



ВЛИЯНИЕ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ДОБАВОК НА СТРУКТУРУ ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНОГО ПЛАМЕНИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ДЛИНЕ ФАКЕЛА

В. Н. КОРЖ, д-р техн. наук, Ю. С. ПОПИЛЬ, инж. (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

Определены границы перехода от ламинарного к турбулентному характеру течения продуктов горения смеси, производимой электролизно-водяными генераторами в зависимости от добавок в смесь паров углеводородных соединений. Рассмотрено распределение температуры по длине факела пламени для разных характеров течения струи продуктов горения и добавок в смесь паров углеводородных соединений. Показаны условия возможного использования водородно-кислородного пламени при газопламенном напылении.

Ключевые слова: газопламенное напыление, водородно-кислородное пламя, электролизно-водяной генератор, ламинарное и турбулентное течение, температура пламени, скорость истечения потока

Перспективными методами борьбы с коррозией и износом являются способы газотермического нанесения покрытий, в частности, газопламенного напыления. Последний состоит в формировании на поверхности изделия слоя из частиц напыляемого материала, которые имеют необходимый запас тепловой и кинетической энергии для получения покрытия вследствие взаимодействия со струей продуктов горения газового пламени.

Одной из задач ресурсосбережения является применение вместо дефицитного ацетилена его заменителей. Особый интерес вызывает возможность использования для процессов газопламенной обработки материалов экологически чистого водорода [1, 2].

Цель работы, проведенной на кафедре восстановления деталей машин НТУУ «КПИ», заключалась в исследовании тепловых характеристик водородно-кислородного пламени (ВКП) при сжигании газовой смеси, вырабатываемой электролизно-водяными генераторами, применительно к использованию газопламенного напыления.

Качество покрытия при газотермических способах нанесения покрытия в основном определяется такими факторами, как температура напыляемых частиц и их скорости. В указанном исследовании основное внимание уделено таким характеристикам ВКП, как его строение и характер горения, распределение температуры по длине факела пламени.

Характер течения струи продуктов горения водородно-кислородной смеси (ВКС) определяется числом Рейнольдса (Re), которое оценивает ламинарность или турбулентность потока продуктов горения пламени при разных расходах, составах газовых смесей и диаметрах выходных отверстий мундштуков горелки [3]. Переход режима горения диффузионного факела в неподвижной газовой среде от ламинарного к турбулентному зафиксирован для разных газов при разных значениях Re . Число Рейнольдса определяли [4] средней скоростью U_m

газового потока на срезе выходного диаметра мундштука горелки для напыления

$$Re = \frac{U_m d}{\nu},$$

где ν — кинематическая вязкость газа или газовой смеси, m^2/c (для ВКС, состоящей из 30 % O_2 + 70 % H_2 $\nu = 36,93 \cdot 10^{-6} m^2/c$); d — диаметр выходного канала мундштука горелки, м.

Среднюю скорость истечения горючей смеси из мундштука горелки можно определить из такой формулы [5]:

$$U_m = 354 \frac{V_{г.с}}{d^2},$$

где $V_{г.с}$ — расход газовой смеси, $m^3/ч$; 354 — эмпирический коэффициент.

Для максимальной длины факела (около 400 мм) средняя скорость газового потока на срезе сопла при сжигании ВКС в зависимости от номера мундштука горелки и расхода газа составляет от 50 до 80 м/с (рис. 1). Причем, начало переходной области истечения газовой струи продуктов горения от ламинарного к турбулентному для горелки диаметром выходного канала мундштука 1,6 мм начинается при скорости истечения струи из мундштука примерно 80 м/с, горелки диаметром выходного канала мундштука 2,0 мм — примерно при 60 м/с и диаметром 2,2 мм — примерно при 50 м/с. Полная турбулизация факела пламени про-

