

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЛЕКСНО-ЛЕГИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ТЕРМОЦЕНТРОБЕЖНОГО РАСПЫЛЕНИЯ, В ПОРОШКОВЫХ ПРОВОЛОКАХ

А. П. ЖУДРА, С. Ю. КРИВЧИКОВ, В. И. ДЗЫКОВИЧ

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В настоящей статье представлены результаты оценки влияния комплексно-легированных порошков (КЛП) на сварочно-технологические свойства порошковых проволок и служебные характеристики наплавленного металла. Рассмотрена возможность обеспечения высокой степени легирования порошковой проволоки при уменьшении ее диаметра. Определены триботехнические характеристики металла, наплавленного порошковыми проволоками с использованием в качестве наполнителя комплексно-легированных порошков. Представлены результаты металлографических исследований наплавленного металла. Установлено, что использование КЛП в качестве сердечника порошковых проволок оказывает положительное влияние на характер плавления и переноса электродного металла, что приводит к улучшению их сварочно-технологических характеристик. Исследования наплавленного металла на износостойкость показали повышение износостойкости наплавленного металла, работающего в условиях абразивного изнашивания и трения металла по металлу. Библиогр. 4, табл. 5, рис. 3.

Ключевые слова: порошковая проволока, термоцентробежное распыление слитков, комплексно-легированные порошки, сварочно-технологические характеристики порошковой проволоки, триботехнические характеристики наплавленного металла

Порошковые проволоки, производимые по ГОСТ 26101–84, имеют сердечник, в котором легирующая часть состоит из дробленых ферросплавов и порошков металлов. Для обеспечения высокой степени легирования, как правило, возникает необходимость применения больших (40...50 %) значений коэффициента заполнения. Это, в свою очередь, приводит к увеличению диаметра порошковой проволоки до 3,2 мм и более. Для стабильного процесса наплавки такой порошковой проволокой требуется значительный ток (400...500 А) и напряжение дуги (28...32 В), что для некоторых типов восстанавливаемых деталей, чувствительных к воздействию высоких температур, склонных к термической деформации и т. п., является нецелесообразным или недопустимым (в таких случаях использование порошковых проволок большого диаметра приводит к значительным энергозатратам). Таким образом, решение задачи уменьшения диаметра порошковой проволоки при сохранении требуемого уровня ее легирования представляет практический интерес.

В ИЭС им. Е. О. Патона разработан технологический процесс получения комплексно-легированных порошков (КЛП), который заключается в выплавке из смеси ферросплавов и других легирующих материалов слитка цилиндрической формы требуемого химического состава и его последую-

щем плазменно-дуговым термоцентробежным распылением на режимах, обеспечивающих получение сферических частиц порошка необходимого гранулометрического состава. При этом химический состав каждой частицы должен соответствовать расчетному составу наплавочных электродных материалов: порошковых проволок, лент, присадочных прутков, штучных электродов и т. п.

Кроме того, сферическая форма частиц КЛП (рис. 1, б), в отличие от частиц неправильной формы (рис. 1, а), обеспечит более плотную компоновку сердечника и даст возможность уменьшить диаметр порошковой проволоки.

Вместе с тем замена механической смеси неоднородных по структуре, свойствам и химическому составу материалов сердечника на КЛП повлечет за собой изменения его электрических и теплофизических свойств. Это, в свою очередь, окажет влияние на сварочно-технологические характеристики порошковой проволоки и, возможно, на свойства наплавленного металла.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния КЛП на сварочно-технологические характеристики порошковых проволок и износостойкость наплавленного металла. Ранее [1] в ИЭС им. Е. О. Патона были выполнены исследования по применению в качестве сердечника порошковой проволоки ПП-Нп-25Х5ФМС гранулированного сплава соответству-

