

УДК 621.793.7

Григоренко Г. М.², Коржик В. Н.^{1,2}, Чайка А. А.², Лютик Н. П.², Адеева Л. И.², Туник А. Ю.², Кудь И. В.³, Еременко Л. И.³, Ткачук В. И.²

¹ Гуандунский Институт сварки (Китайско-украинский Институт сварки им. Е. О. Патона).

КНР, г. Гуанчжоу

² Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. Украина, г. Киев

³ Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины. Украина, г. Киев

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПЛАЗМЕННО-ДУГОВЫХ ПОКРЫТИЙ АРМИРОВАННЫХ УПРОЧНЯЮЩИМИ ЧАСТИЦАМИ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ПРОВОЛОК С ПОРОШКОВЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ WC И WC+NbC

Исследованы закономерности формирования структуры покрытий, напыленных на оптимальных режимах плазменно-дугового напыления из токоведущих порошковых проволок со стальной оболочкой и наполнителями из порошков WC с добавкой 0,5% NbC-нанопорошка. Установлено, что основой обоих покрытий является ферритная матрица, легированная вольфрамом. Дисперсно-упрочняющими фазами служат двойные карбиды Fe_3W_3C и Fe_6W_6C , а также исходные карбиды вольфрама. В покрытии, полученном из проволоки с добавкой нанопорошка NbC, карбидные частицы дополнительно легированы ниобием. Эта добавка в количестве 0,5% привела к повышению твердости покрытия на 700 МПа. Все полученные плазменно-дуговым напылением покрытия имеют тонколамельную структуру и хорошую прочность сцепления с основой. Они отличаются высокой плотностью, минимальной пористостью (<1,5%) и твердостью, превышающей твердость стальной оболочки проволоки в 3 раза.

Ключевые слова: плазменно-дуговое напыление; порошковая проволока; карбидный наполнитель; нанокристаллическая добавка; структура; фазовые превращения; микротвердость.

Введение. Постановка задачи

Актуальность работы связана с перспективностью использования плазменных технологий для нанесения покрытий из тугоплавких материалов и композиций на их основе. Аномально высокие температуры плазменных струй (до 15000–20000 К), а также их высокие скорости (до 1000–3000 м/с и выше) позволяют рассматривать их в качестве эффективных источников нагрева, расплавления и распыления тугоплавких материалов. Преобладающим видом материалов для газотермического напыления в настоящее время являются порошки. Вторым по распространенности видом материалов для плазменно-дугового напыления (ПДН) являются порошковые проволоки и прутки [1–5]. Довольно широкими возможностями для их использования характеризуются и порошковые проволоки и прутки, содержащие тугоплавкие соединения. С точки зрения нанесения покрытий использование порошковых проволок позволяет достичь, по сравнению с порошками, целого ряда преимуществ: более высокой энергоэффективности процесса (удельные затраты энергии при нанесении покрытий из проволок ниже в 8–15 раз); фор-

мирования покрытий из расплавленных частиц (так как плавление проволоки происходит в точке его подачи в высокотемпературную зону плазменной струи, тогда как ускорению, с целью получения частицами необходимой кинетической энергии под действием высокотемпературной газовой струи, подвергаются уже капли расплава); более высокой стабильности процесса и т. д. Дальнейшее повышение эффективности этой технологии достигается, в нашем случае, путем реализации процесса ПДН проволоки-анода, где плавление проволоки происходит не только из-за нагрева плазменной струей, но и за счет тепла, выделяемого на аноде при прохождении электрического тока, а также путем регулирования газодинамических характеристик плазменной струи [6–8].

Целью данной работы является продолжение работ по изучению особенностей процесса нанесения покрытий при плазменно-дуговом напылении (ПДН) с использованием порошковых проволок на основе карбида вольфрама с различными добавками [9, 10].

Весомый вклад в развитие и изучение процессов ПДН, где в качестве исходных материалов использовались проволочные материалы, внесли такие ученые из Украины и стран ближнего зару-

бежья, как Н. В. Катц, В. А. Роянов и Ю. С. Коробов [11–13]. Также механизмы плазменного напыления проволочных материалов подробно исследованы в научных трудах А. Н. Краснова, В. А. Петруничева, В. В. Кудинова (Институт металлургии им. А. А. Байкова РАН) [14–17]. Среди других зарубежных исследователей следует выделить работы японских авторов А. Хасуи и А. Моригаки, а также немецких исследователей М. Шоопа и Е. Кречмара [18–20].

С целью напыления износостойких покрытий узлов сухого трения часто используют карбид вольфрама, предназначенный для защиты рабочих поверхностей от абразивного и газоабразивного срабатывания, коррозии и эрозии при повышенных температурах. Для достижения оптимальных эксплуатационных свойств покрытий такого типа необходимо, чтобы они содержали как можно большую объемную долю упрочняющей фазы монокарбида вольфрама (WC), обладали достаточно высокой прочностью связи упрочняющей фазы с матрицей и минимальным количеством хрупких промежуточных фаз. Это в прямой степени определяется возможностью свести к минимуму при напылении процессы декарбидизации ($2WC \leftrightarrow W_2C + C$, $W_2C \leftrightarrow W + C$) и окисления ($WC + O_2 = W + CO_2$). В частности, в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины (ИЭС) уже проводятся системные разработки порошковых проволок с наполнителями в виде порошков карбидов других тугоплавких соединений для ПДН-покрытий с повышенной износостойкостью и другими специальными свойствами [21].

Вместе с тем, в настоящее время отсутствуют публикации по созданию плазмотронов и другого оборудования для высокопроизводительного ПДН тугоплавких материалов и их композиций в виде прутков и порошковых проволок. В данной работе образцы покрытий для исследования были получены при высокоскоростном ПДН плавящейся токоведущей порошковой проволоки на разработанной в ИЭС установке «PLAZER 30PL-W» (рис. 1). В данной установке процесс ПДН реализуется в аргоновой дуге с интенсивным сопутствующим воздушным обдувом. Дуга в процессе горит между вольфрамовым катодом, обдуваемым небольшим расходом аргона, и плавящейся токоведущей проволокой, подаваемой за срезом двойного сопла плазмотрона [22].

