

УДК 621.7.08

Анализ и оптимизация газотермического напыления по скорости и температуре конденсированной фазы потока*

А.В. Долматов¹, И.П. Гуляев^{1,2}, В.И. Кузьмин², Е.А. Лысков¹,
К.А. Ермаков¹

¹Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск

²Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

E-mail: a_dolmatov@ugrasu.ru

В работе приведены результаты экспериментальных исследований распределения скорости и температуры конденсированной фазы в струе плазматрона ПНК-50 (ИТПМ СО РАН, Новосибирск) на различных режимах напыления образцов покрытий порошком никелевого сплава ПР-НХ16СРЗ. Измеренные средние значения скорости (230–280 м/с) и температуры (2290–2410 К) напыляемых частиц сопоставлены с результатами исследования микротвердости (630–710 НВ) и пористости (1,7–13,5 %) образцов. Составлены карты свойств покрытий в системах координат «ток дуги–дистанция напыления» и «скорость–температура частиц». Предложена методика регулировки режимных параметров напылительного оборудования на основе оптического контроля скорости и температуры частиц. Приведен пример построения актуальной аппаратной функции плазматрона, и выработан подход для оптимизации и трансфера технологии напыления покрытий с заданными свойствами между установками разных производителей, типа и мощности.

Ключевые слова: скорость, температура, тепловизионный контроль; спектральная, яркостная пирометрия; конденсированная фаза, газотермическое напыление, свойства покрытий, оптимизация, технологический режим.

Введение

Современные аддитивные технологии приближаются к уровню, при котором возможно промышленное производство готовых деталей и изделий без традиционных методов обработки, таких как фрезеровка, сверление, стачивание, штамповка, ковка, изгиб, раскатывание [1–4]. В большой мере этот подход характерен для технологии газотермического напыления (ГТН) покрытий. Методы ГТН позволяют получать из низкотехнологичных заготовок высококачественные изделия либо восстанавливать подобные изделия только за счет нанесения функциональных, т.е. жаростойких, теплозащитных, износостойких, фрикционных, электрозащитных, проводящих, коррозионностойких и декоративных покрытий толщиной от 10 мкм до 10 мм и более [5–7]. В настоящее время рождаются технологии послойного производства объемных изделий из керамики и металлов [8].

* Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 15-48-00100 «Приборы контроля динамики распределения термодинамической температуры в процессах СВС материалов и газотермического напыления покрытий».

Качество покрытий характеризуется следующими свойствами: адгезионная и когезионная прочность, плотность (пористость), фазовый состав материала, устойчивость к термоциклированию и другими [9]. В настоящее время задача контроля и оптимизации качества функционального покрытия фактически решается индивидуально для установок напыления разного типа и мощности. Более того, воспроизводимость свойств покрытий, получаемых с помощью разных видов напылительных установок, зависит от технического состояния последних, для поддержания которого в штатном режиме требуются регулярные процедуры ревизии и технического обслуживания [10]. В целом можно констатировать, что в современных установках напыления отсутствует автоматическая обратная связь, которая могла бы в процессе эксплуатации регулировать технологический режим — расход рабочего газа, ток электрической дуги, дистанцию напыления, расход напыляемого материала и т.д. — для поддержания значений скорости и температуры частиц, обеспечивающих заданное качество покрытий.

В теории ГТН качество покрытия в первую очередь определяется двумя основными характеристиками конденсированной фазы напылительной струи: скоростью и температурой частиц наносимого материала [9–12]. Измерение этих параметров осложнено агрессивностью, высокой скоростью и температурой транспортирующего газо-плазменного потока, а также огромным количеством контролируемых объектов (частиц конденсированной фазы) с индивидуальными характеристиками [13, 14]. Современные высокоскоростные камеры и цифровые методы обработки их сигнала позволяют решать задачу измерения скорости конденсированной фазы с погрешностью 1–2 % [15, 16], но задача измерения ее температуры до сих пор остается актуальной [17–20]. При нанесении газотермических покрытий из различных материалов в основном применяются диагностические системы, основанные на методе двухцветовой пирометрии: DPV, AccuraSpray (Теснар, Канада), SpectraViz (Stratronics, США), SprayWatch (Oseir, Финляндия), NIR Sensor (GTV, Германия) [21–23]. Однако в условиях быстропротекающих процессов использование метода осложняется отсутствием информации об излучательной способности большинства новых материалов (карбидов/боридов/оксидов в металлической связке, многокомпонентных сплавов, оксидных систем с добавками редкоземельных металлов и т.п.), трудно прогнозируемым влиянием фонового излучения плазмы, высокой инструментальной погрешностью измерений, которые на практике приводят к ошибкам в 300–500 градусов при определении температур частиц на уровне 2500 К [24, 25].

Целью настоящей работы является разработка методики оптимизации режима газотермического напыления, контроля его стабильности, а также трансфера технологий нанесения функциональных покрытий между установками различного типа и мощности и разных производителей.

Эксперимент и оборудование

Теплофизические исследования режимов напыления проводились на установке плазменного нанесения покрытий «Термоплазма 50-1» (ИТПМ СО РАН, Новосибирск), оснащенной электродуговым плазмотроном линейной схемы ПНК-50 (номинальная мощность 50 кВт) с секционированным каналом из изолированных межэлектродных вставок (МЭВ). Особенностью этого плазмотрона является узел кольцевого ввода порошка с газодинамической фокусировкой запатентованной конструкции [26, 27]. В экспериментах использовался стандартный режим напыления, применяемый для металлических материалов, при этом диаметр сопла составлял 8 мм, плазмообразующим газом являлся воздух (3 г/с), транспортирующим и фокусирующим газом — воздух (по 0,9 г/с), защитным газом — смесь воздуха и пропан-бутана (0,45 г/с). Изменение тепловых и динамических условий напыления осуществлялось варьированием тока электрической дуги согласно режимам табл. 1.

