

УДК 621.924.093.048:621.791

## Разработка технологии механизированной дуговой наплавки покрытия с заданным комплексом свойств, стойкого к гидроабразивному износу

**А.Г. Орлик, Г.Г. Чернышов**

*Показано, что структура наплавленного слоя, обеспечивающая получение требуемого комплекса свойств при гидроабразивном изнашивании, должна быть гетерофазной и формироваться в процессе наплавки с образованием в матрице разноориентированных кристаллов армирующей фазы при кристаллизации покрытия, твердость которого должна быть более 0,8 твердости абразива.*

**Ключевые слова:** механизированная дуговая наплавка, металлография с использованием оптической и электронной микроскопии, микрорентгеноструктурный анализ, испытания на гидроабразивный износ.

## Development of technology for mechanized arc welding of coatings with a given set of properties resistant to hydroabrasive wear

**A.G. Orlik, G.G. Chernyshov**

*It is shown that the structure of the deposited layer, which provides obtaining the required set of properties under hydroabrasive wear, must be heterophase and formed during the deposition with formation of differently oriented crystals of the reinforcing phase in the matrix during crystallization of the coating, which hardness should be more than 0.8 of the abrasive's one.*

**Keywords:** mechanized arc welding, metallography using optical and electron microscopy, microrentgenostructural analysis, hydroabrasive wear test.

**К**онкурентоспособность современных промышленных предприятий во многом зависит от производительности и надежности используемого промышленного оборудования, эффективность оборудования или промышленного комплекса — от технологических перебоев или аварийных остановок на плановый и аварийный ремонт. В наибольшей степени это обусловлено износом оборудования. Период работы оборудования зависит от ресурса всех деталей, входящих



**ОРЛИК**  
Антон Геннадьевич  
аспирант



**ЧЕРНЫШОВ**  
Георгий Георгиевич  
доктор технических наук,  
профессор  
кафедры «Технологии  
сварки и диагностики»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)  
e-mail: a.g.orlik@yandex.ru

в него. Детали, подвергающиеся интенсивному износу, как правило, имеют короткий период эксплуатации, что сильно снижает общий ресурс оборудования и вызывает плановые остановки.

Предприятиями промышленности и сельского хозяйства ежегодно расходуются сотни тысяч тонн металла на изготовление запасных частей для замены быстроизнашивающихся деталей: различного рода штампов, рабочих органов дробильных механизмов, деталей землеройных машин, валков прокатных станов, почвообрабатывающих и других машин. При этом затрачивается большое количество труда, увеличиваются простои агрегатов для замены изношенных деталей, снижается производительность машин и аппаратов. Поэтому повышение износостойкости и срока службы машин — важная задача науки и производства, особенно в современных условиях, когда предприятия для сохранения высокой конкурентоспособности вынуждены использовать очень дорогое высокопроизводительное оборудование. Наиболее перспективным методом повышения ресурса работы деталей машин является наплавка износостойких материалов. Детали с износостойкими наплавленными слоями применяют в условиях комбинированного абразивного и эрозионного износа оборудования, такого, как станки для глубокого бурения, землеройные машины, размельчающие установки, мельницы, грязевые насосы, транспортирующие установки, а также машины и установки сельскохозяйственной, пищевой, целлюлозной, химической промышленности. Увеличение ресурса эксплуатации оборудования, работающего в условиях гидроабразивного износа, является актуальной проблемой.

Детали машин, подвергающиеся интенсивному износу, имеют короткий период эксплуатации, что снижает общий ресурс работы оборудования. Наплавка — универсальный, экономичный и широко используемый в промышленности метод повышения ресурса работы деталей машин.

В данной работе рассматривается группа изделий, функционирующих в условиях гидроабразивного износа, такие как спусковые лотки

гравийных и песчаных карьеров, смесители, шнеки. Наиболее универсальным представителем данной группы изделий является шнек. Поэтому для исследований был выбран шнек регенерационной установки на ОАО «Калужский турбинный завод». К рабочей поверхности этого шнека предъявляются следующие требования: твердость наплавленного слоя не менее 50 HRC, высота наплавленного слоя не менее 4 мм, ширина наплавленного слоя не менее 25 мм и ресурс работы не менее 8 месяцев.

В базовой технологии применялась ручная дуговая наплавка износостойкого покрытия электродами Т-590 на постоянном токе прямой полярности. При этом твердость наплавленного слоя на рекомендуемых параметрах режима сварки составляла 51 HRC. Следует отметить, что такие прочностные характеристики наплавленного слоя могут быть получены при наплавке второго слоя, а исходя из рекомендаций производителя данных электродов, необходимо наносить не более двух слоев, что ограничивает применение этих электродов при значительном износе реборды шнека. В процессе наплавки допустимы поперечные трещины.

