УДК 621.791.92

ДИАГНОСТИКА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕРХЗВУКОВЫХ ГАЗОВЫХ СТРУЙ В АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ СГП-НАПЛАВКИ

В.С. Киселев, М.В. Радченко, Т.Б. Радченко, Ю.О. Шевцов, Е.А. Летов

В работе на основе метода яркостной пирометрии для диагностики температурных характеристик и измерения температуры пламени представлены достоверные данные о распределении температуры нагрева сверхзвуковой газовой струи. Полученные результаты позволяют эффективно управлять процессами аддитивных технологий СГП-наплавки при решении конкретных технологических задач по нанесению многофункциональных защитных покрытий.

Коллективом авторов разработано устройство по реализации сверхзвукового истечения газового потока с соплами с различными числами Маха (патент РФ на полезную модель N 60410 "Устройство для сверхзвуковой газопорошковой наплавки").

В процессе исследования параметров нанесения защитных покрытий определены форма, размер и температура сверхзвуковой газопорошковой струи, установлены основные закономерности истечения газопорошкового потока, температурные и скоростные характеристики наплавляемых частиц порошкового сплава.

При проведении исследований произведено условное разделение диапазона сверхзвукового горения на режимы низкой, средней, и высокой интенсивности. Коэффициент β варьировался от 1,5 до 2 (1,5; 1,75; 2) для каждого режима. Для каждого значения коэффициента β произведены измерения температуры нагрева вольфрамового зонда на расстоянии 3 – 50 мм от края сопла.

Определены основные закономерности изменения температуры нагрева излучающего зонда сверхзвуковой газовой струей.

Ключевые слова: аддитивные технологии, яркостная пирометрия, сверхзвуковая газопорошковая наплавка, коэффициент β соотношения рабочих газов, измерение температуры нагрева при СГП-наплавке, новые энерго- и ресурсосберегающие технологии, гидродинамические параметры сверхзвукового истечения газовых струй, теплофизические параметры СГП-наплавки, физико-химические параметры горения, многопараметрическая модель СГП-наплавки.

Разработка фундаментальных основ для последующего проектирования принципиально новых энерго- и ресурсосберегающих технологий и материалов является одним из приоритетных направлений современной науки. Аддитивные технологии нанесения многокомпонентных защитных покрытий - наиболее динамично развивающаяся отрасль, позволяющая при сравнительно малых затратах увеличить ресурс агрегатов и узлов, работающих в условиях интенсивного механического, коррозионного или комбинированного изнашивания, например, деталей объектов, подведомственных Ростехнадзору, к которым относятся железнодорожный транспорт, котельное оборудование и др.

Потребность в решении фундаментальных вопросов новых технологических процессов определяется наличием в Западной Сибири динамично развивающихся крупных предприятий Алтайского края.

На современном этапе развития аддитивных технологий нанесения защитных покрытий дальнейшие исследования и модернизация газопламенных способов нанесения покрытий связаны с использованием сверхзвуковых газовых струй в процессе сверхзвуковой газопорошковой наплавки (СГП-наплавки). Одним из основных преимуществ СГП-наплавки является максимальная концентрация и плотность тепловой мощности газового пламени в пятне нагрева. Более сосредоточенное пятно нагрева сверхзвуковой струи позволяет за короткий промежуток времени оплавить порошковые частицы сложнолегированных сплавов и навести жидкую металлическую ванну из основного и присадочного металла в поверхностных слоях защищаемой детали.

Важное значение для повышения качества защитных покрытий, наносимых аддитивным способом сверхзвуковой газопорош-

ковой наплавки имеет диагностика и контроль температуры сверхзвуковой газопламенной струи. [1-3]

Коллективом авторов разработано устройство по реализации сверхзвукового истечения газового потока с соплами с различными числами Маха (патент РФ на полезную модель N 60410 “Устройство для сверхзвуковой газопорошковой наплавки”).

Изучение физических характеристик сверхзвуковых газовых струй (например, распределение температуры в факеле пламени при осуществлении СГП-наплавки) является наиболее сложной фундаментальной задачей ввиду ряда особенностей горения в сверхзвуковом потоке - турбулентного характера потока, химической активности пламени и др.