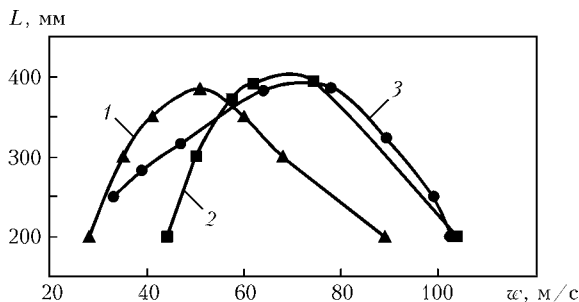


Рис. 1. Зависимость длины факела от средней скорости w истечения потока продуктов горения: 1 — ВКС+бензин; 2 — ВКС+спирт; 3 — ВКС

исходит при использовании мундштуков диаметром выходного канала 1,6 мм, при скоростях истечения из мундштука приблизительно 125 м/с, диаметром выходного канала 2,0 мм примерно при 70 м/с, диаметром 2,2 мм при 80 м/с.

Анализ полученных результатов показал, что для чистой ВКС переход от ламинарного течения продуктов сгорания к турбулентному происходит при скорости истечения струи горючей смеси из мундштука наконечника, соответствующей $Re \approx 3500$, что довольно близко к приведенному в работе [6] $Re = 3 \cdot 10^3$ для переходной области течения газового потока.

Как следует из работы [7], регулирование восстановительно-окислительного потенциала пламени, полученного при сжигании смеси, которая вырабатывается электролизно-водяными генераторами, происходит за счет добавления в ВКС паров углеводородных соединений путем барботирования горючей смеси через спирт, бензин и другие углеводородные соединения.

Добавление в ВКС 5,5 об. % паров бензина способствует увеличению теплосодержания продуктов горения пламени при сжигании 1 м^3 горючей смеси от 6,75 до 17,15 МДж/м³. При введении 16 об. % паров этилового спирта теплосодержание продуктов горения составляет 14,7 МДж/м³.

При добавлении в ВКС приблизительно 5,5 об. % паров бензина или около 16 об. % этилового спирта сохраняется закономерность образования в области стабильного горения пламени ламинарного и турбулентного характера течения потока продуктов горения пламени.

Анализ средней скорости истечения потока смеси ВКС+пары бензина на срезе мундштука показал, что переход характера горения от ламинарного к

турбулентному для всех наконечников горелки с диаметрами выходного канала от 1,6 до 2,2 мм находится в пределах 50...55 м/с (рис. 1).

Для струи продуктов горения ВКС с добавкой 5,5 об. % паров бензина переход от ламинарного к турбулентному характеру течения потока происходит при скорости истечения струи горючей смеси из мундштука горелки, отвечающей $Re \approx 3000$.

Переход к турбулентному характеру течения продуктов горения горючей смеси ВКС+пары бензина происходит при меньших скоростях истечения из горелки по сравнению с потоком ВКС и отвечает меньшим значениям числа Рейнольдса. Это можно объяснить повышением кинематической вязкости газовой смеси за счет добавления в смесь паров бензина.

При переходе от ламинарного к турбулентному характеру течения потока продуктов горения скорость истечения из мундштука горелки газового потока горючей смеси ВКС+16 об. % паров спирта для горелки диаметром выходного отверстия мундштука 1,6 мм составляет примерно 80 м/с (рис. 1). На больших диаметрах выходных отверстий мундштука (2,0...2,2 мм) изменение характера течения продуктов горения происходит при практически одинаковой скорости истечения потока из мундштука горелки (примерно 65 м/с). Эти скорости выше по сравнению с аналогичными скоростями, полученными при добавлении в ВКС паров бензина.

