

ОПТИЧЕСКАЯ ЭМИССИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ СВЕРХЗВУКОВЫХ ГАЗОВЫХ СТРУЙ В ПРОЦЕССЕ НАПЛАВКИ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

М.В. Радченко, А.Я. Суранов, В.С. Киселев, В.С. Смолин, С.Г. Уварова,
Ю.О. Шевцов

Практическое использование сверхзвуковых газовых струй в процессах сверхзвуковой газопорошковой наплавки сдерживает отсутствие фундаментальных исследований этого технологического инструмента. В данной статье представлены результаты экспериментального анализа изменения состава газовой смеси в процессе сверхзвукового горения, полученные методом оптической эмиссионной спектроскопии.

Practical use of supersonic gas stream in the process of supersonic gas-powder building-up suppresses the absence of fundamental investigation of this technological instrument. In this article the results of experimental analysis of structure of gas alloy modification in the process of supersonic burning are presented. The results were received by optical emissive spectroscopy.

Последние 10-12 лет для увеличения срока службы и восстановления рабочих поверхностей различных деталей и механизмов всё активнее начинают развиваться процессы нанесения защитных покрытий сверхзвуковыми газовыми струями [1, 2]. Это относится преимущественно к процессам напыления. Однако, как известно, все процессы напыления без исключения имеют один существенный недостаток, ограничивающий промышленное использование – вероятность отслоения покрытий ввиду относительно низкой прочности сцепления с основой.

Кардинальное решение этой проблемы возможно путем исключения параметра “прочность сцепления” посредством разработки аппаратуры и технологии сверхзвуковой газопорошковой наплавки (СГП-наплавки).

Для реализации этого процесса в НИИ Высоких Технологий (г. Барнаул) в рамках Федеральной программы “СТАРТ” был выполнен комплекс исследований, включающий расчеты сопел Лаваля с различными числами Маха, изготовление серии сопел и их экспериментальную апробацию в процессе наплавки износостойких порошковых сплавов на изношенные поверхности деталей [3]. В результате разработана и запатентована [4, 5] аппаратура для СГП-наплавки. Отличительной технологической чертой аппаратуры является повышение концентрации энергии газопламенного источника нагрева и уменьшение зоны термического влияния при увеличении скорости истечения газовых потоков на срезе сопла газопламенной установки.

Однако в настоящее время остается не-

изученным характер изменения состава и температуры сверхзвукового газового пламени в ходе химической реакции горения, что является важнейшим этапом отработки технологических режимов сверхзвуковой газопорошковой наплавки.

Поэтому чрезвычайно большое значение для повышения качества защитных покрытий, наносимых новым способом – сверхзвуковой газопорошковой наплавкой, имеет диагностика и контроль состава, температуры, и скорости сверхзвуковой газопламенной струи.

Количественное соотношение горючего и окислительного газов сверхзвуковой газовой струи влияет на состав самого пламени (окислительное, нормальное, науглероживающее), а также на температуру и скорость истечения струи, то есть на базовые характеристики данного технологического инструмента. Эти свойства, в конечном счете, являются определяющими при формировании защитного покрытия с заданными технологическими характеристиками. Поскольку процесс СГП-наплавки является исключительно новым [6], то актуальным является изучение этих базовых характеристик сверхзвуковых струй.

На рис. 1 представлена сверхзвуковая газопламенная струя, получаемая с использованием в газовой горелке сверхзвукового сопла Лаваля с числом Маха М5.

Наиболее простым и универсальным методом анализа газовых струй является оптическая эмиссионная спектроскопия. Структурная схема экспериментальной установки для снятия спектра сверхзвуковой газопламенной струи приведена на рис. 2.

