

А.Г. Григорьянц, А.И. Мисюров,
И.Н. Шиганов, Р.С. Третьяков,
А.Я. Ставертий

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРИСТОСТИ ПОКРЫТИЙ ИЗ КОБАЛЬТОВЫХ И НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ, НАПЛАВЛЕННЫХ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Развитие газопорошковой лазерной наплавки позволяет расширить области ее применения при восстановлении ответственных деталей машин. Одним из главных показателей качества нагруженного функционального покрытия является его пористость. Проведено исследование пористости покрытий из никелевого и кобальтового сплавов, полученных с использованием импульсно-периодического и непрерывного лазерного излучения. Установлены характер расположения пор, их типичные размеры и влияние некоторых параметров технологии на процесс порообразования в указанных покрытиях.

E-mail: amisiurov@yahoo.com

Ключевые слова: лазерная наплавка, кобальтовые покрытия, никелевые покрытия, наплавка непрерывным и импульсно-периодическим лазерным излучением.

Введение. Использование порошковой лазерной наплавки для создания покрытий является сравнительно молодой технологией, поэтому ее внедрение часто затруднено в связи с нехваткой данных о качестве и свойствах покрытий. Кроме того, высокая стоимость и сложность эксплуатации оборудования требуют высокой квалификации работников и серьезного экономического обоснования применения таких покрытий при длительном использовании технологии.

Один из важных показателей качества защитного покрытия — его пористость. Наличие пор в материале покрытия может быть как необходимым, так и запрещенным. Как правило, при создании покрытия, работающего в условиях агрессивных сред под действием механической нагрузки, пористость нежелательна, поскольку снижает прочность покрытия и его устойчивость к локальному разрушению при знакопеременных и ударных нагрузках [1]. В этом случае поры становятся источником концентраторов напряжений и, в дальнейшем, микротрещин, приводящих к разрушению покрытий.

Процесс порообразования представляет собой сложное физико-химическое явление. Его развитие может быть вызвано рядом независимых друг от друга факторов: растворимостью газов в расплавленном металле, смачиваемостью материала подложки наплавляемым материалом, а также способом получения присадочного материала [2, 3].

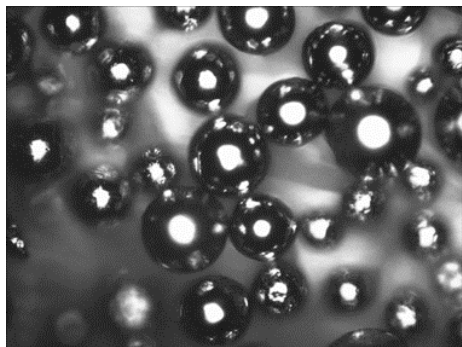
Изменение растворимости газов в расплавленном металле, а также химические реакции, протекающие при его остывании, вызывают зарождение газовых скоплений на межфазной границе. Если замкну-

тый объем газа не успеет всплыть на поверхность, то формируются замкнутые поры. Таким образом, наличие газа и жидкости в порошковой смеси приводит к повышенному порообразованию в наплавленном металле при условии, что в процессе нанесения покрытия газ не успел освободиться.

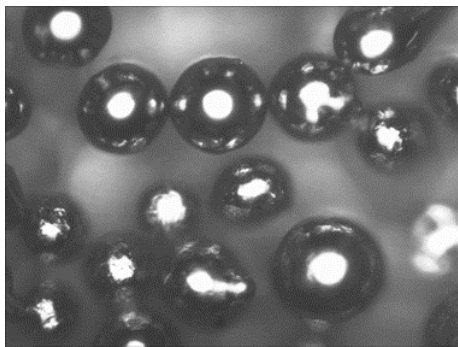
Каждый из перечисленных факторов в конечном счете можно устранить обоснованным выбором таких параметров технологии лазерной наплавки, как плотность мощности, скорость обработки, использование подходящего защитного газа и качественного присадочного материала.