Таблица 1
Режимы работы напылительной установки

Номер режима	Ток дуги, А	Напряжение дуги, В
1	100	270
2	140	265
3	170	258
4	200	250
5	230	243

Измерение характеристик частиц в объеме плазменной струи проводилось в процессе напыления покрытий порошком самофлюсующегося сплава ПР-НХ16СР3, имеющего следующий состав: Ni — основа, С — 0,75 %, Cr — 16 %, Si — 3,2 %, В — 2,7 % [28]. Для экспериментов использовалась фракция дисперсностью 40–100 мкм, расход материала составлял 2 г/с. Такие покрытия применяются в качестве защиты деталей от абразивного и кавитационного износа, поэтому последующие технологические исследования были направлены на определение микротвердости и пористости покрытий. Анализ микротвердости по Виккерсу (HV) осуществлялся с помощью микротвердомера AFFRI DM8 на отшлифованных нетравленных образцах. Твердость каждого покрытия вычислялась путем осреднения данных восьми измерений на расстоянии 150–200 мкм от поверхности основы. Для изучения пористости использовался микроскоп Zeiss Axiovert с цифровой камерой, интегрированной в среду «ВидеоТест-Структура 5.0».

Измерение характеристик конденсированной фазы выполнялось с помощью оригинальной системы экспресс-контроля напылительных струй (рис. 1) [29, 30]. Данная диагностическая система прошла апробацию на установке плазменно-дугового проволочного напыления Plazer 30-PL-W в Институте электросварки им. О.Э. Патона (г. Киев) [31, 32]. По результатам апробации был разработан новый способ спектрально-яркостной пирометрии (СЯП) подвижных объектов, и одной из задач настоящей работы было его внедрение в опытно-промышленный образец измерительной системы.

В методе СЯП установлена статистическая связь между приведенной яркостью ансамбля частиц, регистрируемых тепловизионной камерой, и их интегральным спектром излучения, фиксируемым фотоспектрометром [30]. При этом измерения температуры не зависят от скорости конденсированной фазы, и сохраняется высокая чувствительность, присущая яркостной пирометрии, а также возможность контроля температуры отдельных частиц. Фактически метод СЯП обладает свойством калибровки тепловизионной камеры в режиме *in situ*, т.е. возможно проводить данную процедуру по объекту и в процессе исследования. Теоретическая оценка случайной составляющей погрешности измерения температуры отдельной частицы способом СЯП на основе используемой

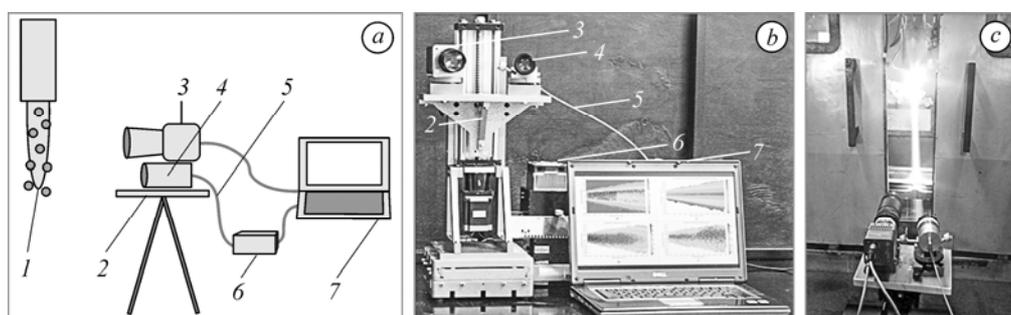


Рис. 1. Схема проведения экспериментов (а), внешний вид системы экспресс-контроля (б), диагностическая система в работе (с).

1 — двухфазная газотермическая струя, 2 — платформа на подвижном штативе, 3 — камера, 4 — объектив фотоспектрометра, 5 — оптоволокно, 6 — фотоспектрометр, 7 — компьютер.

аппаратуры лежит в диапазоне 0,15–1,5 %. Методическое завышение температуры, связанное с неизвестной излучательной способностью материала, в экспериментах [33] было определено на уровне 4 % (80 К) для частиц сплава NiAl при температуре 2000 К. Погрешность измерения скорости отдельных частиц не превышает 1 %.

В ходе экспериментов наблюдался участок напылительной струи на дистанциях 8–31 см от среза сопла плазмотрона. Фокальная плоскость оптической системы располагалась на оси напылительной струи, а глубина резко изображаемого пространства (ГРИП) составляла 5 мм. Область наблюдения системы экспресс-контроля имела размер 120×100×5 мм, а сбор тепловизионных данных производился в двух областях струи: на дистанциях 8–20 и 19–31 см.

Анализ характеристик конденсированной фазы напылительной струи

При обработке данных тепловизионной съемки использовалось предположение, что для фиксированного технологического режима установки процесс напыления можно считать стационарным и локальное математическое ожидание контролируемых величин конденсированной фазы не зависит от времени. В таком случае нет необходимости следить за движением и нагревом отдельной частицы вдоль ее траектории [34], а достаточно набрать статистику по большому количеству частиц в каждой точке области измерения струи.

Методика анализа видеоряда изображений напылительной струи была реализована в среде MATLAB и позволила для каждого идентифицированного трека определить скорость, температуру, положение в потоке и направление движения частицы конденсированной фазы. Объем тепловизионной съемки на каждом режиме напыления составил 10000 кадров. В среднем в одном кадре в процессе обработки было распознано около 50 треков, а общий объем выборки стационарного процесса напыления составил 400–600 тысяч частиц.

С помощью селекции частиц по положению в потоке была выполнена реконструкция напылительной струи, которая позволила получить общее представление о ее геометрических характеристиках (рис. 2). Изображение статистической реконструкции формируется сложением изображений всех треков, идентифицированных в кадрах видеоряда, в соответствии с координатой их «центра масс» и направлением относительно оси потока как целого. Так, по рис. 2 можно измерить угол раскрытия струи и размер пятна напыления на разных дистанциях, обнаружить признаки того, что распределение конденсированной фазы имеет форму полого конуса (изображение внутренней части конденсированной фазы напылительной струи имеет меньшую яркость) и обладает асимметрией (изображение верхней части конуса струи имеет большую яркость).

