 100$	$d_{\Phi} = \frac{d_{\kappa}}{200}$
$10 \leq We < 14$	$d_{\Phi} = \frac{d_{\kappa}}{3-5}$	$100 \leq We < 350$	$d_{\Phi} = \frac{d_{\kappa}}{700}$
$14 \leq We < 20$	$d_{\Phi} = \frac{d_{\kappa}}{10}$	—	—

была установлена на суппортную группу станка, осуществляющую продольное и поперечное контролируемое перемещение. Такая установка позволяет измерять динамическое давление на различном расстоянии от среза проволок в двух направлениях — по оси потока и в радиальном направлении под углом к плоскости подачи проволок.

Результаты измерения динамического давления по оси истечения воздуха на разных расстояниях от стыка проволок для варианта распылительной системы сопло-диафрагма представлены на рис. 4.

Как видно из результатов экспериментов, непосредственно у стыка проволок имеется зона разряжения. Затем происходит резкий рост динамического давления до максимального значения. Расстояние от стыка проволок до точки, в которой регистрируется максимальное значение динамического давления в зависимости от исходного давления P_1 составляет для 0.4 МПа 12 мм, а для 0.5 МПа 1 мм. Используя линейную аппроксимацию для определения протяженности зоны разряжения в исследованном диапазоне давлений, получаем следующую зависимость для расчета требуемого расстояния от сопла, на котором необходимо располагать срез проволок для получения максимального динамического давления L

$$L = 57.22 - 407.41P_2. \quad (5)$$

**Рис. 3.** Установка для проведения газодинамических исследований.

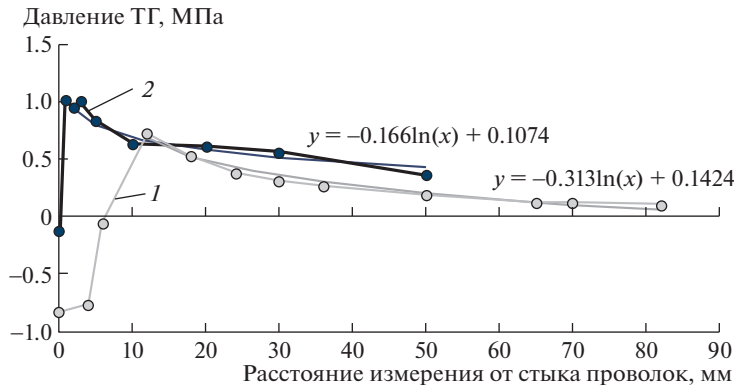


Рис. 4. Распределение динамического давления вдоль оси потока транспортирующего газа (ТГ) по оси потока для сопла-диафрагмы при давлении: 1 – $P_1 = 0.4$ МПа; 2 – $P_1 = 0.5$ МПа.

Исходя из допущения о наличии линейной зависимости между изменением статического давления P_2 и динамического давления на основе полученных экспериментальных данных зависимость (5) можно представить в виде

$$P_d = nP_2 - mP_2 \ln(x), \tag{6}$$

где n, m – коэффициенты пропорциональности, определяемые экспериментально.

Для расчета значений коэффициентов пропорциональности n и m была выполнена обработка полученных зависимостей, характеризующих положение линий тренда (табл. 2).

Подставляя коэффициенты пропорциональности в формулу (6) было получено уравнение для расчета динамического давления при использовании сопла-диафрагмы

$$P_d = (2.0341P_2 - 0.173) - (0.0917 - 0.544P_2) \ln(x). \tag{7}$$

Полученная зависимость характеризует распределение динамического давления в интервале $[x_0 = L; x_i > L]$ по дистанции распыления по оси потока транспортирующего газа. Результаты замеров динамического давления с использованием модельного сопла-трубки представлены на рис. 5.

Обработка данных трендов экспериментальных данных, полученных на сопле-трубке, была выполнена аналогично данным по соплу-диафрагме (табл. 3).

Таблица 2. Результаты расчета коэффициентов пропорциональности для сопла-диафрагмы

Давление на входе и выходе из сопла-диафрагмы		Экспериментальные данные	
Давление P_1 , МПа	Давление P_2 , МПа	P_{max}	a
0.5	0.138	0.1074	0.0166
0.4	0.111	0.0525	0.0313
Линейная аппроксимация		$2.0341P_2 - 0.173$	$0.0917 - 0.544P_2$

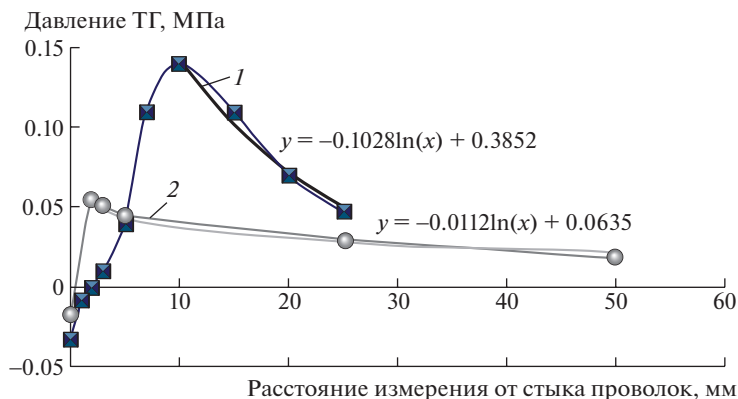


Рис. 5. Распределение динамического давления вдоль оси потока транспортирующего газа при радиальном перемещении под углом относительно плоскости проволоки для сопла-трубки: 1 – $P_1 = 0.5$ МПа; 2 – $P_1 = 0.4$ МПа.

