



ПОРОШКОВЫЕ ПРОВОЛОКИ СЕРИИ ФМИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ (Обзор)

Чл.-кор. НАН Украины **В. И. ПОХМУРСКИЙ**, **М. М. СТУДЕНТ**, д-р техн. наук, **В. М. ГВОЗДЕЦКИЙ**, инж.
(Физ.-мех. ин-т им. Г. В. Карпенко НАН Украины, г. Львов),
А. В. ПОХМУРСКАЯ, д-р техн. наук (Ин-т материаловед., Хемницкий техн. ун-т, Германия)

Приведен краткий обзор разработанных в Физико-механическом институте им. Г. В. Карпенко НАН Украины порошковых проволок для электродугового напыления. Показано, что разработка и применение специальных порошковых проволок как электродных материалов расширило области использования электрометаллизации и во многих случаях позволило получать покрытия со свойствами на уровне лучших плазменных и других газотермических покрытий, но с меньшими затратами.

Ключевые слова: напыление покрытий, электродуговая металлизация, порошковые проволоки, ремонт изношенных поверхностей, структура покрытий, свойства

Электродуговая металлизация — один из газотермических методов нанесения покрытий. Он является технологически наиболее простым и продуктивным методом, не требующим дорогостоящего оборудования, и легко внедряется в производство. Одним из существенных недостатков этого метода является малый ассортимент используемых материалов — проволоки сплошного сечения. Поэтому использование порошковых проволок (ПП) как электродных материалов для электродугового напыления покрытий позволило широко варьировать химический состав покрытий, резко расширять область их использования, а также во многих случаях получить покрытия со свойствами на уровне лучших плазменных и сверхзвуковых газотермических покрытий, но в 5...10 раз дешевле. На сегодня ПП для электродугового напыления серийно выпускают как за рубежом (фирмы «Metco», «Castolin», «TAFA», «Nanosteel»), так и в Украине. Наибольший вклад в разработку и внедрение электродуговых покрытий из ПП в производство внесли специалисты из Института электросварки им. Е. О. Патона [1–8], Физико-механического института им. Г. В. Карпенко НАН Украины (ФМИ) [9–25], Приазовского государственного технического университета [26]. Покрытия из ПП используют во многих отраслях техники для восстановления и защиты от абразивного и газоабразивного износа при комнатной и повышенных температурах вплоть до 700 °С, для ремонта различных деталей машин и агрегатов, работающих в условиях граничного трения.

В ФМИ им. Г. В. Карпенко НАН Украины разработаны ПП диаметром 1,8 мм для электро-

дуговой металлизации (таблица), опытно-промышленные партии которых изготовлены в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. Результаты исследований, посвященных разработке ПП, изучению структурообразования и эксплуатационных свойств электродуговых покрытий различного назначения, отражены в работах [1–10, 26], а разработанные составы ПП защищены патентами Украины [21–25].

Восстановительные покрытия используют для ремонта изношенных поверхностей деталей типа вал с последующей механической обработкой покрытий преимущественно механообрабатывающим инструментом. Поэтому для таких покрытий важнейшим является их высокая износостойкость и производительность при механической обработке. Эти условия обеспечиваются при формировании покрытий с твердостью HV 300...400, в структуре которых находится минимальное количество оксидной фазы.

Минимальное количество кислорода в покрытиях на уровне 2 мас. % обеспечивается при наличии в шихте ПП 0,8 % углерода, 6 % хрома и 6 % алюминия (рис. 1).

С увеличением содержания алюминия уменьшается количество мартенсита, но возрастает содержание феррита в покрытии. При этом твердость покрытия уменьшается при одновременном увеличении его адгезионной прочности. Оптимальная твердость покрытия в диапазоне HV 300...400 обеспечивается при наличии в проволоке 6...12 мас. % алюминия. Матричной фазой таких покрытий является феррит, легированный хромом и алюминием. ПП с повышенным количеством алюминия применяют в энергетике при восстановлении посадочных мест валов роторов электродвигателей, тормозных барабанов грузовых автомобилей и др. (рис. 2).

