

УДК 621.793.794.357.7

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЕННОЙ ПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКИ ТОКОМ ПРЯМОЙ ПОЛЯРНОСТИ НА ФОРМИРУЕМУЮ СТРУКТУРУ Fe–Cr–V–Mo–C ПОКРЫТИЙ

А.С. Дегтерёв, С.Ф. Гнусов

Томский политехнический университет

E-mail: Degterev@tpu.ru

На основе детального анализа структуры покрытий системы Fe–Cr–V–Mo–C, полученных плазменной порошковой наплавкой на постоянном токе прямой полярности с поперечными колебаниями плазмотрона и без них в интервале изменения тока 160...250 А и скорости 4,5...10 м/ч, установлены рациональные режимы наплавки, обеспечивающие формирование равномерной композиционной структуры по всему объему упрочненного слоя.

Ключевые слова:

Плазменная порошковая наплавка, Fe–Cr–V–Mo–C сплав, режим, микроструктура.

Key words:

Plasma powder deposition, Fe–Cr–V–Mo–C alloy, deposition mode, microstructure.

Введение

Хорошо известны способы наплавки, обеспечивающие возможность отдельного управления процессами ввода энергии и подачи присадочного материала [1, 2]. Это в полной мере относится к плазменной порошковой наплавке (ППН), позволяющей формировать одинаковые по размерам упрочняющие слои при различном тепловложении. Плотность энергии, передаваемая от плазменной струи к нагреваемой поверхности на один два порядка больше, чем от открытой несжатой дуги, а при такой плотности энергии скорость ввода тепла в деталь больше скорости теплопередачи в ее массу [3]. Это обстоятельство, а также высокое качество защиты сварочной ванны, возможность создания покрытий толщиной от 0,2 до 6 мм за один проход и малая доля участия основного металла в наплавляемом слое актуализируют применение технологии плазменной порошковой наплавки как для упрочнения деталей вновь вводимого оборудования, так и их восстановления в ходе проведения ремонтных работ. Однако, исчерпывающих данных, устанавливающих связь между режимами ППН, структурой покрытий и ее равномерностью даже при применении хорошо зарекомендовавших себя промышленных порошковых сплавов недостаточно.

Актуальность формирования равномерной микроструктуры обусловлена тем, что в последнее время начали уделять внимание не только повышению износостойкости трущихся поверхностей, но и стабильности их износа в процессе эксплуатации [4]. Современные технологии анализа микроструктуры с высокой точностью позволяют количественно охарактеризовать степень ее неоднородности, а значит, делают возможным эффективный и целенаправленный выбор технологических параметров плазменной наплавки для создания наиболее рационального покрытия.

В настоящее время известны технологии ППН на постоянном токе обратной и прямой полярностей [5, 6]. Последняя получила более широкое

распространение, так как характеризуется большей стабильностью процесса наплавки и относительной простотой конструкции плазмотронов [7]. Наплавка на переменном токе практически не используется [2], но проводятся исследования по наплавке разнополярным импульсным током [8]. В качестве присадочных материалов применяют порошки разнообразных систем легирования на основе Co, Ni, Cu, Fe и др. [2, 3, 9], наносимые на детали, зачастую изготовленные из конструкционных сталей. Для успешного проведения исследований по влиянию режима наплавки на строение формируемых покрытий необходимо изменять параметры режима в широком интервале значений, а экспериментальный порошок должен обладать большим запасом технологичности. Этому требованию удовлетворяет промышленный сплав Fe–Cr–V–Mo–C на основе железа, успешно конкурирующий с быстрорежущими сталями и высокохромистыми чугунами [10].

Целью работы является выявление взаимосвязей между режимами плазменной порошковой наплавки на постоянном токе прямой полярности и формируемой микроструктурой покрытий системы Fe–Cr–V–Mo–C.

Материалы и методики исследования

В качестве наплавочного материала в работе использовался промышленный порошок ПР-Х18ФНМ химического состава (мас. %): 2,1...2,4 С, 17...19 Cr, 2...3 Ni, 7...8 V, 2...2,6 Mo, Fe – основа. Для наплавки использовали фракцию порошка размером от 50 до 200 мкм. В качестве основного материала использовали пластины из стали 20 размером 250×100×10 мм, поверхность которых предварительно шлифовалась.

Покрытия наносили на серийно выпускавшейся в ВНИИЭСО установке УПН-30ЗУХЛ4 с водоохлаждаемым плазмотроном. Для более высокого уровня защиты создаваемых упрочняющих слоев от вредного влияния атмосферного воздуха на плазмотрон устанавливали устройство дополни-

тельного обдува зоны наплавки. В качестве плазмообразующего, транспортирующего и защитного газов применяли аргон высшего сорта. Покрытия наплавляли за один проход на токе прямой полярности при расстоянии от плазмотрона до изделия 10...12 мм, расходе плазмообразующего газа 1...2 л/мин, транспортирующего 10...16 л/мин, для дополнительного поддува до 10...15 л/мин, напряжений на дуге 35...45 В. Основные параметры режимов наплавки с поперечными колебаниями плазмотрона частотой 0,3 Гц и без них приведены в табл. 1. Плотность тока наплавки, определяемая как отношение силы тока к площади поперечного сечения электрода, принимала значения от 8 до 13 А/мм². Эффективная погонная энергия для всех режимов наплавки рассчитывалась согласно ГОСТ Р ИСО 857-1-2009. Эффективный КПД нагрева изделия дугой принимали равным 0,55...0,63.