Анализ газодинамического состояния струи продуктов горения смеси ВКС+16 об. % паров этилового спирта показал, что начало перехода к турбулентному характеру течения продуктов горения происходит при скоростях истечения струи

Таблица 1. Характеристики элементов факела пламени

Состав горючей смеси; характер течения потока продуктов горения	Диаметр отверстия мундштука горелки, мм	Расход газовой смеси дм ³ /ч	Скорость истечения струи горючей смеси, м/с	Длина факела, мм	Длина ядра, мм*	Ширина факела, мм*
ВКС; ламинарный	1,6	300...600	40...80	200...400	5,0	7
	2,0	400...620	30...60	200...415	6,0	8
	2,2	400...700	30...50	200...400	7,0	9
ВКС; турбулентный	1,6	600...760	80...125	400...200	7,0	9
	2,0	620...820	60...70	415...200	8,0	10
	2,2	700...1100	50...80	400...200	9,0	12
ВКС+бензин; ламинарный	1,6	200...400	25...55	200...390	6,5	11
	2,0	300...520	35...50	200...400	7,0	12
	2,2	310...720	35...50	200...400	11,0	13
ВКС+бензин; турбулентный	1,6	400...780	55...100	390...200	11,0	14
	2,0	520...900	50...90	400...200	11,5	14
	2,2	720...1220	50...90	400...200	12,0	15
ВКС+спирт; ламинарный	1,6	400...600	55...80	200...400	5,0	12
	2,0	420...780	35...65	200...400	7,0	12
	2,2	520...900	40...65	200...400	11,0	13
ВКС+спирт; турбулентный	1,6	600...920	80...125	400...200	11,0	13
	2,0	780...1180	65...105	400...200	11,5	14
	2,2	900...1250	65...195	400...200	11,5	15

* Длина ядра и ширина факела указаны для максимальных расходов газовой смеси.



горючей смеси из наконечника, отвечающих $Re \approx 4250$.

При турбулизации газового потока уменьшается длина факела, увеличивается угол раскрытия потока продуктов горения и ядра факела. Изменения геометрических размеров элементов факела пламени в зависимости от состава и расходов горючих смесей представлены в табл. 1.

Анализ влияния средних скоростей истечения потока горючих газовых смесей из мундштука горелки показал, что границы устойчивого горения чистого ВКП находятся в диапазоне 30...125 м/с, а граница перехода от ламинарного характера течения потока продуктов горения к началу турбулентного течения продуктов горения — при средней скорости истечения струи более 60 м/с, что отвечает скорости истечения струи горючей смеси из мундштука горелки $Re \approx 3500$.

Устойчивое горение смеси ВКС с добавками 5,5 об. % паров бензина зафиксировано при скоростях истечения горючей смеси из мундштука горелки от 25 до 100 м/с. Граница перехода от ламинарного характера течения потока продуктов горения к турбулентному находится при средней скорости истечения струи горючей смеси из сопла горелки более 55 м/с, отвечающей $Re \approx 3000$.

Устойчивое горение смеси ВКС с добавками 16 об. % паров этилового спирта происходит при скоростях истечения горючей смеси из мундштука горелки в пределах 35...125 м/с. Граница перехода от ламинарного характера горения к началу турбулизации потока продуктов сгорания зафиксирована при скорости истечения из мундштука горелки более 65 м/с, что отвечает скорости истечения струи горючей смеси из горелки $Re \approx 4200$.

На качество покрытий при газотермическом напылении материалов в значительной мере влияет температура частиц напыляемого материала. При газопламенном напылении температура частиц зависит от длины эффективного участка факела пламени, на котором возможен нагрев частиц до температуры плавления. Нагрев частиц материала до температуры плавления конвективным теплообменом между продуктами горения пламени и напыляемыми частицами возможен при температуре продуктов горения в факеле более 300 °С [8].

С учетом этого длина эффективного участка факела пламени для металлов, плавящихся при температуре до 950 °С (например, медь, латунь, бронза), будет определяться изотермой температуры 1250 °С. Для металлов с температурой плавления до 1200 °С длина эффективного участка определяется изотермой температур около 1500 °С. Для порошковых материалов на основе железа и других металлов с температурой плавления до 1500 °С длина эффективного температурного участка определяется изотермой температуры около 1750 °С.