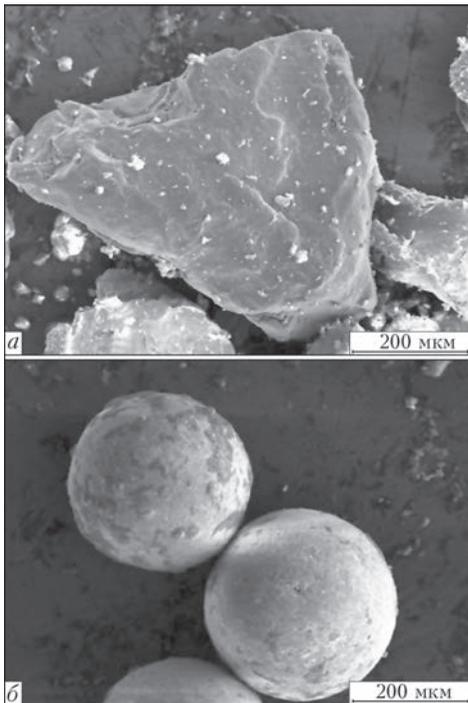


Рис. 1. Внешний вид дробленых частиц ферросплавов (а) и сферических гранул, полученных методом термоцентробежного распыления (б)

ющего состава. Основное внимание в этой работе было уделено повышению термостойкости наплавленного металла.

Нами в качестве объектов исследований были выбраны две порошковые проволоки другого типа: ПП-АН170 (ПП-Нп-80Х20РЗТ), применяющаяся для износостойкой наплавки деталей, работающих в условиях интенсивного абразивного и гидроабразивного изнашивания (зубья ковшей экскаваторов, козырьки драг и др.), и ПП-АН160 (ПП-Нп-200ХГР), используемая для износостойкой наплавки деталей, работающих в условиях трения металла по металлу со смазкой (чугунные коленчатые валы двигателей автомобилей).

Таблица 1. Химический состав КЛП для изготовления порошковых проволок

Тип порошковой проволоки	Содержание элементов, мас. %							
	C	Cr	Mn	Si	Ti	B	Al	Fe
ПП-АН170	3,0	50,0	4,0	4,0	1,5	8,0	-	-
ПП-АН160	19,0	5,0	9,0	13,0	5,0	1,0	2,0	Ост.

Таблица 2. Сварочно-технологические характеристики опытных порошковых проволок

Тип порошковой проволоки	Показатели сварочно-технологических параметров			Режимы наплавки и диаметры порошковых проволок		
	$\Psi_p, \%$	b/h	$K_v, \%$	I_{np}, A	U_d, B	$d_{п.п}, мм$
ПП-АН170	16,8	2,0	25,6	280...300	26...28	3,2
ПП-АН170СФ	9,2	4,3	18,5	220...240	22...24	2,6
ПП-АН160	7,4	4,5	9,4	170...180	21...22	1,8
ПП-АН160СФ	6,2	5,0	7,2	140...150	18...20	1,6

Для проведения сравнительных испытаний были изготовлены две пары порошковых проволок: первая — ПП-АН170 и ПП-АН170СФ, вторая — ПП-АН160 и ПП-АН160СФ. В каждой паре первая порошковая проволока изготовлена в соответствии с требованиями ГОСТ 26101–84, а вторая — с применением в качестве сердечника КЛП.

Химический состав КЛП, полученных методом термоцентробежного распыления на установке ОБ-2327 [2], приведен в табл. 1.

Режимы распыления опытных слитков

Сила тока, А	350...500
Напряжение на дуге, В	28...34
Скорость вращения, об/мин	3500...5000
Скорость подачи слитка, м/мин	1,0...1,5

Для оценки влияния КЛП на сварочно-технологические характеристики опытных порошковых проволок была проведена наплавка одиночных валиков на режиме: $I_n = 280...300 A$, $U_d = 26...28 B$, $v_n = 15,0$ м/ч для порошковых проволок ПП-АН170 и ПП-АН170СФ и $I_n = 170...180 A$, $U_d = 20...21 B$, $v_n = 7,7$ м/ч для порошковых проволок ПП-АН160 и ПП-АН160СФ. Род тока — постоянный, полярность — обратная.