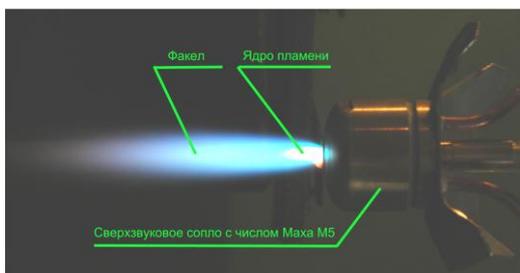


Рисунок 1 – Сверхзвуковая газопламенная струя

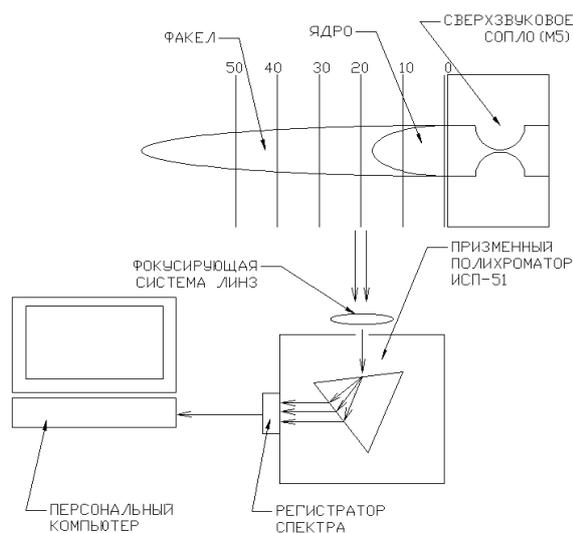
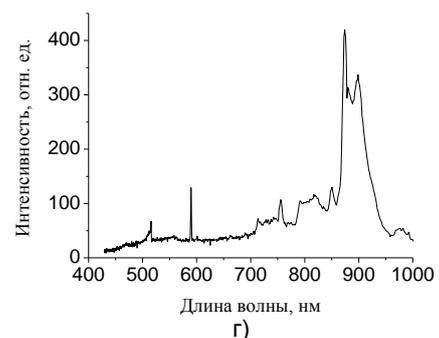
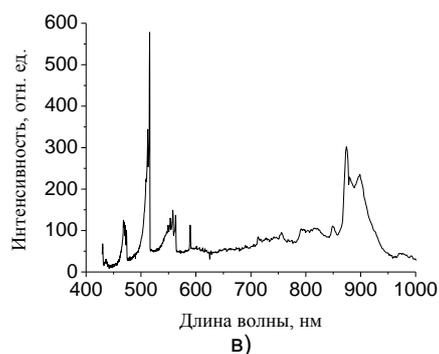
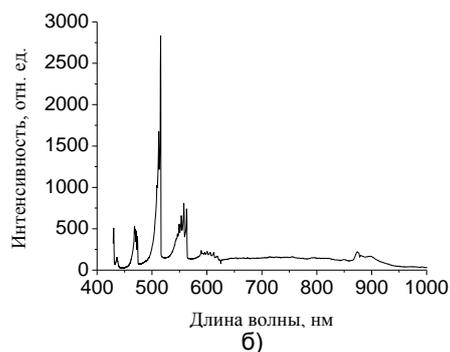
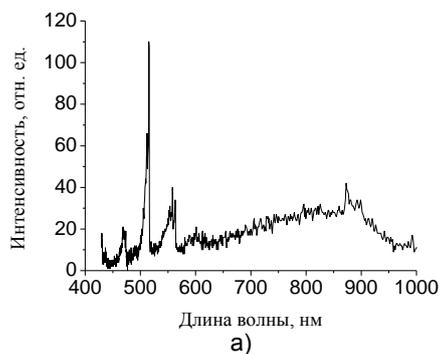


Рисунок 2 – Структурная схема экспериментальной установки

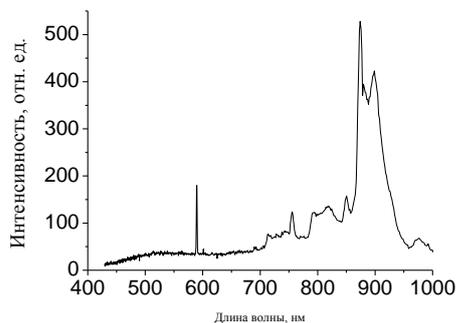
Для получения спектра излучения сверхзвуковой газовой струи были применены призмный полихроматор ИСП-51 и микропроцессорный регистратор спектра на базе фотодиодного приемника ФУК1Л2 [7]. Для калибровки полихроматора по длинам волн использовалась ртутно-кадмиевая лампа СМРК-2. Получение и обработка данных проводились с использованием специального программного обеспечения – среды проектирования виртуальных приборов LabVIEW 7.1 и программы обработки данных Origin 8.0. В качестве примера на рис. 3 приведены спектры излучения пламени при режиме сверхзвукового горения с показаниями системы автоматики пропан – 68, кислород – 52 и расходе рабочих газов $Q_{\text{ПРОПАН}} = 0,245 \text{ м}^3/\text{ч}$ и $Q_{\text{КИСЛОРОД}} = 0,43 \text{ м}^3/\text{ч}$.