Одной из наиболее важных проблем при разработке технологии сверхзвуковой газопорошковой наплавки является выбор рациональных режимов нанесения защитных покрытий, которые имеют набор взаимосвязанных гидродинамических, теплофизических и физико-химических параметров. Такая многопараметрическая модель требует разработки комплексного подхода к процессу измерений в стационарных высокотемпературных потоках.

В процессах газопорошковой наплавки для улучшения качества покрытия необходимо учитывать некоторые особенности. Важную роль играют качество и стабильность самого процесса. Вследствие этого необходимо выявить рациональное соотношение рабочих газов: пропана и кислорода, определить расстояние между краем сопла горелки и защищаемой поверхностью изделия с максимальной температурой. В процессе исследования параметров нанесения защитных покрытий основной задачей является определение формы, размера и температуры сверхзвуковой газопорошковой струи, установление основных закономерностей истечения газопорошкового потока, температурных и скоростных характеристик наплавляемых частиц порошкового сплава.

Важнейшими технологическими параметрами при производстве сверхзвуковой газопорошковой наплавки являются расход рабочих газов пропан-кислород и коэффициент β соотношения рабочих газов. Весь диапазон соотношения рабочих газов при производстве сверхзвуковой газопорошковой наплавки составляет по пропану 2,1 – 7,5 л/мин (30 – 60 ед. по шкале ротаметров). При этом коэффициент β соотношения рабочих газов в диапазоне устойчивого горения составляет 1,5 – 5. При β > 2 сверхзвуковое пламя проявляет окислительный характер, что неприемлемо для наплавочных работ.

На основании этого при проведении исследований условно разделим весь диапазон сверхзвукового горения на режимы низкой, средней, и высокой интенсивности – соответственно 30-60 ед. по шкале ротаметра. Коэффициент β варьируем от 1,5 до 2 (1,5; 1,75; 2) для каждого режима. Для каждого значения коэффициента β производим измерения температуры нагрева вольфрамового зонда на расстоянии 3 – 50 мм от края сопла.

В качестве метода измерения температуры рассмотрим метод оптической пирометрии - измерение температуры оптическим пирометром. Яркостные пирометры применяют для измерения температуры сплошных тел по их собственной интенсивности излучения. Принцип действия пирометра основан на сравнении интенсивности света, излучаемого объектом, температуру которого измеряют, и проградуированной фотометрической лампой накаливания. Для вырезания узкого участка спектра излучения при наблюдении интенсивности излучения объекта и нити применяется фильтр.

Для оценки температуры сверхзвуковой газопламенной струи был выбран косвенный метод измерения яркостной температуры пламени при помощи излучающего зонда. Излучающий зонд помещался в газопламенную струю, нагревался потоком горящей газовой смеси и начинал светиться. Яркость излучения зонда сравнивалась с излучением вольфрамовой нити пирометра.

В качестве измерительной установки использовался яркостной пирометр ЛОП-72 с блоком питания и цифровым многофункциональным вольтметром Aglient (рисунок 1), позволяющий непосредственно измерять температуры нагретых сплошных твердых тел. В качестве излучающего зонда использовался вольфрамовый электрод марки WT-20 2,0х175 диаметром 2 мм.

Рисунок 1 – Общий вид яркостного пирометра ЛОП-72 с блоком питания и цифровым многофункциональным вольтметром Aglient

Нагрев зонда осуществлялся сверхзвуковым пистолетом с расстояния 3, 10, 20, 30, 40 и 50 мм. Наблюдение при помощи пирометра проводилось с расстояния 3 м. В окуляре пирометра на фоне эталонной вольфрамовой нити возникало изображение ярко светящегося вольфрамового электрода. При помощи встроенных в пирометр поглотителей II и III добивались исчезновения разницы в яркости свечения нити и зонда - исчезновения электрода на фоне нити (рисунок 2).

Рисунок 2 – Изображение ярко светящегося вольфрамового электрода на фоне эталонной вольфрамовой нити в окуляре пирометра

ДИАГНОСТИКА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕРХЗВУКОВЫХ ГАЗОВЫХ СТРУЙ В АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ СГП-НАПЛАВКИ

Исследования температуры сверхзвуковой газовой струи производились для следующих технологических параметров: значения избыточных давлений рабочих газов - $P_{КИСЛОРОДА} = 5\ атм$, $P_{ПРОПАНА} = 1{,}5\ атм$; коэффициент β соотношения рабочих газов - 1,5, 1,75, 2,0.