Ресурс работы рассматриваемой детали ограничивается 8 месяцами, поэтому необходимо повышение износостойкости наплавки и механизация процесса.

Для решения поставленной задачи проведен анализ существующих представлений о механизмах абразивного и гидроабразивного разрушения. Процессу абразивного изнашивания посвящены работы М.М. Хрущева, М.А. Бабичева, В.Н. Виноградова, Г.М. Сорокина, М.М. Тененбаума, А.В. Чичинадзе [1] и других, а гидроабразивного изнашивания — работы Д.М. Гаркунова, А.В. Семенова, Г.Е. Лазарева и других [2–4]. При этом механизмы разрушения представлены только для абразивного изнашивания с абразивом и контртелом. Различают: прямое разрушение — унос армирующей фазы и матрицы, интенсивный износ — решетчатое разрушение армирующей фазы и матрицы, умеренный износ — смятие матрицы и разрушение абразива.

Было отмечено, что при гидроабразивном изнашивании в условиях воздействия жидкой фазы отсутствует третий слой между наплавкой

и контртелом, характерный для абразивного изнашивания и формирующийся из продуктов разрушения материала и абразива. Унос матрицы и армирующих фаз без дробления абразива зависит от проявления эффекта Ребиндера, влияние которого на разрушение материала в значительной степени определяется прочностью связей на межфазной границе между матрицей и армирующей фазой.

В работах перечисленных авторов предложены критерии износостойкости. Факторами, определяющими износостойкость, являются: отношение твердости металла к твердости абразива (критерий  $K_t$ ), соотношение размера армирующей фазы ( $R_{\phi}$ ) и критичного размера абразива ( $R_{кра}$ ), а также механические свойства различных структурных фаз [5].

На основании анализа литературных источников были сформированы требования к структуре металла, определяющие сопротивляемость абразивному разрушению. Главными из них являются: гетерофазность металла, наличие пластичной и прочной матрицы, наличие твердых и высокомодульных армирующих фаз. При этом прочность межфазной связи между матрицей и армирующей фазой должна быть максимальной.

На основании имеющихся литературных данных были проанализированы существующие наплавочные материалы, применяемые при различных видах износа, с системой легирования на железистой основе и на основе карбидов кобальта, никеля, молибдена и вольфрама. В настоящее время более перспективными являются композиционные материалы, позволяющие повысить эксплуатационные свойства деталей машин.

Композиционные металлокерамические покрытия на основе металлов группы железа и тугоплавких фаз применяют для абразивно нагруженных деталей, которые одновременно подвергаются действию умеренных ударов, например: спусковые лотки гравийных и песчаных карьеров, транспортирующие шнеки, ножи ковша экскаваторов, насосы в производстве бетона, ковши экскаваторов, козырьки драг, перфолисты обогащительного и сортировочного оборудования, колосники печей гли-

нозема, рабочие колеса и улитки землесосов на песчаном грунте, шламовые насосы и детали строительных машин и механизмов, работающих во всех климатических условиях.

С учетом выявленных критериев износостойкости для рассмотрения механизма разрушения при гидроабразивном изнашивании были выбраны следующие группы наплавочных материалов:

1-я группа — материалы, в которых высокомодульные армирующие фазы вводятся в готовом виде в составе шихты (*ex situ*). Основные компоненты шихты Fe, Si, Mn и не менее 50%WC. Для исследований данной группы материалов была выбрана порошковая проволока DO \*48;

2-я группа — материалы, в которых высокопрочная армирующая фаза формируется в расплаве непосредственно в процессе кристаллизации (*in situ*) за счет определенного уровня легирования компонентами (Cr, Mo, Nb, W, V), обеспечивающими формирование в наплавленном металле высокомодульных интерметаллидных фаз. Наиболее характерным представителем данной группы материалов является порошковая проволока DO 390N.

Для оценки сопротивляемости гидроабразивному износу наплавленных слоев с различной структурой выбрана единая методика наплавки и исследования наплавленного металла. Наплавку на пластины из Ст3 толщиной 8 мм выполняли порошковыми проволоками в защитных газах в установке фирмы Fronius с параметрами режима, обеспечивающими получение заданной геометрии наплавленной поверхности, что реализуется при выборе тока в пределах 145...245 А, напряжения 25...35 В, скорости наплавки 8...10 м/ч и применении поперечных колебаний электрода с частотой 0,65 Гц и амплитудой 7,5...14 мм.