В результате получена следующая зависимость для расчета изменения динамического давления для сопла-трубки для интервала значений $[x_0 = L; x_i > L]$ по дистанции распыления по оси потока транспортирующего газа

$$P_d = (11.914P_2 - 1.259) - (3.393P_2 - 0.365)\ln(x). \quad (8)$$

По полученным максимальным значениям динамического давления были определены значения критерия Вебера и фактический диаметр для капель с исходным диаметром 1.0 мм (табл. 4).

Таблица 3. Результаты расчета коэффициентов пропорциональности для сопла-трубки

Давление на входе и выходе из сопла-трубки		Экспериментальные данные	
Давление P_1 , МПа	Давление P_2 , МПа	P_{\max}	a
0.5	0.138	0.38520	0.1028
0.4	0.111	0.06352	0.0112
Линейная аппроксимация		$11.914P_2 - 1.259$	$3.393P_2 - 0.365$

Таблица 4. Значения критерия Вебера и фактического диаметра капли при металлизации с использованием различных типов сопловых устройств

Тип сопла		Сопло-диафрагма		Сопло-трубка	
P_1 , МПа		0.5	0.4	0.5	0.4
$P_{d \max}$, МПа		0.11	0.05	0.39	0.06
We для металлов	Al	30	16	41	16
	Zn	35	19	48	19
	Fe	16	9	22	9
Фактический диаметр, мкм	Al	45	150	27	150
	Zn	34	110	21	110
	Fe	150	500	88	500

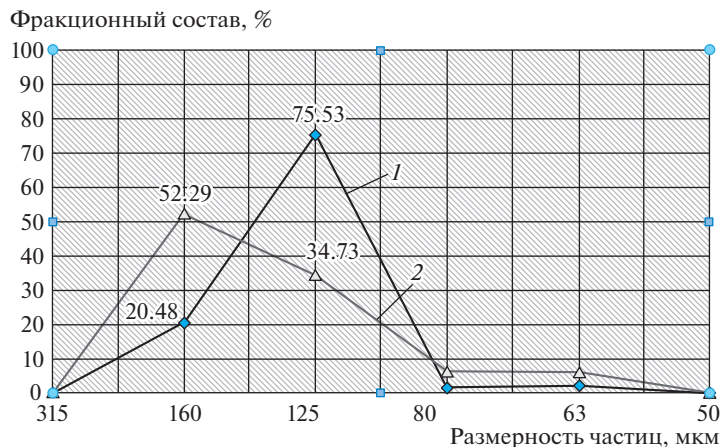


Рис. 6. Фракционный состав частиц алюминия, полученных при металлизации с использованием сопловых устройств разного типа: 1 – сопло-трубка; 2 – сопло-диафрагма.

Анализ полученных данных показал, что в результате дробления для алюминия и цинка размер капель будет уменьшаться до диапазона 1–100 мкм, а для Fe – до 500–100 мкм.

Для экспериментальной проверки фактических размеров частиц жидкого металла, получаемых при металлизации, было выполнено распыление алюминиевой проволоки диаметром 2.2 мм при давлении 0.5 МПа при силе тока 100–110 А, напряжении 26 В. Распыление проводилось с использованием двух типов сопловых устройств, с устройством “сбора” факела распыления и концентрации на подложку из оцинкованной стали, изогнутой параболой, с вершиной в точке пересечения с осью движения ТГ. Полученные частицы были рассеяны на комплексе сит. Фракционный состав представлен на рис. 6.

Как видно из полученных данных сопло-трубка обеспечивает более мелкодисперсный состав напыленного металла, чем сопло-диафрагма. Однако, полученный размер частиц не соответствует значениям, полученным в результате расчета критерия Вебера. Это указывает на необходимость корректировки диапазонов дробления исходных частиц металла при их распылении методом электродуговой металлизации. В диапазоне значений критерия Вебера 20–50 дробление капли происходит на 5–10 частей соответственно.

На основе полученных данных можно сделать следующие **выводы**: **1.** Анализ представленных результатов свидетельствует о необходимости учета распределения динамического давления для размещения среза проволок с целью получения более мелкодисперсного покрытия. **2.** Полученные эмпирические зависимости для расчета динамического давления и расстояния от сопла до стыка проволок позволяют определять указанные параметры и оценивать ожидаемую дисперсность частиц напыляемого металла в диапазоне давлений от 0.4 МПа до 0.5 МПа. **3.** При этом следует отметить необходимость корректировки интенсивности дробления исходной капли жидкого металла в зависимости от критерия Вебера применительно к электродуговой металлизации в сторону меньших значений.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Газотермическое напыление: учебн. пособие / под ред. Л.Х. Балдаева. М.: Маркет ДС, 2007. 344 с.
2. Мордасов Д.М., Мордасов М.М. Особенности аэродинамических характеристик акустически модулированной струи газа // Ж. технической физики. 2017. Т. 87. № 3. С. 468.
3. Elagina O.Yu., Gusev V.M., Buklakov A.G., Nesterenko N.S., Tomskii K.O. Deposition of Pseudo Alloy Coatings by Electric Arc Metallization // Inorganic Materials: Applied Research. 2020. V. 11. № 3. P. 641.
4. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. Учебн. пособие для вузов. М.: Наука, 1991. 600 с.
5. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. Учебник для вузов. М.: Металлургия, 1992. 432 с.
6. Волынский М.С. Необыкновенная жизнь обыкновенной капли. М.: Знание, 1986. 144 с.
7. Пажи Д.Г., Галустов В.С. Основы техники распыливания жидкостей. М.: Химия, 1984.
8. Бойко В.М., Поплавский С.В. Экспериментальное исследование двух типов срывного разрушения капли в потоке за ударной волной // Физика горения и взрыва, 2012. Т. 48. № 4. С. 440.