Из диапазона расхода горючего газа (пропана), обеспечивающего устойчивое горение сверхзвуковой газовой струи при заданных давлениях были выделены три характерных значения диапазона расхода рабочих газов (низкой, средней и высокой интенсивности), приведенные в таблицах 1, 4, 7.

Таблица 1 – Значения расхода рабочих газов сверхзвукового сопла с числом Маха М5 малой интенсивности

Показания ротаметрического стенда по шкале ротаметров		
Коэффициент β соотношения рабочих газов	пропан	кислород
1,5	30	14
1,75	30	18
2,0	30	21
Расход рабочих газов в процессе наплавки $Q_{ПР}$ и $Q_К$, л/мин.		
Коэффициент β соотношения рабочих газов	пропан	кислород
1,5	2,1	3,15
1,75	2,1	3,68
2,0	2,1	4,20

Значения тока в нити пирометра, при которых наблюдается её исчезновение на фоне излучающего вольфрамового зонда, нагреваемого сверхзвуковым соплом с числом Маха М5 малой интенсивности (поглотитель №2 и №3) приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения тока в нити пирометра

Коэффициент β соотношения рабочих газов	Расстояние от среза сопла, мм					
	3	10	20	30	40	50
1,5	0,2819	0,3202	0,3511	0,3411	0,3316	0,33
1,75	0,359	0,3935	0,3853	0,3518	0,35	0,3449
2,0	0,4064 (№2)	0,3243 (№3)	0,3277 (№3)	0,3157 (№3)	0,2855 (№3)	0,2669 (№3)

Значения температур нагрева излучающего вольфрамового зонда, ºС (поглотитель №2 и №3) приведены в таблице 3.

Для сверхзвукового горения малой интенсивности характерно увеличение максимальной температуры нагрева излучающего зонда с увеличением коэффициента β соотношения рабочих газов (рисунок 3).

Таблица 3 – Значения температур нагрева излучающего вольфрамового зонда, нагреваемого сверхзвуковым соплом с числом Маха М5 при малой интенсивности сверхзвукового горения, ºС

Коэффициент β соотношения рабочих газов	Расстояние от среза сопла, мм					
	3	10	20	30	40	50
1,5	1316,815	1510,801	1667,306	1616,657	1568,541	1560,437
1,75	1707,319	1882,058	1840,526	1670,852	1661,735	1635,904
2,0	1947,395	2150,943	2184,576	2065,873	1767,137	1583,148

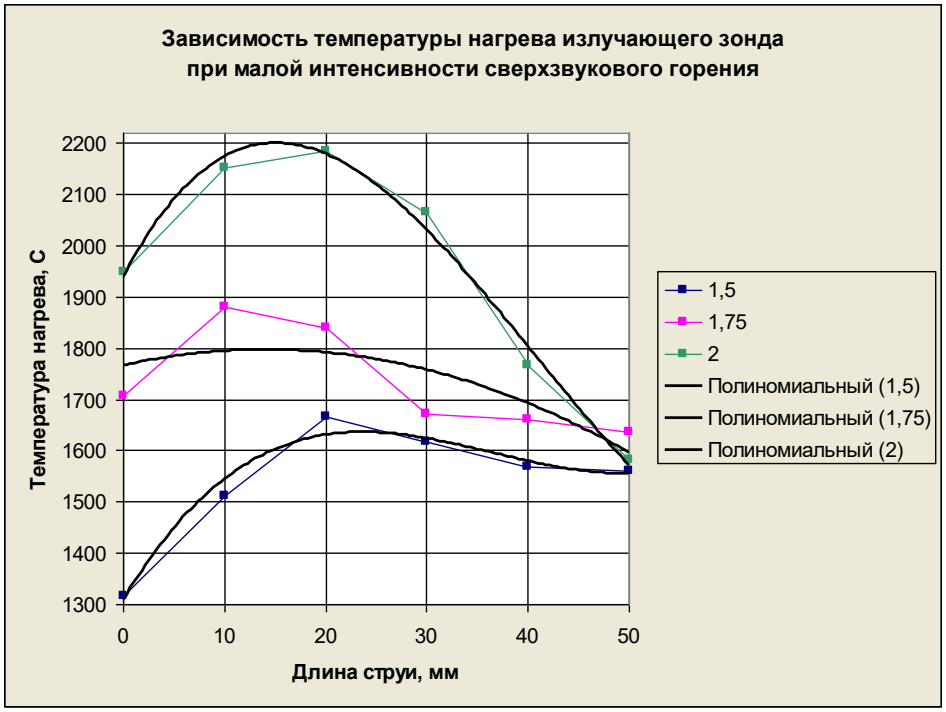


Рисунок 3 – Зависимость температуры нагрева излучающего зонда при малой интенсивности сверхзвукового горения от длины сверхзвуковой газовой струи