Результаты диагностики стационарного процесса напыления можно представить в виде карт распределения средних значений скорости, температуры и относительной концентрации частиц конденсированной фазы (рис. 3). Например, рис. 3а и 3б показывают,

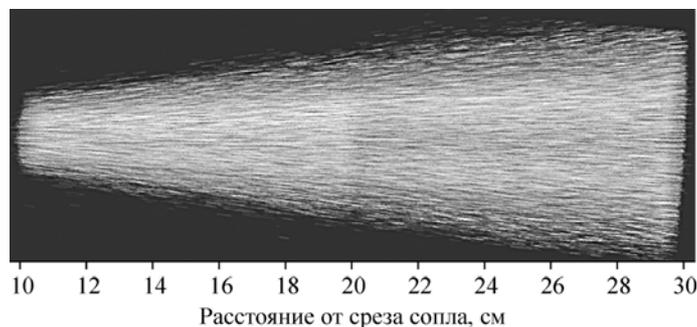


Рис. 2. Статистическая реконструкция напылительной струи при токе дуги 170 А.

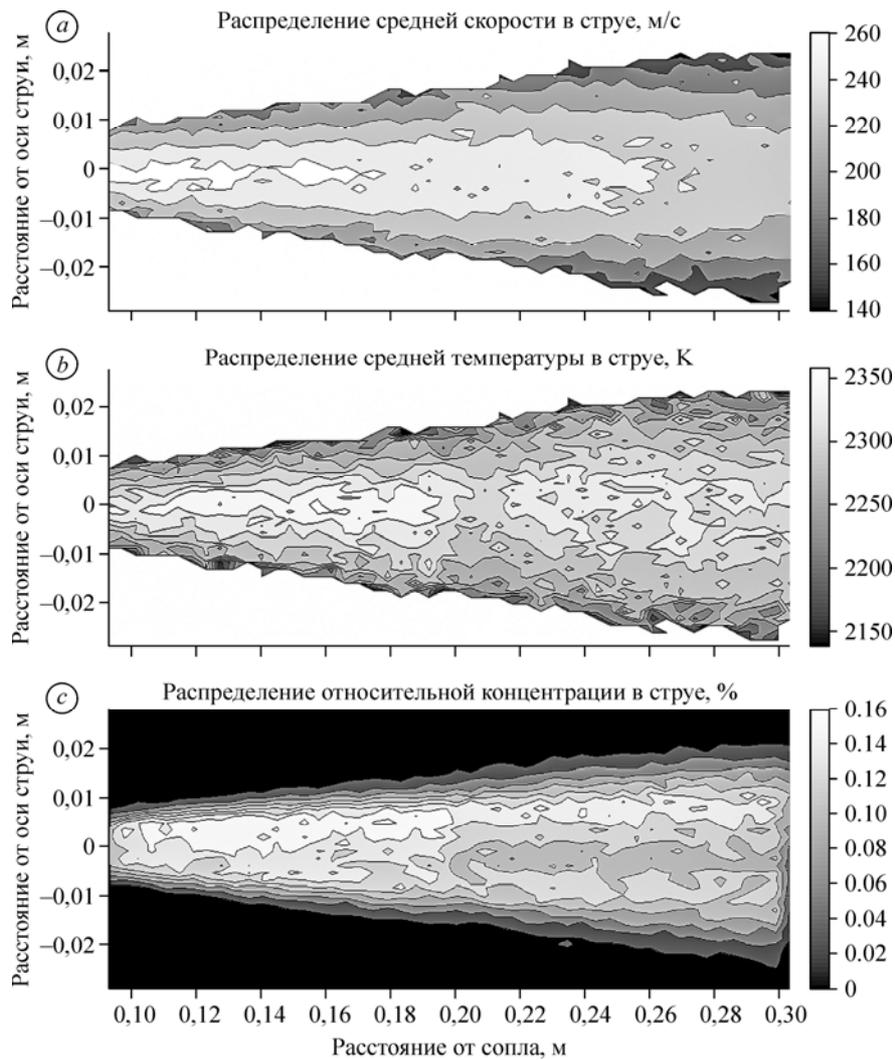


Рис. 3. Распределение средней скорости (а), температуры (b) и относительной концентрации (с) частиц конденсированной фазы в осевом сечении струи.

что распределение скорости и температуры частиц в напылительной струе практически симметричны относительно ее оси. При этом на карте относительной концентрации частиц (рис. 3с) хорошо видна асимметрия: концентрация частиц в верхней части струи выше.

В рамках задачи поддержания стабильности режима работы технологической установки важно, что система экспресс-контроля позволяет за 3–5 минут (ограничено временем регистрации кадров) определить текущие характеристики конденсированной фазы во всей струе, сравнить их с заданными значениями и задействовать обратную связь для регулировки оборудования.

Эффективность применения системы экспресс-контроля можно увидеть на следующем примере. Процесс напыления регистрировался при равных режимных параметрах работы установки и одинаковых условиях наблюдения на отрезке струи 8–20 см до технического обслуживания (ТО) плазмотрона и на отрезке 19–31 см после него. Регламент работ по ТО включал разборку, замену катода и сборку плазмотрона. Результат этих действий можно различить на картах скорости и температуры конденсированной фазы напылительной струи (рис. 4а, 4b), где на дистанции 20 см наблюдается резкое изменение картины изоповерхностей. По графикам характеристик частиц в осевой части