Оборудование и материалы. Для оценки и анализа порообразования при различных режимах лазерной наплавки исследовались покрытия на основе никеля и кобальта. Сплавы этих металлов обычно имеют высокую коррозионную стойкость, вследствие чего используются при создании тяжело нагруженных покрытий.

Никелевый сплав (рис. 1, *a*) представляет собой сплав системы Ni — Cr — В — Si. Кобальтовый сплав (рис. 1, *б*) — аналог хорошо зарекомендовавшего себя в работе коррозионно-стойкого сплава «Stellite 6». Фракционный состав частиц порошка кобальтовых и никелевых сплавов приведен в табл. 1. Указанные сплавы имеют, кроме хорошей коррозионной стойкости, высокую износостойкость, поэтому они отлично работают в условиях тяжелых нагрузок (агрессивной среды совместно с абразивным износом), применяются для восстановления изношенных деталей и узлов машиностроения из чугунных и цветных сплавов, для повышения ресурса новых деталей авиационной и судостроительной промышленности [4].



a



б

Рис. 1. Частицы порошка никелевого (*a*) и кобальтового (*б*) сплавов (×200)

Химический состав порошка никелевого сплава, %

Cr	Ni	Fe	B	Si	C
14,07	Основа	3,65	3,23	4,42	0,69

Химический состав кобальтового сплава, %

Cr	Co	Fe	Mo	W	Mn	Si	Ni	C
28,6	Основа	1,2	0,1	4,6	0,2	1,2	1,3	1,34

Таблица 1

Фракционный состав частиц порошка никелевого и кобальтового сплавов

Размер частиц, мкм	Содержание частиц данного размера, %	
	Никелевый сплав	Кобальтовый сплав
Более 150	0,26	1,22
Более 125	7,96	17,16
Более 106	17,13	21,8
Более 71	59,46	44,73
Более 63	11,24	9,93
Более 53	3,42	4,52
Более 45	0,46	0,52
Менее 45	0,07	0,07

Дуговые методы напыления и наплавки обеспечивают пористость покрытия в пределах 15 %. Применение более современных плазменных и газодинамических методов позволяет снизить пористость до 0...10 % [2, 3]. Как правило, лазерная наплавка функциональных покрытий дает возможность получить минимальную пористость и максимальную прочность наносимого покрытия, при этом достигается минимальный коэффициент перемешивания наплавленного металла с основным.

Наносить твердые износостойкие сплавы можно двумя методами лазерной наплавки: с помощью импульсного и непрерывного лазерного излучения. Наплавка импульсным излучением обеспечивает минимальный коэффициент образования трещин при сравнительно низкой производительности (до 0,6 кг/ч), а наплавка непрерывным лазерным излучением — высокую производительность (до 4 кг/ч), однако вероятность образования трещин при увеличении размеров валиков, наносимых за один проход, резко возрастает [4]. При исследованиях покрытия наносились двумя типами лазерного излучения: непрерывным и импульсно-периодическим. Для нанесения покрытий применялось коаксиальное распылительное сопло. В качестве системы перемещения использовалась многокоординатная система.

Подготовка и исследование образцов осуществлялись на следующем оборудовании:

— отрезной станок MICROMET M3/200-SAS с плавной регулировкой скорости вращения 0...3 000 мин⁻¹, микрометрической системой позиционирования образца (с точностью не менее 0,01 мм) с поперечным перемещением держателя (с ходом не менее 25 мм) и рециркуляционной системой охлаждения;

— шлифовально-полировальный станок APOL LS2/LSA6-40-SAS с регулируемой скоростью вращения в диапазоне значений $0...300 \text{ мин}^{-1}$, системой автоматической подачи охлаждающей жидкости и пневматической системой приложения нагрузки прижима образцов в диапазоне значений $2...4 \text{ бар}$.