Для установления длины эффективных участков факела пламени исследовали распределение температуры по длине факела в зависимости от характера горения пламени и состава горючей смеси. Здесь можно выделить две области: высоко-

температурную, определяемую длиной ядра и зоной нормального распространения пламени (средняя зона), где температура пламени достигает своего максимального значения, и область догорания, расположенную за зоной нормального распространения пламени, где температура пламени существенно снижается.

Максимальная температура в высокотемпературной зоне ВКП, вычисленная экспериментально-расчетным методом, составляет около 3110 °С [1].

При добавлении в ВКС паров углеводородных соединений появляется тенденция к уменьшению максимальной температуры в высокотемпературной зоне (приблизительно до 3100 °С при сжигании смеси ВКС с 5,5 об. % паров бензина и до 3080 °С при сжигании смеси ВКС с 16 об. % паров этилового спирта) [1].

Анализируя распределение температуры по длине факела пламени, найдем длину эффективных участков, в которых температура выше температуры плавления напыляемого материала на 300 °С. Для этого выделяем три температурных интервала по длине факела пламени: от максимальной температуры пламени до 1750 °С, от максимальной до 1500 °С, от максимальной до 1250 °С.

Распределение температуры по длине факела пламени (рис. 2, а) показало, что первых два участка температур имеют большую длину при турбулентном течении потока продуктов горения, третий участок длиннее при ламинарном характере течения потока.

Введение в горючую смесь 5,5 об. % паров бензина приводит к изменению распределения температуры по длине факела (рис. 2, б). Кроме того, в этом случае можно заметить тенденцию к увеличению длины температурных участков по сравнению с пламенем при сжигании чистой ВКС. Это можно объяснить тем, что в факеле за высокотемпературной областью происходит догорание излишка топлива. Если при введении 5,5 об. % паров бензина в ВКС в ядре и в приядерной зоне пламени максимальная расчетная температура ниже, чем при сгорании чистой ВКС, то в области догорания температура повышается. Относительное снижение кислорода в составе горючей смеси снижает максимальную температуру в высокотемпературной зоне, а в области догорания (за счет дополнительного окисления горючего кислородом из воздуха) происходит повышение температуры в этой зоне и увеличение длины третьего участка.

При турбулентном характере течения продуктов горения горючей смеси ВКС+ 5,5 об. % паров бензина длина эффективных участков температур имеет заметную тенденцию к увеличению по сравнению с ламинарным характером течения только для первого участка и сохраняет тенденцию к увеличению третьего участка эффективных температур для ламинарного характера течения.

Анализ длины эффективных участков температур при добавлении в ВКС до 16 об. % паров (рис. 2, в) этилового спирта показывает увеличение всех рассмотренных выше эффективных участков факела пламени как для ламинарного, так и для турбулентного характера течения потока

