



# ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ И СОСТАВОВ ПРИМЕНЯЕМЫХ ПОРОШКОВЫХ ПРОВОЛОК НА СТРУКТУРУ И АБРАЗИВНУЮ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПОКРЫТИЙ

Чл.-кор. НАН Украины **В. И. ПОХМУРСКИЙ**, **М. М. СТУДЕНТ**, канд. техн. наук  
(Физико-механический ин-т НАН Украины, г. Львов),

**И. А. РЯБЦЕВ**, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),  
**И. И. СИДОРАК**, канд. техн. наук, **Ю. В. ДЗЬОБА**, инж., **В. М. ДОВГУНЫК**, канд. техн. наук  
(Физико-механический ин-т НАН Украины, г. Львов),

**Б. ФОРМАНЕК**, др.-инж. (Политехника Шленска, г. Гливице, Республика Польша)

Изучено влияние режимов электродуговой металлизации с использованием порошковой проволоки ФМИ-2 на микроструктуру и абразивную износостойкость покрытий. Показано, что из многих факторов наибольшее влияние на эти показатели оказывает давление сжатого воздуха, сила тока и дистанция напыления. Износостойкость покрытий, нанесенных с использованием порошковой проволоки с шихтой на основе феррохромбора, выше, чем закаленной стали. Наибольшую износостойкость имеют покрытия, нанесенные при высоком давлении сжатого воздуха, характеризующиеся мелкодисперсной структурой и содержащие большее количество оксидной фазы на границах раздела.

*Ключевые слова:* электродуговая металлизация, порошковая проволока, микроструктура, абразивное изнашивание

Для восстановления изношенных деталей машин, работающих в условиях граничного трения, а также для их защиты от абразивного изнашивания успешно применяется электродуговая металлизация порошковыми проволоками (ПП). Производственный опыт и экспериментальные исследования показывают, что износостойкость покрытий, полученных этим способом, зависит от их состава, твердости и структуры [1]. Целью настоящих исследований явилось изучение влияния основных показателей режимов металлизации на структуру и эксплуатационные характеристики покрытий. Исследовали также возможность увеличения износостойкости покрытий, полученных электродуговой металлизацией с использованием порошковой проволоки ФМИ-2 путем изменения состава шихты.

При изучении влияния режимов металлизации на износостойкость получаемых покрытий основное внимание было уделено трем основным показателям: давлению сжатого воздуха, от которого зависит степень диспергирования расплава ПП в дуге и скорость транспортировки образовавшихся капель к напыляемой поверхности; току, с увеличением которого возрастает производительность нанесения покрытий; дистанции напыления, влияющей на коэффициент потерь напыляемого материала и прочность сцепления покрытия с основным металлом.

**Методики проведения экспериментов.** Покрытия наносили электрометаллизатором МЕ-2, разработанным ГМП «Газотермик» при ФМИ НАН Украины. В качестве базовой использовали ПП ФМИ-2 диаметром 1,8 мм. При исследовании влияния состава покрытий на их износостойкость изменяли соотношение между компонентами в шихте ПП ФМИ-2 или вводили в ее состав дополнительные. Режимы металлизации в экспериментах изменяли в пределах, позволяющих получить покрытие без трещин и отслоений: ток дуги 150...300 А; напряжение на дуге 32...33 В; давление сжатого воздуха 0,3...0,6 МПа, дистанция напыления 30...100 мм. Металлографические исследования покрытий проводили на микроскопе «Neophot-2» с вмонтированной цветной цифровой видеокамерой. Для определения микроструктуры использовали смесь азотной и пикриновой кислот. Испытания абразивной износостойкости покрытий проводили по двум методикам: стандартной — Бринелля–Хаурорта (незакрепленным абразивом) и абразивным кругом — закрепленным абразивом (по методике, разработанной в ФМИ НАН Украины).

