

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ПЛАЗМЕННОЙ ПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С КАРБИДНОЙ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ФАЗОЙ

© 2025 С.С. Жаткин, Е.А. Минаков

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 09.09.2025

Работа посвящена исследованию влияния тока плазменной дуги на структуру и свойства покрытий из композиционных материалов Micro-Melt NT-60 фирмы Carpenter и WOKA PTA-6040, полученных при плазменной порошковой наплавке. Установлены закономерности изменения износостойкости в зависимости от режимов наплавки, состава и исходной дисперсности наплавляемых материалов. Показано, что с ростом тока плазменной дуги от 70 до 100 А в процессе наплавки происходит седиментация карбидов к границе сплавления покрытия с подложкой. При этом наиболее выраженная седиментация карбидов наблюдается в наплавленном WOKA PTA-6040 из-за большего размера карбидов и их веса. Выраженная седиментация карбидов в WOKA PTA-6040 коррелирует с неравномерным износом наплавленного слоя по его высоте. Кроме того, испытания на абразивный износ показали, что износостойкость наплавленного покрытия на основе WOKA PTA-6040 выше, чем покрытия из Micro-Melt NT-60 за счет более высокой твердости карбидов.

Ключевые слова: композиционные материалы, плазменная наплавка, износостойкость, порошковые материалы, седиментация, режимы наплавки.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3(2)-261-268

EDN: RAYTQI

ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование и развитие современной техники требует создания материалов, обладающих качественно новым комплексом эксплуатационных свойств. В частности, новыми материалами, отвечающими современным требованиям, являются композиционные материалы (КМ), свойства которых могут заранее проектироваться под определенную задачу [1,2].

Особый интерес имеет получение наплавленных покрытий из КМ на деталях, работающих в условиях трения. Применение покрытий из КМ на рабочих поверхностях трибосопряжений позволит повысить ресурс работы деталей во фрикционном контакте. Однако анализ источников, посвященных данной проблеме, показал, что работы в области наплавки покрытий из КМ представлены незначительно. Это может быть связано с ограничением имеющихся присадочных материалов для наплавки, а также тем, что определение свариваемости исследуемых КМ еще находится на стадии накопления экспериментальных данных [1]. Тем не менее, имеющиеся публикации указывают на перспективность применения композиционных материалов при наплавке для повышения износостойкости.

В частности, автором работы [1] показано, что КМ системы Al-SiC при испытании на трение и износ дают весьма высокие результаты по износостойкости. Введение в алюминиевые сплавы армирующих частиц микронных размеров с резко отличной от матрицы твердостью не только повышает износостойкость сплавов, но и вследствие возросшей гетерогенности может расширить область существования во фрикционном контакте так называемых вторичных структур, обеспечивающих нормальное протекание процессов трения и износа в широком диапазоне параметров нагружения. Такие КМ обладают высокой износостойкостью и низкими значениями коэффициентов трения.

Авторами [2] исследован процесс аргодуговой наплавки износостойких покрытий с применением присадочных композиционных прутков на основе литейных алюминиевых сплавов, армированных частицами SiC со средним размером 14 мкм. Наплавленные композиционные слои характеризуются однородным распределением частиц SiC и по своим механическим и трибологическим свойствам не уступают литым композиционным сплавам.

В связи с возрастающими требованиями к композиционным материалам ведутся работы по совершенствованию составов материалов и технологических процессов их производства. Среди КМ находят широкое применение карбидостали (содержание карбидов от 20 до 70%), которые обладают высокими показателями твердости и износостойкости, имея в основе стальную матрицу. Введение

Жаткин Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры литейных и высокоэффективных технологий,
E-mail: laser@samgtu.ru

Минаков Евгений Александрович, ассистент кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии».
E-mail: goodspik@narod.ru

большого количества карбидной фазы приводит к потере пластичности материала, что не позволяет использовать его в условиях динамических нагрузок, а при малых количествах TiC образующейся жидкой фазы при спекании недостаточно для ликвидации остаточной пористости [3].