Для покрытий, применяемых для деталей, работающих в условиях абразивного износа, выд-

Порошковые проволоки и их назначение

Марка проволоки	Тип легирования	HRC, HV, σ_B , $\sigma_{сц}$	Область применения
ФМИ-2	X6Ю8P3	HRC 40 HV 650 $\sigma_B = 130$ МПа $\sigma_{сц} = 40$ МПа	Восстановление шеек средненагруженных коленчатых валов, распределительных валов, защита от абразивного износа полиграфического оборудования
ФМИ-5	50X6Ю3Г2М2С2	HV 350 $\sigma_B = 180$ МПа $\sigma_{сц} = 40$ МПа	Восстановление посадочных мест деталей под подшипники
ФМИ-6	X6Ю6P3N4	HRC 40 HV 1000, $\sigma_B = 60$ МПа, $\sigma_{сц} = 45$ МПа	Защита от газовой коррозии и газоабразивного износа при высоких температурах (до 700 °С)
ФМИ-7	70X6Ю6P3W4	HRC 40 HV 1150 $\sigma_B = 120$ МПа, $\sigma_{сц} = 45$ МПа	Защита от газовой коррозии и газоабразивного износа при высоких температурах (до 600 °С)
ФМИ-8	50X6Ю2Г2Т2М2	HV 500 $\sigma_B = 180$ МПа, $\sigma_{сц} = 40$ МПа	Восстановление шеек средненагруженных коленчатых валов, распределительных валов

вигаются следующие требования: высокая твердость, низкий уровень напряжений первого рода и высокая износостойкость. Установлено, что с увеличением твердости покрытий до HV 700...800 их износостойкость возрастает, а более HV 800 уменьшается, что связано с возникновением микротрещин в покрытиях. Износ покрытий происходит вследствие роста уже готовых трещин преимущественно по границам ламелей с последующим их скалыванием. Установлено, что высокую износостойкость покрытий при испытании закрепленным абразивом обеспечивают более твердые ламели и твердые оксиды алюминия на границах между ламелями. Поэтому в данном случае следует формировать покрытия, во-первых, с высокой микрогетерогенностью, чтобы обеспечить в них низкий уровень напряжений растяжения, во-вторых, с небольшой толщиной ламелей (высокой дисперсностью покрытия), чтобы повысить содержание оксидов на межламелярных границах. При испытании на износ незакрепленным абразивом слабыми звеньями покрытий являются ламели с наименьшей твердостью и межламелярные границы. В этом случае следует формировать покрытие с низкой микрогетерогенностью и максимальной толщиной ламелей, чтобы минимизировать количество границ между ламелями. Покрытия системы Fe-Cr-B-Al марок ФМИ нашли широкое применение для защиты от абразивного износа в полиграфической промышленности (рис. 3).

Твердость покрытий для деталей, работающих в условиях граничного трения, должна быть не ниже HV 600. Механическая обработка таких покрытий проводится шлифованием под требуемые размеры. При этом в структуре покрытий часто возникают микротрещины, которые могут привести к разрушению покрытия во время эксплуата-

ции. Для обеспечения требуемых характеристик покрытий в состав шихты ПП вводится хром, углерод, бор и алюминий в таких количествах, чтобы матричной фазой покрытия был мартенсит.