Спроектированы камера и стенд для исследования процессов высокопроизводительного ПДН, где учитывалась специфика напыления порошковых проволок, содержащих трубчатую стальную оболочку с тугоплавкими порошковыми наполнителями. Особенности процесса создания ПДН-покрытий заключаются в следующем:

- плавление материала проволок происходит в защитной атмосфере аргона при скорости истече-



Рис. 1. Процесс создания износостойких ПДН-покрытий с помощью установки «PLAZER 30PL-W»

ния плазменной струи, приближающейся к скорости звука;

- дробление расплавленного материала и ускорение дисперсных частиц осуществляются аргоновой плазмой;

- в плазмотроне реализуется турбулентный режим течения плазмы, а протекание газа происходит преимущественно в осевом направлении;

- с помощью сверхзвукового потока воздуха, истекающего из кольцевого зазора между соплами плазмотрона, обеспечивается сжатие и ускорение плазменной струи, причем возрастают температура и скорость напыления частиц.

Эти особенности обеспечивают: минимизацию потерь при испарении материала проволок; его минимальное насыщение кислородом; получение оптимального фракционного состава расплавленных частиц порошковой проволоки; достижение частицами напыляемого материала максимально высокой скорости при соударении с основой; получение наиболее высокой объемной концентрации напыляемых частиц; минимальный (несколько градусов) угол раскрытия потока напыляемого материала.

Методика и инструменты исследований. Обсуждение результатов

Проведена серия экспериментов по напылению на установке «PLAZER 30PL-W» порошковых проволок с наполнителями в виде порошка карбида вольфрама и смеси карбида вольфрама с наноразмерным порошком NbC. Большинство известных газотермических методов нанесения покрытий полностью расплавляют напыляемый материал, разрушая его структуру. Наиболее же перспективным

при создании покрытий с наноструктурными составляющими является высокоскоростное ПДН, которое за счет изменения температуры и варьирования скорости газовой струи в значительной степени сохраняет структуру исходного наполнителя, содержащего наноразмерный порошок NbC.

Наиболее значительным внешним параметром напыления является мощность дуги (определяется величиной тока и напряжением), дистанция напыления, скорость подачи частиц в зону напыления, температура в области контакта частиц с основой, расход плазмообразующего газа, с увеличением которого растут, распылительная способность плазменной струи, его скорость и, соответственно, скорость напыляемых частиц, причем такое увеличение расхода способствует также образованию дисперсного потока этих частиц. С увеличением дистанции напыления снижаются температура и скорость напыляемых частиц вблизи поверхности основы – что может быть связано с их окислением и насыщением газами. С увеличением дистанции возрастает диаметр пятна напыления, а это позволяет получать более равномерные по толщине покрытия и снизить вероятность перегрева напыляемого металла. Именно такие особенности и обеспечивают минимизацию потерь при испарении материала проволоки, его минимальное насыщение кислородом, получение оптимального фракционного состава наплавленных частиц порошковой проволоки с наполнителем из карбида вольфрама, достижение ими максимально высокой скорости при столкновении с основанием и получение наиболее высокой объемной концентрации напыляемых частиц.

При напылении порошковыми проволоками увеличение силы тока ведет к необходимости увеличения скорости подачи проволоки с целью оптимизации осесимметричного потока. Это приводит к нерегулярному характеру напыления покрытия, поэтому с целью обеспечения формирования осесимметричного потока частиц при изменении величины тока необходимо корректировать скорость подачи порошковой проволоки.

Чтобы оценить степень влияния параметров ПДН на структуру и свойства покрытий, использовали метод математического планирования эксперимента. В качестве переменных факторов использовали: силу тока дуги I , А; расход плазмообразующего воздуха Q_B , м³/ч; дистанцию напыления L_d , мм.

Матрица эксперимента (согласно данным по варьированию величин параметров напыления) представлена в табл. 1.

После анализа результатов эксперимента были определены оптимальные режимы ПДН, а именно: $I = 230$ А; напряжение $U = 60$ В; $Q_B = 40$ м³/ч; $L_d = 150$ мм, при которых наблюдается полное расплавление всех компонентов порошковой проволоки

Таблица 1

Матрица эксперимента

Номер эксперимента	Факторы влияния		
	I , А	Q_B , м ³ /ч	L_d , мм
1	180	40	150
2	180	40	220
3	180	50	150
4	180	50	220
5	230	40	150
6	230	40	220
7	230	50	150
8	230	50	220

ки. При этих режимах и были напылены исследованные в работе покрытия.

Исследования порошковых наполнителей и плазменных покрытий выполняли методами металлографии (микроскоп «Неофот-32»), рентгено-спектрального микроанализа (РСМА, микроанализатор «САМЕВАХ»). Рентгеноструктурный фазовый анализ (РСФА) проводили на установке «ДРОН-1М». Пористость покрытий определяли на приборе «OMNIMET», микротвердость образцов измеряли на микротвердомере фирмы «LECO» при нагрузке на индентор 0,49 Н. Для получения наноразмерного порошка был использован метод механохимического синтеза. Синтез карбида ниобия проводили в высокоэнергетической планетарной мельнице «АИР-0,015», с использованием реакционной смеси микронного порошка ниобия (марки «ПНБ-1») и сажи (марки «П-705») с удельными поверхностями 1,7 и 23 м²/г соответственно, в среде аргона. Морфологические исследования и химический анализ полученного продукта механосинтеза проводили на сканирующем микроскопе и методом фотонно-корреляционной спектроскопии (PCS).

Исследуемые материалы. В качестве материалов для напыления использовали порошковые проволоки, состоящие из стальной оболочки (Ст08кп), состава (мас.%): 99,2 Fe; 0,45 Сг; 0,2 Al; 0,2 Mn; 0,08 С, с наполнителями из: порошка WC (коэффициент заполнения – 43 мас.%) и WC + нанопорошок NbC (коэффициент заполнения – 42 мас.%).

Порошковый наполнитель WC представляет собой сложные частицы округлой формы с развитой поверхностью и размерами 40...80 мкм. По данным РСФА, порошок состоит в основном из карбида WC и небольшого количества (~4 мас.%) карбида W₂C (рис. 2). Средняя микротвердость частиц составляет 21530 ± 1610 МПа.