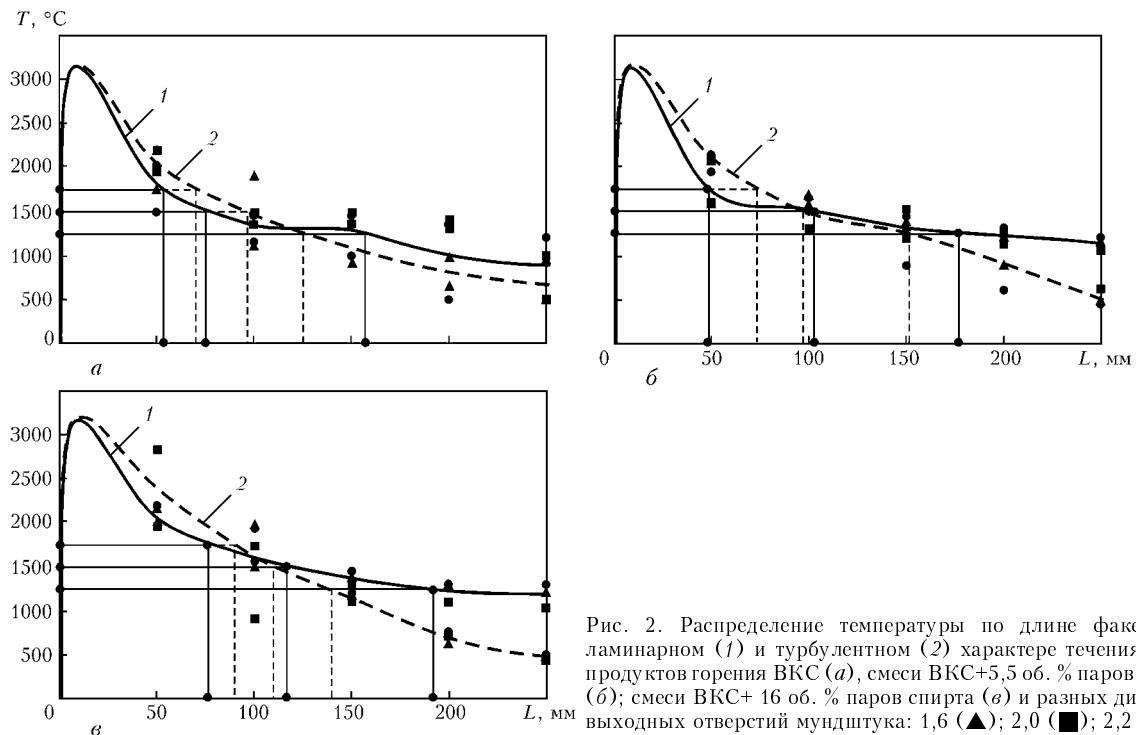


Рис. 2. Распределение температуры по длине факела при ламинарном (1) и турбулентном (2) характере течения потока продуктов горения ВКС (а), смеси ВКС+5,5 об. % паров бензина (б); смеси ВКС+ 16 об. % паров спирта (в) и разных диаметрах выходных отверстий мундштука: 1,6 (▲); 2,0 (■); 2,2 (●) мм

Таблица 2. Длина эффективных участков температур по длине факела пламени

Состав горючей смеси	Характер течения потока продуктов горения	Температурный интервал, °С	Длина эффективного температурного участка, мм	Температурный интервал, °С	Длина эффективного температурного участка, мм	Температурный интервал, °С	Длина эффективного температурного участка, мм
ВКС	Ламинарный	3110...1750	55	3110...1500	75	3110...1250	150
	Турбулентный		70		95		125
ВКС+5,5 об. % паров бензина	Ламинарный	3100...1750	50	3100...1500	100	3100...1250	175
	Турбулентный		75		100		150
ВКС+16 об. % паров спирта	Ламинарный	3080...1750	75	3080...1500	110	3080...1250	190
	Турбулентный		90		110		140

продуктов горения, по сравнению с факелом пламени, полученным при сжигании чистой ВКС. Сохраняется тенденция к увеличению длины первого эффективного участка пламени при турбулентном характере течения по сравнению с ламинарным; сокращение третьего эффективного участка пламени при турбулентном характере течения по сравнению с ламинарным.

Результаты исследований распределения температур по длине факела пламени в зависимости от состава смесей и характера горения ВКП (табл. 2) показали, что больше длина участка факела температурами выше 1500 °С при турбулентном, а ниже 1500 °С — при ламинарном характере течения.

При введении в горючую смесь паров углеводородных соединений зафиксирована тенденция к увеличению длины рассмотренных эффективных температурных участков. Причем, с введением в ВКС паров спирта она проявляется больше.

Выводы

1. При добавлении углеводородных соединений в ВКС границы перехода от ламинарного к турбулентному характеру течения струи продуктов

горения смещаются в сторону меньших скоростей потока. При этом увеличивается длина участков температур, при которых частицы напыляемого материала могут достигать температуры плавления.