При испытаниях по методике Бринелля–Хаурорта в зону контакта между резиновым диском и исследуемым образцом с помощью дозирующего устройства постоянно подается новая порция абразива. Особенностью этой методики является то, что изменение усилия прижатия резинового диска к поверхности образца изменяет степень закрепления абразивных частиц и является главным параметром, который отличает данный вид



изнашивания от изнашивания закрепленным абразивом. Уровень усилия прижатия определяет будет ли абразивная частица прочно удерживаться резиновым диском, производя микрорезание и пластическую деформацию поверхности, или она будет перекатываться между резиновым диском и изнашиваемой поверхностью, приводя к усталостному разрушению последней. Режим испытаний по методике Бринелля–Хауорта следующий: нагрузка  $P = 2,40$  МПа, диаметр диска 50 мм, ширина 12 мм, скорость вращения 160 об/мин, время испытаний 15 мин. В качестве абразива использовали кварцевый песок с размером зерен до 200 мкм и влажностью не выше 0,16 %. Резиновый диск перед испытаниями притирали на шлифовальной бумаге типа 2 (ГОСТ 6456–75) зернистостью № 8П (ГОСТ 3647–71), закрепленной на плоской пластине, после чего ролик промывали спиртом. В качестве эталона использовали образец из стали У8 с твердостью  $HRC$  60.

Для испытаний износостойкости закрепленным абразивом было изготовлено специальное приспособление, смонтированное на малогабаритном фрезерном станке. Вместо фрезы абразивный круг из электрокорунда средней твердости СМ-2 крепили на керамической связке 7К15 диаметром 150 мм и шириной 6 мм. Зернистость электрокорунда составляла 250...315 мкм. Образцы крепили на одном плече рычага, а на другом — груз массой 0,55 кг. Соотношение плеч составляло 2,5:1, скорость вращения абразивного круга 120 об/мин, время испытаний 120 мин.

Для испытаний по обеим методикам использовали образцы в виде пластин размером 40×40×8 мм. Перед нанесением покрытия поверхность образцов площадью 40×40 мм подвергали дробеструйной обработке и за несколько проходов наносили покрытие толщиной приблизительно 1 мм с использованием порошковых проволок соответствующих составов.

**Исследование влияния режимов напыления на структуру покрытий.** Влияние давления сжа-

того воздуха. При проведении экспериментов давление сжатого воздуха изменяли в пределах 0,3...0,6 МПа. При малых значениях (0,3 МПа) его диспергирующее воздействие незначительно и капли расплава ПП имеют довольно большой размер — около 500 мкм. Скорость полета таких частиц невысока и составляет около 20 м/с. При соударении с напыляемой поверхностью такие капли деформируются незначительно, образуя грубодисперсное и гетерогенное покрытие (рис. 1, а) с пористостью 5...7 %. Благодаря высокой тепловой энергии капель во время кристаллизации происходит их частичное микросваривание. В некоторых участках покрытия, микротвердость которых достигает  $HV$  6000 МПа, обнаружены микротрещины, обусловленные появлением в процессе металлизации растягивающих напряжений.

При возрастании давления сжатого воздуха до 0,6 МПа размер капель жидкого металла уменьшается до 80 мкм [2], одновременно до 100 м/с увеличивается их скорость, что способствует измельчению структуры покрытия (рис. 1, б). Капли металлического расплава с большей силой ударяются в напыляемую поверхность, сильно расплющиваются и образуют ламели, соотношение длины к ширине которых изменяется от 3:2 при давлении сжатого воздуха 0,3 до 5:1 при 0,6 МПа. Покрытие, сформировавшееся из мелких капель, более гетерогенно и имеет больше границ раздела — оксидных пленок. Согласно данным фазового анализа эти пленки в основном состоят из оксидов  $Al_2O_3$ ,  $Cr_2O_3$  и  $Fe_2O_3$ . Основными фазами покрытия независимо от давления сжатого воздуха являются твердый раствор алюминия и хрома в  $\alpha$ -Fe с дисперсными выделениями боридов  $Fe_2B$  [3].