При анализе результатов экспериментов использовались фотографии спектров излучения молекул [8-10]. Были четко идентифицированы полосы спектра ядра сверхзвукового пламени: обнаружены полосы молекул C_2 (полосы Свана), соответствующие длинам

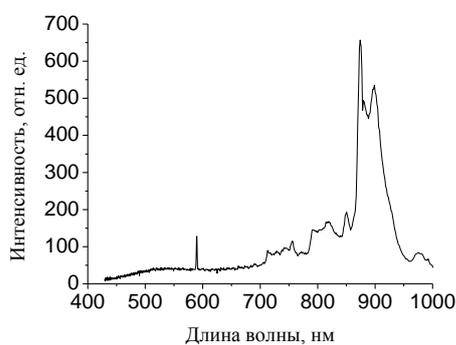
волн – 438,3 нм, 473,7 нм, 516,5 нм, 563,6 нм и 619,1 нм. Из литературы [11] известно, что появление радикала C_2 наблюдается вблизи зоны максимальной температуры. Таким образом установлено, что температура пламени максимальна в области, где наблюдается наиболее интенсивное излучение полос Свана.



ОПТИЧЕСКАЯ ЭМИССИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ СВЕРХЗВУКОВЫХ ГАЗОВЫХ СТРУЙ В ПРОЦЕССЕ НАПЛАВКИ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ



д)



е)

Рисунок 3 – Спектр сверхзвуковой струи на расстоянии от края сопла: а) 0 мм; б) 10 мм; в) 20 мм; г) 30 мм; д) 40 мм; е) 50 мм

Однако интересен факт, что непосредственно в факеле сверхзвуковой струи данные полосы исчезали, при этом появлялись характерные спектры ярко светящихся частиц углерода (атомов С) в диапазоне 750-950 нм [11], расчет содержания которых является актуальной задачей при отработке технологических режимов сверхзвуковой газопорошковой наплавки. Так как при нагреве поверхности защищаемой детали науглероживающим пламенем определенная доля углерода пламени поглощается основой, позволяя снизить температуру плавления тончайшего поверхностного слоя, содержание углерода в пламени напрямую влияет на образование жидкой металлической ванны в поверхностных слоях детали.

Полученные данные интенсивности полос в спектре ядра сверхзвукового пламени позволяют судить об относительном изменении фазового состава сверхзвуковой струи и температуры пламени в зависимости от расстояния от края сопла и соотношения рабочих газов. Рассмотрим относительное изменение температуры и фазового состава газовой смеси в режиме сверхзвукового горения

высокой интенсивности с показаниями системы автоматики пропан – 68, кислород – 52 (рис. 3). На рис. 3, а показан спектр излучения ядра пламени на краю сопла: четко видны полосы молекул C_2 , имеющие интенсивность излучения 20 отн. ед. на длине волны 473,7 нм, 110 отн. ед. на длине волны 516,5 нм, 40 отн. ед. на длине волны 563,6 нм и 18 отн. ед. на длине волны 619,1 нм. Далее, на расстоянии 10 мм от края сопла (рис. 3, б) наблюдается резкое увеличение интенсивности излучения данных линий, которое составляет соответственно 500, 2850, 750 и 200 отн. ед. – зона максимальной температуры. При этом в спектре сверхзвуковой струи появляются полосы ярко светящихся частиц углерода интенсивностью 250 отн. ед. Далее, на расстоянии 20 мм от края сопла (рис. 3, в) наблюдается уменьшение интенсивности излучения линий молекул C_2 , которое теперь составляет соответственно 120, 575, 150 и 55 отн. ед. При этом интенсивность полос частиц углерода увеличивается до 300 отн. ед. С дальнейшим увеличением расстояния до 30, 40, 50 мм (рис. 3, г, д, е) наблюдается исчезновение полос исходных составляющих пламени (молекул C_2), а интенсивность излучения частиц углерода составляет для этих расстояний соответственно 420, 520, 650 отн. ед., что свидетельствует о незначительном увеличении количества частиц углерода в газовой смеси.

Так как температура пламени максимальна в области, где наблюдается наиболее интенсивное излучение полос Свана, а содержание атомарного углерода в пламени напрямую влияет на образование жидкой металлической ванны в поверхностных слоях детали, необходимым завершением экспериментальных исследований является математическая обработка полученных данных при помощи построения математической модели зависимости интенсивности свечения радикалов от варьируемых технологических параметров сверхзвуковой газопламенной наплавки – общего расхода газов и расстояния от края сопла.

Для решения данной задачи был использован новый программный продукт «Прогноз-техно», разработанный в НИИ Высоких Технологий на базе пакета прикладных программ MatLab, предназначенный для построения методом наименьших квадратов регрессионных моделей в прикладных статистических исследованиях. Даная программа, в отличие от других программных продуктов, позволяет получить не только уравнения рег-

рессии, связывающие входные и выходные параметры процесса, но и построить графические модели в трехмерном пространстве (поверхность в 3D), а также их проекции на координатные плоскости.