Таблица 1. Параметры режимов плазменной порошковой наплавки

Режимы наплавки	Сила тока, А	Погонная энергия, кДж/см	Скорость наплавки, м/ч	Расход порошка, кг/ч	Размах колебаний, мм
1	160	28,2	4,5	1,45	0
2	190	35,6	4,5	1,45	
3	220	42,1	4,5	1,45	
4	220	42,1	4,5	1,90	
5	160	21,2	6,0	1,90	
6	190	26,7	6,0	1,90	
7	220	31,6	6,0	1,90	
8	250	37,1	6,0	1,90	
9	190	20,0	8,0	1,90	
10	220	23,7	8,0	1,90	
11	220	19,0	10,0	1,90	
12	160	28,2	4,5	1,45	9
13	190	35,6	4,5	1,45	9
14	220	42,1	4,5	1,45	9
15	220	42,1	4,5	1,90	9
16	190	35,6	4,5	1,90	15
17	220	42,1	4,5	1,90	15

Анализ геометрических размеров валиков проводился на длине 50 мм в зоне установившегося режима в пяти произвольных точках. Углы смачи-

вания и глубину проплавления для каждого режима измеряли с помощью оптического микроскопа на четырех поперечных макрошлифах, протравленных в течение 15 с 4 % раствором HNO₃ в C₂H₅OH. Макро- и микроструктуру наплавленных покрытий исследовали в трех перпендикулярных сечениях упрочненного слоя (рис. 1) с помощью оптического микроскопа Olympus GX51, снабженного анализатором изображений SIAMS 700. На «поперечных» шлифах (сечение 1) оценивали равномерность структуры по толщине формируемых покрытий. Для этого по оси покрытий, от границы сплавления к их вершине, прокалывалась дорожка уколов (маркеров) алмазной пирамидой (угол при вершине 136°) при нагрузке в 0,981 Н с шагом 300 мкм. Справа и слева от каждого маркера анализировалась микроструктура. На «продольных» шлифах (сечения 2 и 3) равномерность структуры оценивалась по длине и ширине упрочняющих слоев.

Частицы карбида ванадия, выявляемые рельефным полированием по методике [11], исследовали с применением методов дифференциального интерференционного контраста и темнопольного освещения. Для анализа эвтектических карбидов использовали травитель следующего химического состава: 8,3 % K₃[Fe (CN)₆], 8,3 % KOH, 83,4 % H₂O. Травление осуществляли при температуре 20 °С методом погружения образцов, время травления 60 с. С помощью анализатора изображений оценивали объемные доли частиц упрочняющих фаз, их средние диаметры, среднеквадратичное отклонение размеров и число частиц, приходящихся на единицу площади шлифа (10⁴ мкм²). Линейным методом оценивали величину зерна матрицы.

Результаты и обсуждение

При наплавке на прямой полярности столб плазмы имеет цилиндрическую форму и незначительно деформируется (на 10...20 % расширяется) лишь вблизи упрочняемой поверхности. Он характеризуется постоянством геометрии, и его диаметр увеличивается с ростом силы тока. Упрочняющие слои характеризуются малой (менее 0,4 мм) чешуйчатостью и постоянством геометрических разме-

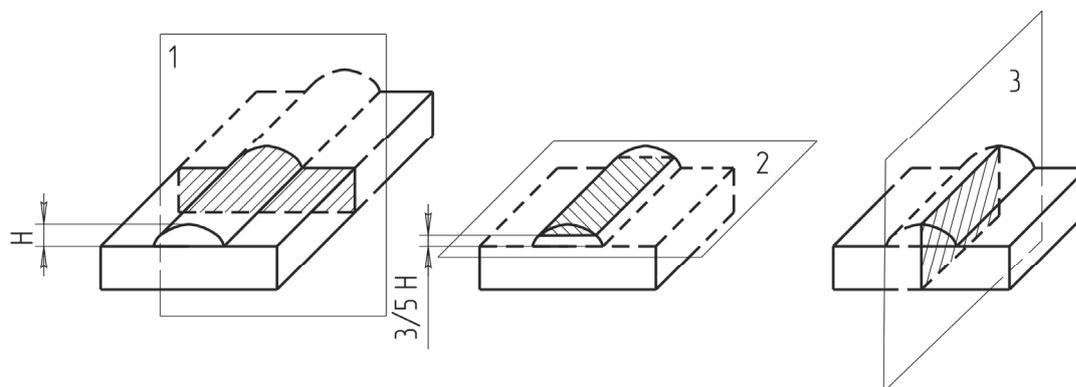


Рис. 1. Схематичное положение сечений 1-3, в которых проводился анализ макро- и микроструктуры покрытий

ров. Разброс значений ширины по длине валиков при наплавке без колебаний плазмотрона не превышает 0,6 мм, а при их введении не превышает 1,2 мм (табл. 2). Максимальная ширина валиков, в диапазоне изменения токов 160...250 А, сформированных без поперечных колебаний плазмотрона, достигает 14 мм.

Увеличение силы тока от 160 до 250 А способствует снижению углов смачивания, уменьшению высоты, повышению ширины валиков и увеличению глубины проплавления. Размеры валиков, сформированных на режимах № 6–11, свидетельствуют об уменьшении ширины и высоты формируемых упрочняющих слоев с повышением скорости наплавки от 6 до 10 м/ч. Этот факт является следствием уменьшения ширины сварочной ванны и количества порошка, поступающего в нее. Уменьшение скорости наплавки с 6 до 4,5 м/ч при расходе 1,9 кг/ч и токе 220 А не приводит к увеличению ширины упрочняющего слоя, наблюдается резкое увеличение углов смачивания и высоты покрытия. Данный эффект объясняется преобладанием процесса охлаждения сварочной ванны подаваемым в нее значительным количеством присадочного материала над ростом ее ширины в результате уменьшения скорости движения плазмотрона. Таким образом, режим № 4 является граничным для расхода порошка 1,9 кг/ч, уменьшение тока наплавки до 190 А и тем более до 160 А не позволит сформировать качественное покрытие. Наплавка покрытия током в 250 А (режим № 8) приводит к заметному сокращению срока службы деталей используемой модели плазмотрона, потому в работе он нашел ограниченное применение.