**Влияние силы тока.** При дуговой металлизации ПП диаметром 1,8 мм минимальный ток составляет  $I_{min} = 150$ , максимальный  $I_{max} = 300$  А. В связи с тем, что капли, формирующие покрытие, имеют более высокую начальную температуру, и покрытие формируется более плотным и с мень-

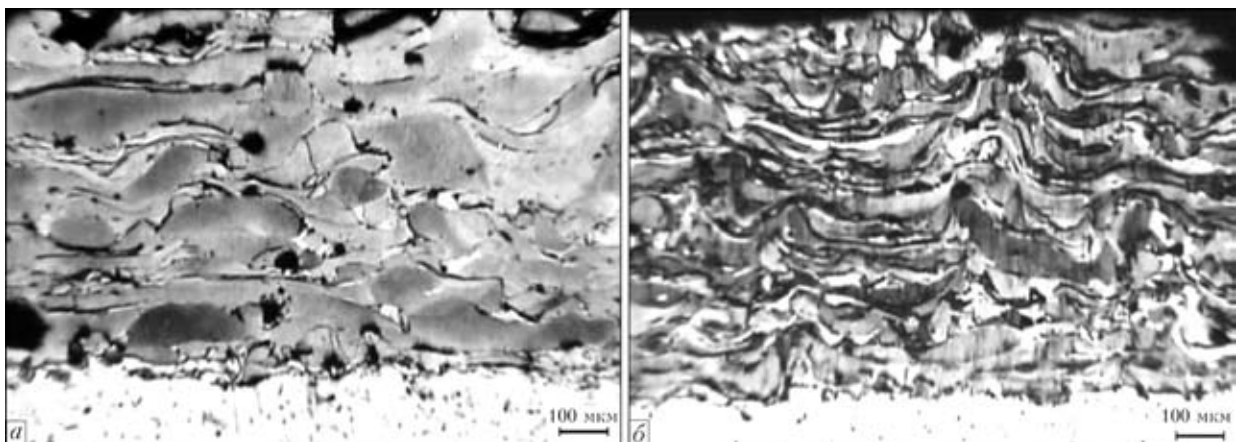


Рис. 1. Микроструктура покрытия, полученного дуговой металлизацией с использованием ПП ФМИ-2 ( $U = 32$  В,  $I = 150$  А,  $L = 100$  мм). Давление сжатого воздуха 0,3 (а); 0,6 МПа (б)

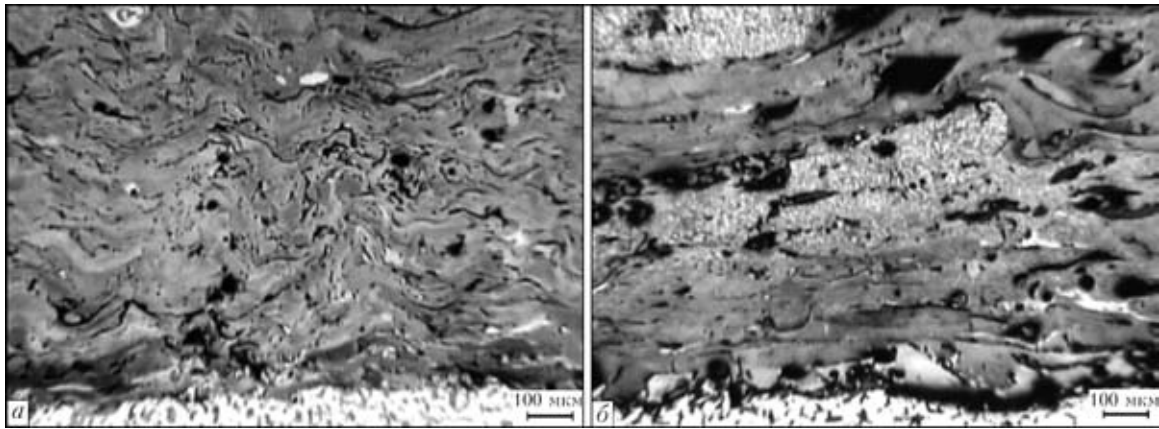


Рис. 2. Микроструктура покрытия, полученного дуговой металллизацией с использованием ПП ФМИ-2 ( $U = 32$  В,  $P = 0,6$  МПа): *a* —  $I = 300$  А,  $L = 100$  мм; *b* —  $I = 150$  А,  $L = 30$  мм

шим содержанием оксидов (рис. 2), с увеличением силы тока от 150 до 300 А гетерогенность покрытия уменьшается. Тем не менее, нанесение покрытий на повышенных токовых режимах может вызывать перегрев деталей и, как следствие, способствовать интенсивному окислению и отслоению покрытия.