Использовали три основных состава компонентов газовой смеси: 100%Ar; 98%Ar + 2%CO<sub>2</sub> и 80%Ar + 20%CO<sub>2</sub>. Для изменения скорости охлаждения применяли принудительное охлаждение водой и поперечные колебания электрода.

Для каждого параметра режимов осуществлялась запись термических циклов по оси шва на спе-

циализированном измерительном комплексе, позволяющем преобразовывать аналоговые сигналы от термопар. Комплекс производит одновременную запись сигналов по 10 каналам (мгновенные значения тока, напряжения дуги и 8 сигналов от термопар). Повторная запись по каждому каналу выполняется с частотой 40 Гц. Обработка данных производилась с помощью электронных таблиц EXCEL.

Замер твердости (HRC) на поверхности и в поперечном сечении наплавки осуществлялся универсальным прибором WilsonWolpert 930N. Вдавливание конуса выполняли при нагрузке 1 500 Н.

Для анализа структуры наплавленного металла и состава фаз использовали оптический микроскоп Leica DMILM с программой обработки изображения Quin.

Исследование структуры методами растровой электронной микроскопии выполнялось на микроскопе Carl Zeiss LEO 430i с энергодисперсионным рентгеновским анализатором JED-2300 фирмы JEOL и растровом сканирующем электронном микроскопе FEI Quanta 200 3D DualBeam TM (USA) с интегрированной системой фокусированного ионного пучка. После получения растровой микрофотографии производилось инвертирование фотографий для получения картины, аналогичной фотографиям оптического микроскопа.

Фазовый состав наплавленных покрытий исследовали методами рентгенографии на многоцелевом рентгеновском дифрактометре с системой управления и регистрации на базе IBM PC с ДРОН-3М.

Стойкость наплавленного покрытия к гидроабразивному износу определяли на установке Kärcher (рис. 1). Потерю массы образца измеряли взвешиванием через 5, 10 и 15 мин обработки. Взвешивание проводили на электронных весах LP 220 S (Sartorius) с точностью измерения 0,0001 г.

Установлено, что при наплавке проволокой, обеспечивающей формирование и рост упрочняющих фаз в процессе кристаллизации, твердость рабочего слоя по глубине наплавки практически не изменяется, а на поверхности наплавленного слоя составляет 58–67 HRC. При

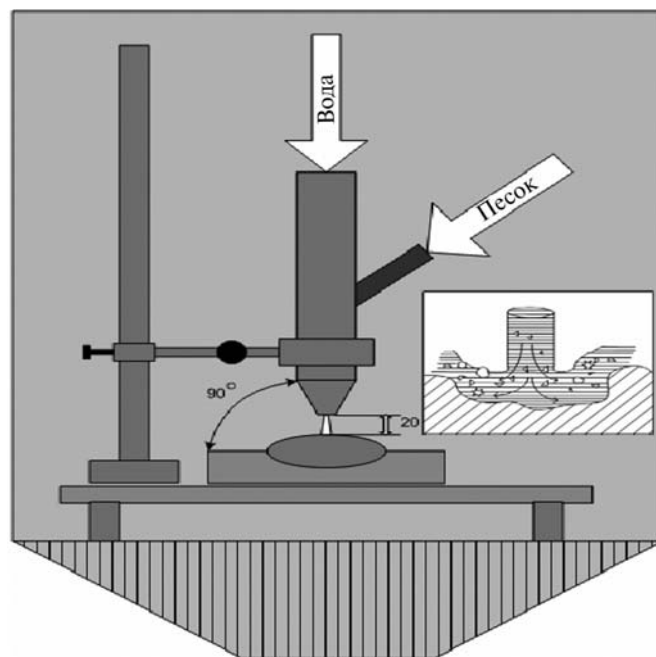


Рис. 1. Установка Kärcher для гидроабразивного износа

наплавке проволокой с введением упрочняющих фаз в готовом виде твердость у поверхности ниже, чем у линии сплавления.

Поверхностное натяжение расплавленного металла сварочной ванны снижается при добавлении в аргон углекислого газа. Установлено, что применение сварочной смеси Ar — CO<sub>2</sub> с содержанием 20% CO<sub>2</sub> позволяет уменьшить краевые углы между поверхностью подложки и профилем наплавки до  $\phi < 90^\circ$ , но при этом повышается разбрызгивание.

Для исследуемых параметров режима наплавки была определена доля участия основного металла в наплавленном слое в зависимости от состава защитного газа, скорости охлаждения, применения колебаний и изменения силы тока.