Таблица 2. Размеры формируемых валиков

№ режима	Ширина, мм	Высота, мм	Глубина проплавления основного металла, менее, мм	Угол смачивания, град	Сплавление
1	9,3±0,3	4,8±0,1	0,50	105±16	–
2	10,5±0,1	4,6±0,2	0,75	103±18	+
3	13,1±0,2	4,0±0,1	0,80	61±5	+
4	12,1±0,2	6,0±0,1	0,25	76±20	+
5	7,4±0,1	4,9±0,1	0,15	94±5	+
6	9,8±0,2	4,4±0,1	0,30	76±12	+
7	12,4±0,1	3,9±0,1	0,60	60±5	+
8	13,5±0,2	3,5±0,1	1,00	47±4	+
9	8,3±0,1	3,8±0,1	0,15	74±22	+
10	10,8±0,1	3,4±0,2	0,30	64±6	+
11	8,9±0,1	3,2±0,1	0,30	54±5	+
12	12,0±0,4	4,1±0,1	0,10	57±10	+
13	13,4±0,6	3,9±0,1	0,25	60±2	+
14	16,3±0,2	3,5±0,1	0,70	45±13	+
15	15,8±0,1	4,9±0,1	0,20	73±7	+
16	20,5±0,6	3,7±0,2	0,10	43±3	–
17	20,5±0,6	3,7±0,2	0,10	36±3	+

Пористость наплавленного металла менее 0,5 %, пористость на границе сплавления также менее 0,5 %, за исключением покрытий № 16 – 20...25 % и № 17 – до 1 %.

При наплавке с расходом присадочного порошка 1,9 кг/ч током 190 А на скорости 8 м/ч и на

10 м/ч током 220 А формируемые валики характеризуются значительными углами смачивания. Дальнейшее уменьшение тепловложения в сварочную ванну способствует ухудшению адгезии упрочняющего слоя к основному металлу и появлению пористости на границе их сплавления. Таким образом, режим № 9 является граничным для скорости 8 м/ч и режим № 11 – для скорости 10 м/ч.

Сравнительный анализ покрытий, выполненных на режимах № 3 и 4, показал, что с уменьшением расхода порошка высота валиков и углы смачивания уменьшаются, а ширина и глубина проплавления возрастают. Увеличение ширины и глубины объясняется увеличением температуры сварочной ванны.

Введение поперечных колебаний приводит к понижению углов смачивания, увеличению ширины и уменьшению высоты покрытий. Вместе с тем, при наплавке со значительным размахом колебаний (15 мм) даже на токе 190 А наблюдается лишь частичное сплавление упрочняющего слоя с основным металлом и наличие пористости на границе сплавления (режим № 16).

На основании анализа микроструктуры полученных упрочняющих слоев их можно характеризовать, как композиционные (рис. 2). Матрица в упрочненном слое представлена α - и γ -твердыми растворами. Размеры зерен матрицы по мере удаления от границы сплавления к вершине валика уменьшаются на 25...40 % при наплавке на токе 190 А, на 10...27 % при наплавке на токах 160 А и 220 А и на 10 % при токе 250 А. Подобную закономерность можно объяснить следующим образом. При формировании покрытий на токе 160 А температура в верхних и нижних объемах сварочной ванны невелика. Нижние объемы в процессе наплавки прогреваются несколько сильнее, верхние слабее. Увеличение тока до 190 А приводит к значительному прогреву наплавляемого металла вблизи границы сплавления, а для прогрева верхних объемов покрытия вводимой энергии еще недостаточно. Дальнейшее увеличение тока до 220...250 А приводит к выравниванию температурного воздействия и уменьшению разницы между структурой верхних и нижних объемов формируемых валиков.

С увеличением силы тока от 160 до 220 А и уменьшением скорости наплавки от 10 до 4,5 м/ч средний размер зерен матрицы формируемых покрытий увеличивается от 5,9 мкм до 8,5 мкм. Наплавка на токе 250 А способствует резкому увеличению размера зерен матрицы до 11 мкм.

В карбидной подсистеме присутствуют как первичные карбиды, так и эвтектические карбиды, выделившиеся по границам зерен (рис. 2). Ванадий, как более сильный карбидообразующий элемент, в первую очередь образует собственные карбиды V_2C и VC . Большая часть углерода сплава находится в этих карбидах, так как 1 % ванадия связывает до 0,236 % углерода [4, 12]. По данным рентгеноструктурного анализа в сплаве также присутствует карбид Me_7C_3 . Результаты анализа фазового состава хорошо согла-