**Влияние дистанции напыления.** При дуговой металллизации пучок расплывенных капель имеет вид конуса с углом расхождения  $15...20^\circ$ . Уменьшение дистанции напыления способствует повышению концентрации расплавленных частиц, попадающих и кристаллизующихся на напыляемой поверхности, что обуславливает меньшую скорость их кристаллизации и дальнейшего охлаждения. Размер образующихся боридов  $Fe_2B$  при этом намного больше, чем при напылении на меньшем расстоянии (рис. 2, б).

**Исследование влияния режимов напыления на абразивную износостойкость покрытий.**  
**Влияние давления сжатого воздуха.** При исследованиях изнашивания закрепленным абразивом установлено, что увеличение давления сжатого воздуха с 0,3 до 0,6 МПа способствует возрастанию износостойкости покрытий в 1,6 раза (рис. 3, кривая 1). Это объясняется тем, что при высоком давлении сжатого воздуха покрытие имеет более дисперсную структуру и содержит большее количество оксидов хрома и алюминия, а также более дисперсные выделения боридов в ламелях. В комплексе это обеспечивает более высокую микротвердость покрытия, а так как изнашивание в данном случае идет в основном в результате микро-резания, то и износостойкость покрытия увеличивается.

При испытаниях по методике Бринелля–Хаурорта износостойкость покрытий, наоборот, уменьшается (рис. 3, кривая 2). Это обусловлено реализацией иного механизма изнашивания — покрытие в основном разрушается в результате многократной пластической деформации абразивными частицами и частично за счет резания. В этом

случае более высокую износостойкость будут иметь покрытия с большим запасом пластичности. Нанесение покрытий при малом давлении сжатого воздуха (0,3 МПа) приводит к увеличению размера капель металлического расплава, которые, кристаллизуясь, остывают дольше, чем мелкие частицы и, как следствие, в крупнозернистом покрытии растягивающие остаточные напряжения намного меньше. При многократных нагружениях покрытия частицами абразива микротрещины в них зарождаются труднее и износостойкость таких покрытий при испытаниях незакрепленным абразивом выше.

Металлографическими исследованиями установлено, что после испытаний закрепленным абразивом на изношенных поверхностях образцов видны следы от микро-резания частицами абразива. Кроме того, в результате микро-резания вскрываются поры, причем в покрытиях, сформированных при малом давлении сжатого воздуха, они крупнее (рис. 4, б, г).

Поверхности трения образцов после изнашивания незакрепленным абразивом имеют другой вид (рис. 4, в, г), что подтверждает иной механизм изнашивания по этой методике испытаний — следов от микро-резания частицами абразива на изношенной поверхности практически нет. В мелкозернистом покрытии разрушение идет преимущественно за счет пластической деформации.

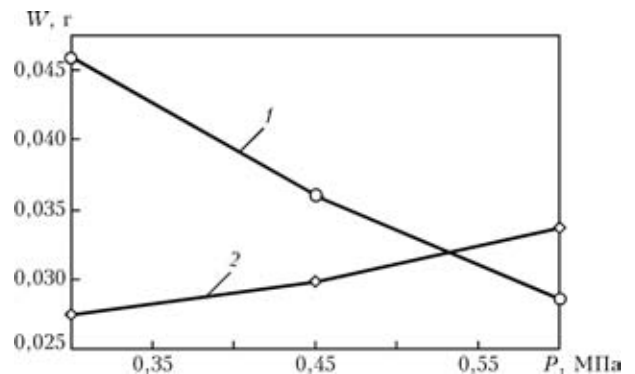


Рис. 3. Влияние давления сжатого воздуха на износ покрытия при испытании закрепленным (1) и незакрепленным (2) абразивом