Увеличение доли участия основного металла в смеси с содержанием CO<sub>2</sub> 20% в аргоне больше, чем в смеси с 2% CO<sub>2</sub> в аргоне. Это обусловлено увеличением жидкотекучести наплавленного металла и изменением характеристик дуги, что приводит к выгоранию легирующих элементов и увеличению перемешивания основного металла с наплавленным. Следовательно, большее содержание углекислого газа может вызвать снижение износостойкости наплавленного покрытия.

Наплавка с колебаниями также вызывает снижение доли участия основного металла, по сравнению с наплавкой, выполненной без колебаний, что связано с уменьшением нагрева подложки за счет увеличения скорости перемещения конца электрода, и, как следствие, снижением мгновенного значения погонной энергии.

На рисунке 2 представлены характерные структуры металла на разной глубине валиков, выполненных порошковыми проволоками.

В покрытии, выполненном по технологии, обеспечивающей введение готовой армирующей фазы, наблюдается присутствие в матрице армирующих частиц (WC). При этом у поверхности наплавленного покрытия частицы меньше, чем в зоне сплавления покрытия с основным металлом из-за осаждения их на дно ванны. Такая неоднородность распределения по сечению наплавленного валика обуславливает изменение твердости по глубине слоя и может влиять на стойкость покрытия к гидроабразивному изнашиванию.

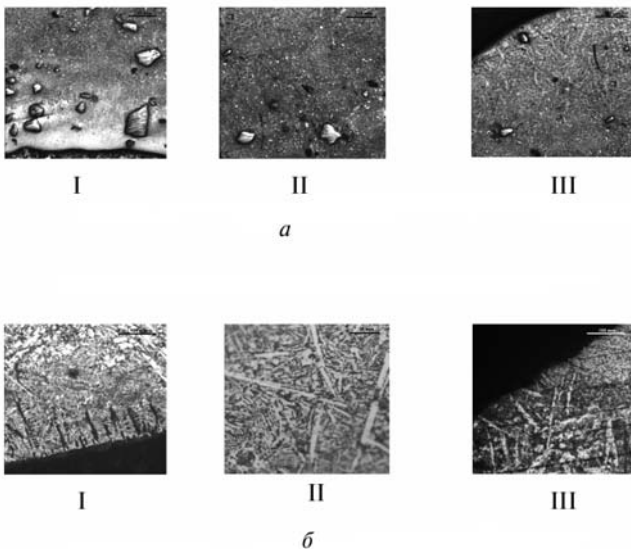


Рис. 2. Структуры покрытий по глубине валика различных систем легирования:

- a* — система легирования — Fe-Si-Mn-VC;
- б* — система легирования — Fe-Si-Mn-Cr-Mo-Nb-W-B; I — линия сплавления; II — средняя часть валика; III — верхняя часть валика

В покрытии, выполненном по технологии, обеспечивающей формирование и рост армирующих фаз в процессе кристаллизации, наблюдается дендритная структура, свидетельствующая об эпитаксиальной кристаллизации в зоне сплавления валика с основным металлом, и формирование игольчатой разно ориентированной дисперсной армирующей фазы по всему сечению наплавленного покрытия.

Для оценки влияния армирующих фаз, сформированных в процессе кристаллизации, на механизм изнашивания был проведен анализ размеров армирующей фазы по всему сечению наплавленного слоя (рис. 3).

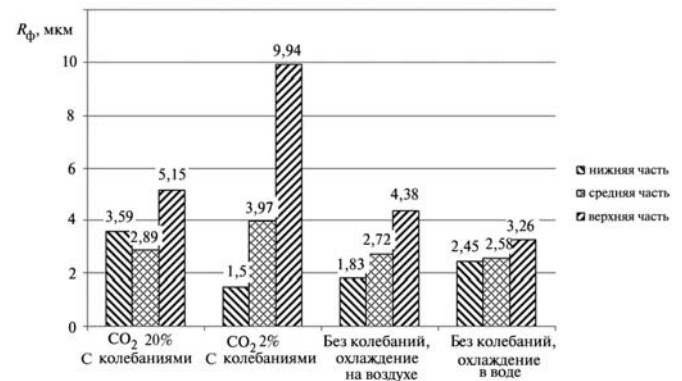


Рис. 3. Размеры кристаллов армирующих фаз

Установлено, что максимальный размер армирующих фаз наблюдается при минимальной скорости охлаждения на образцах, выполненных с использованием поперечных колебаний. При увеличении скорости охлаждения происходит уменьшение размеров игл карбоборидных кристаллов. Объемное содержание фазы и ее размеры, в соответствии с имеющимися критериями изнашивания, наиболее благоприятны при минимальной скорости охлаждения, так как в этом случае размер фазы превышает размер абразива. Поскольку эти фазы высокотемпературные, они являются ведущими в формировании структуры наплавленного покрытия. Кроме того, состав фаз определяет их твердость и прочностные свойства, необходимые для обеспечения требуемой сопротивляемости гидроабразивному разрушению покрытия.