Для сверхзвукового горения малой интенсивности характерно увеличение максимальной температуры нагрева излучающего зонда с увеличением коэффициента β соотношения рабочих газов (рисунок 3). Максимум температуры достигает 1640 ºС для β=1,5; 1800 ºС для β=1,75; 2200 ºС для β=2. С увеличением коэффициента β изменяется также и характер изменения температуры в зависимости от расстояния до среза сопла горелки. С увеличением β зона максимальной температуры смещается ближе к соплу, далее с увеличением расстояния она падает более резко, что говорит о более интенсивном протекании сгорания.

Таблица 4 – Значения расхода рабочих газов сверхзвукового сопла с числом Маха М5 средней интенсивности

Показания ротаметрического стенда по шкале ротаметров		
Коэффициент β соотношения рабочих газов	пропан	кислород
1,5	45	23
1,75	45	28
2,0	45	34
Расход рабочих газов в процессе наплавки $Q_{ПР}$ и $Q_К$, л/мин.		
Коэффициент β соотношения рабочих газов	пропан	кислород
1,5	3,0	4,5
1,75	3,0	5,25
2,0	3,0	6,0

Значения тока в нити пирометра, при которых наблюдается исчезновение нити на фоне излучающего вольфрамового зонда (поглотители №2 и №3) приведены в таблице 5.

Значения температур нагрева излучающего вольфрамового зонда, ºС (поглотитель №2 и №3) приведены в таблице 6.

Таблица 5 – Значения тока в нити пирометра

Коэффициент β соотношения рабочих газов	Расстояние от среза сопла, мм					
	3	10	20	30	40	50
1,5	0,2949 (№3)	0,3051 (№3)	0,3024 (№3)	0,2996 (№3)	0,2969 (№3)	0,2888 (№3)
1,75	0,3 (№3)	0,3048 (№3)	0,3155 (№3)	0,2997 (№3)	0,2874 (№3)	0,2659 (№3)
2,0 (без ядра)	0,3655 (№3)	0,2881 (№3)	0,2707 (№3)	0,2796 (№2)	0,28 (№2)	0,2806 (№2)

Таблица 6 – Значения температур нагрева излучающего вольфрамового зонда, нагреваемого сверхзвуковым соплом с числом Маха М5 при средней интенсивности сверхзвукового горения, ºС.

Коэффициент β соотношения рабочих газов	Расстояние от среза сопла, мм					
	3	10	20	30	40	50
1,5	1860,121	1961,019	1934,311	1934,311	1879,905	1799,781
1,75	1910,57	1958,051	2063,894	1907,602	1785,932	1573,256
2,0	2558,489	1792,856	1620,737	1305,166	1307,192	1310,231