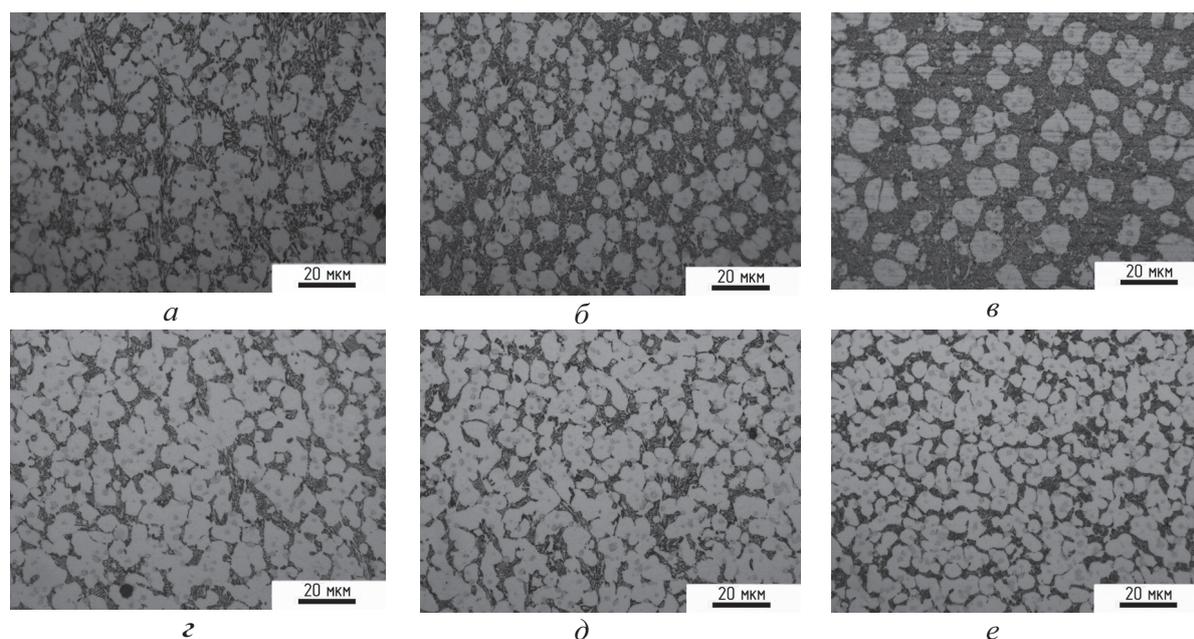


Рис. 2. Микроструктура покрытий сформированных по режимам: № 5 (а-в), № 7 (г-е); (а, г) – вблизи границы сплавления, (б, д) – в центре покрытий, (в, е) – в верхней части покрытий

суются с данными, описанными в работах [4, 9, 13, 14]. Твердость эвтектики на основе карбида Me_7C_3 изменяется в интервале 950...1200 HV, а матрицы, содержащей равноосные частицы карбидов ванадия, – 300...600 HV.

Режим наплавки оказывает существенное влияние на систему эвтектических карбидов. При наплавке на токах 160 и 190 А наблюдается разнодисперсность эвтектики (рис. 2, а-в). По мере удаления от границы сплавления отдельные, вытянутые в направлении теплоотвода эвтектические колонии (рис. 2, а) начинают разориентироваться друг относительно друга и уменьшаться в размерах (расстояние между осями второго порядка уменьшается с 1,5...2 мкм до 0,6 мкм (предел разрешения оптической системы) и меньше (рис. 2, б). И в конечном итоге развиваются в сплошную сетку по границам зерен (рис. 2, в). Доля эвтектических карбидов может достигать 40...45 %. В зонах с обширными сетчатыми выделениями погрешность измерения доли эвтектических карбидов повышается вследствие увеличения их дисперсности.

При наплавке с расходом порошка 1,9 кг/ч токами 220...250 А со скоростью 6 м/ч, током 220 А со скоростью 8 м/ч и на скорости 4,5 м/ч током 220 А при расходе 1,45 кг/ч доля эвтектики по мере удаления от границы сплавления к поверхности покрытия возрастает от 18 до 24 % (рис. 5, а). При наплавке на скорости 4,5 и 10 м/ч током 220 А при расходе 1,9 кг/ч рост более значителен, объемная доля достигает 35 %. Это связано с недостаточным прогревом током в 220 А всего объема покрытий по причине их значительной высоты или вследствие высокой скорости наплавки.