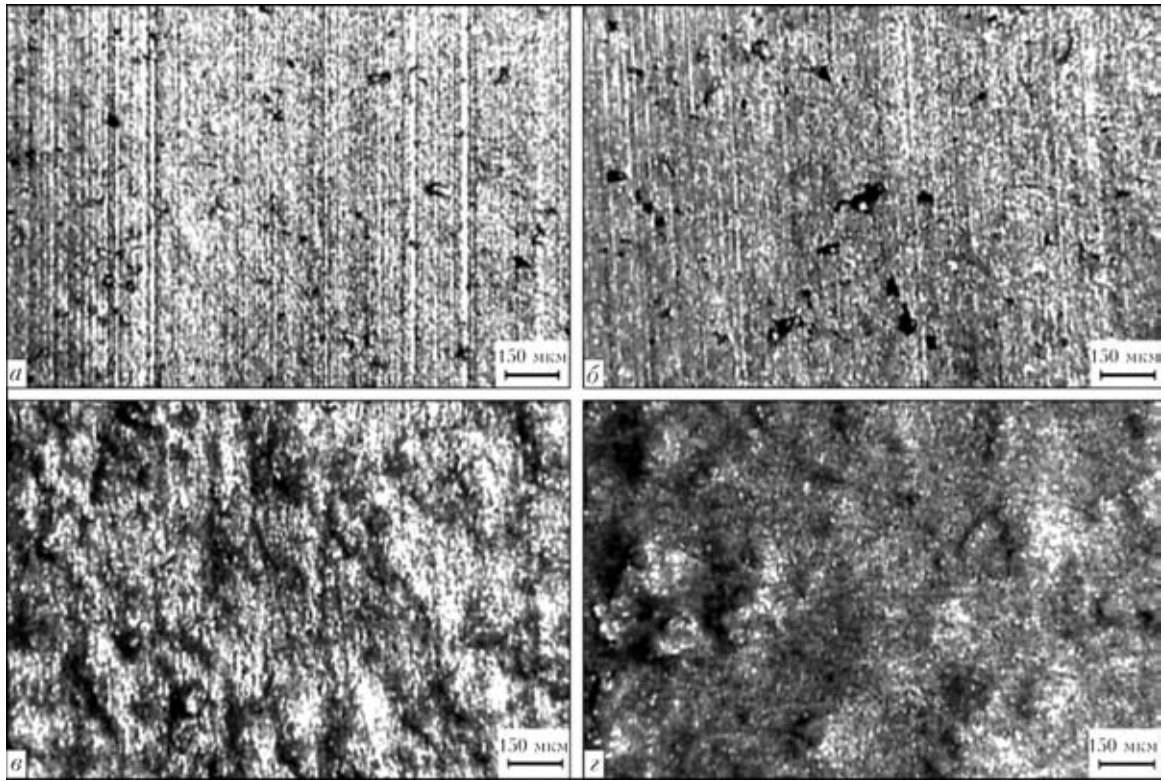


Рис.4. Топография поверхностей трения после испытаний закрепленным (*a, б*) и незакрепленным (*в, г*) абразивом. Режимы металлизации:  $U = 32$  В,  $I = 150$  А,  $L = 100$  мм,  $P = 0,6$  (*a, в*);  $0,3$  МПа (*б, г*)

шественно по границам ламелей (рис. 4, *в*), в грубозернистом оно более равномерное (рис. 4, *г*).

**Влияние силы тока.** Как отмечено выше (см. рис. 2, *a*), увеличение силы тока при напылении уменьшает в покрытии количество границ раздела между структурными составляющими, что негативно влияет на износостойкость при испытаниях закрепленным абразивом (рис. 5, *a*, кривая 1). При испытаниях по методике Бринелля–Хаурта из-

носостойкость покрытий практически не зависит от силы тока (рис. 5, *a*, кривая 2).

**Влияние дистанции напыления.** При изучении влияния дистанции напыления на абразивную износостойкость покрытий установлено, что при изнашивании закрепленным абразивом минимальный износ зафиксирован у покрытий, полученных на дистанции напыления 100 мм (рис. 5, *б*, кривая 1). С ее увеличением частицы, формирующие покрытие, дольше пребывают в атмосфере воздуха, в результате чего увеличивается толщина оксидных пленок на их поверхности, а соответственно и в покрытии. Это способствует увеличению износостойкости покрытий. При изнашивании незакрепленным абразивом износостойкость не зависит от дистанции напыления (рис. 5, *б*, кривая