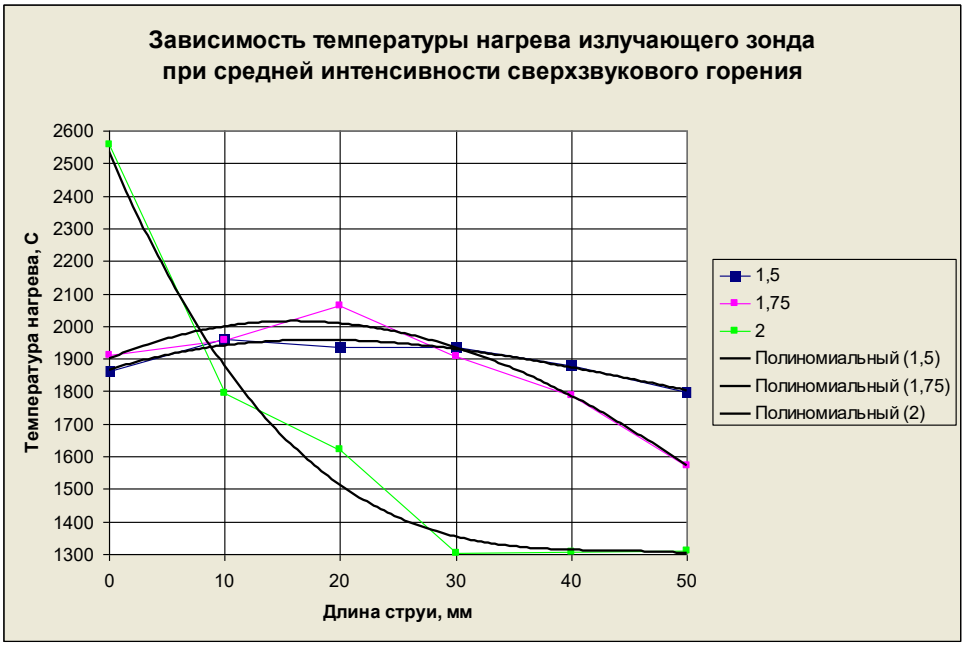


Рисунок 4 – Зависимость температуры нагрева излучающего зонда при средней интенсивности сверхзвукового горения от длины сверхзвуковой газовой струи

Для сверхзвукового горения средней интенсивности характерно увеличение максимальной температуры нагрева излучающего зонда с увеличением коэффициента β соотношения рабочих газов (рисунок 4). Максимум температуры достигает 1950 ºС для β=1,5; 2020 ºС для β=1,75. С увеличением коэффициента β с 1,5 до 1,75 изменяется характер распределения температуры в зависимости от расстояния от среза сопла горелки – с увеличением β зона максимальной температуры смещается ближе к соплу, далее с увеличением расстояния она падает более резко, что говорит о более интенсивном протекании сгорания (рисунок 5, б). Для β=2 максимум температуры 2550 ºС наблюдается на крае сопла, при этом распределение температуры нагрева имеет другой характер вследствие того, что на данном режиме ядро пламени полностью перемещается внутрь горелки (рис. 5 а).

Таблица 7 – Значения расхода рабочих газов сверхзвукового сопла с числом Маха М5 высокой интенсивности

Показания ротаметрического стенда по шкале ротаметров		
Коэффициент β соотношения рабочих газов	пропан	кислород
1,5	60	32
1,75	60	38
2,0	60	45
Расход рабочих газов в процессе наплавки $Q_{ПР}$ и $Q_К$, л/мин.		
Коэффициент β соотношения рабочих газов	пропан	кислород
1,5	3,84	5,76
1,75	3,84	6,72
2,0	3,84	7,68

Значения тока в нити пирометра, при которых наблюдается исчезновение нити на фоне излучающего вольфрамового зонда (поглотители №2 и №3) приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Значения тока в нити пирометра

Коэффициент β соотношения рабочих газов	Расстояние от среза сопла, мм					
	3	10	20	30	40	50
1,5	0,2929 (№3)	0,3063 (№3)	0,3126 (№3)	0,3118 (№3)	0,2993 (№3)	0,299 (№3)
1,75	0,2948 (№2)	0,3335 (№2)	0,3751 (№2)	0,3709 (№2)	0,373 (№2)	0,3642 (№2)
2,0	0,3235 (№3)	0,3105 (№3)	0,3189 (№3)	0,3117 (№3)	0,3067 (№3)	0,306 (№3)

Значения температур нагрева излучающего вольфрамового зонда, ºС (поглотитель №2 и №3) приведены в таблице 9.

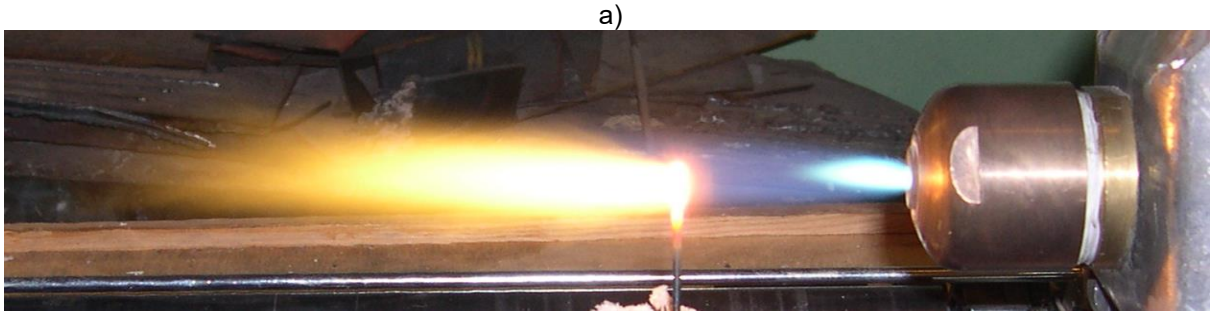
Таблица 9 – Значения температур нагрева излучающего вольфрамового зонда, нагреваемого сверхзвуковым соплом с числом Маха М5 при высокой интенсивности сверхзвукового горения, ºС.