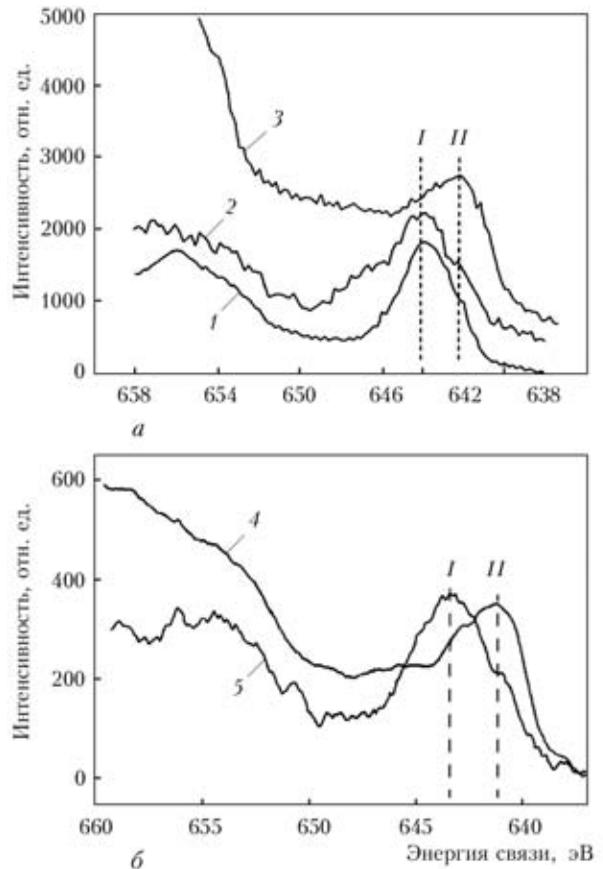


Рис. 1. Влияние количества углерода (I), хрома (ПП80X (0...6) (2) и алюминия (ПП80X6Ю (0...10)) (3) в шихте ПП на количество кислорода в покрытиях (а) и относительная стойкость реза из сплава ВК8 (б) при обработке покрытий из ПП 80X6Ю (0...10 Al)

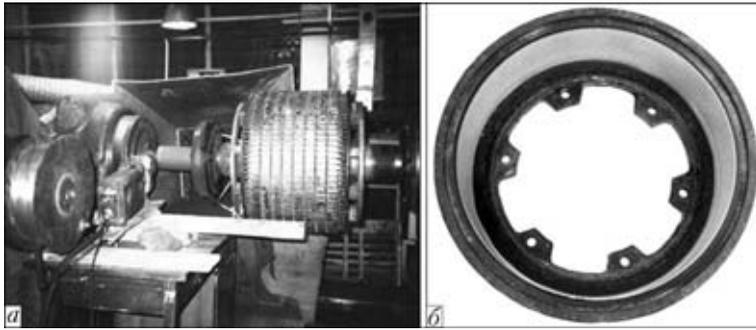


Рис. 2. Восстановление вала ротора электродвигателя (а) и тормозного барабана грузового автомобиля (б)

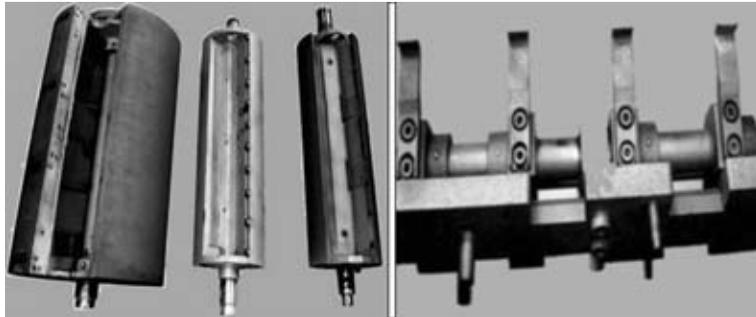


Рис. 3. Восстановленные детали листопротяжной системы полиграфической машины

Такая структура обеспечивает минимальный уровень растягивающих напряжений в покрытии не выше 50 МПа.

При удельных нагрузках свыше 14 МПа в паре трения покрытие – контртело происходит катастрофический износ контртела. Металлографическим, спектральным и рентгеноструктурным анализами установлено, что это обусловлено нали-

чием на шлифованной поверхности покрытий трещин, раскрытые края которых выполняют роль резцов, выступов высотой до 0,3 мкм, образованных оксидами алюминия и карбидами. Выступы из карбидов над шлифованной поверхностью покрытий образуются в результате неполного растворения крупных карбидов из шихты в расплаве ПП. Для устранения интенсивного износа контртела в паре трения с покрытием предложены способы оптимизации покрытий, которые сводятся к следующему:

- обеспечение условия полного растворения карбидов в расплаве ПП с использованием для этого меньших по размерам частиц карбидов в шихте ПП или применение повышенного напряжения дуги (34...38 В) при напылении;

- уменьшение содержания воздуха в шихте ПП путем ее уплотнения и добавления к ней порошка, содержащего соединения титана, который в паровой фазе взаимодействует с кислородом в зоне расплава, образуя мелкие оксиды титана, которые на 1...2 порядка меньше частиц Al_2O_3 .