Для определения фазового состава наплавленных слоев проводилась рентгеновская съемка на установке ДРОН-3. Одна из дифракто-

грамм, снятая с поверхности наплавленного слоя, приведена на рис. 4. Дифрактограммы весьма сложны в расшифровке. Объем мартенситной фазы  $\alpha = \text{Fe}$  (см. рис. 4) составляет 26,5%,  $\gamma = \text{Fe} - 20, 21\%$ . В составе наплавки обнаружены бориды  $\text{WB}_4$ ,  $(\text{Mo}, \text{W})\text{B}$  (5,3%),  $\text{FeW}_2\text{B}_2$  (5,8%), карбиды  $\text{FeW}_3\text{C}$  и другие фазы.

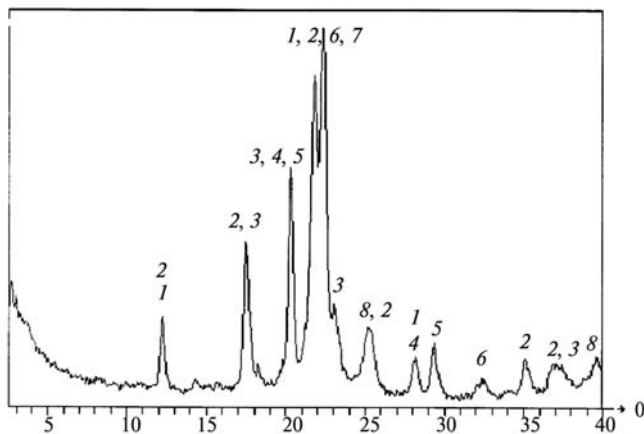


Рис. 4. Дифрактограмма, полученная с поверхности наплавленного слоя:

- 1 —  $\text{WB}_4$ ; 2 —  $\text{FeW}_2\text{B}_2$ ; 3 —  $\text{FeW}_3\text{C}$ ; 4 — W; 5 — Mo;
- 6 —  $\alpha\text{-Fe}(\text{CrN})$ ; 7 — Cr; 8 —  $\gamma\text{-Fe}$

Для уточнения химического состава фаз проведен микрорентгеноструктурный анализ с записью карт в характеристическом излучении. Установлено, что наплавленный металл кристаллизуется как многофазная смесь, содержащая первичные блочные карбиды и бориды Nb и Mo(W) (WC-87 HRC) с температурой плавления выше 3 050 и 2 100 °С, а также борокарбиды хрома ( $\text{CrB}_2$ —106 HRC) и железа в виде дендритных игл, твердость которых выше, чем у абразива. При этом растущие кристаллы карбидов не оттесняют тугоплавкие боридные фазы, а поглощают их вследствие решеточного соответствия и смачиваемости (показано стрелками на рис. 5). Это должно обеспечивать требуемое сопротивление гидроабразивному изнашиванию.

В покрытии, наплавленном по технологии с формированием армирующих фаз в процессе кристаллизации, происходит рост высокопрочной армирующей фазы в пластичной матрице (рис. 6), поэтому высокая адгезия по межфазным границам фаза — матрица обеспечивается

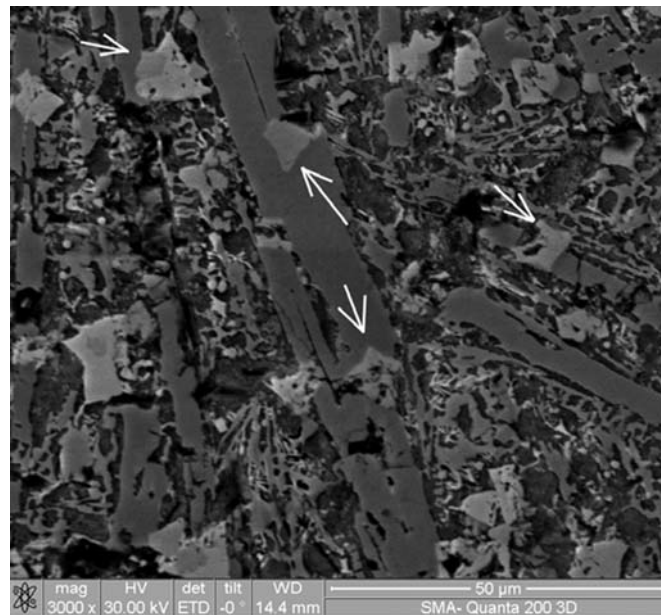


Рис. 5. Типичная структура наплавленного металла

минимальным несоответствием решеток с армирующим наполнителем, устраняя возможность проявления при воздействии гидроабразива эффекта Ребиндера.