Коэффициент β соотношения рабочих газов	Расстояние от среза сопла, мм					
	3	10	20	30	40	50
1,5	1840,338	1972,889	2035,208	2027,294	1903,646	1900,678
1,75	1382,153	1578,164	1788,864	1767,591	1778,228	1733,657
2,0	2143,03	2014,435	2097,527	2026,305	1976,846	1969,921

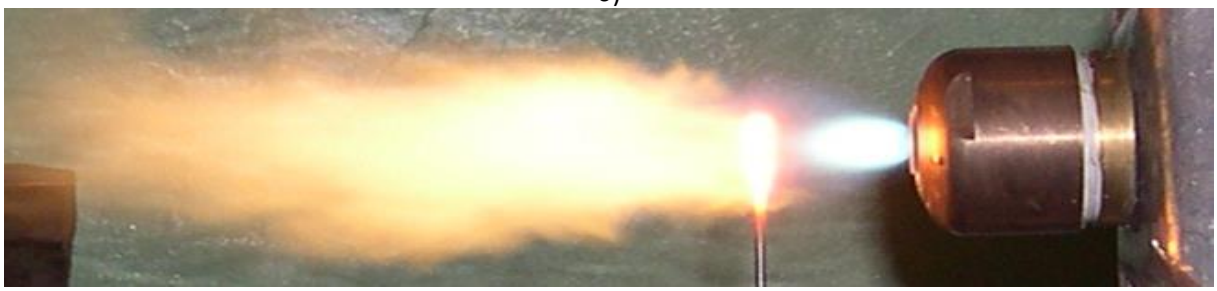
При сверхзвуковом горении высокой интенсивности изменение температуры нагрева излучающего зонда имеет следующие закономерности (рисунок 6). Для β=1,5 максимум температуры нагрева достигает 2030 ºС. Характер изменения аналогичен режимам низкой и средней интенсивности при β=1,5. При β=1,75 ºС наблюдается выход полностью ядра пламени за пределы сопла (рисунок 5, б), что приводит к падению и рассредоточению температуры (рисунок 6). Максимум наблюдается на расстоянии 33 мм от среза сопла, и составляет 1780 ºС.

Зависимости температуры нагрева излучающего зонда при малой, средней и высокой интенсивностях сверхзвукового горения для наиболее характерного значения коэффициента соотношения рабочих газов β=1,5 показаны на рисунке 7.

а)



б)



в)

Рисунок 5. Характерное изменение размеров, формы и структуры сверхзвукового газового потока высокой и средней интенсивности при различных соотношениях рабочих газов β:
а) средней интенсивности β=2; б) средней интенсивности β=1,75;
в) высокой интенсивности β=1,75