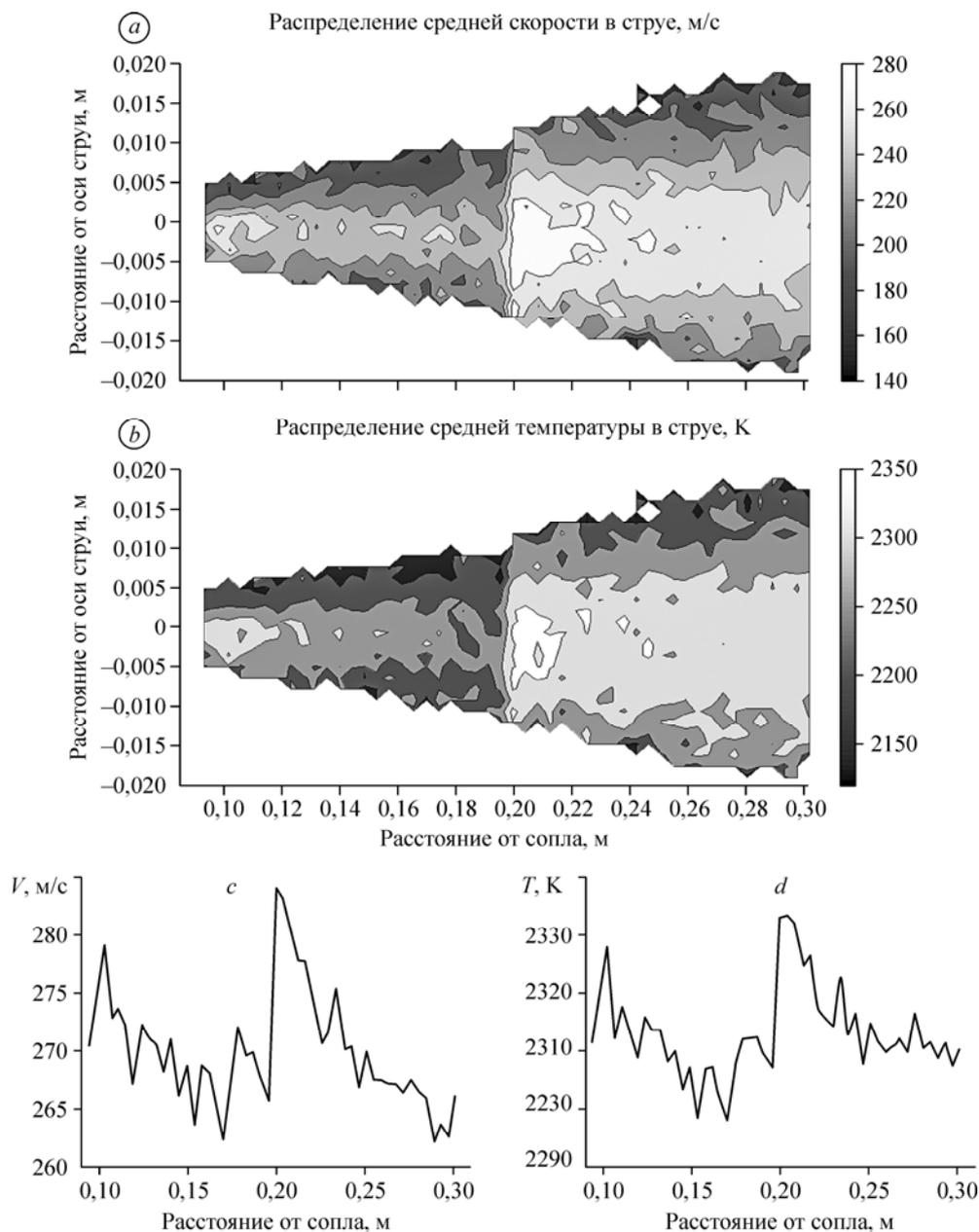


Рис. 4. Результаты эксперимента по диагностике состояния установки напыления до и после технического обслуживания.

напылительной струи (± 2 мм от оси) (рис. 4с, 4d) можно определить, что скорость скачком увеличивается на 15–20 м/с, а температура — на 25–30 градусов. Этот опыт показывает, что во время эксплуатации плазмотрона эрозия его конструктивных элементов влечет изменение динамических и тепловых характеристик конденсированной фазы струи, и для обеспечения штатного режима работы установки требуется применение системы диагностики конденсированной фазы.

Система экспресс-контроля напылительных струй позволяет проводить анализ режимов работы установки и выявить их связь с важнейшими характеристиками процесса — скоростью и температурой конденсированной фазы. Для этого удобно следить за поведением

средней по сечению скорости \bar{V}_0 и температуры \bar{T}_0 частиц на разных дистанциях напылительной струи (рис. 5). Видно, что эти величины на дистанциях менее 22 см достигают максимальных значений уже при токе дуги 170 А. Значимые различия характеристик для режимов 3–5 можно обнаружить только в хвостовом участке струи, где меньший наклон графика соответствует большому току. Отличия температур частиц для режимов работы плазмотрона 3–5 не превышают 1,5 % на всех исследованных дистанциях. Зависимости скорости конденсированной фазы (рис. 5а) показывают, что для каждого режима наблюдается область (начальный участок струи), в которой скорость частиц остается практически постоянной, а далее на графике наблюдается излом и следует заметное уменьшение скорости частиц.

Оценка на основе мощностных параметров работы плазмотрона показывает, что увеличение тока дуги от 100 до 230 А приводит к росту числа Рейнольдса истекающей струи в диапазоне $7 \div 9 \cdot 10^3$ при диаметре сопла 8 мм и скорости потока 1500–2000 м/с, что объясняет снижение длины начального участка турбулентной струи [35]. Выполненный анализ работы напылительной установки позволяет установить связь «рабочий режим — параметры конденсированной фазы». Строго говоря, при анализе режимов напыления важную роль играют не только средние значения скорости и температуры частиц в пятне напыления, но и их среднеквадратичные отклонения. Кроме того, физические и эксплуатационные характеристики покрытий определяются результатом большого числа актов растекания и затвердевания отдельных частиц материала, каждый из которых зависит как от температуры и скорости самих частиц, так и от большого числа других параметров, таких как состояние и температура поверхности основы, угол напыления и т.д. Комплексный анализ таких зависимостей довольно сложен [36] и выходит за рамки настоящей работы.