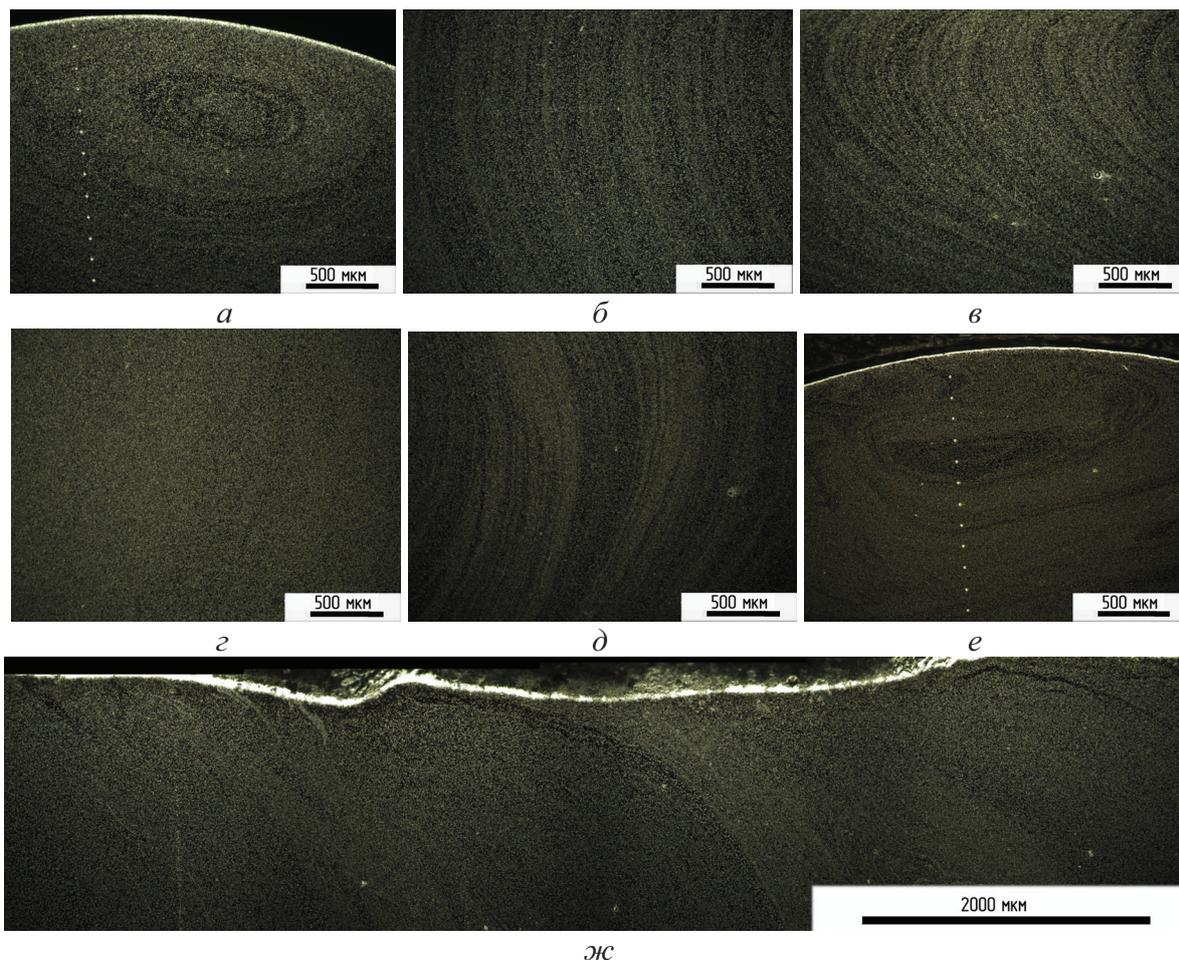
Относительно однородное распределение эвтектики по толщине покрытия наблюдается при его

создании на токе 220 А высотой до 4 мм при скорости наплавки до 8 м/ч включительно (рис. 2, г-е). Расширив диапазон токов до 250 А можно увеличить предельную высоту однородного покрытия, однако вместе с тем увеличивается глубина проплавления (до ~1,0 мм), средний размер зерен матрицы (до 11 ± 1 мкм), частицы карбида ванадия приобретают игольчатую морфологию, снижается срок службы деталей плазмотрона.

При одновременном анализе микро- и макроструктуры упрочняющих слоев (режимы наплавки № 1, 2, 4-6 и 11) наблюдается определенный порядок в распределении частиц карбида ванадия. В сечении 1 обнаруживаются эллиптические темные зоны с малым числом крупных частиц карбида ванадия (рис. 3, а), в сечении 2 и 3 – эти зоны выглядят в виде серповидных сегментов, повторяющие контуры границы кристаллизации сварочной ванны (рис. 3, б, в). Описываемые области характеризуются более крупными эвтектическими колониями в сравнении с остальными объемами покрытий.

На основе анализа структуры в трех сечениях валика удалось построить схему распределения этих зон в объеме покрытий, выполненных без поперечных колебаний плазмотрона (рис. 4, а). Видно, что в случае обнаружения зон с малым числом частиц карбида ванадия в одном из сечений, они однозначно будут присутствовать и в двух других сечениях.

Для оценки влияния режима наплавки на размеры образующихся зон использовали сечение № 2. При наплавке на минимальной из рассматриваемого диапазона скорости и токе упрочненный слой содержит серповидные зоны (шириной до 220 мкм) с малым числом частиц карбида ванадия (рис. 3, б). Увеличение тока от 160 до 220 А при той же скорости наплавки способствует уменьше-



ЖС

Рис. 3. Макроструктура покрытий, сформированных по режимам: № 1 (а, б, в), 9 (г), 11 (д, е), 17 (ж); (а, е) – сечение № 1, (б, г, д, ж) – сечение № 2, (в) – сечение № 3

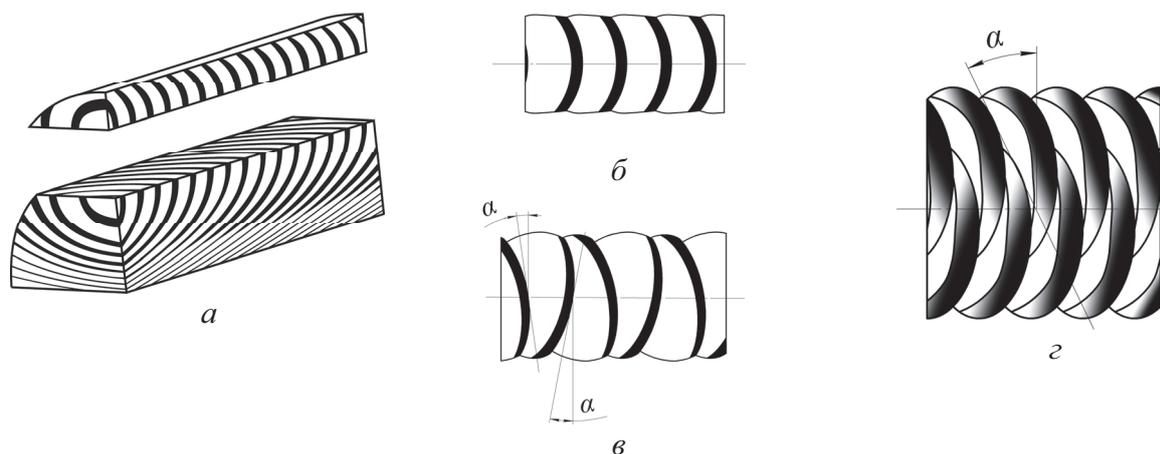


Рис. 4. Схемы распределения зон с малым числом крупных частиц карбида ванадия: в объеме покрытий, выполненных без поперечных колебаний (а); в сечении 2 покрытий, выполненных с поперечными колебаниями плазматрона размахом 9 мм (б, в) и 15 мм (г)