В результате проведенных испытаний (табл. 2) установлено, что использование КЛП в качестве сердечника порошковых проволок повышает стабильность горения дуги (определялась величиной коэффициента вариации по напряжению дуги K_v : чем меньше величина K_v , тем стабильнее процесс горения дуги), снижает потери электродного металла от разбрызгивания Ψ_p и способствует улучшению качества формирования наплавленного металла b/h (оценивалось величиной отношения ширины b наплавленного валика к его высоте h : чем больше величина b/h , тем выше качество формирования). Сферическая форма частиц КЛП позволила уменьшить диаметр порошковых проволок $d_{п.п}$ и, тем самым, снизить минимально возможные значения тока и напряжения дуги, при которых процесс наплавки протекает стабильно. Положительное влияние КЛП на K_v , b/h и Ψ_p обусловлено благоприятным характером их плавления и переноса электродного металла: более равномерным плавлением сердечника и оболочки, уменьшением размера переходящих электродных капель, количества и длительности коротких замыканий дугового промежутка. Наиболее существенные изменения перечисленных параметров имеют место при использовании КЛП в качестве сердечника порошковой проволоки ПП-АН170.

Испытания на абразивную износостойкость металла, наплавленного порошковой проволокой, показали, что использование КЛП в качестве сердечника порошковой проволоки ПП-АН170 приводит к повышению износостойкости наплавленного металла.

Испытания на абразивную износостойкость металла, наплавленного порошковой проволокой, показали, что использование КЛП в качестве сердечника порошковой проволоки ПП-АН170 приводит к повышению износостойкости наплавленного металла.

Таблица 3. Химический состав наплавленного металла, мас. %

Тип порошковой проволоки	C	Cr	Si	Mn	Ti	Al	B
ПП-АН160	2,2	0,3	1,2	0,8	0,3	0,2	0,08
ПП-АН160СФ	2,0	0,5	0,8	0,6	0,3	0,1	0,10
ПП-АН170	1,1	18,5	0,7	0,8	0,3	-	2,6
ПП-АН170СФ	0,9	19,1	0,5	0,8	0,4	-	2,9

выми проволоками ПП-АН170 и ПП-АН170СФ, проводили на машине трения НКМ по схеме «неподвижное кольцо» при трении о незакрепленный абразив [3]. Образцы для испытаний размером 16×16×6 мм вырезали из третьего и четвертого слоя многослойной наплавки, проведенной на указанном выше режиме. Химический состав наплавленного металла приведен в табл. 3. Относительную износостойкость оценивали как отношение потери массы образца-эталоны (металл, наплавленный порошковой проволокой ПП-АН170) к потере массы образца, наплавленного порошковой проволокой ПП-АН170СФ. Полученные результаты представлены в табл. 4.

Результаты испытаний свидетельствуют о том, что использование КЛП в качестве сердечника порошковой проволоки ПП-АН170 приводит к повышению абразивной износостойкости наплавленного металла на 22...32 %. Сравнительный металлографический анализ структур наплавленного металла (рис. 2) показал, что КЛП не оказывает влияние на фазовый состав, но изменяет степень дисперсности и твердость структурных составляющих.

Так, для металла, наплавленного порошковой проволокой ПП-АН170СФ (рис. 2, б), характерно образование карбоборидов и эвтектики с большей степенью дисперсности, чем для металла, наплавленного порошковой проволокой ПП-АН170 (рис. 2, а). И в первом, и во втором случае твердость карбоборидов и эвтектики практически одинакова и составляет $HV_{1,0} = 14000...17000$ и $HV_{1,0} = 9200...14500$ соответственно. В то же время твердость матрицы металла, наплавленного порошковой проволокой ПП-АН170СФ, выше, и составляет $HV_{1,0} = 7200...8600$, тогда как для металла, наплавленного порошковой проволокой АН170 — $HV_{1,0} = 6500...7400$. По всей видимости, более высокая твердость матрицы наплавленного металла обуславливает и большую его абразивную износостойкость.