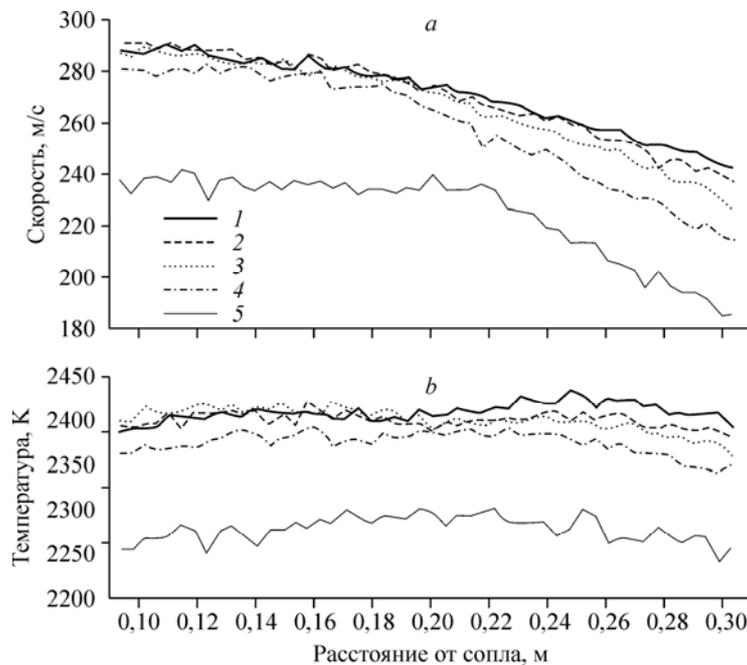


Рис. 5. Зависимости средних по сечению напылительной струи скорости (а) и температуры (б) конденсированной фазы. Ток струи 230 (1), 200 (2), 170 (3), 140 (4), 100 (5) А.

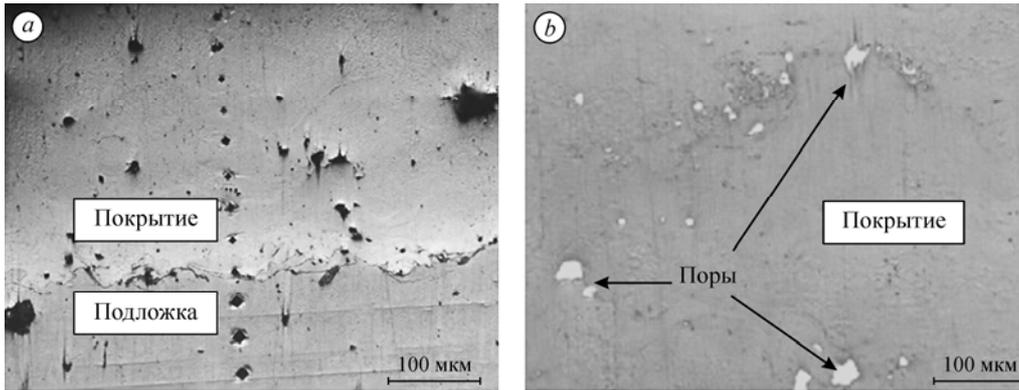


Рис. 6. Микрофотографии поперечного шлифа покрытия, полученные при токе 150 А и дистанции напыления 200 мм.

a — исследование микротвердости, *b* — исследование пористости.

Зависимость свойств покрытия от режимов напыления

Для изучения связи «параметры конденсированной фазы–функциональные свойства покрытия» было произведено напыление опытных образцов покрытий толщиной 300–400 мкм на дистанциях 17, 20, 23 см при токах дуги плазмотрона 100, 150, 200 А. Режимы напыления выбирались таким образом, чтобы обеспечивать значимые изменения скорости и температуры частиц. Напылительная установка оснащена приводом для вращения цилиндрических деталей, поэтому основой служили отрезки труб из низкоуглеродистой стали с наружным диаметром 60 мм и толщиной стенки 3 мм, подвергнутые предварительной пескоструйной обработке. Для снятия термонапряжений после напыления образцы выдерживались в печи при температуре 350 °С в течение трех часов. Исследования проводились на подготовленных поперечных шлифах (рис. 6а).

Анализ изображений шлифов позволил определить пористость каждого из образцов (рис. 6б). В табл. 2 представлены результаты измерений, а на рис. 7 — набор изолиний на картах с системой координат «дистанция напыления–ток дуги», полученный путем кусочно-линейной интерполяции тех же данных. Как видно, микротвердость покрытий имеет тенденцию к повышению с увеличением дистанции напыления, при этом ее минимальные значения реализуются при токе дуги 150 А. Зависимость пористости покрытий более сложная. Можно констатировать, что напыление на средней дистанции 200 мм приводит к высоким ее значениям.

Таблица 2

Характеристики конденсированной фазы струи и образцов покрытий

<i>H</i> = 17 см			<i>H</i> = 20 см			<i>H</i> = 23 см		
<i>I</i> = 100 А	<i>I</i> = 150 А	<i>I</i> = 200 А	<i>I</i> = 100 А	<i>I</i> = 150 А	<i>I</i> = 200 А	<i>I</i> = 100 А	<i>I</i> = 150 А	<i>I</i> = 200 А
Средняя скорость частиц на дистанции напыления, м/с								
237	263	281	238	268	281	226	255	270
Средняя температура частиц на дистанции напыления, К								
2293	2359	2402	2317	2392	2398	2318	2398	2410
Микротвердость, НV								
710	524	685	663	629	708	651	654	687
Объемная пористость, %								
3,2	6,9	13,5	12,1	11,5	15,6	2,1	1,7	3,0

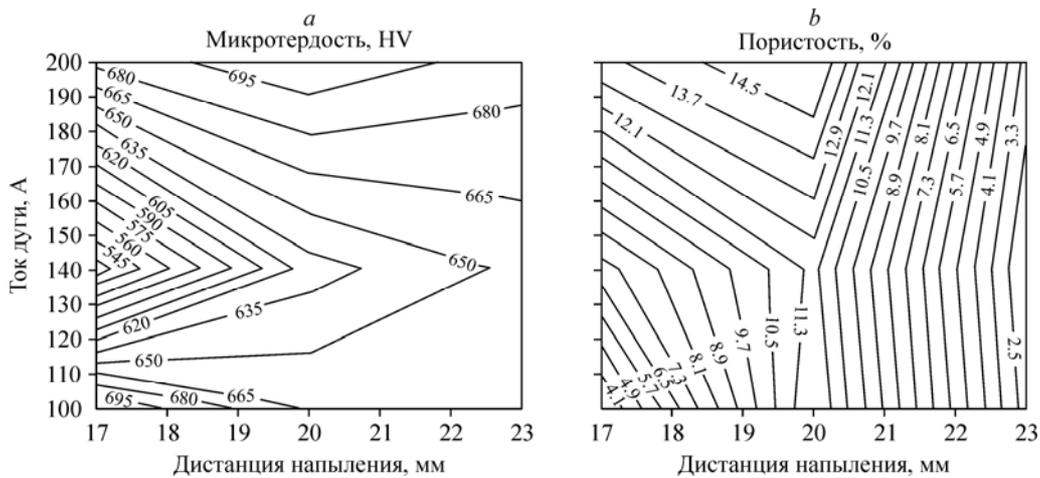


Рис. 7. Карты микротвердости (а) и пористости (b) покрытий в системе координат «дистанция напыления–ток дуги».