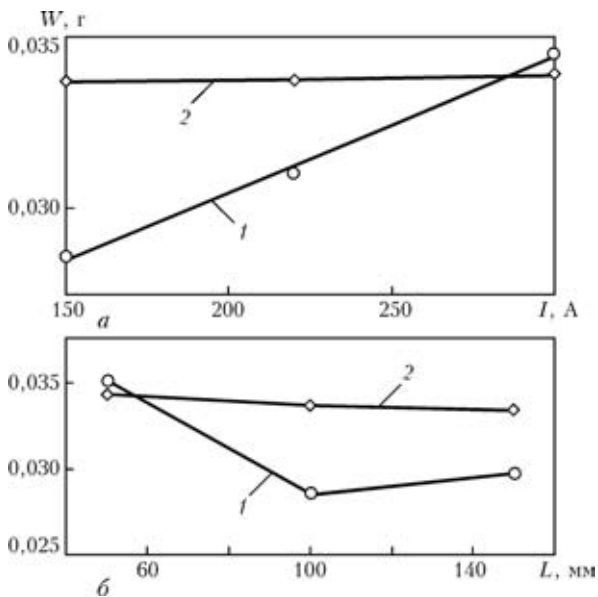


Рис. 5. Влияние силы тока (*a*) и дистанции напыления (*б*) на износ покрытия при испытаниях закрепленным (1) и незакрепленным (2) абразивом: *a* —  $U = 32$  В,  $L = 100$  мм,  $P = 0,6$  МПа; *б* —  $U = 32$  В,  $I = 150$  А,  $P = 0,6$  МПа

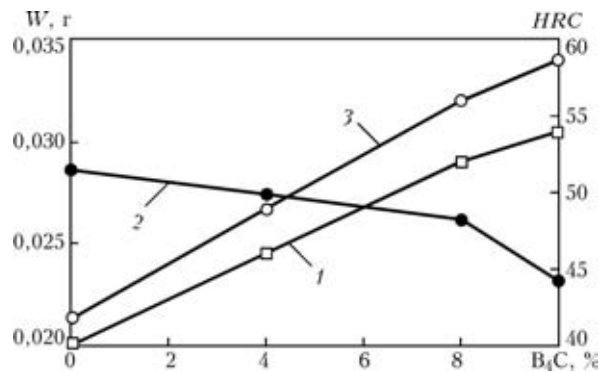


Рис. 6. Влияние содержания карбида бора в шихте ПП на твердость (1) и износостойкость покрытия при испытаниях закрепленным (2) и незакрепленным (3) абразивом

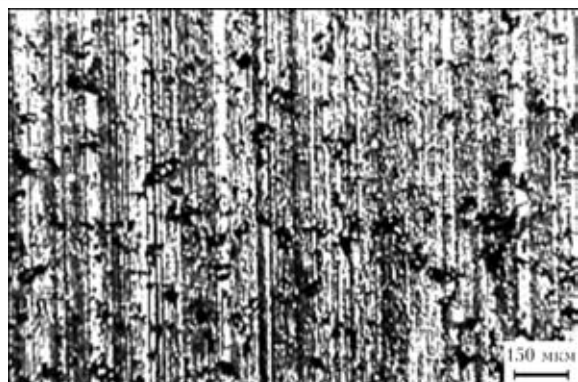


Рис. 7. Топография поверхности трения покрытия после испытания незакрепленным абразивом (режимы напыления:  $U = 32$  В,  $I = 150$  А,  $P = 0,6$  МПа,  $L = 100$  мм)

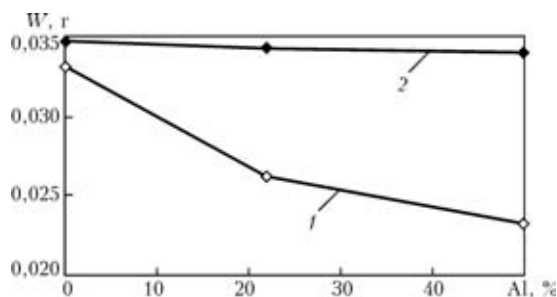


Рис. 8. Влияние содержания алюминия в шихте ПП (50 % ФХБ + 8 %  $B_4C$  + Cr) на износостойкость покрытий при испытании на изнашивание закрепленным (1) и незакрепленным (2) абразивом

2), а определяется размером ламелей, на величину которых дистанция напыления не влияет.