Отмечено, что при получении композиционных материалов методом лазерного плавления рост прочностных характеристик материалов осуществляется за счет механизмов дисперсного упрочнения и дисперсионного твердения, поэтому в качестве матричного материала была выбрана мартенситностареющая сталь СПН14А7М5. Она рекомендована для изготовления высоконапряженных конструкций, для экструзионных прессов и штампов, специальных ответственных механизмов и валов, для держателей штампов, высокопрочных шасси вертолетов и др. Легирование стали карбидом титана (от 0 до 30%) приводит к повышению твердости и износостойкости за счет дисперсного упрочнения материала [3].

Карбидосодержащие композиты используются для повышения износостойкости и эффективности работы шарошечных буровых долот, в значительной степени зависящей от надежности защиты козырька лап, стойкости опоры подшипника и зубчатых венцов.

В частности, в буровых долотах ресурс их эксплуатации во многом определяется износостойкостью зубцов, для повышения которой часто используется наплавка твердыми и сверхтвердыми сплавами из порошковых и прутковых материалов. Так по результатам исследований и испытаний образцов, полученных ацетиленокислородной наплавкой карбидосодержащего гибкого прутка 60WC 40Ni (60% карбида вольфрама и 40% никеля с добавками хрома, кремния) и порошка материала 80WC20Ni (80% карбида вольфрама и 20% никеля с добавками хрома, кремния) установлено, что на процесс износа влияет размер и форма карбидов [4]. Показано, что структура с крупными глобулярными карбидами обладает большей износостойкостью и минимальным разбросом значений микротвердости. При наплавке с применением карбидосодержащего порошка на наплавленный гибкий пруток поверхность валика формируется бездефектной, более равномерной и однородной.

Повышение механических свойств суперсплавов является неотъемлемой частью изготовления деталей, работающих в условиях высоких температур. Помимо комплексной термической обработки, способствующей образованию интерметаллических соединений в матрице, одним из путей решения данного вопроса может быть создание металломатричных композитов (ММК) на основе суперсплавов. Так в работе [5] технологией струйного нанесения связующего BJ (Binder Jetting) были изготовлены ММК путем добавления 1 масс.% TiC в матрицу из суперсплава Inconel 718 микронного и наноразмерного диапазона. Установлено, что введение в матрицу из Inconel 718 1 масс.% микро-TiC позволило значительно повысить его механические свойства, чего нельзя сказать о добавлении 1 масс.% нано-TiC, частицы которого равномерно располагались на поверхностях частиц порошка Inconel 718, что приводило к плохому спеканию и, в результате, низким механическим свойствам [5].

Помимо влияния условий эксплуатации, сопротивление износу сильно зависит от микроструктурных параметров металлической матрицы и карбидов. Матрица ответственна за способность удерживать частицы твердых карбидов, упрочняться в процессе эксплуатации за счет субструктурных и фазовых превращений. Последнее особенно важно, поскольку позволяет релаксировать напряжения и, следовательно, сдерживать образование и развитие микротрещин, и передавать нагрузку на карбидные частицы. К микроструктурным параметрам карбидов относятся тип, морфология, объемная доля и распределение [6].

Большую роль в уменьшении износа отводят карбиду ванадия. Независимо от класса сталей введение ванадия в несколько раз уменьшает износ. Увеличение в быстрорежущих сталях содержания углерода, позволяющее перейти от пластинчатых к равноосным карбидам ванадия, или одновременно увеличение содержания углерода и ванадия [6].

Установлено, что при плазменно-порошковой наплавке порошком ПР-Х18ФНМ в интервале токов 220...260 А с ростом скорости подачи порошка фактор формы частиц VC растет по линейному закону и при расходе более 1,5 кг/ч они становятся равноосными ($f > 0,7$). При наплавке покрытий токами 160...200 А частицы VC в них описываются средним фактором формы больше 0,74 уже при минимальном расходе порошка. При этом удлинённые частицы в основном располагаются по границам аустенитных зерен, а равноосные – в теле зерен и эвтектике.

Плазменная порошковая наплавка позволяет формировать мультимодальное распределение упрочняющей фазы по размерам в объеме упрочненного слоя: микронные и субмикронные размеры частиц карбида ванадия в аустенитной матрице и эвтектические карбиды типа Cr_7C_3 , что обеспечивает равномерность их распределения по объему [6].