Для снижения вероятности порообразования вследствие захвата влаги порошок был просушен в шкафу при температуре $300 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 30 мин [5]. Частицы порошка имели форму, близкую к сферической, что улучшает стабильность подачи порошка и значительно снижает количество газа, захваченного частицами в ванну расплава.

Методика проведения испытаний. Исследование пористости покрытий проводилось гидростатическим методом по оригинальной методике. Метод позволяет установить объем открытых (сообщающихся с атмосферой) и закрытых (не сообщающихся с атмосферой) пор в покрытии.

Методика основана на измерении массы покрытия на воздухе и в воде. Определение пористости и плотности (кроме плотности металла покрытия) рассматриваемым методом может проводиться на образцах с покрытием и на отделенных покрытиях. Плотность материала покрытия устанавливалась только для отделенных покрытий.

Для получения исходных данных образец до нанесения покрытия и после взвешивают на воздухе. Затем пропитывают в вакууме жидкостью (водой) и взвешивают пропитанный образец с покрытием в воде и на воздухе. В случае измерений на отделенном покрытии проводится однократное взвешивание на воздухе.

Гидростатическое взвешивание образцов осуществляется на специально приспособленных аналитических весах. Образцы подвешивают на тонкой нити или проволоке (диаметром $0,05...0,10 \text{ мм}$), масса которой учитывается при проведении расчетов, если она не компенсирована перед измерением.

Перед взвешиванием с пропитанных образцов на воздухе фильтровальной бумагой удаляются излишки влаги, и образцы сразу же взвешиваются. Исключение погрешности, обусловленной испарением жидкости с поверхности образца, достигается многократным взвешиванием через контролируемые интервалы времени и экстраполяцией на исходную массу мокрого образца.

Результаты исследований. Значения пористости покрытий из никелевых и кобальтовых сплавов, полученных лазерной наплавкой, приведены в табл. 2. Как видно из результатов измерений гидростатическим методом, пористость покрытий, полученных импульсным излучением, составляет не более 1 %, пористость покрытий, полученных непрерывным излучением, — не более 2,2 %. Пористость покрытий из кобальтового сплава, даже несмотря на более мелкие частицы порошка, несколько выше пористости покрытий никелевого сплава. Этот факт можно объяснить различными свойствами металла в жидком состоянии.

Значения пористости покрытий из никелевого (числитель) и кобальтового (знаменатель) сплавов, полученных лазерной наплавкой и измеренные гидростатическим методом

Режим излучения	Пористость, %		
	Закрытая	Открытая	Общая
Непрерывный	0,36/0,50	1,41/1,40	1,77/1,90
Импульсно-периодический	0,045/0,210	0,425/0,510	0,47/0,72

Для получения информации о размерах пор в поверхностных слоях и характере их расположения, были сделаны продольные шлифы наплавленных образцов и проведены измерение пористости металлографическим методом.

Кобальтовый состав стабильно наносится методами лазерной наплавки в довольно широком окне технологических режимов без образования трещин. Полученный слой имеет твердость около 45 HRC при нанесении непрерывным и импульсно-периодическим лазерным излучением. Результаты исследования пористости наплавленного слоя представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты исследования пористости продольного (числитель) и поперечного (знаменатель) шлифа кобальтовых покрытий металлографическим методом

Номер измерения	Отношение степени пористости к площади поверхностного слоя, %	Средний диаметр пор, мкм	Примечание
<i>Наплавка непрерывным излучением</i>			
1	1,0/1,2	25...35 (отдельные поры) / —	Продольный шлиф на глубине 230 мкм от исходной наружной поверхности шлифа / Поперечный шлиф
2	1,5/2,0		
3	1,2/1,0		
<i>Наплавка импульсно-периодическим излучением</i>			
1	0,1/1,1	— /11...34	Продольный шлиф на глубине 275 мкм от исходной наружной поверхности шлифа / Поперечный шлиф
2	0,3/2,2		
3	0,3/1,0		

На продольных шлифах поверхностного слоя, полученного лазерной наплавкой кобальтового сплава, после обработки и полировки образца импульсно-периодической наплавки на глубину 230 мкм от исходной наружной поверхности наблюдаются скопления мелких пор (рис. 2).