По полученным значениям интенсивности свечения полос Свана и атомарного углерода были построены 3D модели (рис. 4 а, рис. 5, а), а также их проекции на координатные плоскости (рис. 4 б, в, рис. 5, б, в).

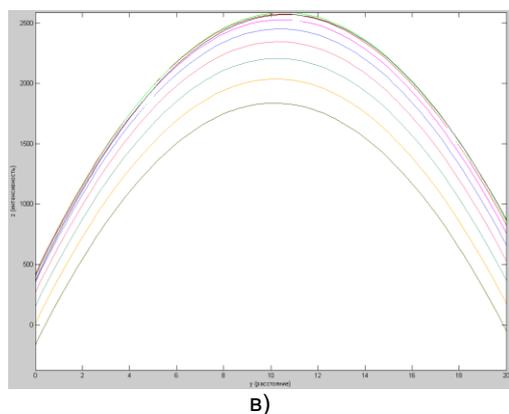
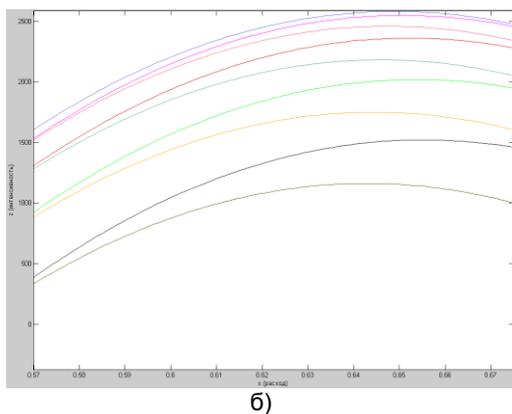
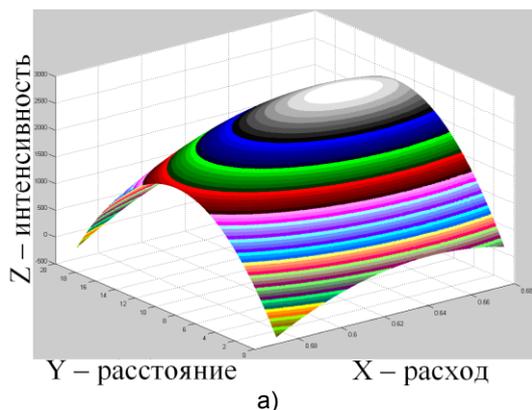


Рисунок 4 – Интенсивность излучения молекул C_2 (полос Свана): а) 3D математическая модель; б) в зависимости от общего расхода газов; в) в зависимости от расстояния от края сверхзвукового сопла

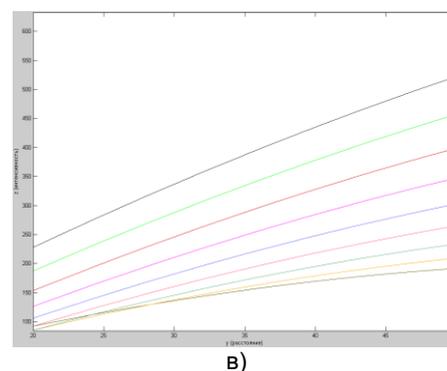
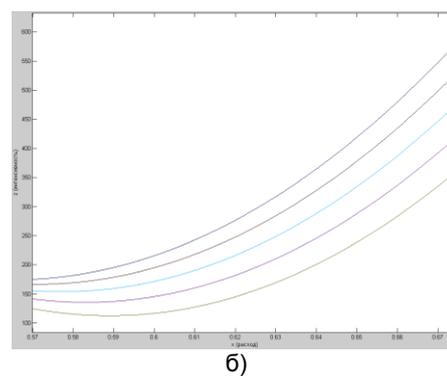
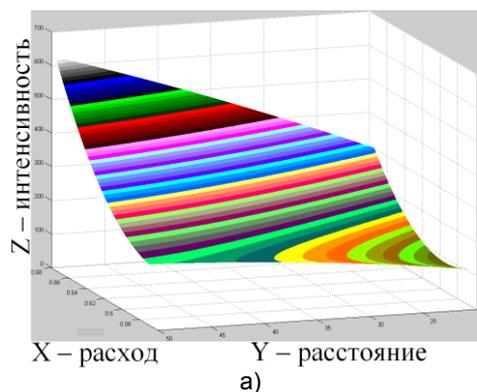


Рисунок 5 – Интенсивность излучения атомарного углерода (C): а) 3D математическая модель; б) в зависимости от общего расхода газов; в) в зависимости от расстояния от края сверхзвукового сопла