Таким образом, применение среди наплавочных материалов композиционных материалов с карбидной упрочняющей фазой обеспечивает высокие значения абразивной износостойкости, твердости и других свойств. Уровень износостойкости таких композитов определяется не только физико-механическими свойствами металлической связки и карбидной фазы, но также дисперсностью, объемным содержанием и распределением карбидов в наплавленном материале. При этом

их объемное распределение может непосредственно влиять на скорость износа в различных зонах наплавки. Целью данной работы является исследование влияния режимов плазменной наплавки на размеры и распределение карбидов, а также износостойкость наплавленных порошковых материалов *WOKA 6040* и *Micro-Melt NT-60*.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Наплавка осуществлялась на долотную сталь 19ХГНМА. Химический состав наплавляемых материалов приведен в табл. 1-2.

Таблица 1. Химический состав CARPENTER Micro-Melt NT-60

Наименование материала	Содержание, % по массе						Карбид вольфрама
	Co	Ni	C	Cr	V	Mo	
<i>Micro-Melt NT-60</i>	0,5	35 (основа)	1,6-2,9	0,35	0,45	0,8	60

Таблица 2. Химический состав WOKA PTA-6040

Наименование материала	Содержание, % по массе						Карбид вольфрама
	Co	Ni	C	Cr	V	Si	
<i>WOKA PTA-6040</i>	2,2	30 (основа)	3,5-5,3	1,5	0,45	0,6	60

Плазменная наплавка порошков *WOKA PTA-6040* и *Micro-Melt NT-60* фирмы CARPENTER была произведена на автоматической плазменной установке *ARC-06B*. Наплавка проводилась сканирующей дугой на вращающийся образец из стали 19ХГНМА с угловой скоростью 220°/мин. Диаметр сопла плазматрона составлял 2,4 мм, а расстояние от сопла до поверхности наплавки 9 мм. В экспериментах изменялся ток дуги от 70 до 100А при неизменной частоте сканирования и расходе порошка.

Исследование микроструктуры зон плазменной наплавки проводился на растровом электронном микроскопе *JSM-6390LV/LGS* фирмы JEOL, а анализ размеров карбидов в программе СИАМС 700.

Испытания на абразивный износ были проведены на установке Универсал -1А собранной на базе сверлильного станка СС-13/350, обеспечивающей через систему датчиков и средств регистрации непрерывный контроль нормальной нагрузки, момента трения, температуры испытуемого образца [7,8]. Испытания проводились локально в нескольких участках зоны наплавки. На рис. 1 цифрами указаны четыре зоны локального трения при испытаниях. Кроме того, для наплавленного *WOKA PTA-6040* дополнительно проведены испытания в трёх слоях наплавленного валика (верх, средняя зона и зона сплавления) после послойного шлифования. Материал контртела – трубка из стали 40Х (закалка до HRC 46-48) с внешним диаметром 6 мм и толщиной стенки 1 мм. Испытания проводились при нормальной нагрузке в 45 кгс в течение 10 минут с частотой вращения шпинделя 600 об/мин. При испытаниях использовалась алмазная паста АСМ-3/2-НОМГ, соответственно износ образца осуществлялся алмазным порошком дисперсностью 2-3 мкм. Площадь трения составляла $1,57 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$.

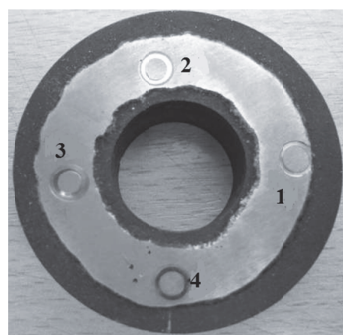


Рис. 1. Расположение зон трения:
1 – начало наплавки; 4 – конец наплавки

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для выявления и сравнения общей структуры образцов после наплавки на растровом электронном микроскопе были сделаны фотографии общего вида зон плазменной наплавки, представленные на рис. 2.