На шлифованной поверхности покрытия, полученного из ПП с оптимизированным составом шихты, отсутствуют микровыступы и шероховатость его шлифованной поверхности существенно меньше. Кроме того, титан и магний в составе

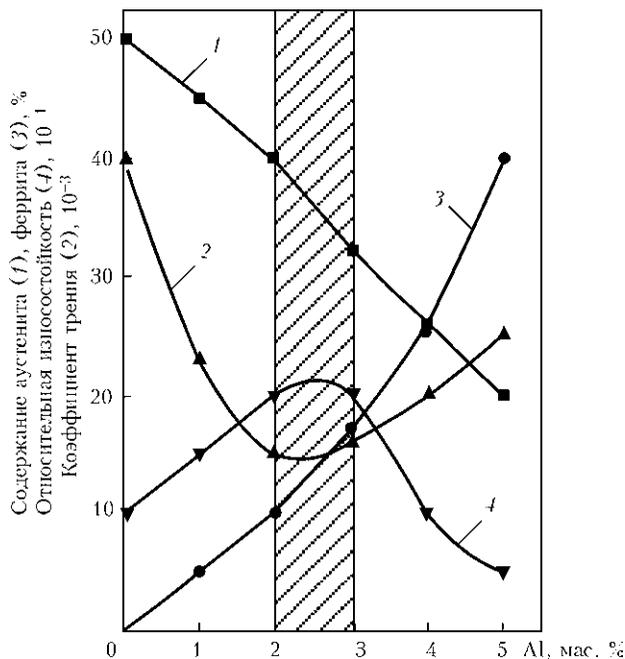


Рис. 4. Влияние содержания алюминия в ПП 50X6T2M2Ю2 на трибологические характеристики покрытий с трехфазной структурой в условиях граничного трения при удельной нагрузке $P = 7$ МПа

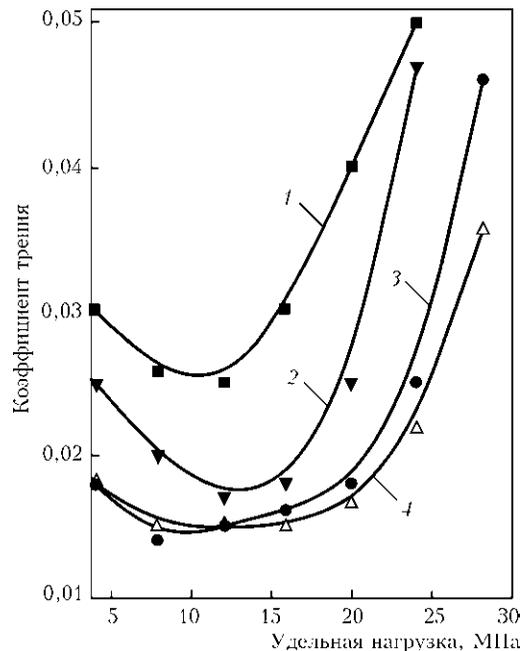


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения в масле дизельном М14В2 от удельной нагрузки для пар трения покрытия с ПП—бронза (БрС-30): 1 — Х6Ю6РЗ; 2 — сталь ШХ15 (HRC 62); 3 — 50X6Г2Т2М2+Х6Р3Ю6Т2; 4 — 50X6Т2М2Ю2

шихты ПП способствуют усвоению 2...3 мас. % азота из воздуха, содержащегося в порах шихты, благодаря чему в покрытии формируются частицы нитридов титана размером 200...500 нм.

В результате неравновесности структуры и фазового состава покрытий при трении в них могут реализовываться условия, благоприятные для самоорганизации поверхностного слоя.

Методами малоугловой рентгенографии покрытия установлено, что оптимальные условия для самоорганизации поверхности возникают в трехфазном покрытии с матричной фазой мартенсита (~50 %), аустенита (~30 %) и феррита (~20 %). При высоких удельных нагрузках из аустенита выделяются карбиды $(Fe, Cr)_{23}C_6$ и часть его с поглощением тепла превращается в отпущенный мартенсит.