Порошковый наполнитель состава WC + NbC содержит 99,5 мас.% карбида вольфрама и 0,5 мас.% наноразмерного порошка NbC. Морфологические

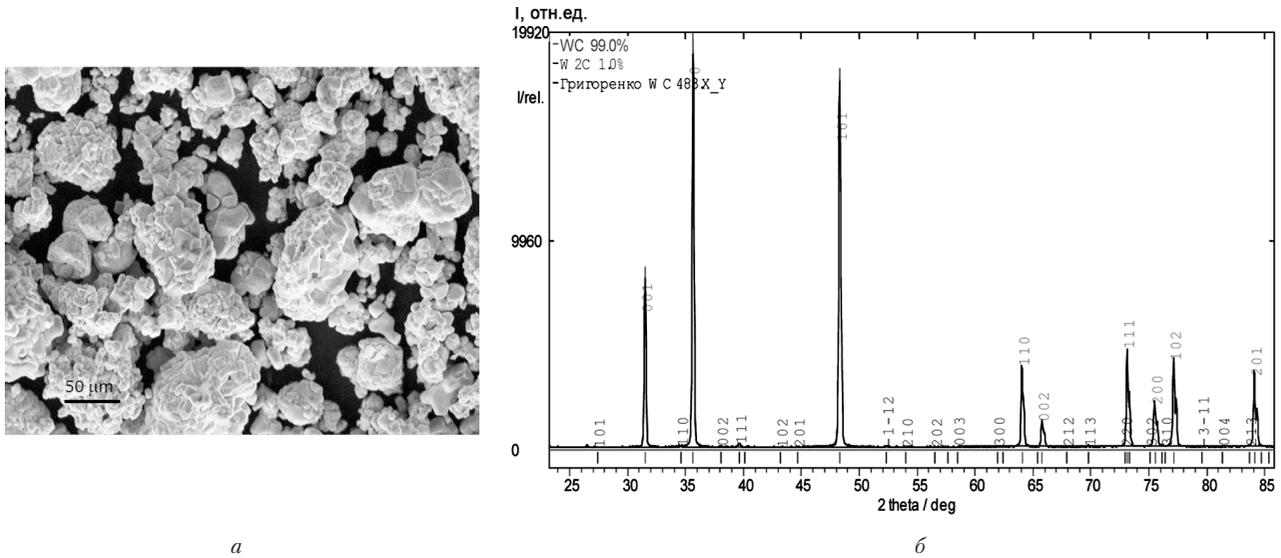


Рис. 2. Морфология частиц (а) и дифрактограмма (б) порошка карбида вольфрама

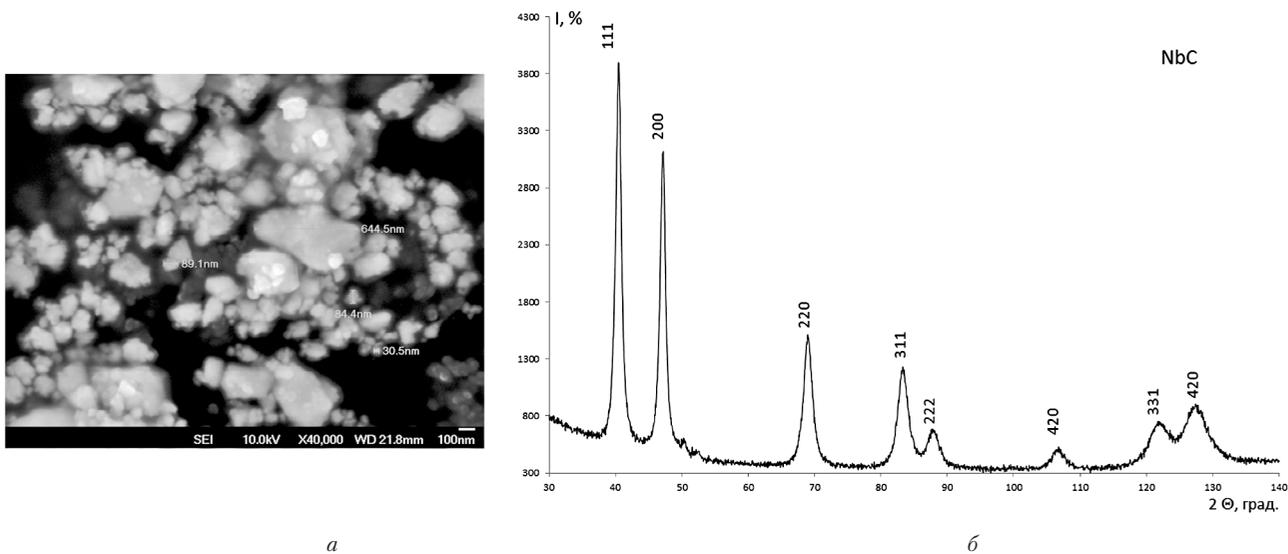


Рис. 3. Морфология частиц (а) и дифрактограмма (б) порошка карбида ниобия

исследования частиц этого нанопорошка (рис. 3, а) показали, что он представляет собой смесь наноразмерных индивидуальных частиц и конгломератов из них. Средний размер частиц порошка составляет 120 нм, причем не более 40% этих частиц являются наноразмерными (≤ 100 нм). Согласно данным РСФА (рис. 3, б), продуктом механосинтеза является наноразмерный порошок карбида ниобия с периодом решетки $a = 0,447$ нм и с областью когерентного рассеяния 20...25 нм. Согласно данным химического анализа, по содержанию связанного углерода полученный порошок соответствует химической формуле $Nb_{0,98}C$, а количество железа в результате намолта не превышает 1,7 мас.%.
Исследование покрытий. Особенности структуры покрытий, полученных из проволок с наполни-

телями в виде тугоплавких соединений, определяются спецификой процесса высокоскоростного ПДН. Процесс заключается в сочетании скоротечной высокотемпературной обработки частиц, их дальнейшего высокоскоростного столкновения с поверхностью основы и высокой скоростью кристаллизации. Металлографический анализ подтверждает, что с помощью установки «PLAZER 30PL-W» получают качественные покрытия с близкой к «нулевой» пористостью.

Металлографические исследования показали, что микроструктуры плазменных покрытий, полученных из порошковой проволоки с наполнителями WC и WC + NbC, похожи (рис. 4). Покрытия представляют собой слоистые гетерогенные структуры с наличием большого числа границ раздела,