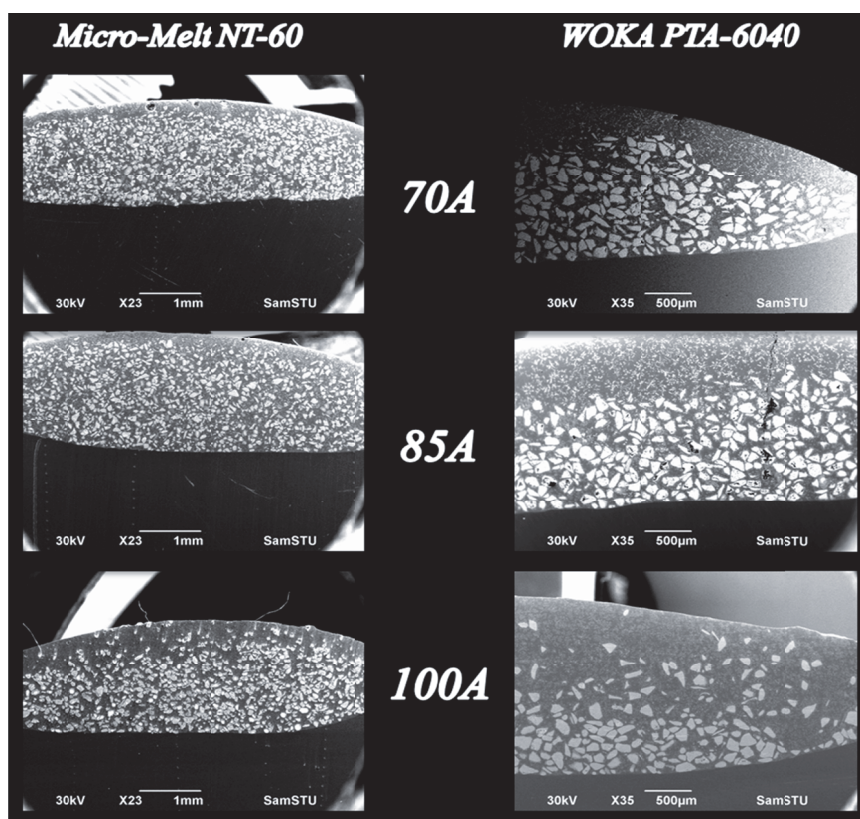


Рис. 2. Зоны наплавки материалов *WOKA PTA-6040* и *Micro-Melt NT-60* в зависимости от тока плазменной дуги

Наблюдается уменьшение карбидной фазы в верхних слоях наплавленных валиков, что особенно заметно для наплавленного *WOKA PTA-6040*. При увеличении тока плазменной дуги до 85 - 100А область, обедненная карбидами, увеличивается, т. е. происходит их растворение, распад и осаждение на большую глубину (рис. 2). Видно также, что распределение карбидов в наплавленном материале *Micro-Melt NT-60* меняется слабо по сравнению с *WOKA PTA-6040*.

Процесс растворения и распада карбидов происходит более интенсивно при повышенных токах дуги 85 и 100 А (рис. 3). Наиболее интенсивно распадаются карбиды в наплавленном *Micro-Melt NT-60* (рис. 3,б).

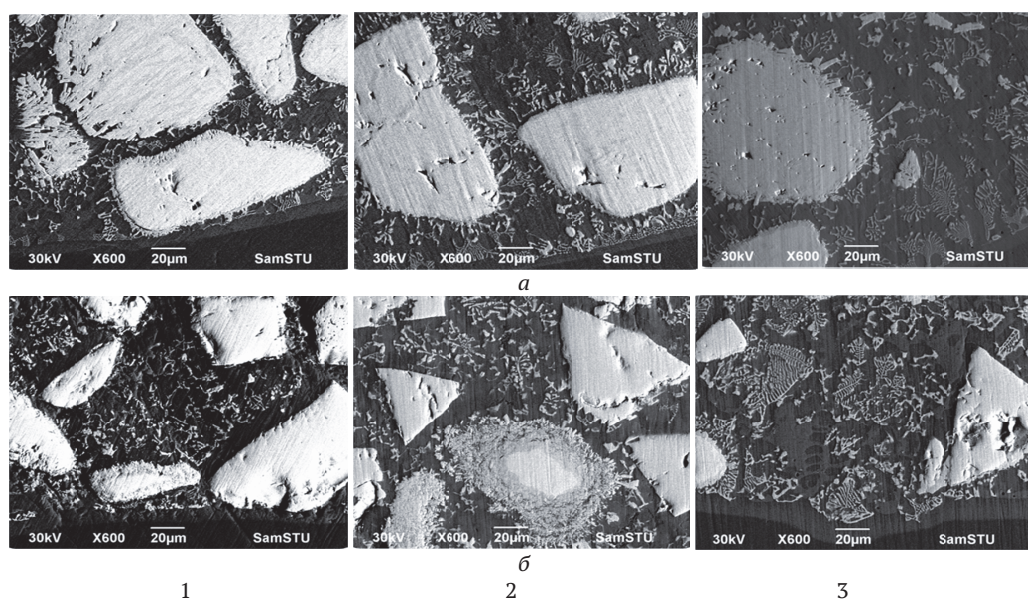


Рис. 3. Микроструктура в зоне плазменной наплавки в зависимости от тока дуги:
а – зоны наплавки *WOKA PTA-6040*; б - зоны наплавки *Micro-Melt NT-60*;
1 – 70А; 2 – 85А; 3 – 100А