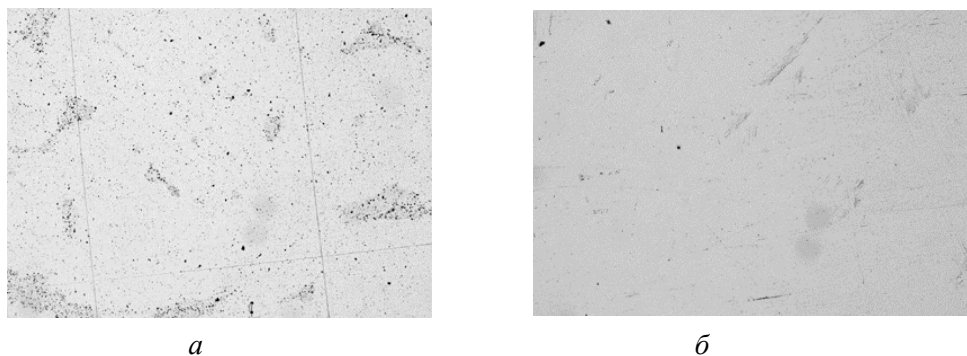


Рис. 2. Продольные шлифы образцов, полученных импульсным излучением:

а — шлиф на поверхности; *б* — шлиф на глубине 230 мкм

На поперечном шлифе образца, полученного непрерывным лазерным излучением, поры преимущественно расположены в верхней части слоя. Ближе к линии сплавления пористость практически полностью исчезает. На образце, полученном импульсно-периодическим излучением, дефекты встречаются по всей поперечной площади поверхностного слоя (рис. 3) и напоминают дефекты изготовления шлифа, а не поры.

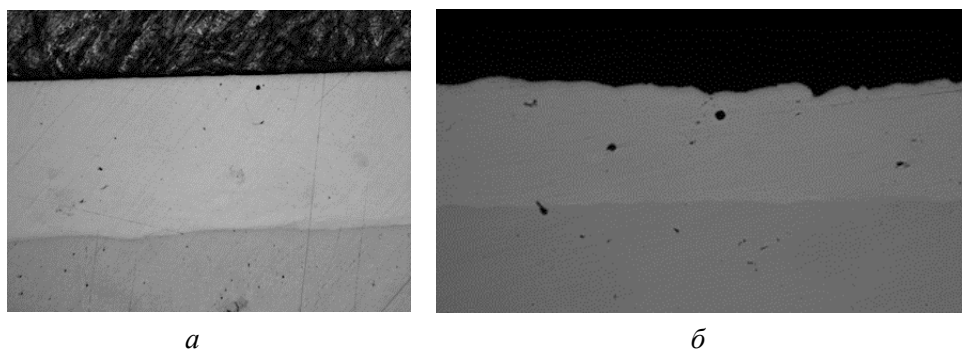


Рис. 3. Поперечные шлифы образцов кобальтового сплава:

а — слой, наплавленный непрерывным излучением; *б* — слой, наплавленный импульсно-периодическим излучением

Никелевый сплав системы Ni — Cr — В — Si является самофлюсующимся, поэтому отлично ложится на подложку из стали. Однако без специальных технологических этапов при наплавке непрерывным и импульсно-периодическим лазерным излучением в покрытии воз-

никают горячие трещины. Полученный слой имеет ровную поверхность со сравнительно низкой шероховатостью и твердостью 55...60 HRC как при непрерывном, так и при импульсно-периодическом режиме нанесения. Режим нанесения непрерывным лазерным излучением высокопроизводителен, однако при увеличении нанесенного материала за один проход возникают дефекты в виде несплавлений с подложкой (рис. 4) и поры (табл. 4).