Определение триботехнических параметров металлов, наплавленных порошковыми проволоками ПП-АН160 и ПП-АН160СФ, проводили на машине трения СМТ-1 по схеме ролик-колодка в соответствии с ГОСТ 23224-86. Колодками служили сегменты из стандартных автомобильных вкладышей АО 20-1. Для изготовления ро-

Таблица 4. Результаты испытаний абразивной износостойкости металла, наплавленного порошковыми проволоками ПП-АН170 и ПП-АН170СФ

Марка образца	Масса образца, г		Износ, г	Относительная износостойкость
	до испытаний	после испытаний		
170-1	12,0436	11,9017	0,1419	1,00
170СФ-1	12,0003	11,8888	0,1115	1,27
170-2	12,4266	12,2736	0,1530	1,00
170СФ-2	11,6245	11,4991	0,1254	1,22
170-3	12,1111	11,9717	0,1394	1,00
170СФ-3	12,2234	12,1176	0,1058	1,32

ликов использовали заготовки из чугуна ВЧ 50-2, цилиндрическую поверхность которых наплавливали опытными порошковыми проволоками на указанных выше режимах, а затем шлифовали до номинальных размеров: толщина 12 мм, диаметр 50 мм. Химический состав испытуемых наплавленных металлов приведен в табл. 3.

Испытания пар трения-скольжения со смазкой проводили в два этапа: в режиме приработки и при рабочей нагрузке. Значение оптимальной рабочей нагрузки $P_{оп}$ выбирали на основании предварительных экспериментов, показавших, что ее превышение может привести к «заеданию» сопряжения наплавленный металл-вкладыш. Суммарную интенсивность изнашивания сопряжения в целом I_{Σ} определяли как сумму интенсивностей изнашивания вкладыша I_k и ролика I_p . Методика определения этих величин приведена в ГОСТ 23.224-86. Кроме того, в процессе испытаний проводили запись изменения коэффициента тре-

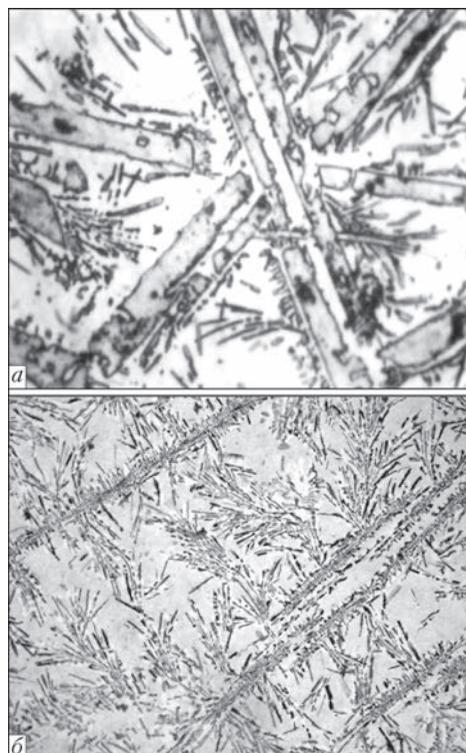


Рис. 2. Структура (×500) металла, наплавленного порошковой проволокой: а — ПП-АН170; б — ПП-АН170СФ

Таблица 5. Триботехнические характеристики пар трения-скольжения

Номер сопряжения	Тип сопряжения и порошковой проволоки	Показатели работоспособности		Интенсивность изнашивания, мм/м · 10 ⁻⁴			$f_{тр} \cdot 10^{-2}$
		$P_{оп}$, МПа	$T_{тр}$, °С	I_p	I_k	I_{Σ}	
1	Наплавленный металл-вкладыш. Порошковая проволока ПП-АН160	11,0	72	0,24	0,26	0,5	45
2	Наплавленный металл-вкладыш. Порошковая проволока ПП-АН160-СФ	14,0	50	0,22	0,12	0,34	20

ния сопряжения $f_{тр}$ и температуры фрикционного разогрева масла $T_{тр}$.