нию ширины описываемых зон: (30...220) мкм → (25...110) мкм → (0...20) мкм. В случае наплавки на скорости 6 м/ч ширина серповидных зон уменьшается от 10...70 мкм при токах 160...190 А и до 0...20 мкм при токах 220...250 А. При дальнейшем росте скорости наплавки до 8 м/ч зоны с ма-

лым числом частиц карбида ванадия едва различимы и их ширина не превышает 10 мкм (рис. 3, г). Увеличение скорости до 10 м/ч вновь вызывает появление областей с малым числом частиц карбида ванадия шириной до 150 мкм и способствует увеличению неоднородности структуры (рис. 3, д, е).

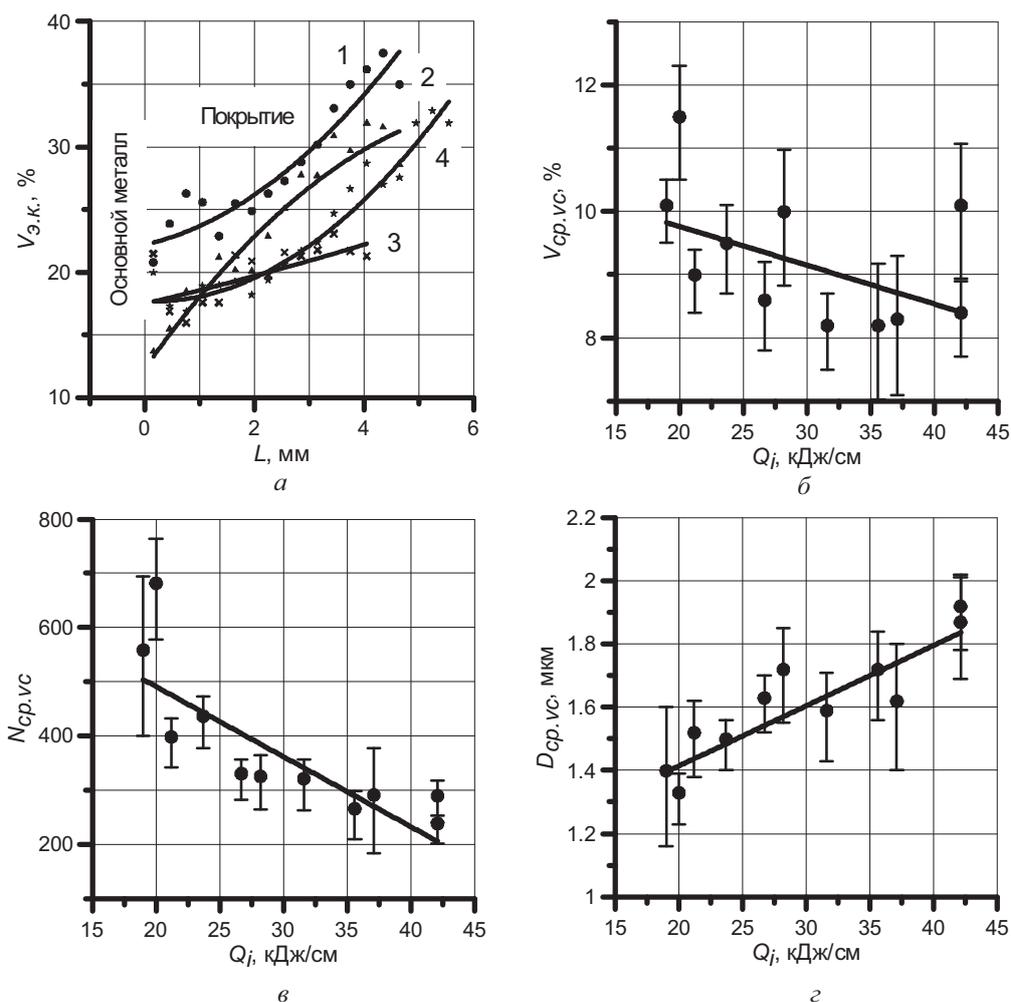


Рис. 5. Карбидные фазы в покрытиях: распределение объемной доли эвтектических карбидов $V_{э.к.}$ по толщине покрытий (а) – номера линий соответствуют номерам режимов; зависимости среднего диаметра $D_{ср.вс}$ (г) частиц карбида ванадия, их числа $N_{ср.вс}$ (в) и объемной доли $V_{ср.вс}$ (б) от эффективной погонной энергии

Режимы наплавки не только вызывают определенный порядок в распределении частиц карбида ванадия в объеме покрытий, но и оказывают существенное влияние на форму, размеры и объемную долю включений ВС. С увеличением погонной энергии (изменение силы тока от 160 до 220 А и скорости наплавки от 10 до 4,5 м/ч) наблюдается рост средних размеров частиц карбида ванадия от 1,3 до 1,9 мкм (рис. 5, г), небольшое уменьшение их объемной доли от 10...12 % до 8...9 % (рис. 5, б), и уменьшение среднего числа частиц от ~600 до ~200 (рис. 5, в, рис. 6, а, в) на фиксируемой площади микроструктуры покрытий (10^4 мкм^2). С увеличением размера частиц карбида ванадия они приобретают ярко выраженную огранку. В покрытии № 3 изменяется строение частиц карбида ванадия по объему упрочняющего слоя. Вблизи границы сплавления они имеют угловатую форму (рис. 6, а), а в верхней части покрытия как угловатую, так и игольчатую (рис. 6, б). При наплавке на токе величиной 250 А, формируемые армирующие частицы ВС имеют как угловатую, так и игольчатую мор-

фологию по всему объему упрочненного слоя (рис. 6, г). Изменение формы частиц карбида ванадия, по-видимому, является следствием значительного перегрева сварочной ванны.