Методика оптимизации и трансфера технологий напыления

Карты свойств покрытия позволяют оптимизировать режимы напыления в соответствии с требованиями, предъявляемыми к технологическому процессу. Так, если при формировании покрытия важна только его твердость, то таким требованием может быть энергосбережение. Тогда, зафиксировав требуемый уровень твердости на соответствующей изолинии, можно найти точки с минимальным током дуги и соответствующей дистанцией напыления. Например, при твердости $T = 665$ HV минимальный ток дуги составит 160 А, а дистанция напыления — 23 см (рис. 7а). Если оптимизировать режим напыления под заданное значение пористости, например, $\Pi = 2,5$ %, то минимальный ток дуги составит 100 А, а дистанция напыления — 22,8 см (рис. 7b). Еще одним критерием оптимизации режима напыления может быть совместное обеспечение нескольких свойств покрытия. Например, если требуется обеспечить $T = 665$ HV и $\Pi = 2,5$ %, то следует искать точки пересечения соответствующих изолиний при наложении карт свойств покрытия в системе координат «дистанция напыления–ток дуги». В нашем случае изолинии пересекаются в одной точке: (160 А, 22,9 см).

Существенным недостатком такого подхода к оптимизации режима напыления является то, что в цепочке зависимостей «параметры режима напыления–скорость» и «температура частиц–свойства покрытия» связь первых двух звеньев зависит от состояния технологического оборудования. Это обстоятельство не позволяет контролировать выход установки из требуемого режима работы вследствие нештатных ситуаций, вызванных, например, эрозией элементов канала плазмотрона, блокировкой линий подачи порошка, изменением состава или давления рабочих газовых смесей и т.п. Кроме того, опыт нанесения покрытий, накопленный на отдельной установке, крайне сложно перенести на оборудование другой конфигурации или класса. Фактически на каждой установке приходится проводить серию экспериментов по напылению образцов покрытий и изучению их характеристик. Очевидно, что эта процедура требует наибольших материальных и временных затрат в отличие от сравнительно быстрой оптической диагностики скорости и температуры частиц дисперсной фазы струи.

Контроль скорости и температуры конденсированной фазы напылительной струи позволяет применять другую стратегию оптимизации рабочего режима установки: однократно установить универсальную связь «скорость и температура частиц–свойства покрытия», которая является неизменной для различных напылительных установок, и, используя ее, в дальнейшем осуществлять напыление в условиях, обеспечивающих

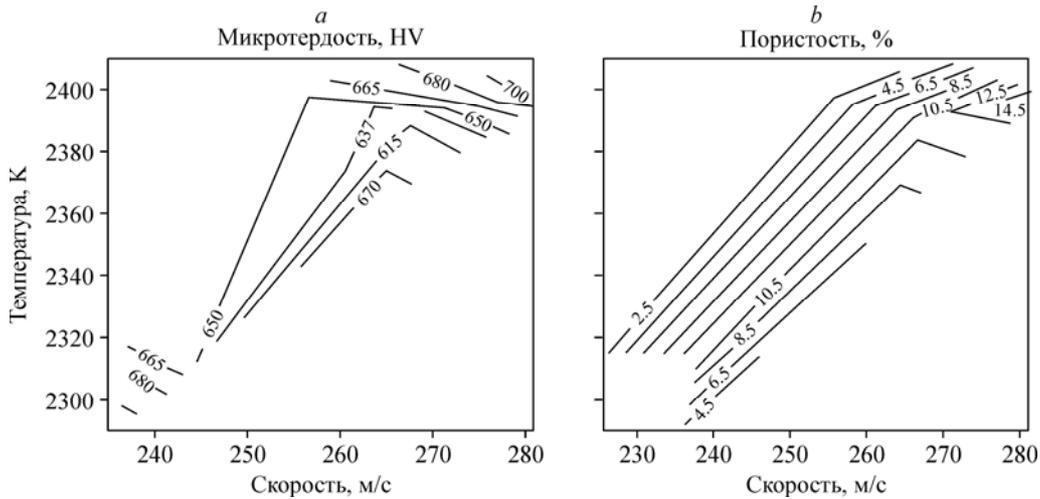


Рис. 8. Универсальные карты микротвердости (а) и пористости (b) покрытий в системе координат «скорость–температура напыляемых частиц».

требуемые значения скорости и температуры частиц. Поддержание такого режима можно осуществлять путем диагностики в режиме реального времени либо за счет предварительной паспортизации режимов работы установки. В качестве иллюстрации рассматриваемого подхода на рис. 8 представлены карты микротвердости и пористости покрытий в системе координат «скорость–температура напыляемых частиц», построенные по данным табл. 2. Так, по универсальным картам можно определить, что для получения покрытия с микротвердостью 650 HV и пористостью 5 % существуют две точки пересечения изолиний этих свойств: в первой точке скорость равна 260 м/с, температура — 2397 К, а во второй — 255 м/с и 2387 К соответственно.

Для определения условий напыления, обеспечивающих требуемые значения скорости и температуры частиц, проведена паспортизация режимов работы плазменного оборудования в штатном режиме (непосредственно после ТО). На рис. 9 представлена аппаратная функция напылительной установки в системе координат «дистанция напыления–ток дуги». На картах аппаратной функции плазматрона пересечение изолиний скорости и температуры дает следующие режимные параметры: для первой точки дистанция напыления составляет 22,1 см, ток дуги равен 145 А, а для второй точки это соответственно 22,2 см и 135 А.