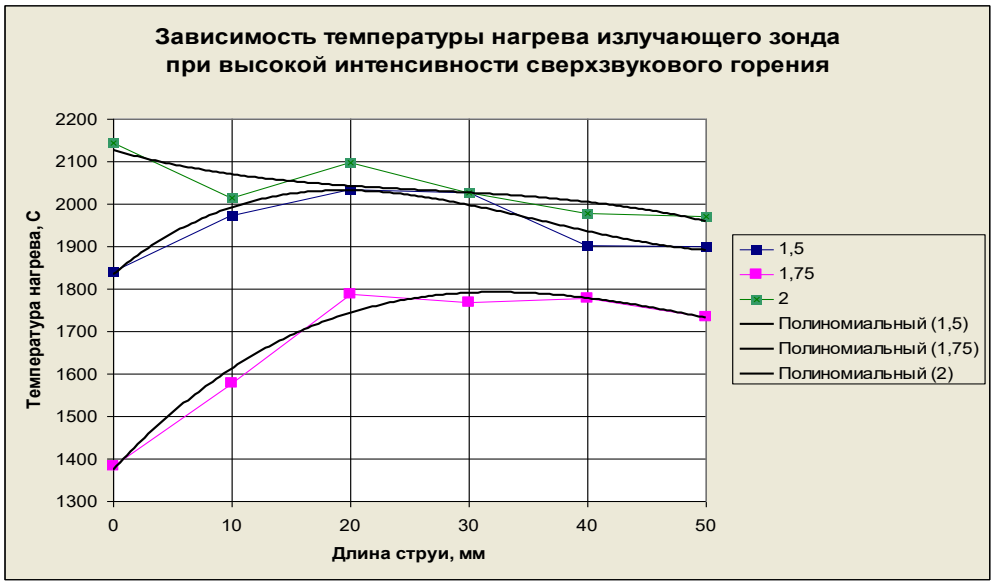


Рисунок 6 – Зависимость температуры нагрева излучающего зонда при высокой интенсивности сверхзвукового горения

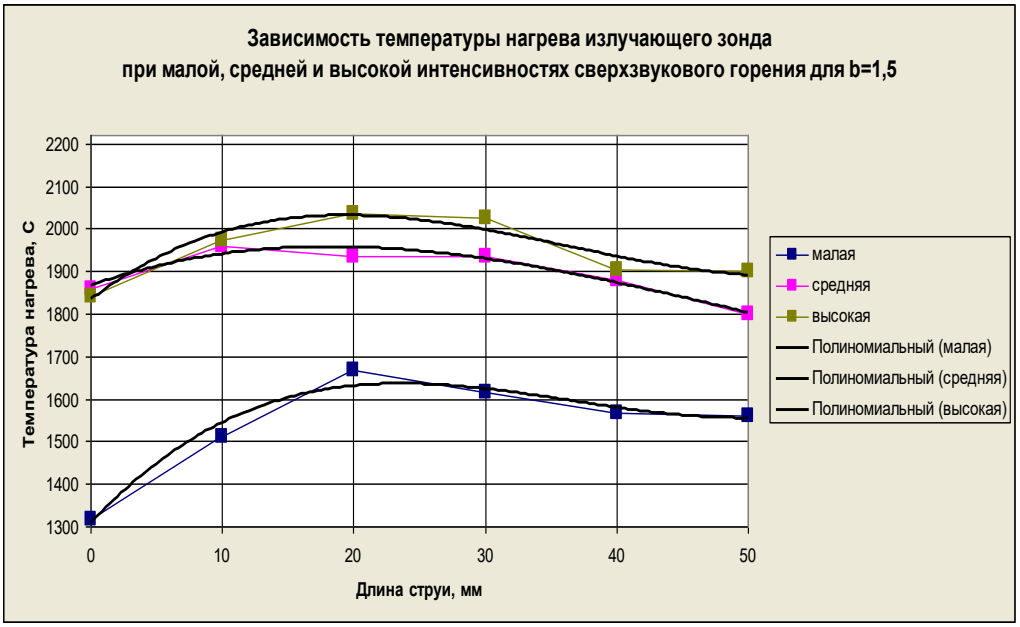


Рисунок 7 – Зависимость температуры нагрева излучающего зонда при малой, средней и высокой интенсивностях сверхзвукового горения для β=1,5

Однако ввиду турбулентного характера самой сверхзвуковой газовой струи её характеристики не имеют четких геометрических границ, вследствие этого погрешность метода существенна и составляет около 100 ºС. Погрешность измерения увеличивается с увеличением измеряемой температуры.

Для режимов низкой, средней, и высокой интенсивностей горения при β=1,5 характер изменения температуры практически не изменяется. Максимум температуры (2030 ºС) достигается при режиме высокой интенсивности на расстоянии порядка 20 мм от среза сопла.

Таким образом, применение метода яркостной пирометрии для диагностики температурных характеристик и измерения температуры пламени позволяет получить достоверные данные о распределении температуры нагрева сверхзвуковой газовой струи и эффективно управлять процессами аддитивных технологий СГП-наплавки при решении конкретных технологических задач по нанесению многофункциональных защитных покрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Киселев, В. С. Повышение износостойкости наплавленных покрытий путем выбора рациональных технологических параметров на основе диагностики сверхзвуковых газопорошковых струй: дисс. … канд. техн. наук: 05.02.10/ В.С. Киселев; Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова.- Барнаул, 2010.