На основе анализа таких показателей упрочненного слоя как внешний вид, пористость, адгезия с основным металлом, размер зерна матрицы, отсутствие или малая ширина зон с высоким содержанием эвтектических карбидов, размер, морфология и равномерность распределения частиц карбида ванадия, наиболее равномерную структуру покрытия можно сформировать при скорости наплавки 4,5 м/ч и расходе порошка 1...1,45 кг/ч, скорости 6...8 м/ч и расходе 1...1,9 кг/ч на токе 220 А. Увеличение тока до 250 А приводит к резкому увеличению размера зерна матрицы (до 11 мкм), изменению морфологии частиц карбида ванадия и заметному сокращению срока службы деталей используемой модели плазматрона.

Поперечные колебания плазматрона вносят изменения в макро- и микростроение темных зон упрочняющих слоев с малым содержанием частиц

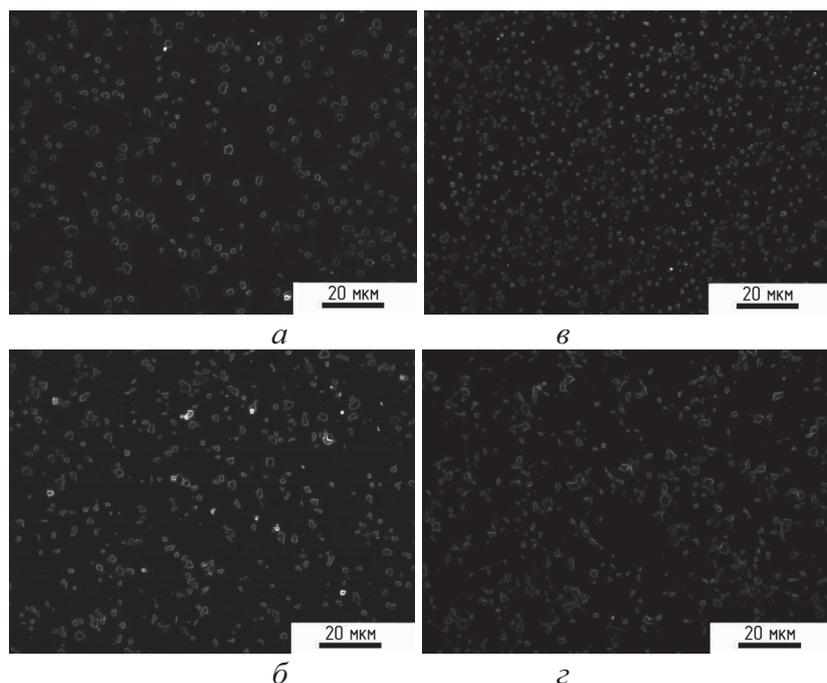


Рис. 6. Микроструктура покрытий, сформированных по режиму № : 3(а, б), 9(в), 8(г); (а) – в нижней части покрытия, (б) – в верхней части покрытия

карбида ванадия. Колебания плазматрона с малым размахом (9 мм) способствуют увеличению размеров пятна нагрева и ширины сварочной ванны. В сечении 2 покрытий наблюдаются серповидные зоны с малым числом крупных частиц карбида ванадия, и их ширина изменяется от 10 до 80 мкм в случае наплавки токами 160 А и 220 А, и от 50 до 250 мкм током 190 А. Причем описываемые зоны расположены или симметрично относительно центра покрытия (рис. 3, б) или развернуты на некоторый угол то в одну, то в другую сторону соизмеримо с траекторией движения плазматрона (рис. 3, в). В сечении 1 покрытий не обнаруживается распределение частиц карбида ванадия по эллиптическим траекториям, что можно объяснить изменением формы сварочной ванны, а именно сокращением длины ее хвостовой части.

Увеличение размаха колебаний плазматрона до 15 мм обеспечивает большую чувствительность процесса кристаллизации сварочной ванны к его местоположению в пространстве. Это особенно заметно при уменьшении скорости наплавки до 4,5 м/ч, когда теплоотвод в направлении амплитуды колебаний плазматрона в большей степени влияет на процесс кристаллизации сварочной ванны, чем теплоотвод в направлении скорости наплавки. Происходит изменение внешнего вида сформированных валиков и их микроструктуры. В сечении 1 покрытий ширина эллиптических зон с малым числом частиц карбида ванадия не превышает 50 мкм. Серповидные зоны с малым числом частиц карбида ванадия (сечение 2) в данных условиях наплавки существенно изменяются. Их ширина значительно увеличивается (до 2000 мкм) и они следуют друг за другом (рис. 3, ж), формируя

периодическую структуру покрытия (рис. 4, з). Внутри серповидной зоны по ее ширине плавно увеличивается число частиц карбида ванадия в направлении вектора скорости наплавки.