Результаты измерений размеров карбидов в наплавленных материалах, проведенных в программе СИАМС 700, представлены на гистограммах (рис. 4, 5). Из представленных данных для наплавленного *WOKA PTA-6040* видно, что при токе плазменной дуги 70 А в зоне наплавки наблюдаются карбиды размерами как менее 100 мкм, так и значительная доля крупных карбидов размерами от 100 до 400 мкм. Повышение тока плазменной дуги до 85 А уменьшает процентное содержание крупных карбидов (250 – 400 мкм), то есть происходит их распад и растворение в связующем никеле и преобладают карбиды размерами до 100-250 мкм. Дальнейшее повышение тока плазменной дуги до 100 А вызывает измельчение карбидов размером 200 – 250 мкм.

Анализ показал, что средний размер карбидов *WOKA PTA-6040* при возрастании тока дуги от 70 до 100 А падает от 170 мкм до 120 мкм (табл. 3).

В то же время в наплавленном *Micro-Melt NT-60* максимальные размеры карбидов, которые присутствуют в незначительном количестве, не превышают 100-200 мкм при всех токах дуги (рис. 5), а их средний размер слабо зависит от тока дуги и составляет 70-80 мкм (табл. 3).

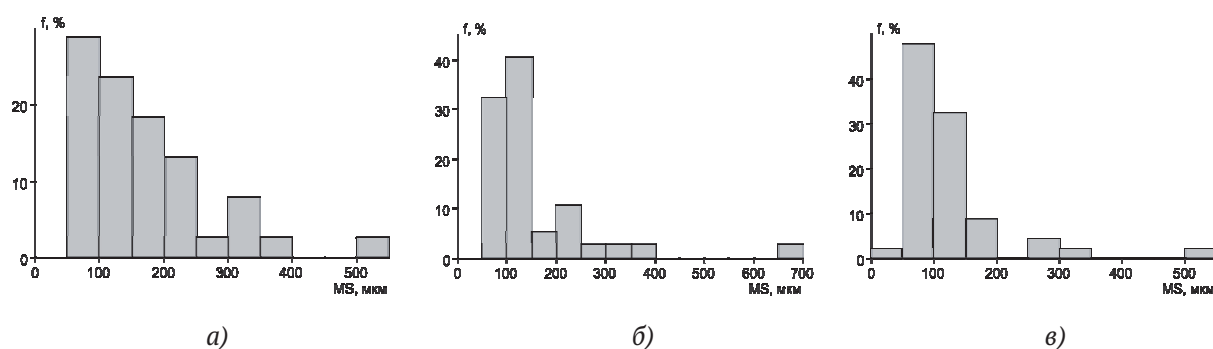


Рис. 4. Распределение карбидов по размерам в наплавленном материале *WOKA PTA-6040* в зависимости от тока плазменной дуги:
а – 70А; б – 85А; в – 100А

