

ПРЕДЕЛЫ ДЕТОНАЦИОННО-ГАЗОВОГО НАПЫЛЕНИЯ

Т. П. Гавриленко, Ю. А. Николаев

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, nikolaev_academ.org

Для ряда порошковых материалов, материалов подложки, размеров стволов установок и составов взрывчатых газовых смесей рассчитаны максимально достижимые прочности адгезии и когезии. Эти данные дают наглядное представление об областях применимости детонационно-газового напыления.

Ключевые слова: детонация, напыление.

Процесс детонационно-газового напыления состоит в том, что в закрытую с одного конца трубу (ствол) через смеситель газов напускают взрывчатую смесь, вводят в ствол порцию порошка, а затем в стволе инициируют детонацию. Истекающий из ствола поток продуктов детонации разгоняет и нагревает частицы порошка. Вылетая из ствола, частицы порошка попадают на мишень (подложку), образуя покрытие. Общее представление о степени развития этой технологии можно найти в обзоре [1].

Основным преимуществом детонационно-газового способа напыления является получение покрытий из широкого ассортимента порошковых материалов (металлов, сплавов, карбидов, оксидов и композитов), отсутствие пористости (менее 1 %) в покрытиях и значительно более высокая адгезия и когезия по сравнению с покрытиями, полученными другими способами. Импульсный характер процесса напыления исключает проблемы охлаждения ствола установки, а также не вызывает заметного нагрева детали, ее поводок и коробления.

Во всех газотермических способах напыления формирование покрытий определяется диффузионными процессами, основную роль в которых играют скорость и температура частиц, энергетически дополняющие друг друга. Детонационное покрытие формируется элементарными актами взаимодействия высокоскоростных расплавленных или частично расплавленных частиц с холодной поверхностью подложки.

Давление за фронтом детонационной волны составляет десятки атмосфер, а температура — несколько тысяч градусов, что позволяет разогнать частицы порошка до нескольких сотен метров в секунду и разогреть их до тем-

пературы плавления и выше.

Расплавленная или частично расплавленная частица, движущаяся со скоростью более 100 м/с, растекается по поверхности подложки и формирует кумулятивную струю, которая очищает поверхность подложки и обеспечивает хороший контакт (на молекулярном уровне) между частицей и подложкой. Часть поверхности подложки при ударе испытывает микроскопическую пластическую деформацию. Адгезия и когезия зависят от относительной площади контактной поверхности, на которой имела место взаимодиффузия на глубину нескольких межатомных расстояний за время остывания частицы на поверхности подложки.

Выступы шероховатости на поверхности подложки находятся в привилегированных условиях, поскольку они более полно окружены горячей частицей и прогреваются до большей температуры.

Совсем нерасплавленные частицы, как правило, не напыляются. Перегрев частиц также вреден. Полностью расплавленные частицы могут разбрызгиваться при ударе о подложку или широко растекаться по ее поверхности, что приводит к риску образования трещин. Расплавленные частицы в процессе разгона могут дробиться под напором газового потока. Осколки частиц очень быстро перегреваются в потоке продуктов детонации и даже испаряются.

Часто диаметр ствола значительно превосходит размер напыляемой детали, в связи с чем актуальна проблема минимизации размеров стволов детонационных установок. Ограничением являются потери энергии газа в стенки ствола. В зависимости от шероховатости стенок ствола тепловая энергия газа при движении падает вдвое каждые несколько десятков диаметров ствола.

Таблица 1

Максимальная прочность адгезии (когезии) покрытия из порошка 75 % WC + 25 % Co, нанесенного на стальную подложку

Смесь	d_p , мкм	σ , МПа, при d_b , мм				
		20	10	7.5	5	3
C ₂ H ₂ + 1.2O ₂	20	500	500	500	340	0
	40		500	355	220	
	60		310	270	0	
	80		280	220	0	
	100		0	0	0	
C ₂ H ₂ + 2.5O ₂	20	500	500	500	500	500
	40			500	280	200
	60			500	225	0
	80			280	150	0
	100			245	0	0

На параметры частиц существенно влияет объем смесителя, степень заполнения ствола и место ввода порошка. Смеситель сглаживает границу между инертным газом и взрывчатой смесью, что позволяет использовать широкую фракцию порошков.