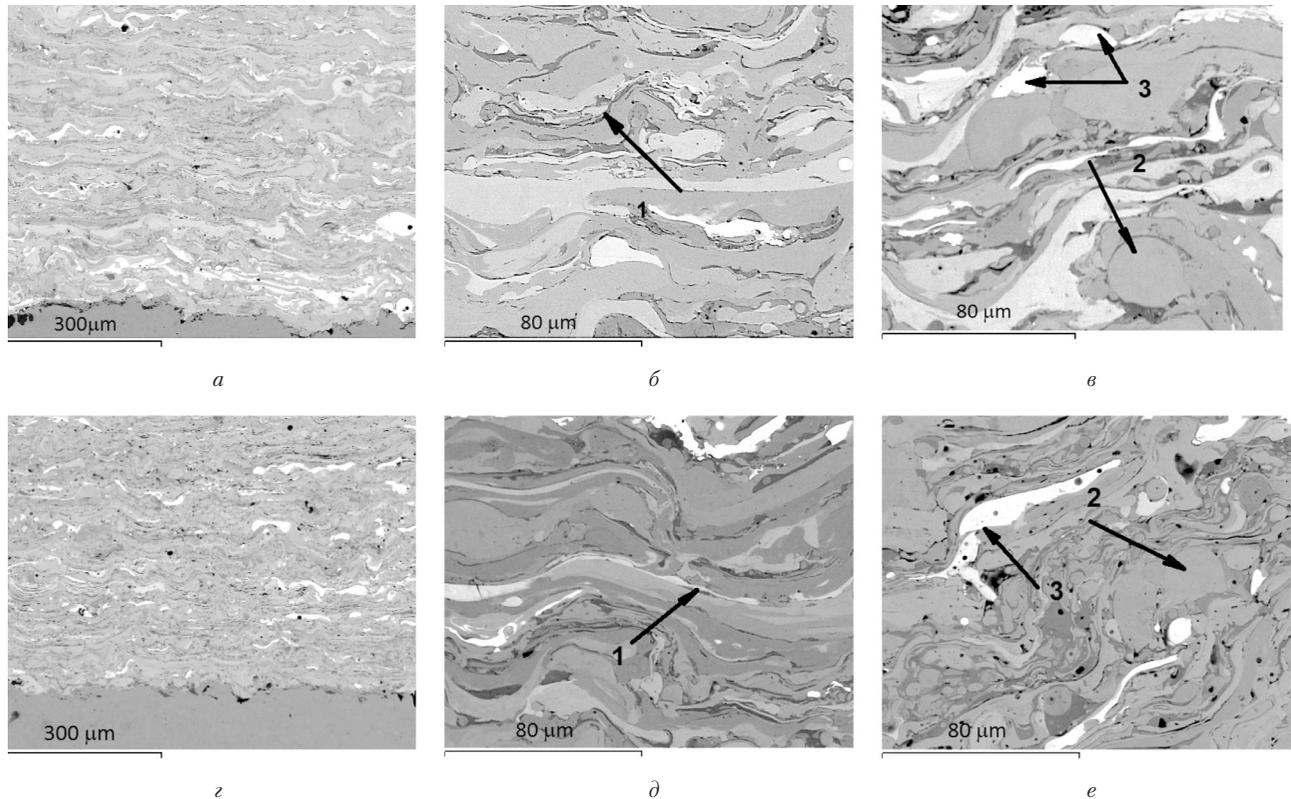


Рис. 4. Микроструктура плазменных покрытий, полученных из порошковой проволоки с наполнителями из: WC (а–в); WC + NbC (г–е)

образованные деформированными плоскими частицами с разной скоростью охлаждения и условиями укладывания слоев напыляемого материала. При движении напыляемых частиц в высокотемпературной газовой струе их поверхность окисляется, в результате чего каждая частица покрывается пленкой окислов, которая сохраняется на границах частиц в покрытии (стрелка 1 на рис. 4, б, д). Покрытия, полученные из порошковых проволок на основе карбида вольфрама, плотны и хорошо сформированы. Слои в покрытиях состоят из сильно деформированных частиц-ламелей и хорошо прилегают к основе. Трещины и отслоения в покрытиях отсутствуют. Формирующаяся мелкозернистая структура покрытия состоит из стабильных и метастабильных фаз. Основную часть покрытия составляют частицы дискообразной формы, образующиеся в результате деформации и затвердевания на подложке полностью расплавленных в плазме частиц исходного материала. Достаточно редко присутствуют крупные частицы глобулярной формы (стрелка 2 на рис. 4, в, е), подвергнутые воздействию высокотемпературной плазменной струи, но затвердевшие до соударения с основой — причиной чему могут быть как их неполное расплавление, так и затвердевание при движении в потоке. Также в покрытиях наблюдаются округлые мелкие частицы и частицы смешанного типа, сочетающие в себе признаки нескольких видов частиц. Порис-

тость напыленных покрытий не превышает ~ 1,5 об.%.

Сравнивая микроструктуры напыленных покрытий, можно отметить, что покрытия, полученные из проволоки с наполнителем WC + NbC, отличаются более высокими плотностью и однородностью и несколько меньшей (до 1 об.%) пористостью. Микроструктуры, как правило, являются дисперсными и состоят в основном из тонких ламеллярных частиц с оксидными оторочками по границам толщиной менее 1 мкм (рис. 4, г–е). Мелкодисперсные же карбидные частицы встречаются редко (стрелка 3 на рис. 4 в, е).

При высокоскоростном ПДН в покрытиях происходят не только структурные, но и фазовые изменения. Дисперсные частицы активно взаимодействуют с окружающей средой, в результате чего происходит изменение их химического и фазового составов. При высоких температурах между карбидами вольфрама WC, W₂C и железом происходит взаимодействие, приводящее к образованию двойных карбидов. Эти карбиды стабильны только при наличии двух металлов. Наиболее известным двойным карбидом является так называемый η-карбид Me₆C, однако существуют и другие карбиды. Двойной η-карбид имеет кубическую структуру с большим (~11 Å) периодом решетки. В системе Fe–W–C отмечено существование двойных карбидов Fe₃W₃C, Fe₄W₂C, Fe₂W₄C, а также, при наличии

дефицита углерода, карбид Fe_6W_6C . В этих карбидах возможно частичное или полное замещение переходных металлов, а именно образование тройных карбидов, причем существует аналогичная возможность замещения углерода азотом или кислородом. Благодаря этим свойствам η -карбиды действуют как растворители, имея высокую твердость, чрезвычайно высокий коэффициент термического

расширения (близкий к коэффициенту термического расширения железа), хорошую сопротивляемость окислению и высокую коррозионную стойкость в кислотах. Все это обуславливает положительную роль η -карбидов как структурных составляющих покрытий [23].