С целью изучения возможности увеличения абразивной износостойкости покрытий, полученных при использовании ПП ФМИ-2, в состав ее шихты добавляли карбид бора  $B_4C$ . Установлено, что увеличение количества боридов в структуре покрытия способствует повышению твердости с 40 до 54 HRC (рис. 6, кривая 1). Однако когезионная прочность покрытия при этом уменьшается от 130 до 90 МПа в результате возникновения микротрещин в процессе формирования слоя. Испытания на износостойкость покрытий закрепленным абразивом показали, что несмотря на существенное повышение твердости его износостойкость воз-

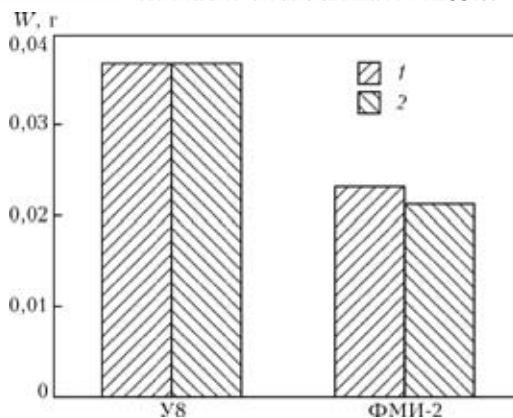


Рис. 9. Износостойкость стали У8 и покрытия из ПП ФМИ-2 при испытаниях закрепленным (1) и незакрепленным (2) абразивом

растает лишь на 25, а при испытании незакрепленным абразивом, наоборот, уменьшается на 30 % (рис. 6, кривые 2, 3), поскольку во время шлифования в покрытии возникают поверхностные трещины, способствующие преобладающему межзеренному разрушению, о чем свидетельствует рельеф поверхности (рис. 7).

С целью изучения влияния количества алюминия в шихте ПП (50 % ФХБ + 8 %  $B_4C$  + 42 % Cr) на абразивную износостойкость покрытия хром частично заменяли алюминием. Установлено, что при изменении количества алюминия в шихте ПП твердость покрытий не изменяется, а износостойкость (при испытаниях по двум методикам) возрастает лишь на 30 % при полной замене хрома на алюминий (рис. 8).

Абразивную износостойкость покрытия системы Fe–Cr–B–Al сравнивали с износостойкостью закаленной стали У8 (HRC 60) при аналогичных условиях испытаний. Выявлено, что износ закаленной стали в 1,5 раза больше, чем покрытия (рис. 9). Кроме того, следы от износа абразивным диском для стали более однородны, чем для покрытия (рис. 10).

Таким образом, проведенные испытания показали, что более высокую износостойкость имеют покрытия, полученные при большем давлении

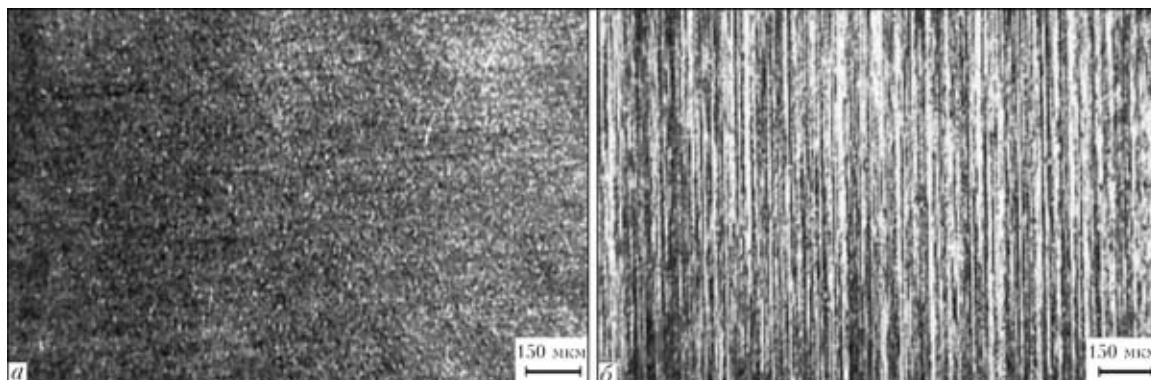


Рис. 10. Топографии поверхностей трения закаленной стали У8 после испытаний незакрепленным (а) и закрепленным (б) абразивом



сжатого воздуха, и характеризующиеся более мелкодисперсной структурой. Износостойкость покрытий, сформированных из ПП с шихтой на основе феррохромбора, на 50 % выше, чем закаленной стали У8 (*HRC* 60). Введение в шихту ПП карбида бора повышает твердость покрытий, но уменьшает их пластичность. При испытаниях закрепленным абразивом износостойкость покрытий возрастает, а незакрепленным уменьшается.