Предполагается, что в феррите выделяются наноразмерные частицы графита (10...20 нм). При трении углерод диффундирует к поверхности трения и образует на ней сплошную пленку графита. Оптимальное содержание феррита в структуре покрытия составляет 10...20 %. При этом коэффициент трения и износ пары трения минимальны (рис. 4, 5). Такое содержание феррита в покрытии обеспечивается при наличии в нем 2...3 мас. % алюминия.

Проволоки серии ФМИ нашли применение для восстановления опорных шеек роторов и валов турбины компрессоров для перекачки газа на ремон-

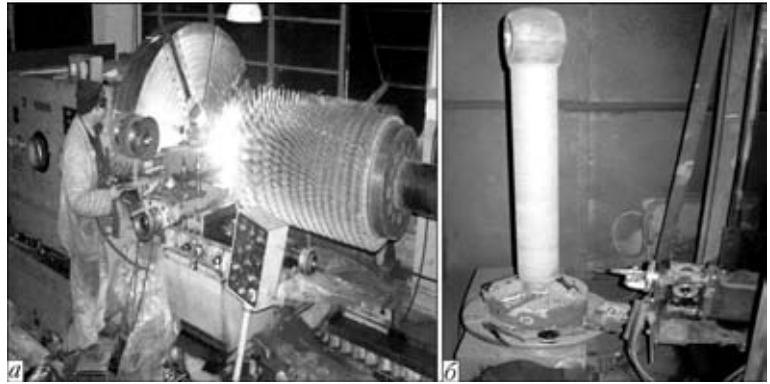


Рис. 6. Напыление покрытия на опорную шейку вала турбины (а) и штока гидроцилиндра (б)

тных предприятиях «Укрэнергосервис», штоков гидроцилиндров шахтного оборудования (рис. 6).

Для покрытий из ПП системы Fe-Cr-B-Al, эксплуатируемых в условиях повышенных температур при наличии газоабразивного износа, важна стабильно высокая твердость в течение долгого времени эксплуатации (несколько лет) при высокой температуре. Для обеспечения высокой твердости и жаростойкости покрытий в состав шихты ПП добавляли такие элементы, как хром, бор, алюминий, магний, никель и вольфрам, которые могут при повышенной температуре вызвать дисперсионное упрочнение. Фазовым и спектральным анализами установлено, что дисперсионное упрочнение покрытий обеспечивается выделениями в их структуре боридов $(FeCr)_2B$, нитридов CrN и AlN, а также интерметаллидов $FeAl_3$, Ni_3Al и Fe_7W_6 . При температуре эксплуатации до 550 °C наибольший эффект упрочнения обеспечивается выделением интерметаллидов Fe_7W_6 , а свыше 550 °C — Ni_3Al .