По результатам РСФА (рис. 5) установлено, что фазовый состав покрытия, полученного из прово-

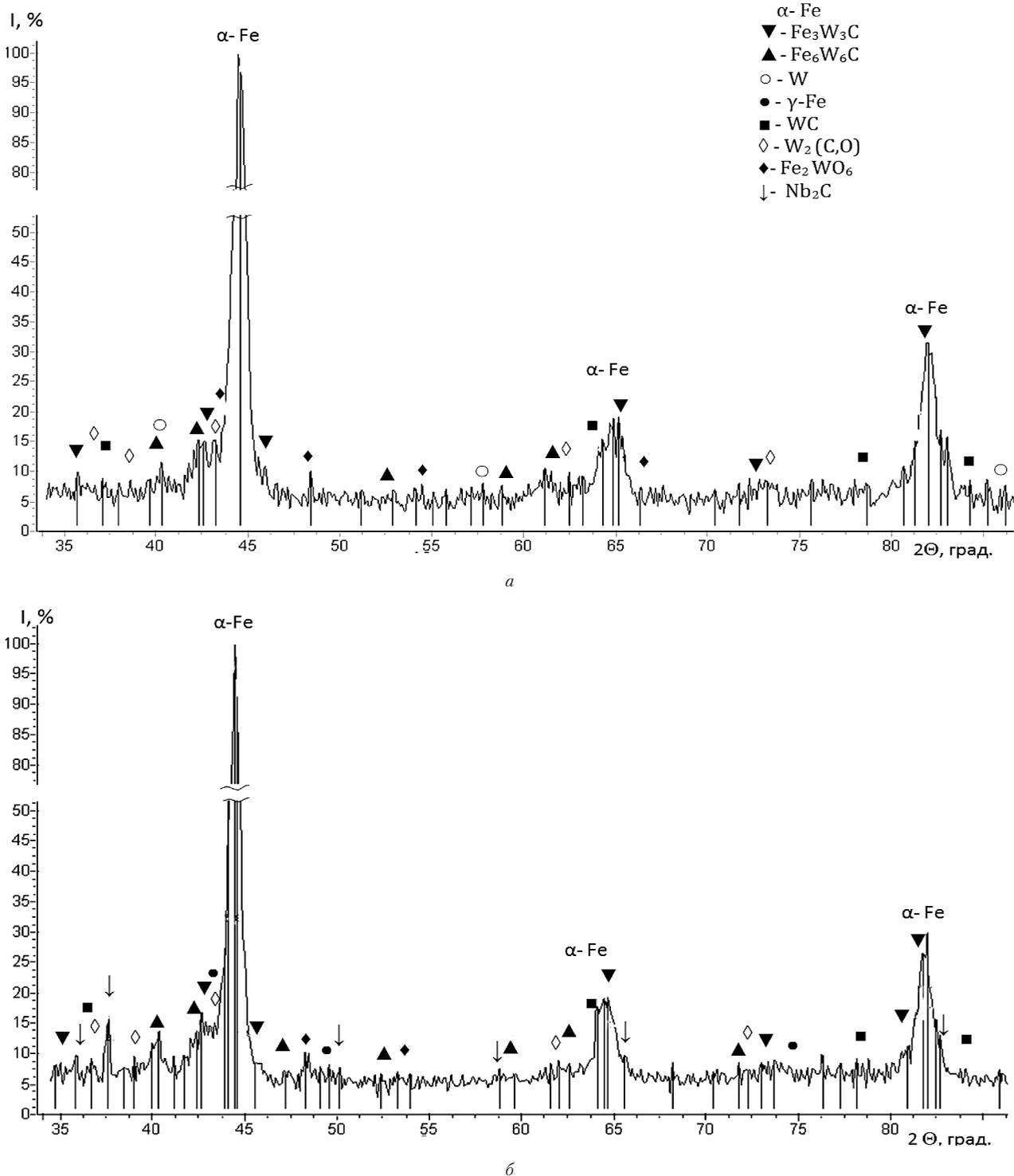


Рис. 5. Рентгенограммы покрытий, полученных из порошковой проволоки с наполнителями: WC (а); WC + NbC (б)

локи с наполнителем WC, является следующим: α -Fe (основная фаза); Fe_3W_3C ; Fe_6W_6C ; W; Fe_2WO_6 ; WC. Фазовый же состав покрытия с наполнителем WC + NbC несколько отличается от предыдущего, а именно: α -Fe (основная фаза); Fe_3W_3C ; Fe_6W_6C ; γ -Fe; $W_2(C, O)$; Nb_2C ; WC. Таким образом, упрочнение матрицы на основе α -Fe происходит за счет включений двойных карбидов железа и вольфрама (Fe_6W_6C и Fe_3W_3C), а также исходных карбидов (см. рис. 4). Двойные карбиды являются продуктом взаимодействия, в результате процесса ПДН, стальной оболочки проволоки с порошковым наполнителем.

Наличие указанных фаз в напыленных покрытиях также подтверждается результатами РСМА (табл. 2, 3; рис. 6, 7) отдельных структурных элементов напыленных покрытий.

Таким образом, по результатам РСФА и РСМА основными структурными составляющими покрытия из порошковых проволок с наполнителем WC + NbC, как и в покрытии с наполнителем порошковой проволоки из WC, является твердый раствор на основе α -Fe, легированный вольфрамом, двойные карбиды железа и вольфрама Fe_3W_3C , Fe_6W_6C , а также исходные карбиды вольфрама WC и W_2C . Вместе с тем, наблюдаются отдельные карбидные включения в виде светлых, удлинённых и округлых участков на основе вольфрама и железа, легированных небольшим количеством ниобия (участки 2, 3, 4 на рис. 7, а; участок 1 на рис. 7, б). Все это свидетельствует о том, что взаимодействие наночастиц Nb происходит в основном с карбидными составляющими, растворимость же NbC в кар-

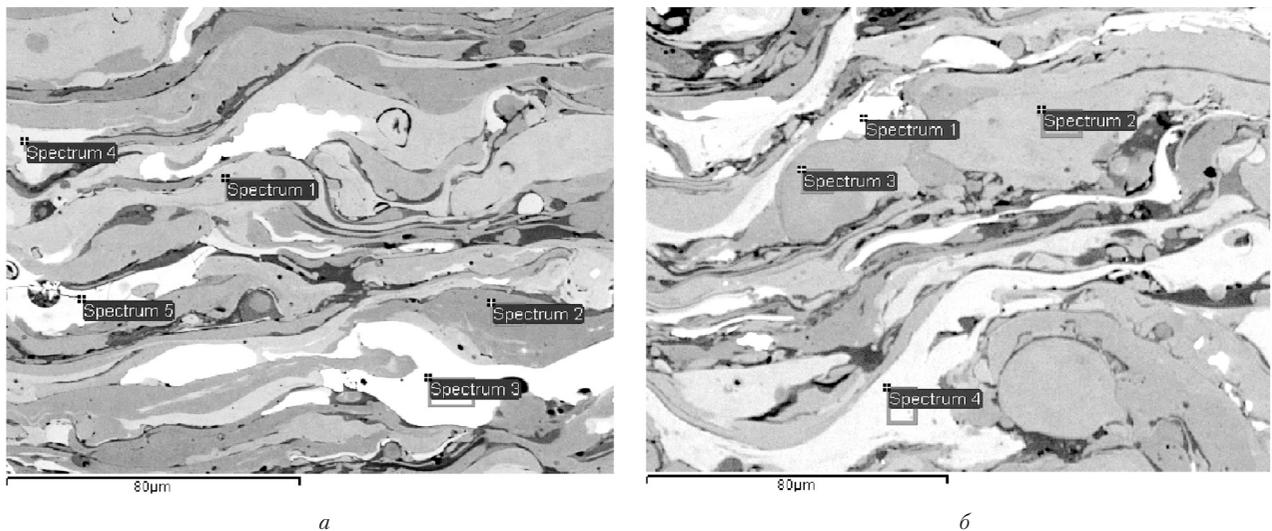


Рис. 6. Структура покрытия, напыленного из проволоки с наполнителем WC (растровый электронный микроскоп (РЭМ), режим «BEI»)