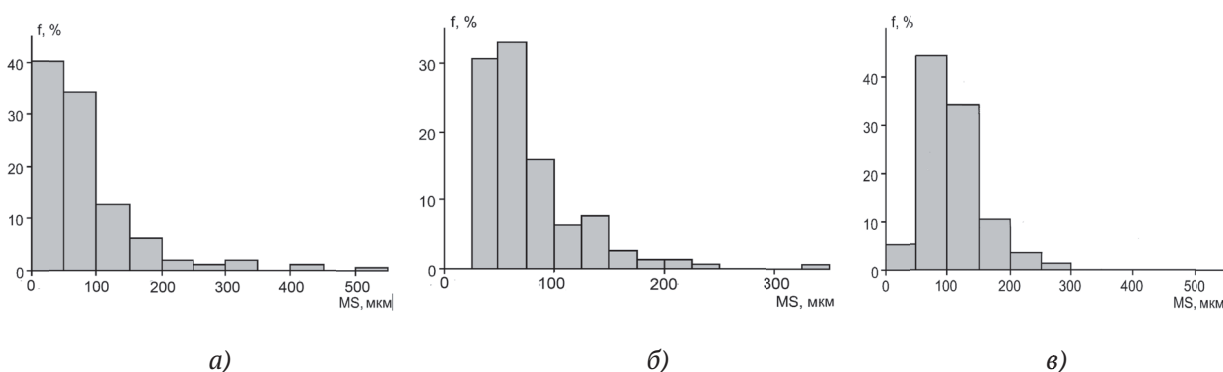


Рис. 5. Распределение карбидов по размерам в наплавленном материале *Micro-Melt NT-60* в зависимости от тока плазменной дуги:
а – 70А; б – 85А; в – 100А

Таблица 3. Средний размер карбидов в наплавленных материалах в зависимости от тока плазменной дуги

Материал наплавки	<i>WOKA PTA-6040</i>			<i>Micro-Melt NT-60</i>		
Ток дуги, А	70	85	100	70	85	100
Средний размер карбидов, мкм	170	155	120	80	80	70

Помимо растворения и распада карбидов с ростом тока плазменной дуги наблюдается их седиментация, что наиболее заметно в наплавленном *WOKA PTA-6040* из-за более крупных карбидов. Процесс седиментации подтверждается данными испытаний на локальный износ по высоте от верха зоны наплавки (табл. 4). Испытания проводились послойно на разной глубине – 500 мкм, 1000 мкм и 1900 мкм - от поверхности наплавки.

Таблица 4. Величина износа WOKA PTA-6040 по высоте зоны наплавки

Ток дуги, А	Верх зоны наплавки (отступ 500мкм)		Середина зоны наплавки (отступ 1000 мкм)		Низ зоны наплавки (отступ 1900мкм)	
	Средняя величина износа, мкм	Скорость износа мкм/час	Средняя величина износа мкм	Скорость износа мкм/час	Средняя величина износа, мкм	Скорость износа мкм/час
70	25	152	20	120	22	134
85	31	185	21	128	20	119
100	35	207	27	159	17	102

Видно, что при токе 70 А величина износа практически не меняется по глубине наплавленного материала. При токе плазменной дуги 85 А средняя величина износа на глубине 0,5 мм выше, чем при токе дуги 70 А, обусловленная распадом и седиментацией карбидов. Наличие карбидов на глубине 1 мм и 1,8-1,9 мм определяет и меньшую величину износа наплавленного материала. В то же время при токе 100 А средняя величина износа возросла на глубине 0,5 мм и 1 мм, а на глубине 1,8-1,9 мм даже несколько снизилась по сравнению с токами плазменной дуги 70 А и 85 А.

Растворение и распад карбидов при повышенных токах дуги приводит к снижению износостойкости верхних слоев наплавки. При токах 85А и 100 А в верхней части наплавленного валика износ максимальный. В процессе наплавки в верхней части валика температура нагрева максимальна и распад карбидов здесь наибольший. Процесс седиментации при повышенных токах также обедняет верхние слои зоны наплавки, из-за снижения вязкости расплава. Поэтому нижние слои наплавленного материала (ближе к подложке) наиболее обогащены крупными карбидами (рис. 2), что обуславливает минимальный износ в данных областях.

Таким образом, проведенные испытания на абразивный износ показали, что наиболее интенсивному износу подвергается верхняя зона наплавленного валика, где практически отсутствует карбидная фаза из-за растворения и распада. С увеличением глубины зоны наплавки возрастает концентрация карбидов вольфрама и соответственно уменьшается величина износа.

Сравнительная характеристика средней величины износа наплавленных материалов представлена в табл. 5.