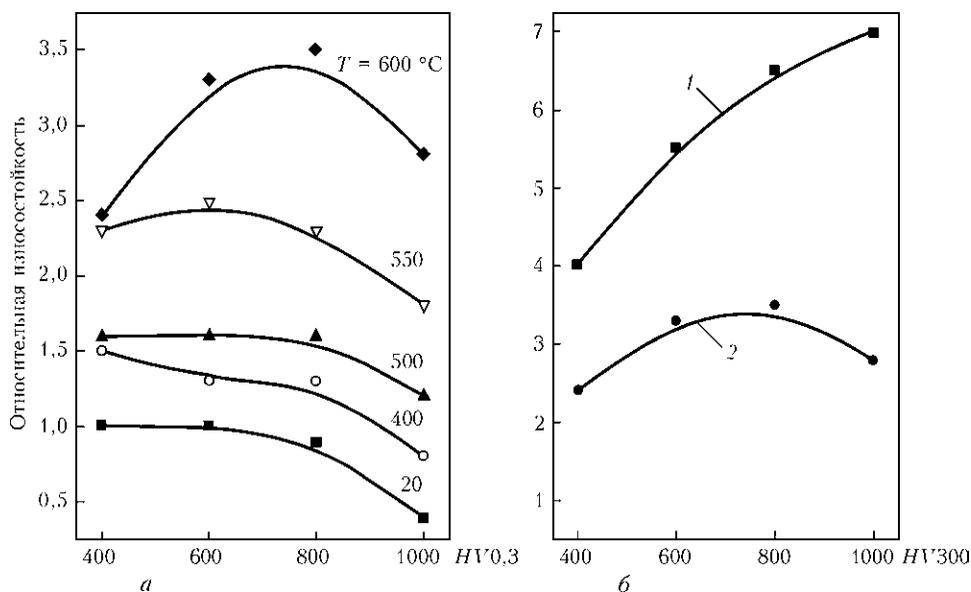


Рис. 7. Относительная износостойкость покрытий из ПП системы Fe-Cr-B-Al (залитые значки) и эталонных образцов из стали 12Х1МФ при различных температурах (предварительная выдержка образцов при температуре испытания 50 ч) (а) и относительная износостойкость покрытий из тех же материалов при температуре испытания 600 °C (б) и длительности предварительной выдержки образцов 100 (кривая 1) и 50 (2) ч

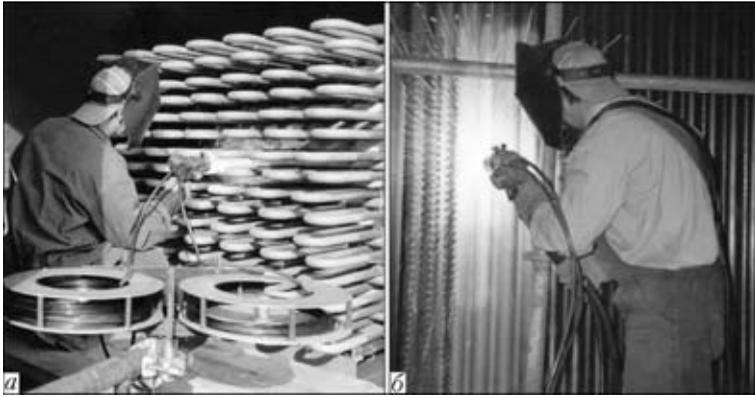


Рис. 8. Напыление покрытий из ПП на трубы экономайзера (а) и экранные трубы (б) котла ТП-100 для защиты от газоабразивного изнашивания при повышенных температурах

Покрытия из ПП повышают жаростойкость стали 12Х1МФ в 30 раз. В отличие от сплошных материалов покрытиям свойственно как внешнее с поверхности, так и внутреннее межламеллярное окисление. Кислород может проникать вдоль границ ламелей и по микротрещинам до стальной основы и формировать там оксидные пленки. Интенсивность газоабразивного износа зависит от твердости покрытий и уровня в них напряжений.

При комнатной температуре износостойкость покрытия уменьшается с повышением его твердости и становится меньше твердости эталона — стали 12Х1МФ. С повышением температуры износостойкость покрытий возрастает, причем чем больше экспозиция при высокой температуре, тем выше износостойкость покрытия (рис. 7). Это обусловлено напряжениями первого рода, которые формируются в покрытии. При длительных экспозициях при температуре 500...600 °С в покрытии происходят два противоположных процесса. Во-первых, в покрытии выделяются дисперсные фазы, в результате чего его объем уменьшается и растягивающие напряжения в нем растут, в то же время в покрытии происходит внутреннее окисление и его объем при этом увеличивается, а напряжения растяжения уменьшаются. Вследствие этого при экспозиции около 1000 ч растягивающие напряжения в покрытиях сменяются на напряжения сжатия.

Покрытия, в структуре которых происходят дисперсионные газовые выделения, применяют для защиты от газоабразивного износа, например, нагревательных элементов котлов ТЭС (рис. 8).

Таким образом, разработанные ФМИ им. Г. В. Карпенко НАН Украины ПП могут найти применение для электродугового напыления различного назначения.

1. Борисов Ю. С., Коржик В. Н. Аморфные газотермические покрытия: теория и практика // Автомат. сварка. — 1995. — № 4. — С. 3–12.
2. Структура и свойства электродуговых покрытий на основе ферробора, полученных из порошковых проволок / А. Л. Борисова, И. В. Миц, Т. В. Кайда и др. // Там же. — 1991. — № 9. — С. 66–68.
3. Влияние технологических параметров электродуговой металлизации на прочность сцепления и структуру пок-

крытий из порошковых проволок на основе FeCr + Al / А. Л. Борисова, А. Ш. Клейман, В. К. Андрейчук и др. // Тез. докл. X Всесоюз. конф. «Теория и практика газотермического нанесения покрытий». — Димитров, 1989. — Т. 2. — С. 153–157.