Из анализа проекций графической 3D модели интенсивности излучения молекул C_2 (полос Свана) на координатные плоскости (рис. 4 б, в) следует, что наибольшую интенсивность полосы Свана имеют на расстоянии 10,6 мм от края сопла при общем расходе рабочих газов, равном $0,649 \text{ м}^3/\text{ч}$. То есть эта зона сверхзвукового пламени обладает наивысшей температурой. Следовательно, для наиболее эффективного нагрева подложки и максимальной производительности газопорошковой наплавки необходимо распола-

ОПТИЧЕСКАЯ ЭМИССИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ СВЕРХЗВУКОВЫХ ГАЗОВЫХ СТРУЙ В ПРОЦЕССЕ НАПЛАВКИ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

гать горелку так, чтобы поверхность металла находилась именно в этой зоне. Зависимости интенсивности излучения атомарного углерода (С) от общего расхода газов и от расстояния от края сверхзвукового сопла (рис. 5 б, в) являются возрастающими и носят качественно одинаковый характер.

На основании полученных экспериментальных данных сделаны следующие выводы:

1. Методом оптической эмиссионной спектроскопии получены достоверные экспериментальные данные о распределении интенсивности излучения атомов С и молекул С₂ (полос Свана), которые позволяют выявить зависимость максимальной температуры сверхзвукового пламени от значений общего расхода рабочих газов и расстояния от края сопла.

2. Установлено, что интенсивность спектральных линий, соответствующих С₂, может рассматриваться как критерий, определяющий максимальную температуру в сверхзвуковом газовом пламени.

3. На основе анализа интенсивности излучения полос Свана определена область максимальной температуры сверхзвукового пламени, которая располагается на расстоянии порядка 10 мм от края сопла в зависимости от расхода рабочих газов, что является одним из основных параметров, определяющих эффективность процесса сверхзвуковой газопорошковой наплавки.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.technicord.ru>.
2. Пат. 2037336 Российская Федерация, МПК В05В7/20. Установка для сверхзвукового газопла-

менного напыления / Воронежский А.В., Воронежская З.И., Адамов Б.С., Адамова С.С., Рачеткина А.И., Бабченкова Н.Н.; заявл. 29.12.1992; опубл. 19.06.1995.

3. Разработка комплекса автоматизированного оборудования и технологии создания защитных покрытий на деталях котлов с «кипящим слоем»: Отчет о НИР по программе 3438р/5897 «СТАРТ-05»/ Радченко М.В., Шевцов Ю.О., Радченко Т.Б., Маньковский С.А., Нагорный Д.А., Черемисин П.В.// ООО «НИИ Высоких Технологий». Руководитель М.В.Радченко. Г.Р.№ 0120.0 509888. Инв. № 02.2.007 00277. Барнаул, 2006. - 82 с.

4. Пат. № 60410 Российская Федерация, МПК В22В 19/06. Устройство для сверхзвуковой газопорошковой наплавки / Радченко М.В., Шевцов Ю.О., Радченко Т.Б., Нагорный Д.А., Маньковский С.А.; заявл. 4.07.2006; опубл. 27.01.2007 в Б.И. № 3.

5. Радченко, М. В. Разработка технологической аппаратуры для сверхзвуковой газопорошковой наплавки / М.В. Радченко, Ю.О. Шевцов, Д.А. Нагорный, С.А. Маньковский, Т.Б. Радченко // Обработка металлов. – 2007. – №1(34). – С. 19-23.

6. Положительное решение на выдачу патента РФ по заявке № 2007110154, МПК В22D 19/06. Способ сверхзвуковой газопорошковой наплавки / Радченко М.В., Шевцов Ю.О., Радченко Т.Б., Игнатъев В.В.; заявл. 19.03.2007.

7. Суранов, А. Я. Микропроцессорный регистратор одномерных изображений на базе фотодиодного приемника / А.Я. Суранов, С.В. Белых // Приборы и техника эксперимента. – 2003. – №6.

8. Герцберг, Г. Спектры и строение двухатомных молекул / Г. Герцберг. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1949. – 403 с.

9. Пеннер, С. С. Количественная молекулярная спектроскопия и излучательная способность газов / С.С. Пеннер. – М.: Издательство иностранной литературы, 1963. – 493 с.

10. <http://www.arikah.com/encyclopedia/butane>.

11. Мальцев, В. М., Основные характеристики горения / В.М. Мальцев, М.И. Мальцев, Л.Я. Кашпоров. – М.: Химия, 1977. – 320 с.