Экспериментально проверить влияние всех этих факторов практически невозможно. Значительно упрощает анализ разработанная нами численная модель процесса. Математическая постановка задачи подобна приведенной в работе [2] с тем отличием, что ствол вдоль оси заполняется неоднородной по составу взрывчатой газовой смесью. В этой связи введены лагранжевы координаты, уточнено описание кинетики химических реакций и калорического уравнения состояния [3]. Точно поставлены граничные условия на открытом конце ствола, которые раньше основывались на эмпирических данных. Кроме того, в модели вычисляется конечный результат напыления — прочность связи покрытия с подложкой [4].

Математическая постановка задачи тесно связана с конструкцией установки «Обь» [5], в которой заполнение ствола газами и порошком является регулируемым и рассчитываемым. Модель учитывает все перечисленные выше факторы, обладает достаточной для практики точностью и для расчета на компьютере одного варианта требуется всего несколь-

Таблица 2

Максимальная прочность адгезии (когезии) покрытия из стального порошка, нанесенного на стальную подложку (смесь C₂H₂ + 1.2O₂)

d_p , мкм	σ , МПа, при d_b , мм		
	20	10	5
20	600	600	600
40	600	400	290
60	420	300	0
80	360	175	0
100	200	0	0

ко минут. С ее помощью легко оптимизировать конкретный технологический процесс.

Число практических задач велико, и, даже если ограничиться наиболее значимыми задачами, привести в статье все подробности оптимальных режимов не представляется возможным. Поэтому ниже мы приводим результаты расчетов, иллюстрирующие пределы применимости детонационно-газового напыления без указания подробностей режимов. Мы не уверены, что исчерпали все возможности метода, так как сетка перебранных параметров была довольно редкой. Тем не менее мы надеемся, что приведенные данные дают наглядное представление о возможностях метода.

В представленных ниже таблицах приведена максимально достижимая величина σ , соответствующая минимуму значений прочности адгезии и когезии. Для каждого диаметра ствола (d_b) и диаметра частиц (d_p) подбирались длина ствола, место ввода порошка и другие параметры, близкие к оптимальным. Значения этих параметров в таблицах не приводятся, так как во всяком технологическом процессе понятие оптимизации носит собственный характер. Нам важно было показать, какие порошки на какую подложку с применением стволов какого диаметра можно наносить в принципе и какую максимальную прочность адгезии или когезии при этом можно достичь. Во всех таблицах 0 соответствует тому, что покрытие при этих параметрах практически не образуется.

Как видно из таблиц, для труб большого диаметра высокая прочность достижима для частиц всех исследованных размеров. Однако следует учесть, что указанная прочность для частиц различающихся размеров достига-

Таблица 3

Максимальная прочность адгезии (когезии) покрытия из порошка Al_2O_3 , нанесенного на стальную подложку (смесь $C_2H_2 + 2.5O_2$)

d_p , мкм	σ , МПа, при d_b , мм		
	20	10	5
20	580	580	575
40	575	570	560
60	575	565	0
80	570	560	0
100	560	0	0

Таблица 4

Максимальная прочность адгезии (когезии) покрытия из медного порошка, нанесенного на стальную подложку (смесь $C_2H_2 + 2.5O_2$)

d_p , мкм	σ , МПа, при d_b , мм		
	20	5	2
20	440	440	230
40		290	130
60		235	0
80		180	0
100		140	0

Таблица 5

Максимальная прочность адгезии (когезии) покрытия из алюминиевого порошка, нанесенного на стальную подложку (смесь $C_2H_2 + 2.5O_2$)

d_p , мкм	σ , МПа, при d_b , мм		
	20	2	1
20	80	80	80
40		80	15
60		50	0
80		40	0
100		25	0