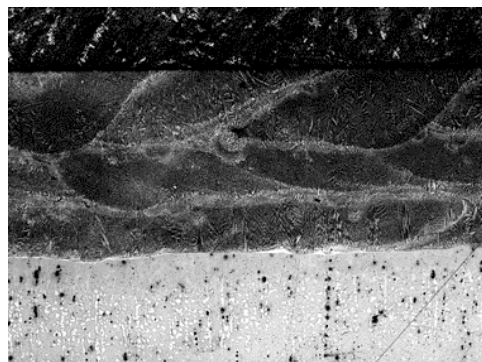


Рис. 4. Поперечный шлиф образцов кобальтового сплава, нанесенного непрерывным излучением (×50)

Таблица 4

Результаты исследования пористости продольных (числитель) и поперечных (знаменатель) шлифов никелевых покрытий металлографическим методом

Номер измерения	Степень пористости по отношению к площади поверхностного слоя, %	Средний диаметр пор, мкм	Примечание
<i>Наплавка непрерывным излучением</i>			
1	0,1/1,8	15,0...57,0 / 5,0...55,0	Продольный шлиф на глубине 200 мкм от исходной наружной поверхности шлифа / Поперечный шлиф
2	0,2/1,2		
3	0,10/1,25		
<i>Наплавка импульсно-периодическим излучением</i>			
1	0,1/0,2	До 35 / —	Продольный шлиф на глубине 220 мкм от исходной наружной поверхности шлифа / Поперечный шлиф
2	0,0/0,12		
3	0,15/0,25		

На продольных шлифах поверхностного слоя никелевого сплава нанесенного непрерывной лазерной наплавкой, содержатся отдельные крупные поры, произвольно расположенные в плоскости шлифа (рис. 5). По мере удаления от наружной поверхности число пор сокращается, приобретая неправильную форму, отличающуюся от сферической формы. Вероятно, такие поры возникли вследствие отставания диффузии растворенного газа от скорости кристаллизации металла.

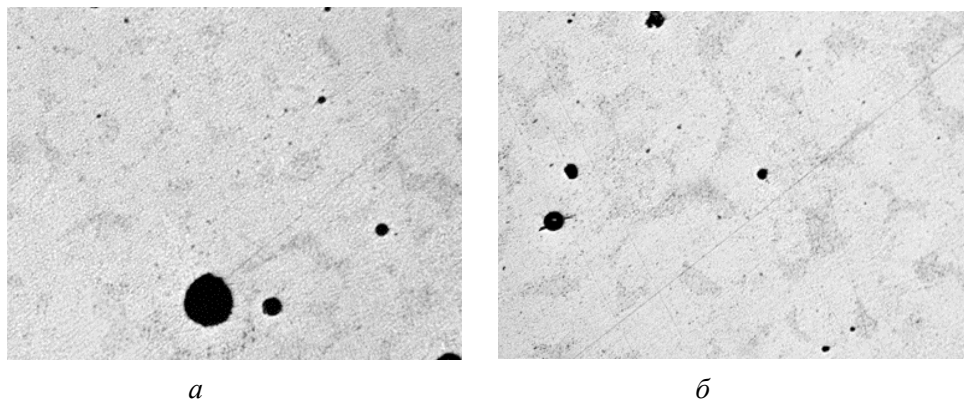


Рис. 5. Продольный шлиф образца, полученного непрерывной лазерной наплавкой ($\times 50$):

а — шлиф на поверхности; *б* — шлиф с заглуплением на 275 мкм

Поперечные шлифы нанесенных образцов представлены на рис. 6. По сечению слоя видны цепочки пор и несплошности. Эти поры возникают в результате нехватки плотности мощности лазерного излучения на краях пятна. На образцах, выполненных импульсным излучением, присутствуют зоны несплавления в переходной зоне.