Таблица 2

Содержание элементов в участках покрытия, приведенного на рисунке 6

Исследуемый участок	Содержание элементов, мас. %				
	C	O	Mn	Fe	W
Рис. 6, а					
1	3,09	1,28	0,09	75,06	20,48
2	2,89	1,19	0,23	84,09	11,59
3	4,61	1,29	0,15	19,32	74,63
4	3,74	1,87	0,18	63,2	31,01
5	12,46	3,59	0,03	52,76	31,16
Рис. 6, б					
1	16,9	3,46	0,00	45,61	34,02
2	6,7	2,11	0,00	78,0	13,2
3	3,29	1,52	0,00	82,56	12,63
4	4,89	1,9	0,00	71,03	22,18

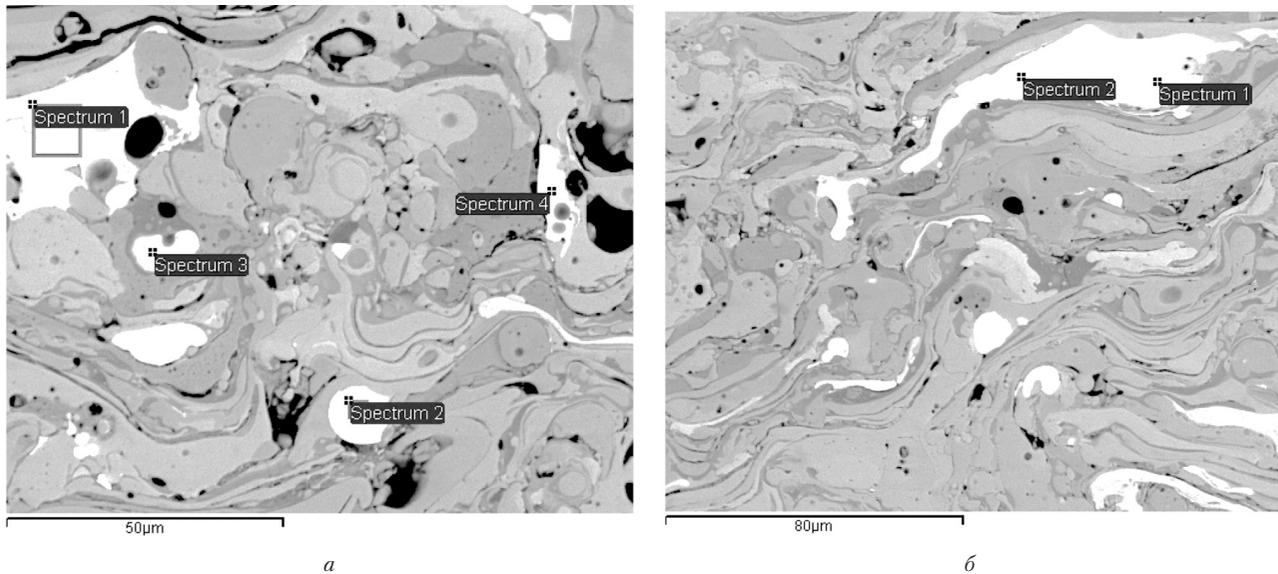


Рис. 7. Структура покрытия, напыленного из проволоки с наполнителем WC + 0,5% NbC (РЭМ, режим «ВЕI»)

Таблица 3

Содержание элементов, в участках покрытия, приведенного на рисунке 7

Исследуемый участок	Содержание элементов, мас. %				
	C	O	Nb	Fe	W
Рис. 7, а					
1	5,32	4,03	—	48,17	42,48
2	3,86	1,42	0,52	29,2	65,0
3	5,25	2,75	0,39	47,11	44,5
4	4,74	1,79	0,2	42,84	50,43
Рис. 7, б					
1	9,62	—	0,4	0,53	89,44
2	10,87	5,43	—	31,4	52,31

бидах объясняется следующим. Монокарбид NbC с кубической решеткой довольно строго следует «правилу 15%» Юм–Розери, согласно которому образование твердых растворов возможно лишь в тех случаях, когда максимальная разность атомных размеров металлов не превышает ~15%. Это правило было впервые предложено для определенных систем чистых металлов, но оно оказалось вполне справедливым и для монокарбидов. Учитывая небольшую разницу в атомных радиусах металлов W и Nb, между ними и их монокарбидами возможно образование твердых растворов, поэтому добавки нанопорошка NbC в системе WC–Fe могут растворяться (при напылении) в высокотемпературной кубической модификации WC.

Как показали дюротметрические исследования, микротвердость плазменных покрытий из обеих проволок, напыленных на оптимальном режиме, на 14% выше микротвердости покрытий, напыленных

на пониженном режиме. Результаты измерений микротвердости частиц приведены в табл. 4.

Как следует из результатов измерений микротвердости, добавление в наполнитель небольшого количества 0,5%-го наноразмерного порошка NbC привело к повышению твердости покрытий на 700 и 650 МПа при напылении на оптимальном ($I = 230$ А) и пониженном ($I = 180$ А) режимах соответственно. Пористость покрытий, независимо от режимов напыления и состава наполнителя, является низкой и не превышает 1,5%.

Выводы

В ходе выполнения работы были разработаны новые типы порошковых проволок на основе карбида вольфрама, предназначенные для нанесения сверхзвуковых плазменных покрытий с повышенной износостойкостью.