Из полученных данных (табл. 5) следует, что износостойкость наплавленного металла сопряжений № 1 и 2 примерно одинакова. В то же время I_{Σ} сопряжения № 2 в 1,5 раза ниже, чем сопряжения № 1, что обусловлено меньшей величиной I_k сопряжения № 2. Исходя из этого, можно утверждать, что для двух сравниваемых сопряжений применение порошковой проволоки ПП-АН160СФ обеспечивает получение наплавленного металла с более высокими антифрикционными свойствами. Для выявления причин, оказывающих влияние на полученные результаты, провели металлографические исследования наплавленного металла сопряжений № 1 и 2. Следует отметить, что детальный анализ струк-

турно-фазового состояния многокомпонентного сплава, кристаллизация которого происходила в неравновесных условиях, весьма трудоемкая задача. Однако с достаточной степенью достоверности можно утверждать, что структура наплавленного металла (при использовании как порошковой проволоки ПП-АН160, так и ПП-АН160СФ) состоит из двух основных фаз: продуктов распада аустенита (перлит + остаточный аустенит) и карбидно-цементитной фазы (рис. 3). Последняя в плоскости шлифа имеет вид разветвленной армирующей сетки с разнотолщинными участками.

На фотоснимке микроструктуры эта фаза окрашена в белый цвет, а перлитно-аустенитная — в темный, что дало возможность провести оценку их количественного соотношения. В результате установлено, что наплавленный металл сопряжения № 1 содержит 40...46 % «белой» (карбидно-цементитной) фазы твердостью $HV0,5$ — 8000...8200. Твердость зерен твердого раствора составляет $HV0,5$ — 5000...5200. В наплавленном металле сопряжения № 2 доля карбидно-цементитной фазы составляет 28...33 %, а ее твердость остается такой же, что и в наплавленном металле сопряжения № 1. В то же время твердость перлита наплавленного металла сопряжения № 2 ($HV0,5$ — 5800...6200) существенно выше, чем у наплавленного металла сопряжения № 1.

Таким образом можно утверждать, что уменьшение доли твердой, и абразивной по отношению к вкладышу, карбидной фазы в наплавленном металле способствует снижению интенсивности изнашивания вкладыша и сопряжения в целом. В то же время уменьшение количества износостойкой структурной составляющей компенсируется увеличением твердости и количества твердого раствора. В результате интенсивности изнашивания наплавленного металла сопряжений № 1 и 2 остаются примерно одинаковыми. Выявить механизм влияния КЛП на количественное соотношение фаз в наплавленном металле и их твердость с помощью металлографического анализа не представилось возможным. Однако можно предположить, что это связано с влиянием бора — активного модифицирующего и карбидообразующего элемента.

В работе [4] показано, что вид борсодержащего материала (B_4C , B_2O_3 , BN и др.) в составе сердечника порошковой проволоки оказывает суще-

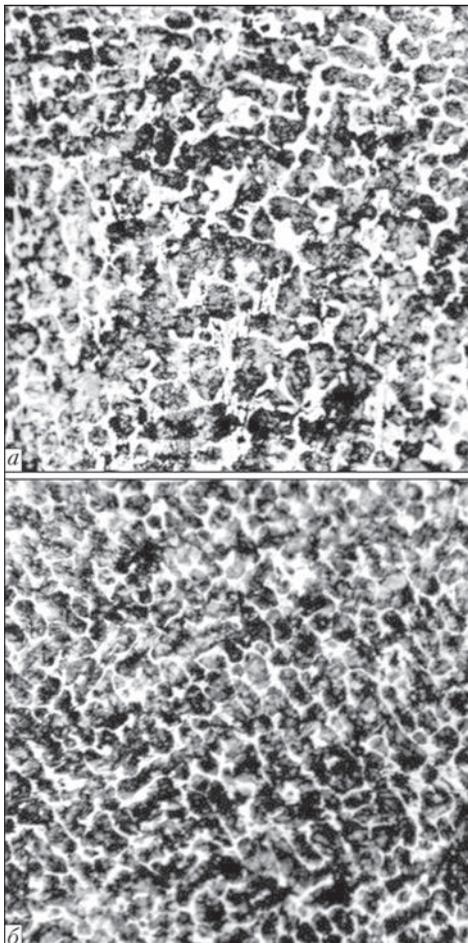


Рис. 3. Структура (×320) металла, наплавленного порошковой проволокой: а — ПП-АН160; б — ПП-АН160СФ