2. Комплексная диагностика сверхзвуковых газовых струй в процессе сверхзвуковой газопорошковой наплавки износостойких покрытий / М.В. Радченко, В.С. Киселев, Ю.О. Шевцов, С.Г. Уварова, Т.Б. Радченко, В.Г. Радченко // Сварка и диагностика.- 2011.-№1.- С. 54-58.

3. Радченко, М.В. Методика прогнозирования качества защитных износостойких покрытий, выполненных способом сверхзвуковой газопорошковой наплавки на объектах Ростехнадзора / М.В. Радченко, В.С. Киселев, Ю.О. Шевцов, Т.Б. Радченко, В.Г. Радченко, С.Г. Уварова // Сварка и диагностика, 2014.- № 4.- С. 14-18.

4. Радченко, М.В. Разработка технологических рекомендаций по созданию защитных покрытий на трубах котлов с «кипящим слоем» газопорошковой наплавкой [Текст] / М. В. Радченко, Ю. О. Шевцов, В. Г. Радченко, С. Г. Уварова // Ползуновский вестник. – 2009. – № 4. – С. 200–206.

5. Шевцов, Ю.О. Прогнозирование свойств наплавляемых защитных покрытий с использованием регрессионного анализа [Текст] / Ю. О. Шевцов, М. В. Радченко, С. А. Маньковский, С. Г. Уварова, Т. Б. Радченко // Ползуновский вестник. – 2009. – № 4. – С. 207–210.

6. Радченко, М.В. Экспериментальные исследования технологического процесса сверхзвуковой газопорошковой наплавки для объектов теплоэнергетики [Текст]/ М.В. Радченко, С.А.Маньковский С.А., Шевцов Ю.О., Радченко В.Г., Радченко Т.Б. // Сварочное производство, 2009.- №7.- С. 28-31.

7. Радченко М.В. Разработка технологических рекомендаций по созданию защитных покрытий на трубах котлов с «кипящим слоем» газопо-

рошковой наплавкой [Текст] / М. В. Радченко, Ю. О. Шевцов, В. Г. Радченко, С. Г. Уварова, Т. Б. Радченко, В. С. Киселёв // Ползуновский вестник. – 2011. – № 2-2. – С. 244–250.

8. Киселев, В.С. Технологические аспекты контроля и диагностики процесса СГП-наплавки самофлюсующихся сплавов [Текст]/ В.С. Киселев, М.В. Радченко, Г.В. Матохин, Т.Б. Радченко, Ю.О. Шевцов // Ползуновский вестник, 2012.- № 1/1.- С. 123-126.

9. Радченко, М.В., Уварова С.Г., Шевцов Ю.О., Радченко В.Г., Марков В.А. Практика использования концентрированных потоков энергии для сварки и создания защитных покрытий [Текст]// Ползуновский вестник, 2012.- № 1/1.- С. 248-254.

10. Радченко, М.В. Разработка и изготовление устройства для сверхзвуковой газопорошковой наплавки и анализ его технологических характеристик [Текст]/ М.В. Радченко, Д.А. Нагорный, Ю.О. Шевцов, Т.Б. Радченко// Ползуновский вестник.- Барнаул: Изд-во Алт. гос. тех. ун-та им. И.И. Ползунова, 2013.- № 4-2.- С. 55-59.

Киселев Вадим Сергеевич *– к.т.н., доцент кафедры «Малый бизнес в сварочном производстве» АлтГТУ им. И. И. Ползунова, тел. 89293970327.*
E-mail: vadserkis@yandex.ru

Радченко Михаил Васильевич *– д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Малый бизнес в сварочном производстве» АлтГТУ им. И. И. Ползунова, тел. 89039112852.*
E-mail:_mirad_x@mail.ru

Радченко Татьяна Борисовна *– д.т.н., профессор кафедры «Малый бизнес в сварочном производстве» АлтГТУ им. И. И. Ползунова, тел. 89059851621.*
E-mail:_mirad_x@mail.ru

Шевцов Юрий Олегович *– к.т.н., доцент кафедры «Малый бизнес в сварочном производстве» АлтГТУ им. И. И. Ползунова, тел.89132213520, E-mail: yuoshevtsov@mail.ru*

Летов Егор Александрович *– аспирант кафедры «Малый бизнес в сварочном производстве» АлтГТУ им. И. И. Ползунова, тел. 84997847285, E-mail: Egor_Letow@mail.ru*