**Зависимость микротвердости покрытий от режимов ПДН
и состава наполнителя порошковой проволоки**

№ п/п	Химический состав наполнителя, мас. %	I, А	Пористость, %	HV _{0,5%} , МПа
1	100 WC	180	< 1,0	4480
2		230	< 1,5	4500
3	99,5 WC+0,5 NbC	180	< 1,0	4850
4		230	< 1,0	4880

Примечание: постоянные режимы напыления: $Q_{\text{возд}} = 40 \text{ м}^3/\text{ч}$, $L_{\text{д}} = 150 \text{ мм}$, $U = 60 \text{ В}$

Определены оптимальные такие режимы технологии высокоскоростного ПДН покрытий, которые позволяют не только сохранить наибольшую долю монокарбида вольфрама, но и получить двойные карбиды вольфрама и железа, сведя к минимуму процессы декарбидизации и окисления и таким образом повысив качество износостойких покрытий.

Исследованы закономерности формирования структуры покрытий, полученных на оптимальных режимах ПДН из порошковых проволок со стальной оболочкой и наполнителями WC и WC с добавкой 0,5% NbC-нанопорошка. Установлено, что основой обоих покрытий является легированная вольфрамом ферритная матрица. Дисперсно-упрочняющими фазами служат двойные карбиды $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ и $\text{Fe}_6\text{W}_6\text{C}$, а также исходные карбиды вольфрама. В покрытии, полученном из проволоки с добавкой нанопорошка NbC, карбидные частицы дополнительно легированы ниобием. На дифрактограмме появляются линии отражения Nb_2C , однако исчезают линии W. Очевидно, что добавка монокарбида NbC тормозит процессы декарбидизации карбидов вольфрама.

Установлено, что все исследуемые ПДН-покрытия имеют тонколамельную структуру и хорошую прочностью сцепления с основой. Они отличаются высокой плотностью, минимальной пористостью (< 1,5%) и твердостью, превышающей твердость стальной оболочки проволоки в 3 раза.

Примечание: Работа выполнялась при поддержке Программы иностранных экспертов КНР № WQ20124400119 (Chinese Program of Foreign Experts No. WQ20124400119), Программы инновационной группы провинции Гуандун, КНР № 201101C0104901263 (Guangdong Innovative Research Team Program No. 201101C0104901263, China), проекта Гуандунской ключевой лаборатории современной технологии сварки № 2012A061400011, КНР (Project of Guangdong Provincial Key Laboratory No. 2012A061400011, China).

Список литературы

- [1] Борисов Ю. С. Газотермические покрытия из порошковых материалов: справочник / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко, Е. Н. Арда-товская. — К.: Наук. думка. — 1987. — 544 с.
- [2] Куницкий Ю. А. Некристаллические металлические материалы и покрытия в технике / Ю. А. Куницкий, В. Н. Коржик, Ю. С. Борисов. — К.: Техника, 1988. — 297 с.
- [3] Петров С. В. Плазменное газозоодушное напыление / С. В. Петров, И. Н. Карп. — К.: Наук. думка, 1993. — 499 с.
- [4] Петров С. В. Плазма продуктов сгорания в инженерии поверхности / С. В. Петров, А. Г. Саков. — К.: ТОПАС, 2000. — 220 с.
- [5] Wielage B. Thermisches Spritzen — Potenziale, Entwicklungen, Maerkte / B. Wielage, K. Bobzin, C. Rupprecht, M. Brahl // Thermal Spray: DVS «Verlag», 2008. — Bul. 1. — S. 30—36.
- [6] Виллаге Б. Особенности газотермического напыления покрытий порошковыми проволоками (Обзор) / Б. Виллаге, К. Руппхерт, А. Похмурская // Автомат. сварка. — 2011. — № 10. — С. 26—30.
- [7] Харламов М. Ю. Нагрев и плавление проволоки-анода при плазменно-дуговом напылении / М. Ю. Харламов, И. В. Кривцун, В. Н. Коржик и др. // Там же. — 2011. — № 5. — С. 5—11.
- [8] Харламов М. Ю. Формирование пленки жидкого металла на торце проволоки анода при плазменно-дуговом напылении / М. Ю. Харламов, И. В. Кривцун, В. Н. Коржик, С. В. Петров // Там же. — 2011. — № 12. — С. 3—18.
- [9] Борисов Ю. С. Исследование структуры и свойств газотермических покрытий системы WC—Co—Cr, полученных высокоскоростными методами напыления / Ю. С. Борисов, Е. А. Астахов, А. П. Мурашов и др. // Там же. — 2015. — № 10. — С. 26—29.
- [10] Григоренко Г. М. Особенности металлургических процессов при плазменно-дуговом напылении покрытий, полученных из стальной проволоки с порошковыми наполнителями WC и WC—Co / Г. М. Григоренко, Л. И. Адеева, А. Ю. Туник и др. // Современная электрометаллургия. — 2015. — № 4. — С. 14—24.
- [11] Катц Н. В. Металлизация распылением. — М.: Машиностроение, 1966. — 200 с.

- [12] Роянов В. А. Дефекты, контроль и управление качеством при сварке и родственных технологиях: учебник (4-е изд.) / В. А. Роянов, В. Я. Зусин, С. С. Самотугин, И. В. Захарова. — Мариуполь: ПГТУ, 2014. — 390 с.
- [13] Коробов Ю. С. Совершенствование технологии нанесения покрытий на алюминиевые сплавы на основе математического моделирования процесса электродуговой металлизации: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.03.06. — Свердловск: Уральский политехнический институт, 1981. — 23 с.
- [14] Краснов А. Н. Низкотемпературная плазма в металлургии / А. Н. Краснов, С. Ю. Шаривкер, В. Г. Зильберберг. — М.: Металлургия, 1970. — 216 с.
- [15] Петруничев В. А. К механизму плазменного распыления проволоки / В. А. Петруничев, В. В. Титков // Физика и химия обработки металлов. — 1977. — № 1. — С. 14–16.
- [16] Куудинов В. В. Плазменные покрытия / отв. ред. акад. Н. Н. Рыкалин. — М.: Наука, 1977. — 184 с.
- [17] Куудинов В. В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование: уч. для вузов / В. В. Куудинов, Г. В. Бобров; под ред. д.т.н., проф. Б. С. Митина. — М.: Металлургия, 1992. — 432 с.
- [18] Хасуи А. Техника напыления. — М.: Машиностроение, 1975. — 288 с.
- [19] Хасуи А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки. — М.: Машиностроение, 1981. — 192 с.
- [20] Кречмар Э. Напыление металлов, керамики и пластмасс. — М.: Машиностроение, 1966. — 432 с.
- [21] Походня И. К. Производство порошковой проволоки / И. К. Походня, В. Н. Шлепаков, В. Ф. Альтер и др. — К.: Вища школа. — 1980. — 231 с.
- [22] Коржик В. Н. Механизированная линия «PLAZER 30PL-W» для плазменно-дугового проволочного напыления покрытий / В. Н. Коржик, М. Ф. Короб // Сварщик. — 2012. — № 4 (86). — С. 13–16.
- [23] Гольшмидт Х. Дж. Сплавы внедрения / вып. 1; пер. с англ. — М.: Мир, 1974. — 424 с.