4. Борисова А. Л., Клейман А. Ш. Влияние редкоземельных металлов и кальция на структуру и физико-механические свойства электрометаллизационных покрытий из порошковых проволок с наполнителем из ферробора // Прочность деталей сельскохозяйственной техники. — Кишинев: Кишинев. с.-х. ин-т, 1990. — С. 33–38.
5. Борисов Ю. С., Козьяков И. А., Коржик В. Н. Структура и свойства газотермических покрытий, полученных с использованием порошковых проволок системы Fe–Cr–B, Fe–Cr–B–C // Автомат. сварка. — 1996. — № 5. — С. 21–24.
6. Влияние условий напыления на структуру покрытий, полученных из порошковой проволоки «Амотек 101» / Ю. С. Борисов, А. Л. Борисова, И. А. Козьяков и др. // Там же. — 1996. — № 1. — С. 21–30.
7. Козьяков И. А., Коржик В. Н., Борисов Ю. С. Стойкость аморфизированных газопламенных покрытий из порошковых проволок системы Fe–B в условиях газоабразивного изнашивания // Там же. — 1996. — № 9. — С. 27–29.
8. Козьяков И. А., Коржик В. Н., Борисов Ю. С. Трибологические характеристики аморфизированных газопламенных покрытий, напыляемых порошковыми проволоками системы Fe–B // Там же. — 1996. — № 10. — С. 24–28.
9. Електродугові відновні та захисні покриття / В. І. Похмурський, М. М. Студент, В. М. Довгунік та ін. — Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2005. — 190 с.
10. Застосування електродугової металізації порошковими дротами системи Fe–Cr–C–Al для відновлення деталей машин / В. І. Похмурський, М. М. Студент, В. М. Довгунік, І. Й. Сидорак // Машинознавство. — 1999. — № 1. — С. 13–18.
11. Вплив абразивно-струминної обробки на адгезію протикорозійних і відновних електрометалізаційних покриттів / І. Й. Сидорак, М. М. Студент, В. М. Довгунік, Н. Павлик // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2000. — № 1. — С. 458–460.
12. Вплив тертя на фазові перетворення у поверхневих шарах газотермічного покриття FeCrB+Al / М. М. Студент, В. М. Довгунік, І. Й. Сидорак та ін. // Те саме. — 2000. — № 4. — С. 109–111.
13. Вплив тертя на структурно-фазові перетворення у приповерхневому шарі газотермічного покриття FeCr+Al+C / В. М. Довгунік, М. М. Студент, І. Й. Сидорак та ін. // Те саме. — 2000. — № 5. — С. 113–116.
14. Tribological properties of arc sprayed coatings obtained from FeCrB and FeCr based powder wires / A. Pokhmurska, M. Student, E. Bielanska et al. // Surface & Coating Technology. — 2002. — № 151–152. — P. 490–494.
15. Порошкові проволоки систем FeCrB+Al і FeCr+Al+C для відновительних електрометалізаційних покриттів / В. І. Похмурський, М. М. Студент, В. М. Довгунік, І. Й. Сидорак // Автомат. сварка. — 2002. — № 3. — С. 32–35.