Studied is the influence of electric arc metallization modes using flux-cored wire FMI-2 on the microstructure and abrasive wear resistance of the coatings. It is shown that among the many factors the compressed air pressure, current and spraying distance have the greatest influence on these characteristics. Wear resistance of coatings, deposited using the flux-cored wire with the charge based on ferrochromium-boron, is higher than that of hardened steel. The highest wear resistance is found in coatings deposited at a high pressure of compressed air, characterized by finely dispersed structure and containing a large amount of the oxide phase on the interphases.

Поступила в редакцию 27.04.2005

## НОВАЯ КНИГА

### ПОЛЕЗНЫЙ СПРАВОЧНИК

В 2005 г. издательством «Интермет Инжиниринг» (Москва, РФ) выпущен в свет справочник «Сварочные технологии при ремонтных работах» известного российского ученого-материаловеда в области теплоэнергетики Ф. А. Хромченко. Справочник посвящен рассмотрению способов сварочно-наплавочных технологий при ремонте и восстановлении деталей и узлов корпусного оборудования и трубопроводов в различных отраслях промышленности, включая энергомашиностроение, химическую, нефтеперерабатывающую и металлургическую. Особое внимание уделено применению сварочных ремонтных технологий в энергетике. Важность и актуальность данной книги заключается в ее направленности на обеспечение надежности и долговечности котельного и турбинного оборудования, а также трубопроводов действующих энергоблоков ТЭС и отработавших свой парковый ресурс.



Справочник состоит из восьми глав, четырех приложений и библиографии.

В **главе 1** дана классификация видов повреждений в деталях и узлах конструкций и приведены способы ремонтной сварки и термообработки.

**Глава 2** посвящена ремонту сварных соединений паропроводов, коллекторов котлов, водо-, газо-, нефтепроводов и трубных систем диаметром до 100 мм. Рассмотрены причины повреждений с их металлографической трактовкой и даны рекомендации по ремонту.

**Глава 3** посвящена ремонтной сварке трубных элементов станционных и магистральных трубопроводов, коллекторов и литых корпусов арматуры, тройников, колен и отводов.

В **главе 4** приведен материал по выбору оптимальных технологий ремонта баббанов котлов и другого котельного оборудования.

В **главе 5** рассмотрены ремонтные технологии сварки литых корпусных деталей и узлов паровых турбин и способы ремонта рабочих и направляющих лопаток с эрозионными повреждениями. Даны основные положения сварочно-ремонтной технологии при восстановлении этих деталей.

**Глава 6** посвящена весьма важному вопросу ремонтной сварки чугуновых деталей. Приведены основные положения сварочной технологии в зависимости от характера и размера дефектов и даны рекомендации по сварочным материалам.

В **главе 7** предложены способы наплавки и наплавочные материалы при восстановлении арматуры и изделий различного профиля.

**Глава 8** посвящена вопросу термической обработки при ремонте оборудования и элементов трубопроводов. Рассмотрены различные виды термообработки, включая предварительный и сопутствующий подогрев при сварке, термический отдых, высокий отпуск, нормализацию и др., а также описаны способы нагрева (индукционный, радиационный и комбинированный). Даны характерные примеры. Кроме того, приведены сведения о восстановительной термической обработке паропроводов, отработавших свой ресурс.

Изданный справочник обобщает результаты многолетней работы автора и является серьезным вкладом в материаловедение в области теплоэнергетики. Представленный материал может быть использован при разработке технологий ремонтной сварки применительно к конкретным деталям турбо- и котлоагрегатов энергоблоков ТЭС. Написан простым, доступным языком, хорошо иллюстрирован и может быть использован инженерами и специалистами сварочного производства в области теплоэнергетики, а также преподавателями и студентами технических вузов.

А. К. Царюк, канд. техн. наук