Все наплавленные образцы испытывали на гидроабразивный износ. Полученные данные по скорости изнашивания наплавленных поверхностей обрабатывали статистическими методами. Для достоверности результатов испытания для каждого параметра режима производили на пяти образцах.

Результаты оценивали по скорости потери массы образцов (г/ч) за 15 мин при проведении испытаний в пределах рабочего слоя (рис. 7), так как в течении первых 5 мин происходит очистка поверхности, а далее устанавливается стационарный режим изнашивания. Результаты показывают, что большую скорость изнашивания имеют образцы, наплавленные по базовой технологии и по технологии, обеспечивающей введение готовой армирующей фазы, а меньшую скорость изнашивания — образцы, наплавленные по технологии с формированием и ростом армирующих фаз в процессе кристаллизации, в смеси с содержанием 2%  $\text{CO}_2$  в аргоне, имеющем максимальные размеры игл и минимальную долю участия основного металла.

На основании проведенных исследований были выявлены особенности гидроабразивного

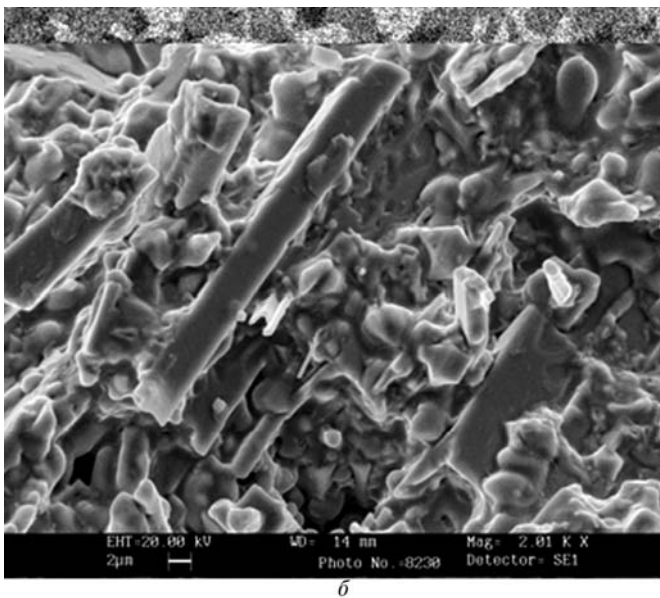
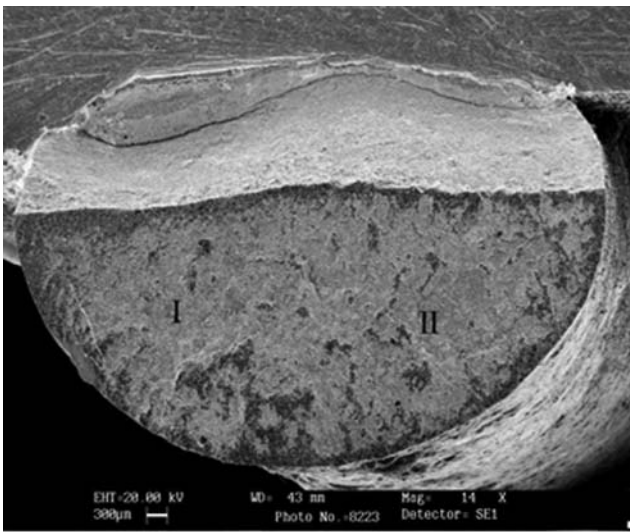


Рис. 6. Макро- (а) и микрофотографии (б) излома наплавленного валика

изнашивания наплавленных слоев и предложены уточненные схемы механизма изнашивания

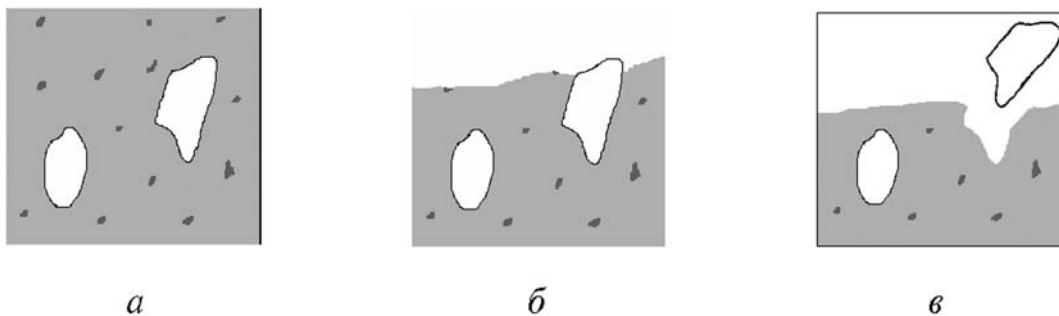


Рис. 8. Особенности изнашивания гидроабразивного покрытия, выполненного по технологии Ex situ:

а — первый этап; б — второй этап; в — третий этап

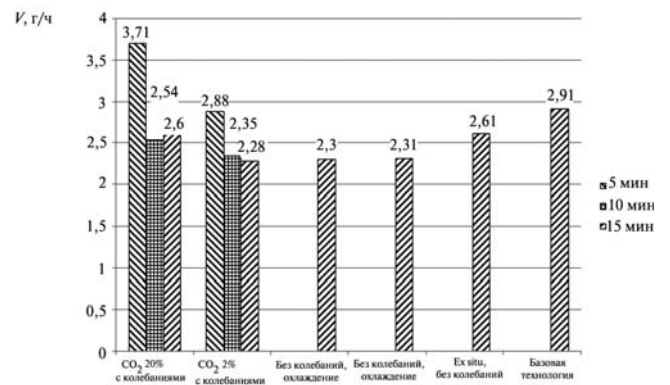


Рис. 7. Скорость изнашивания наплавленных слоев

в зависимости от структуры наплавленного металла.

Для технологии, обеспечивающей введение готовой армирующей фазы, характерно вымывание матрицы, ослабление межфазной связи армирующей фазы с матрицей и последующий отрыв фазы (рис. 8), т. е. максимальное проявление эффекта Ребиндера, что подтверждается результатом проведенных испытаний.

Технологии с формированием и ростом армирующих фаз в процессе кристаллизации характерна максимальная связь матрицы и армирующей фазы, исключая проявление эффекта Ребиндера, упрочнение матрицы дисперсными карбоборидными включениями и формирование упрочняющей фазы в виде дендритной сетки, снижающей скорость уноса матрицы. При этом разрушение поверхности покрытия, сформированного по технологии in situ, происходит путем уноса матрицы и обламывания абразивом выступающих игл упрочняющей фазы, а не за счет вымывания и выкрашивания зерен упрочняющей фазы (рис. 9).

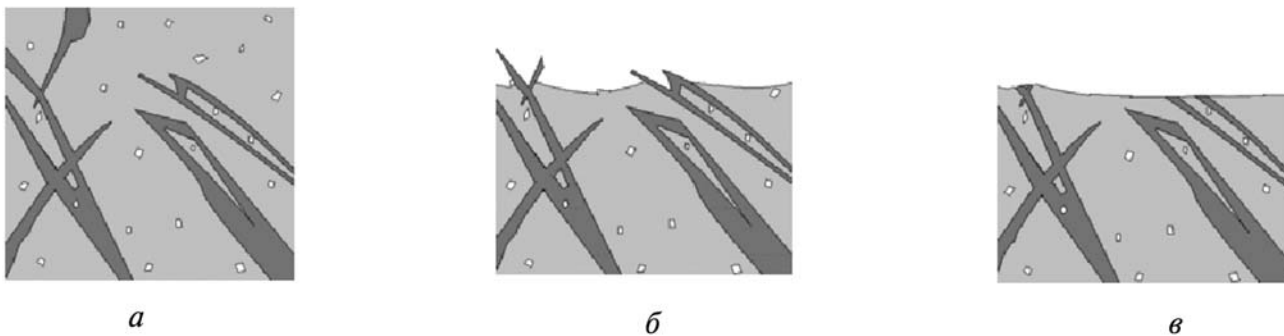


Рис. 9. Особенности гидроабразивного изнашивания покрытия, выполненного по технологии *in situ*:

*a* — первый этап; *б* — второй этап; *в* — третий этап

Предварительная оценка по принятому для абразивного износа параметру  $K_T$  является неоднозначной для гидроабразивного изнашивания. Этот критерий можно использовать в качестве необходимого, но недостаточного показателя. Полученные авторами статьи наплавленные покрытия имеют  $K_T > 0,8$ . Отсюда следует, что рассматриваемые процессы абразивного разрушения поверхности исследуемых наплавленных слоев можно рассматривать как умеренное разрушение, поэтому окончательный выбор материала для наплавки следует проводить с учетом данных структурного анализа, подтверждающего возможность получения структуры с максимальным сопротивлением изнашиванию.