16. *Структура* и трибологические свойства покрытий, полученных методом электродуговой металлизации / В. И. Похмурский, М. М. Студент, И. И. Сидорак и др. // Там же. — 2003. — № 8. — С. 13–17.
17. *Влияние* режимов электродуговой металлизации и состава применяемых порошковых проволок на структуру и абразивную износостойкость покрытий // В. И. Похмурский, М. М. Студент, И. А. Рябцев и др. // Там же. — 2006. — № 7. — С. 31–36.
18. *Triboelektroche* miczne wtasciowosci powlok natryskiwanuch lukowo na stopu aluminium / V. Pokhmurskii, V. Dovhunyk, M. Student et al. // Inzynieria Powierzchni. — 2008. — № 1. — С. 9–13.
19. *Високотемпературна* корозія електродугових покривів з порошкових дрітів на базі системи Fe–Cr–B–Al / М. Студент, Ю. Дзьоба, В. Гвоздецький та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2008. — № 5. — С. 93197.
20. *Пат. 40722U Україна, МПК (2009) C23C 4/00, B22F 7/00, B32B 15/00.* Порошковый дріт для одержання дисперсійно зміцнених електродугових покриттів / В. І. Похмурський, М. М. Студент, Ю. В. Дзьоба, І. Й. Сидорак; заявник і патентовласник. — U2008 12843; заявл. 03.11.2008; опубл. 27.04.2009, Бюл. № 8.
21. *Пат. 40723U Україна, МПК (2009) C23C 4/00, B22F 7/00, B32B 15/00.* Порошковый дріт для одержання зносостійких електродугових покриттів / М. М. Студент, Г. В. Похмурська, Я. Я. Сірак, В. М. Гвоздецький; заявник і патентовласник ФМІ НАН України. — U2008 12844; заявл. 03.11.2008; опубл. 27.04.2009, Бюл. № 8.
22. *Пат. 47456 Україна, МПК (2009) C23C 6/00.* Порошковый дріт для одержання електродугових покриттів, що дисперсійно зміцнюються за підвищених температур / В. І. Похмурський, М. С. Романів, М. М. Студент, Г. В. Похмурська, Т. М. Харандюк, Я. В. Серівка; заявники і патентовласники: ФМІ НАН України; Бурштинська ТЕС. — U2009 05524; заявл. 01.06.2009; опубл. 10.02.2010; Бюл. № 3.
23. *Пат. 19967 Україна, МПК (2006) C 23 C 4/00.* Спосіб одержання композиційних покриттів / С. І. Маркович, В. І. Похмурський, О. Й. Мажейко, М. М. Студент; заявники і патентовласники: ФМІ НАН України; Кіровоградський нац. техн. ун-т. — U2006 05358; заявл. 16.05.2006; опубл. 15.01.2007, Бюл. № 1.
24. *Пат. 20013 Україна, МПК (2006) C23C 4/04, C3C 4/12.* Порошковый дріт для одержання композиційних газотермічних покриттів / В. І. Похмурський, Г. В. Похмурська, М. М. Студент, Ю. В. Дзьоба, Я. Я. Сірак; заявник і патентовласник: ФМІ НАН України. — U2006 06217; заявл. 05.06.2007; опубл. 15.01.2007, Бюл. № 1.
25. *Пат. 40721U Україна, МПК (2009) C23C 4/00, B22F 7/00, B32B 15/00.* Порошковый дріт для одержання зносостійких електродугових покриттів / В. І. Похмурський, М. М. Студент, Ю. В. Дзьоба, І. Й. Сидорак; заявник і патентовласник: ФМІ НАН України. — U2008 12842; заявл. 03.11.2008; опубл. 27.04.2009, Бюл. № 8.
26. *Роянов В. А.* Теоретические основы создания и промышленное освоение экономнолегированных ПП для электродугового напыления износостойких покрытий с улучшенными эксплуатационными свойствами: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Минск, 1990. — 36 с.

The paper gives a brief review of flux-cored wires developed by the N.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine for electric arc spraying. It is shown that development and utilisation of special flux-cored wires as electrode materials widened the application fields for electric arc metallising and allowed, in many cases, deposition of coatings with properties at a level of the best plasma and other thermal spraying ones at lower costs.

Поступила в редакцию 16.06.2011

ВНИМАНИЮ МОЛОДЫХ СВАРЩИКОВ!

МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОНКУРС СВАРЩИКОВ В КИТАЕ

Общество сварщиков Украины информирует, что 27–30 мая 2012 г. в Пекине Китайское сварочное общество проводит международный конкурс сварщиков «2012 ARC Cup International Welding Competition» во время 17-й выставки Beijing Essen Welding and Gutting. Возраст конкурсантов — 16–25 лет (на 1 января 2012 г.). Номинация конкурса: дуговая сварка — ручная покрытыми электродами, механизированная плавящимся электродом в активных газах, неплавящимся электродом в инертных газах и роботизированная.

**Заявки на участие в конкурсе направлять
в Общество сварщиков Украины:
тел./факс 44-200 2466, E-mail: tzu@e-mail.ua**