Введение поперечных колебаний приводит к уменьшению средних размеров частиц карбида ванадия на 10...25 %, увеличению их среднего числа на 10...50 % и объемной доли на 10...20 % по сравнению со структурой упрочненных слоев, полученных без поперечных колебаний плазматрона при тех же значениях скорости наплавки и силы тока.

Наплавка с размахом колебаний плазматрона 9 мм, расходом порошка 1,45 кг/ч на токе 220 А не приводит к изменениям объемной доли эвтектики по высоте упрочняющего слоя. Увеличение расхода порошка до 1,9 кг/ч на том же токе, и при расходе 1,45 кг/ч на токах 160...190 А приводит к росту доли эвтектических карбидов от границы сплавления к поверхности упрочненного слоя. При увеличении размаха колебаний до 15 мм доля эвтектики растет от границы сплавления к поверхности покрытий.

Выводы

1. Установлено, что наиболее равномерную структуру упрочненного слоя покрытий системы Fe–Cr–V–Mo–C с шириной эллиптических и серповидных зон, не превышающей 20 мкм, можно сформировать при скорости плазменной порошковой наплавки на постоянном токе 220 А прямой полярности 4,5 м/ч и расходе порошка 1...1,45 кг/ч, скорости 6...8 м/ч и расходе 1...1,9 кг/ч.
2. Показано, что варьированием параметрами режимов наплавки можно влиять на средний диаметр (от 1,3 до 1,9 мкм), число (от 200 до 600 шт. на еди-

- нице площади поверхности), долю (от 8...9 до 10...12 %) и морфологию частиц карбида ванадия, средний размер зерен матрицы (от 5,9 до 11 мкм), и распределение эвтектических карбидов.
- Установлено, что введение поперечных колебаний плазмотрона малого размаха исключает распределение частиц карбида ванадия по эллиптическим траекториям в покрытиях, ширина же серповидных зон в них составляет 10...250 мкм. При увеличении размаха колебаний до 15 мм ширина эллиптических зон не превышает 50 мкм, а ширина серповидных зон с малым числом частиц карбида ванадия увеличивается до 2 мм, формируя периодическую структуру покрытий. При этом, внутри серповидных зон по их ширине плавно увеличивается число частиц кар-

бида ванадия в направлении вектора скорости наплавки.

- Введение поперечных колебаний плазмотрона обеспечивает уменьшение средних размеров частиц карбида ванадия на 10...25 %, увеличение их среднего числа на 10...50 % и средней объемной доли на 10...20 % по сравнению со структурой упрочненных слоев, полученных без поперечных колебаний плазмотрона при тех же значениях скорости наплавки и силы тока.

Авторы благодарят к.т.н., доцента Р.И. Дедюха за консультацию в вопросах эффективности нагрева изделия плазменной дугой.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания Министерства образования и науки РФ на проведение научно-исследовательских работ № 8.3664.2011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Лапин И.Е., Косович В.А. Неплавящиеся электроды для дуговой сварки. – Волгоград: ВолГТУ, 2001. – 190 с.
- Гладкий П.В. и др. Плазменная наплавка. – Киев: Екотехнология, 2007. – 292 с.
- Пантелеенко Ф.И., Лялякин В.П., Иванов В.П., Константинов В.М. Восстановление деталей машин. – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с.
- Liujiu Xu, Jiandong Xing, Shizhong Wei, Yongzhen Zhang, Rui Long. Study on relative wear resistance and wear stability of high-speed steel with high vanadium content // *Wear*. – 2007. – V. 262. – P. 253–261.
- Шевченко О.И. Управление структурой, составом и свойствами покрытий при плазменной наплавке за счет технологических воздействий: дис. ... д-ра техн. наук. – Екатеринбург, 2006. – 355 с.
- Гладкий П.В., Переpletчиков Е.Ф., Рябцев И.А. Плазменная наплавка (обзор) // *Автоматическая сварка*. – 2007. – № 2. – С. 32–40.
- Шицын Ю.Д., Косолапов О.А., Струков Н.Н. Распределение энергии сжатой дуги при работе плазмотрона на токе обратной полярности // *Сварка и диагностика*. – 2010. – № 3. – С. 13–16.
- Макаренко Н.А., Грановский Н.А., Богущий А.А., Куций А.М., Кошевой А.Д. Плазменная наплавка разнополяр-

ными импульсами тока // *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. – 2007. – № 2Е. – С. 213–217.

- Переpletчиков Е.Ф., Рябцев И.А. Плазменно-порошковая наплавка в арматуростроении. – Киев: Екотехнология, 2007. – 64 с.
- Xu Liujiu, Xing Jiandong, Wei Shizhong, Zhang Yongzhen, Long Rui. Investigation on wear behaviors of high-vanadium high-speed steel compared with high-chromium cast iron under rolling contact condition // *Materials Science and Engineering*. – 2006. – V. 434. – P. 63–70.
- Геллер Ю.А. Инструментальные стали. – М.: Металлургия, 1983. – 527 с.
- Переpletчиков Е.Ф., Рябцев И.А., Васильев В.Г., Хайнце Х. Структура и свойства высокоуглеродистых высокованадиевых сплавов на железной основе для наплавки // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2003. – № 5. – С. 37–40.
- Bratberg J., Frisk K. An Experimental and Theoretical Analysis of the Phase Equilibria in the Fe–Cr–V–C System // *Metallurgical and materials transactions. A*. – 2004. – V. 35A. – P. 3649–3663.
- Shizhong Wei, Jinhua Zhu, Leujue Xu Research on wear resistance of high speed steel with high vanadium content // *Materials Science and Engineering*. – 2005. – V. 404. – P. 138–145.

Поступила 09.09.2011 г.