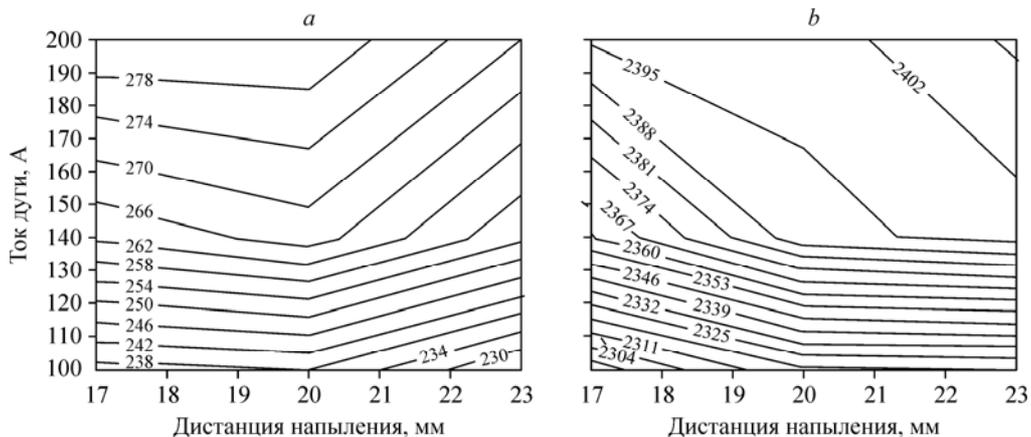


Рис. 9. Аппаратная функция плазматрона для скорости (а) и температуры (b) частиц порошка ПР-НХ16СР3.

В общем виде предлагаемая методика состоит из следующих шагов:

- технологические исследования свойств образцов покрытий и построение универсальных карт «характеристики конденсированной фазы в струе–свойства покрытий»;
- измерение аппаратной функции напылительного оборудования «режим напыления–характеристики дисперсной фазы в струе»;
- выбор требуемых значений свойств покрытий, определение соответствующих характеристик частиц напыляемого материала в струе и режима работы напылительной установки.

Заключение

Применение оптической системы экспресс-контроля позволило провести экспериментальные исследования распределения скорости и температуры частиц сплава ПР-НХ16СР3 (фракция 40–100 мкм) в напылительной струе на разных режимах работы плазмотрона ПНК-50. На дистанциях напыления 17–23 см средние значения скорости частиц составили 230–280 м/с, температуры — 2290–2410 К. Продемонстрирована зависимость характеристик конденсированной фазы потока от технического состояния напылительного оборудования. В силу этой зависимости предложено контролировать процесс нанесения покрытия не по режимным параметрам установки, а по измеряемым характеристикам конденсированной фазы в напылительной струе.

Карты свойств покрытий для конкретных материалов, построенные в системе координат «скорость–температура частиц», напротив, не зависят от состояния оборудования и являются универсальными. Это открывает возможности контроля над качеством покрытия в процессе производства и регулирования технологического режима. На основе универсальных карт регулярные процедуры ревизии и технического обслуживания можно заменить тепловизионным экспресс-контролем, направленным на определение актуальной аппаратной функции установки. Эта функция позволяет правильно скорректировать технологический режим для поддержания качества производимых покрытий на заданном уровне. Кроме того, использование универсальных карт свойств покрытия делает возможным трансфер технологий напыления между оборудованием разных производителей, типа и мощности.

Список литературы

1. Horn T.J., Harrysson O.L.A. Overview of current additive manufacturing technologies and selected applications // *Sci. Progress*. 2012. Vol. 95, No. 3. P. 255–282.
2. Горьнин И.В., Орыщенко А.С., Мальшевский В.А., Фармаковский Б.В., Кузнецов П.А. Аддитивные технологии на базе композиционных порошковых наноматериалов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2014. № 10. С. 4–8.
3. Кузнецов П.А., Васильева О.В., Теленков А.И., Савин В.И., Бобырь В.В. Аддитивные технологии на базе металлических порошковых материалов для российской промышленности // *Новости материаловедения*. Наука и техника. 2015. № 2. С. 4–10.
4. Туричин Г., Климова О., Земляков Е., Бабкин К., Сомонов В., Шамрай Ф., Травянов А., Петровский П. Технологические основы высокоскоростного прямого лазерного выращивания изделий методом гетерофазной порошковой металлургии // *Фотоника*. 2015. № 4, № 52. С. 68–83.
5. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование: учебник для вузов. М.: Металлургия. 1992. 432 с.
6. Балдаев Л.Х. Газотермическое напыление: уч. пособие. М.: Маркет ДС, 2007. 344 с.
7. Коржик В.Н., Харламов М.Ю., Петров С.В. и др. Технология и оборудование для плазменно-дугового напыления для восстановления ответственных деталей железнодорожного транспорта // *Вестник Восточноукр. Национ. ун-та им. В. Даля*. 2011. № 14. С. 76–82.
8. Шишковский И.В. Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объемных изделий. М.: Физматлит, 2009. 424 с.
9. Тушинский Л.И., Плохов А.В. Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий // Новосибирск: Наука, 1986. 197 с.
10. Балдаев Л.Х., Димитриенко Л.Н. Проблема качества газотермических покрытий // *Надежность и сертификация оборудования для нефти и газа*. 2001. № 3. С. 18–20.

11. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления: уч. пособие по курсу «Технология конструкций из металлокомпозигов» // М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 360 с.
12. Анисимов М.И., Бланк Е.Д., Галеев И.М., Орыщенко А.С. Влияние скорости и температуры металлizationsонного потока на свойства детонационных покрытий // Тр. 6-й междунар. научно-техн. конф. «Пленки и покрытия». СПб: Изд-во СПбГТУ, 2001. С. 462-464.
13. Овсянников А.А., Энгельшт В.С., Лебедев Ю.А. и др. Диагностика низкотемпературной плазмы. Новосибирск: Наука, 1994. 485 с.
14. Дубнищев Ю.Н., Арбузов В.А., Белоусов П.П., Белоусов П.Я. Оптические методы исследования потоков // Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2003. 418 с.
15. Гуляев И.П., Гуляев П.Ю., Долматов А.В. Трековый анализ скорости частиц и фундаментальная диаграмма потока ламинарного плазматрона // Ползуновский альманах. 2008. № 2. С. 23–26.
16. Гуляев П.Ю., Иордан В.И., Гуляев И.П., Соловьев А.А. Оптико-электронная система диагностики двухфазных потоков динамическим методом счета частиц // Изв. вузов. Физика. 2008. Т. 51, № 9/3. С. 79–87.
17. Альгман И.С. Об определении температуры частиц по спектру излучения // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40, № 1. С. 75–77.
18. Иордан В.И., Соловьев А.А. Редукция температурного распределения частиц гетерогенных потоков методом «обращения» их интегрального теплового спектра // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2010. № 2 (98). С. 85–95.
19. Гуляев П.Ю., Долматов А.В. Диагностика распределения температуры и скорости напыляемого порошка в импульсном плазменном потоке // Изв. вузов. Физика. 2007. № 9, приложение. С. 114–117.
20. Михальченко А.А., Картаев Е.В., Кузьмин В.И., Наливайко В.И., Чубаков П.А. Определение температуры в струе, истекающей из плазматрона с МЭВ, по молекулярному спектру азота // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18, № 4. С. 657–669.
21. Spraywatch 3i for thermal spray process monitoring [электронный ресурс] // Oseir: Optical and Spectroscopic Equipment for Industry and Research. URL: <http://www.oseir.com>.
22. NIR sensor [электронный ресурс] // SprayWerx Technologies Inc. URL: <http://www.spraywerx.com/equipment/nir-sensor>.
23. Гуляев И.П., Маковеев А.О. Контроль температуры частиц при получении полых порошков ZrO_2 в потоке электродуговой плазмы // Ползуновский альманах. 2013. № 1. С. 37–41.
24. Mauer G., Vassen R., Stöver D. Study on detection of melting temperatures and sources of errors using two-color pyrometry for in-flight measurements of plasma sprayed particles // Proc. of Int. Thermal Spray Conf., Maastricht, Netherlands, June 2–4, 2008.
25. Kuzmin V.I., Mikhailchenko A.A., Nalivaiko V.I., Chubakov P.A. Comparison of thermophysical and optical methods of temperature distribution measurements in flow of plasmatron with interelectrode inserts // Изв. вузов. Физика. 2007. Т. 50, № 9. С. 85–88.
26. Пат. 2474983 РФ, МПК H05B7/22. Узел кольцевого ввода порошкового материала электродугового плазматрона / Кузьмин В.И., Михальченко А.А., Картаев Е.В.; заявитель и патентообладатель Федер. Гос. бюджет. Учреждения науки ИГиПМ СО РАН; 2011128160/07; заявл. 07.07.2011; опубл. 10.02.2013.
27. Кузьмин В.И., Картаев Е.В., Сергачев Д.В., Корниенко Е.Е., Лапушкина Е.Ю., Токарев А.О. Плазменное напыление порошковых покрытий при газодинамической фокусировке дисперсной фазы // Актуальные проблемы в машиностроении. 2014. № 1. С. 482–488.
28. Корниенко Е.Е., Lapushkina E.J., Kuzmin V.I., Vaschenko S.P., Gulyaev I.P., Kartayev E.V., Sergachev D.S., Kashapov N., Sharifullin S., Fayrushin I. Air plasma sprayed coatings of self-fluxing powder materials // J. of Phys.: Conference Series. 2014. Vol. 567. P. 012010-1–012010-7.
29. Dolmatov A.V., Gulyaev I.P., Jordan V.I. The optical control system of dispersed phase properties in thermal spray process // IOP Conf. Series: Materials Sci. and Engng. 2015. Vol. 81, No. 1. P. 012041-1–012041-9.
30. Dolmatov A.V., Gulyaev I.P., Gulyaev P.Yu., Jordan V.I. Control of dispersed-phase temperature in plasma flows by the spectral-brightness pyrometry method // IOP Conf. Series: Materials Sci. and Engng. 2016. Vol. 110, No. 1. P. 012058-1–012058-9.
31. Гуляев И.П., Гуляев П.Ю., Коржик В.Н., Долматов А.В., Иордан В.И., Кривцун И.В., Харламов М.Ю., Демьянов А.И. Экспериментальное исследование процесса плазменно-дугового проволочного напыления // Автоматическая сварка. 2015. № 3–4. С. 37–43.
32. Gulyaev I.P., Dolmatov A.V., Kharlamov M.Yu., Gulyaev P.Yu., Jordan V.I., Krivtsun I.V., Korzhyk V.M., Demyanov O.I. Arc-plasma wire spraying: an optical study of process phenomenology // J. of Thermal Spray Technology. 2015. Vol. 24, No. 8. P. 1566–1573.
33. Вашенко С.П., Гуляев И.П., Гуляев П.Ю., Долматов А.В., Кузьмин В.И. Экспресс-контроль движения и нагрева частиц при газотермическом напылении // Мат. 17-й междунар. научно-практ. конф. «Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика». 2015. С. 61–68.
34. Бороненко М.П., Гуляев И.П., Долматов А.В. Определение основных теплофизических параметров процессов плазменного напыления // Вестник Югорского государственного университета. 2013. № 2 (29). С. 7–16.
35. Фролов В.Я., Клубникин В.С., Петров В.К., Юшин Б.А. Техника и технологии нанесения покрытий: уч. пособие // СПб: Изд-во Политехнического ун-та, 2008. 387 с.
36. Fauchais P., Fukumoto M., Vardelle A., Vardelle M. Knowledge concerning splat formation: an invited review // J. of Thermal Spray Technology. 2004. Vol. 13, No. 3. P. 337–360.

Статья поступила в редакцию 10 июня 2016 г.