Таблица 5. Сравнительная характеристика износостойкости WOKA PTA-6040 и Micro-Melt NT-60

Глубина шлифа под зону износа 1000мкм						
Материал	Ток дуги 70А		Ток дуги 85А		Ток дуги 100А	
	Средняя величина износа, мкм	Скорость износа, мкм\час	Средняя величина износа, мкм	Скорость износа, мкм\час	Средняя величина износа, мкм	Скорость износа, мкм\час
WOKA PTA-6040	20	120	21	128	27	159
Micro-Melt NT-60	26	156	38	228	40	240

В обоих случаях с увеличением тока дуги средняя величина износа возрастает, но наиболее сильно это наблюдается для наплавленного покрытия *Micro-Melt NT-60*. Повышенный износ последнего может быть обусловлен не только меньшим размером карбидов, но и их твердостью. По результатам измерения микротвердости установлено, что твердость карбидов в наплавленном WOKA PTA-6040 достигает 2000-2400 кгс/мм², в то время как в *Micro-Melt NT-60* ее величина не превышает 800 – 1200 кгс/мм². При этом за счет растворения карбидов твердость связи в WOKA PTA-6040 составляет 700-900 кгс/мм², а в *Micro-Melt NT-60* 400-500 кгс/мм², что соизмеримо с твердостью стальной подложки в зоне сплавления.

ВЫВОДЫ

На основе проведенных исследований по плазменной порошковой наплавке композиционных покрытий WOKA PTA-6040 и *Micro-Melt NT-60* фирмы CARPENTER установлено:

С увеличением тока плазменной дуги от 70 А до 100А наблюдается растворение и распад карбидов в наплавленных валиках. При этом средний размер карбидов наплавленного WOKA PTA-6040 уменьшается от 170 до 120 мкм, а в материале *Micro-Melt NT-60* – от 80 до 70 мкм.

В заданном диапазоне токов плазменной дуги в процессе наплавки происходит седиментация карбидов к границе сплавления покрытия с подложкой. При этом наиболее выраженная седиментация наблюдается в наплавленном WOKA PTA-6040 при токах дуги 85 и 100А из-за перегрева расплава и снижения его вязкости, а также большего размера карбидов и их веса.

Распад первичных карбидов в верхних слоях наплавленного валика и их седиментация вглубь к зоне сплавления с подложкой при повышении тока дуги вызывает неравномерный износ наплавленного слоя по его высоте. При этом послойные испытания на абразивный износ показали, что меньшему износу подвержены нижние слои наплавленного валика с наиболее высокой концентрацией карбидов в них.

Испытания на абразивный износ показали, что износостойкость наплавленного покрытия на основе WOKA PTA-6040 выше, чем покрытия из *Micro-Melt NT-60* за счет более высокой твердости карбидов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коберник Н.В. Разработка технологических основ дуговой наплавки износостойких покрытий из композиционных материалов системы Al-SiC: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н.В. Коберник. – М., 2008. 17 с.
2. Коберник Н.В. Аргонодуговая наплавка износостойких композиционных покрытий / Н.В. Коберник, Г.Г. Чернышов, Р.С. Михеев, Т.А. Чернышова, Л.И. Кобелева // Физика и химия обработки материалов. – 2009. – № 1. – С. 51-55.
3. Маранц А. В. Разработка и исследование процессов лазерной обработки композиционных материалов сталь СПН14А7М5-TiC: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2013. – 28 с.
4. Паркин А.А. Структура и износостойкость многослойного карбидосодержащего покрытия после ацетиленокислородной наплавки/ А.А. Паркин, С.С. Жаткин, Е.А. Минаков, А.Б. Семин// Известия МГТУ «МАМИ». – 2014. – Т. 2. – № 4(22). – С.34-43.
5. Борисов, А. Н. Исследование влияния размера частиц TiC на микроструктуру и механические свойства композиционного материала Inconel 718 / TiC, изготовленного с применением аддитивной технологии струйного нанесения связующего / А.Н. Борисов, В.Ш. Суфияров // Сборник тезисов докладов Международной научной конференции «Современные материалы, передовые производственные технологии и оборудование для них (СМПТО-2023)» – СПб, 2023. – С.11-13.
6. Гнусов, С.Ф. Влияние режимов плазменной наплавки на микроструктуру карбида ванадия в покрытиях на основе порошка ПР-Х18ФНМ / С.Ф. Гнусов А.С. Дегтерёв // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 2. – С. 63-71.
7. Ибатуллин, И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: Монография // И.Д. Ибатуллин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. – 387 с.
8. Ибатуллин, И.Д. Новые методы и приборы для экспрессной оценки энергетических параметров усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: дисс. ... докт. техн. наук / И.Д. Ибатуллин. – Самара, 2010. – 225 с.