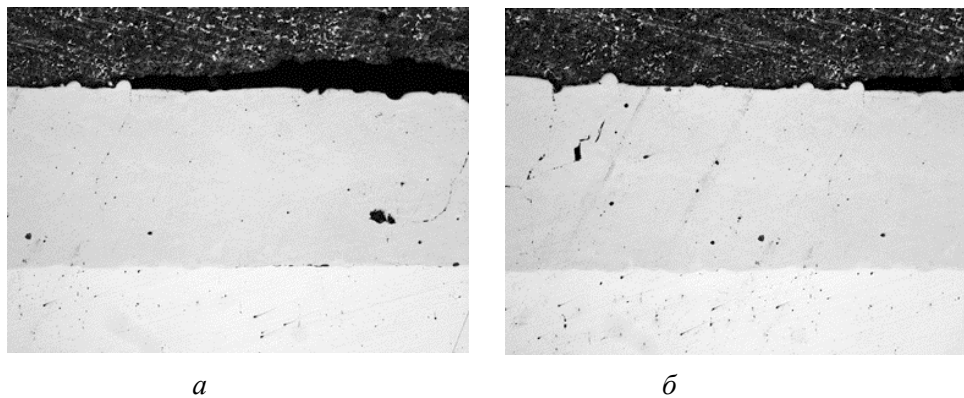


Рис. 6. Поперечные шлифы образцов с покрытиями из никелевого сплава, наплавленными импульсно-периодическим (*а*) и непрерывным (*б*) излучением

Выводы. Значения пористости, измеренные двумя различными методами, коррелируют между собой и показывают наличие пор различных типов в покрытиях, полученных непрерывным лазерным излучением. В покрытиях, наплавленных импульсно-периодическим лазерным излучением, пористость имеет точечный, скорее случайный характер расположения, и установить зависимости ее расположения невозможно. Наличие цепочек пор на продольных шлифах свидетельствует о низкой плотности мощности на краях валиков, возникает так называемая межпроходная пористость [3]: частицы порошка оплавляются и не образуют сплошной жидкой ванны расплава.

В результате проведенных исследований также получены данные о размерах пор. Крупные поры неправильной формы на поперечных и продольных шлифах свидетельствуют о нестабильном режиме расплавления попадающего в валик порошкового материала. В таких случаях необходимо увеличивать погонную мощность лазерного излучения, однако при этом возрастает глубина подплавления основного материала и разбавление промежуточного слоя основным материалом.

Значения пористости слоев и размер пор при наплавке импульсно-периодическим лазерным излучением ниже аналогичных значений и размеров, полученных при наплавке непрерывным лазерным излучением, в первую очередь вследствие меньшей толщины наносимого за проход слоя. Вероятность образования кристаллизационных трещин при импульсной наплавке никелевого сплава значительно ниже вероятности при непрерывной наплавке [5].

В результате проведенных исследований установлено, что пористость покрытий на основе никеля и кобальта не превышает 2,2 %. Это свидетельствует о высокой плотности покрытия и его применимости в ответственных конструкциях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Либенсон Г.А. Производство порошковых изделий. — М.: Металлургия, 1990. — 240 с.
2. Гибридные технологии лазерной наплавки / А.М. Забелин, И.Н. Шиганов, А.М. Чирков и др. — М.: Изд-во МГОУ, 2007.
3. Borges Bernardo Miguel Fonseca da Costa Alves. Laser Cladding Using Filler Powder and Wire. Productivity and Quality: Diss. ... Degree of Master in Mechanical Engineering. September. 2008.
4. Наплавочные порошковые ленты и проволоки. Справочник / П.В. Гладкий, И.А. Кондратьев, В.И. Юматова и др. — Киев: Тэхника, 1991. — 36 с.
5. Морозов В.П. Разработка способа и технологии восстановления авиационных деталей и узлов с помощью лазерной наплавки: Дис. ... канд. техн. наук. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1987.

Статья поступила в редакцию 11.09.2012