Grigorenko G. M.², Korzhyk V. N.^{1,2}, Chaika A. A.², Lutik N. P.², Adeeva L. I.², Tunik A. Yu.², Cud I. V.³, Eremenko L. I.³, Tkachuk V. I.²

¹ Guangdong Welding Institute (China-Ukraine E. O. Paton Institute of Welding). Chine, Guangzhou

² E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Science of Ukraine. Ukraine, Kiev

³ Frantsevich Institute for Problems in Materials Science of National Academy of Sciences of Ukraine. Ukraine, Kiev

FEATURES OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF PLASMA-ARC COATING REINFORCED WITH REINFORCING PARTICLES DERIVED FROM WIRES WITH POWDERED FILLERS WC AND WC + NbC

Researches on features of formation of structure of coatings obtained by plasma-arc spraying of cored wires based on WC and WC with additives of nanopowder NbC had been performed. Coatings, obtained by plasma-arc spraying have fine lamellar structure, are characterized by high density, minimum porosity (<1%), hardness in 3 times greater than the hardness of the shell, good adhesive strength to the substrate.

In the ferrite matrix (α -Fe) of coatings alloyed by tungsten the dispersion-reinforcing phases are double carbides and Fe_3W_3C u Fe_6W_6C , as well as initial tungsten and niobium carbides. In the coating obtained from a wire with the addition of 0.5% of nanopowder NbC the hardness of coating increases up to 700 MPa.

Keywords: plasma arc spraying; cored wire; carbide filler; nanocrystalline additive; structure; phase transformations; microhardness.

References

- [1] Borisov Yu.S. Thermal coatings from powder materials: handbook / Yuriy Borisov, Yu. A. Kharlamov, S.L. Sidorenko, E.N. Ardatovsky. — K.: Science. Dumka. — 1987. — 544 p.
- [2] Kunitsky Yu.A. Non-crystalline metallic materials and coatings in engineering / Y.A. Kunitsky, V.N. Korzhyk, Yuriy Borisov. — K.: Technology, 1988. — 297 p.
- [3] Petrov S.V.-gas spraying Plasma / S.V. Petrov, I. Carp. — K.: Science. Dumka, 1993. — 499 p.

- [4] Petrov S.V. Plasma combustion products in surface engineering / S.V. Petrov, A.G. Saks. – K.: TOPAS, 2000. – 220 p.
- [5] Wielage B. Thermisches Spritzen – Potenziale, Entwicklungen, Maerkte / B. Wielage, K. Bobzin, C. Rupprecht, M. Brahl // Thermal Spray: DVS «Verlag», 2008. – Bul. 1. – S. 30–36.
- [6] Wielage B. Features of thermal spray coatings cored wires (Review) / B. Wielage, C. Rupprecht, A. Pohmurskaya // Automatic welding – 2011. – No. 10. – P. 26-30.
- [7] Yu. Kharlamov. Heating and melting of the wire-anode in plasma-arc spraying / M. Yu Kharlamov, I.V. Krivtsun, V.N. Korzhyk et al. // Ibid. – 2011. – No 5. – P. 5-11.
- [8] Yu. Kharlamov. Formation of the liquid metal film on the anode end of the wire in plasma-arc spraying / M. Yu. Kharlamov, I.V. Krivtsun, V.N. Korzhyk, S.V. Petrov // Ibid. – 2011. – No. 12. – P. 3-18.
- [9] Borisov S. Investigation of the structure and properties of WC-Co-Cr system thermal spray coatings obtained by spraying high-speed / Yuri Borisov, E.A. Astakhov, A.P. Murashov et al. // Ibid. – 2015. –No. 10. – P. 26-29.
- [10] Grigorenko G.M. Features of metallurgical processes in plasma-arc spraying coatings produced from steel wire with powder fillers WC and WC-Co / G.M. Grigorenko, L.I. Adeeva, A. Yu. Tunick and others. // Modern electrometallurgy. – 2015. –No. 4. – P. 14-24.
- [11] Katz N.V. Sputtering. – M.: Engineering, 1966. – 200 p.
- [12] Royan V.A. Defects, inspection and quality control during welding and related technologies: textbook (4th ed.) / V.A. Royan, V.Yu. Zusin, S.S. Samotugin, I.V. Zakharova. – Mariupol: Perm State Technical University, 2014. – 390 p.
- [13] Korobov S. Improvement coating technology for aluminum alloys on the basis of mathematical modeling of electric arc metallization process: the author's abstract dis. ... Cand. tehn. Sciences: 05.03.06. – Sverdlovsk: Ural Polytechnic Institute tute, 1981. – 23 p.
- [14] Krasnov A.N. Low temperature plasma metallurgy / A.N. Krasnov, S. Yu. Sharivker, V.G. Silberberg. – M.: Metallurgy, 1970. – 216 p.
- [15] Petrunichev V.A. Mechanism of plasma spray wire / V.A. Petrunichev, V.V. Titkov // Physics and chemistry of metal processing. – 1977. – No. 1. -P. 14-16.
- [16] Kudinov V.V. Plasma coating / hole. Ed. Acad. N.N. Rykalin. – M.: Nauka, 1977. – 184 p.
- [17] Kudinov V.V. Coating by spraying. Theory, technology and equipment: Ouch. for schools / V.V. Kudinov, G. Bobrov; ed. prof. B.S. Mitin. – M.: Metallurgy, 1992. – 432 p.
- [18] A. Hasa. Spraying technique. – M.: Engineering, 1975. – 288 p.
- [19] A. Hasa. Surfacing and spraying / A. Hasa, O. Morigaki. – M.: Engineering, 1981. – 192 p.
- [20] E. Kretschmar. Spraying of metals, ceramics and plastics. – M.: Engineering, 1966. – 432 p.
- [21] Pokhodnya I.K. Production of cored wire / I.K. Pokhodnya, V.N. Shlepakov, V.F. Alter, etc. – K.: Vishcha school. – 1980. – 231 p.
- [22] Korzhyk V.N. Mechanized line «PLAZER 30PL-W» for plasma-arc wire spraying coatings / V.N. Korzhyk, M.F. Korob // Welder. – 2012. – No. 4 (86). – P. 13-16.
- [23] Golshmidt H.J. Alloys implementation / vol. 1; per. from English. – M.: Mir, 1974. – 424 p.