INFLUENCE OF PLASMA POWDER SURFACING MODES ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS WITH A CARBIDE HARDENING PHASE

© 2025 S.S. Zhatkin, E.A. Minakov

Samara State Technical University, Samara, Russia

The work is devoted to the study of the influence of plasma arc current on the structure and properties of coatings made of composite materials Micro-Melt NT-60 from Carpenter and WOKA PTA-6040, obtained by plasma powder surfacing. Regularities of wear resistance changes depending on surfacing modes, composition and initial dispersion of surfacing materials are established. It is shown that with an increase in the plasma arc current from 70 to 100 A during surfacing, sedimentation of carbides occurs to the fusion boundary of the coating with the substrate. In this case, the most pronounced sedimentation of carbides is observed in the surfacing WOKA PTA-6040 due to the larger size of the carbides and their weight. Pronounced sedimentation of carbides in WOKA PTA-6040 correlates with uneven wear of the surfacing layer along its height. In addition, abrasion tests have shown that the wear resistance of the deposited coating based on WOKA PTA-6040 is higher than that of the coating based on Micro-Melt NT-60 due to the higher hardness of the carbides.

Key words: composite materials, plasma surfacing, wear resistance, powder materials, sedimentation, surfacing modes.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3(2)-261-268

EDN: RAYTQI

REFERENCES

1. *Kobernik N.V.* Razrabotka tekhnologicheskikh osnov dugovoy naplavki iznosostojkih pokrytij iz kompozicionnykh materialov sistemy Al-SiC: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk / N.V. Kobernik. – M., 2008. 17 s.
2. *Kobernik N.V.* Argonodugovaya naplavka iznosostojkih kompozicionnykh pokrytij / N.V. Kobernik, G.G. Chernyshov, R.S. Miheev, T.A. Chernyshova, L.I. Kobeleva // Fizika i himiya obrabotki materialov. – 2009. – № 1. – S. 51-55.
3. *Maranc A.V.* Razrabotka i issledovanie processov lazernoj obrabotki kompozicionnykh materialov stal' SPN14A7M5-TiC: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. – M., 2013. – 28 s.
4. *Parkin A.A.* Struktura i iznosostojkost' mnogoslojnogo karbidosoderzhashchego po-krytiya posle acetilenokislorodnoj naplavki/ A.A. Parkin, S.S. Zhatkin, E.A. Minakov, A.B. Semin// Izvestiya MGTU «MAMI». – 2014. – T. 2. – № 4(22). – S.34-43.
5. *Borisov, A. N.* Issledovanie vliyaniya razmera chastic TiS na mikrostrukturu i mekha-nicheskie svoystva kompozicionnogo materiala Inconel 718 / TiC, izgotovlennogo s primeneniem additivnoj tekhnologii strujnogo nanoseniya svyazuyushchego / A.N. Borisov, V.Sh. Sufiyarov // Sbornik tezisov dokladov Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Sovremennye materialy, peredovye proizvodstvennye tekhnologii i oborudovanie dlya nih (SMPPTO-2023)» – SPb, 2023. – S.11-13.
6. *Gnyusov, S.F.* Vliyanie rezhimov plazmennoj naplavki na mikrostrukturu karbida vanadiya v pokrytiyah na osnove poroshka PR-H18FNM / S.F. Gnyusov A.S. Degteryov // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. – 2014. – T. 324. – № 2. – S. 63-71.
7. *Ibatullin, I.D.* Kinetika ustalostnoj povrezhdaemosti i razrusheniya poverhnostnykh sloev: Monografiya // I.D. Ibatullin. – Samara: Samar. gos. tekhn. un-t, 2008. – 387 s.
8. *Ibatullin, I.D.* Novye metody i pribory dlya ekspressnoj ocenki energeticheskikh parametrov ustalostnoj povrezhdaemosti i razrusheniya poverhnostnykh sloev: diss. ... dokt. tekhn. nauk / I.D. Ibatullin. – Samara, 2010. – 225 s.

Sergey Zhatkin, Candidate of Technological Sciences, Associate Professor at the Department of Founding and High-Performance Processes. E-mail: laser@samgtu.ru

Evgeny Minakov, Assistant at the Department of Founding and High-Performance Processes. E-mail: goodspik@narod.ru