2. Для газопламенного напыления порошковых материалов с температурой плавления до 1000 °С большая вероятность получения качественного покрытия при использовании пламени, полученного при сжигании смеси, вырабатываемой электролизно-водяными генераторами, с добавкой в ВКС 5,5 об. % паров бензина или 16 об. % паров этилового спирта, и ламинарном характере течения струи продуктов горения. Для напыления порошковых материалов с температурой плавления выше 1000 °С вероятность получения удовлетворительного качества напыленного слоя выше при использовании пламени, полученного от сжигания смеси ВКС+16 об. % паров спирта или смеси ВКС+5,5 об. % паров бензина с турбулентным характером течения струи продуктов горения.

1. Корж В. М., Попіль Ю. С. Керування параметрами процесу горіння воднево-кисневого полум'я при газополум'яній обробці матеріалів // Наук. вісті НТУУ «КПІ». — 2002. — № 4. — С. 81–91.
2. Корж В. М., Попіль Ю. С., Глуховський В. Ю. Дослідження теплових та кінетичних характеристик факелу

- лу воднево-кисневого полум'я при нанесенні покриття // Пробл. техніки. — 2002. — №2. — С. 61-66.
3. *Дыбан Е. П., Мазур А. К.* Конвективный теплообмен при струйном обтекании тел. — Киев: Наук. думка, 1982. — 363 с.
 4. *Абрамович Г. Н.* Прикладная газовая динамика. — М., 1976. — 888 с.
 5. *Евсеев Г. Б., Глизманенко Д. Л.* Оборудование и технология газопламенной обработки металлов и неметаллических материалов. — М.: Машиностроение, 1974. — 312 с.
 6. *Брюханов О. Н.* Микрофакельное горение газов. — Л.: Недра, 1983. — 192 с.
 7. *Корж В. Н.* Регулирование характера горения горючей газовой смеси добавкой жидких углеводородных соединений // Автомат. сварка. — 1983. — № 11. — С. 65-66, 69.
 8. *Применение газов-заменителей ацетилену при газопламенной обработке металлов* / Под ред. И. А. Антонова. — М.: Машиностроение, 1964. — 150 с.

Boundaries are determined for transition from the laminar to turbulent nature of the flow of combustion products of a mixture, produced by water electrolyses generators, depending on additives to a mixture of vapours of hydrocarbon joints. Considered is the temperature distribution along the flame length for different modes of the flow of a jet of combustion products and mixture of vapours of hydrocarbon compounds. Conditions of the possible use of the hydrogen-oxygen flame are shown.

Поступила в редакцию 29.04.2004

ПОЛЕЗНО ЗНАТЬ

УПАКОВКА ПРОВОЛОКИ В КОНУСОБРАЗНЫЕ БОЧКИ



Фирма К. «Дариус Текнолоджиз» (Франция) разработала новую технологию упаковки проволоки в конические бочки.

Преимущества: пустые бочки можно складывать в стопки по 10 шт. или больше, что снимает острую проблему их утилизации; для хранения пустых бочек требуется мало места, их можно вернуть на волочильный завод за очень небольшую плату; расходы по хранению пустых барабанов и их сборку уменьшаются в пять раз.

Особенности: при этом новом процессе витки проволоки укладывают определенным образом, соответствующим конической форме бочки. Специально подогнанное удерживающее кольцо обеспечивает плавную размотку без заедания. Никакая перестройка оборудования не требуется ни у заказчика, ни у конечного пользователя.

Предполагается, что новый процесс, по которому подана заявка на патент, обеспечит прорыв в технологии использования сварочной проволоки.

«Дариус Текнолоджиз» — фирма-консультант, специализирующаяся на разработке новой продукции в области металлургии. Фирма предоставляет такие услуги по разработке продукции, как изучение рынка, руководство проектом, поиск партнера, реклама, связь и подготовка персонала.

Более детальную информацию можно найти по адресу:
 lm.darius@wanadoo.fr
<http://perso.wanadoo.fr/dariustechnologies>.