ственное влияние на количественное соотношение и морфологию фазовых составляющих наплавленного металла. Бор в состав сердечников порошковых проволок ПП-АН160 и ПП-АН160СФ был введен хотя и в одинаковых количествах, но с помощью разных борсодержащих материалов: в первом случае — лигатуры железо–хром–бор (ФХБ), во втором — частиц КЛП. Возможно также, что различное содержание карбидно-цементитной фазы в исследованных образцах наплавленного металла является результатом изменяющейся карбидообразующей активности бора, зависящей от его композиционного состояния.

Выводы

1. Применение комплексно-легированных порошков (КЛП) в качестве сердечника высоколегированных порошковых проволок позволяет существенно уменьшить ее диаметр без изменения уровня легирования, снизить энергоемкость процесса наплавки и улучшить эксплуатационные свойства наплавленного металла. Замена сердечника порошковой проволоки ПП-АН170 на сердечник из КЛП позволило повысить ее сварочно-технологические характеристики, уменьшить диаметр с 3,2 до 2,6 мм и в

1,2...1,3 раза увеличить абразивную износостойкость наплавленного металла.

2. Замена механической смеси неоднородных по составу шихтовых материалов сердечника порошковой проволоки на КЛП оказывает влияние на количественный состав и твердость структурных составляющих наплавленного металла. Применение КЛП в порошковой проволоке ПП-АН160 уменьшает долю абразивной карбидной фазы и повышает твердость перлитной основы наплавленного металла, что увеличивает износостойкость сопряжения, работающего в условиях трения металла по металлу в 1,3 раза.

1. *Кондратьев И. А.* Порошковая проволока, заполненная гранулированным сплавом // Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавка деталей оборудования металлургии и энергетики. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1980. — С. 36–38.
2. *Дзыкович В. И.* Исследование и разработка материалов для износостойкой наплавки на основе сфероидизированных гранул карбидов вольфрама: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 2010. — 24с.
3. *Юзвенко Ю. А., Гавриш В. А., Марьенко В. Ю.* Лабораторные установки для оценки износостойкости наплавленного металла // Теоретические и технологические основы наплавки. Свойства и испытания наплавленного металла. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1979. — С. 23–27.
4. *Жудра А. П., Кривчилов С. Ю., Петров В. В.* К вопросу выбора борсодержащих шихтовых материалов для сердечника порошковой проволоки // Автомат. сварка. — 2004. — № 4. — С. 55–56.

Поступила в редакцию 22.09.2014

15-й Международный научно-технический семинар «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА И РЕМОНТА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ И НА ТРАНСПОРТЕ»

23–27 февраля 2015

г. Свалява

Тематика семинара:

- ◆ Современные тенденции развития технологии машиностроения
- ◆ Подготовка производства — как основа создания конкурентоспособной продукции
- ◆ Состояние и перспективы развития заготовительного производства
- ◆ Совершенствование технологий механической и физико-технической обработки в машино- и приборостроении
- ◆ Упрочняющие технологии и покрытия
- ◆ Современные технологии и оборудование в сборочном и сварочном производстве
- ◆ Ремонт и восстановление деталей машин в промышленности и на транспорте, оборудование для изготовления, ремонта и восстановления
- ◆ Технологическое управление качеством и эксплуатационными свойствами изделий
- ◆ Метрология, технический контроль и диагностика в машино- и приборостроении
- ◆ Экологические проблемы и их решения в современном производстве

В рамках семинара будет проведена презентация журналов издательства «Машиностроение» (Россия), разработок НИИ и промышленных предприятий

На ПАО «Ильницкий завод механического сварочного оборудования» будет проведено выездное заседание секции

«Современное сварочно-наплавочное и механическое сварочное оборудование»

Оргкомитет приглашает принять участие в семинаре, выступить с докладами и сообщениями, представить выставочный стенд или образцы продукции.