Таблица 6

Максимальная прочность адгезии (когезии) покрытия из порошка ZrO_2 , нанесенного на стальную подложку (смесь $C_2H_2 + 2.5O_2$)

d_p , мкм	σ , МПа, при d_b , мм		
	20	10	5
20	80	80	80
40		80	0
60		80	0
80		0	0
100		0	0

ется при различающихся режимах напыления в стволах разной длины. Как показывают эксперименты, коэффициент использования порошка максимален при прочности, приблизительно равной половине максимального значения. При таких требованиях к покрытиям при одном и том же режиме можно, как правило, напылять частицы с вдвое различающимися размерами. Расширить фракцию порошков, напыляемых при одном и том же режиме, можно, используя стволы повышенных размеров.

Одним из популярнейших материалов для износостойких покрытий является карбид вольфрама с кобальтовой связкой. При достаточно больших диаметрах ствола прочность адгезии и когезии может достигать прочности кобальта и слабо зависит от размеров частиц порошка и состава взрывчатой смеси. Из табл. 1 видно, что для относительно мелких частиц диаметр (или гидравлический радиус) ствола может быть уменьшен до $3 \div 5$ мм.

Для упрочнения поверхности стальных деталей или при восстановлении размеров изно-

шенных деталей покрытие может выполняться из стали той же или иной марки. При этом целесообразно применять газовые смеси, продукты детонации которых не окисляют материал. Из табл. 2 видно, что прочность адгезии также может быть достаточно высокой.

Одним из дешевых материалов износостойких покрытий, работающих при высоких температурах, является корунд. Из табл. 3 видно, что здесь σ также достаточно высока для широких фракций порошков. Отметим, что корунд ложится на медную подложку так же хорошо, как и на стальную, с той лишь разницей, что адгезия на 30 % ниже.

В подшипниках скольжения, как правило, применяются пары трения из мягкого и твердого материалов. Из табл. 4 и 5 видно, что легко достичь адгезии, сравнимой с прочностью материала мягкого порошка.

Для теплозащитных покрытий применяется диоксид циркония. Расчеты показывают, что такие покрытия можно наносить только на очень легкоплавкие материалы типа алюминия

(табл. 6) или на переходные слои с низкой теплопроводностью (когезия покрытия достаточно высока).

Отметим, что режимы напыления всех металлических покрытий должны подбираться значительно точнее, чем композитов.

Таким образом, детонационно-газовое напыление может применяться для нанесения покрытий самого различного назначения на детали различных размеров, вплоть до самых малых, с применением широкой фракции порошков.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Николаев Ю. А., Васильев А. А., Ульяницкий В. Ю.** Газовая детонация и ее применение в технике и технологиях (обзор) // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39, № 4. С. 22–54.
2. **Gavrilenko T. P., Grigoriev V. V., Zhdan S. A., et al.** Acceleration of solid particles by gaseous detonation products // Combust. Flame. 1986. V. 66. P. 121–128.
3. **Николаев Ю. А., Зак Д. В.** Согласование моделей химических реакций в газах со вторым началом термодинамики // Физика горения и взрыва. 1988. Т. 24, № 4. С. 87–90.
4. **Гавриленко Т. П., Николаев Ю. А., Прохоров Е. С., Ульяницкий В. Ю.** О механизмах образования покрытий при газотермическом напылении // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 2. С. 110–123.
5. **Gavrilenko T. P., Nikolaev Yu. A., Ulianitsky V. Yu.** Production of composite materials by detonation of coating using the ADU-«Ob» // X Intern. Conf. High Energy Rate Fabrication. Ljubljana, Yugoslavia, 1989.

*Поступила в редакцию 1/VI 2005 г.,
в окончательном варианте — 15/VI 2006 г.*