На основании проведенных исследований и выявленных особенностей гидроабразивного изнашивания были разработаны технологические рекомендации для нанесения износостойкого покрытия.

Для обеспечения требуемой стойкости к гидроабразивному изнашиванию наплавленного покрытия необходимо применять материалы на железной основе с системой легирования Fe–C–Si–Cr–Mo–Nb–W–B, позволяющие формировать структуру наплавленного слоя с разноориентированной игольчатой упрочняющей фазой состава Fe–C–Cr и мелкодисперсными карбидами в матрице. Твердость по всему сечению рабочего слоя должна быть не менее 64 HRC для получения  $K_T > 0,8$ .

Производственные испытания проводили при восстановлении реборды шнека конвертирующей установки на ОАО «Калужский турбинный завод». На основе проведенных иссле-

дований разработана технология восстановления рабочей поверхности реборды шнека. Ресурс работы изделия повысился в 2 раза. На предлагаемую технологию получен акт внедрения.

### Выводы

1. Показано, что при выборе материала для наплавки слоев, стойких к гидроабразивному износу, существующий критерий  $K_T$  является недостаточным, так как не в полной мере характеризует износостойкость материала, даже в рамках одного структурного класса сплавов. В условиях гидроабразивного износа большее значение имеют межфазные связи, геометрические размеры, прочность и твердость структурных составляющих наплавленного металла. В связи с этим наиболее предпочтительны наплавочные материалы, обеспечивающие формирование высокомолекулярных упрочняющих фаз в процессе кристаллизации в пластичной матрице как многофазной смеси, содержащей первичные блочные карбиды и бориды, с высокой адгезией по межфазным границам «фаза — матрица».

2. Раскрыт механизм разрушения поверхности при гидроабразивном износе покрытий со структурой, содержащей упрочняющие фазы в виде игольчатых дендритов и полученной *in situ* с использованием сварочных материалов на железной основе с системой легирования Fe–C–Si–Cr–Mo–Nb–W–B. Установлено, что в отличие от наплавленных покрытий со структурой, содержащей сформированную *ex situ* упрочняющую фазу в виде WC, разрушение покрытия с игольчатыми дендритами происходит не за счет вымывания и выкрашивания



зерен упрочняющей фазы, обусловленного эффектом Ребиндера, а путем обламывания абразивом выступающих игл упрочняющей фазы, что позволяет увеличить сопротивление износу в 1,5–2 раза.

3. Основное сопротивление разрушению оказывают иглы упрочняющей фазы, поэтому при выборе технологии наплавки для формирования структуры с высоким сопротивлением гидроабразивному разрушению необходимо использовать режимы с минимальной скоростью охлаждения ванны, обеспечивающие формирование в наплавленном слое структуры с максимальным объемом упрочняющей фазы, размером карбоборидных кристаллов  $R_{\text{ф}} \geq R_{\text{кр}}$  и твердостью  $H_{\text{т}}$  более 0,8 твердости абразива  $H_{\text{а}}$ , но не приводящие к деградации упрочняющей фазы и увеличению доли участия основного металла в наплавленном слое, и защитный газ с содержанием  $\text{CO}_2$  в  $\text{Ar}$  не более 5%.

4. Диапазон изменения режимов наплавки должен обеспечивать, с одной стороны, качественное формирование и заданные размеры наплавленного валика, с другой стороны, — требуемые параметры термического цикла, что реализуется при однослойной однопроводной наплавке за счет выбора тока в пределах 145...245 А, напряжения 25...35 В, скорости наплавки 8...10 м/ч и применения поперечных колебаний электрода с частотой 0,65 Гц и амплитудой 7,5...14 мм.

5. Предложена методика испытаний на гидроабразивный износ, позволяющая получать сравнимые результаты оценки стойкости различных видов покрытий. Адекватность методики подтверждена производственными

испытаниями наплавленных слоев в реальных условиях гидроабразивного изнашивания, поэтому данная методика может быть предложена при выборе материала для наплавки деталей, работающих в условиях гидроабразивного воздействия.

6. Промышленное испытание выбранного наплавочного материала на железной основе с системой легирования Fe–C–Si–Cr–Mo–Nb–W–V и рекомендуемой технологии наплавки покрытия при ремонте шнека на ОАО «Калужский турбинный завод» показало, что стойкость покрытия увеличивается в 2 раза и позволяет экономить на каждом шнеке не менее 1 млн 450 тыс. руб. за счет сокращения объема ремонтных работ.

## Литература

1. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун и др.; Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение. 2003. 576 с.
2. Гаркунов Д.Н. Триботехника. Износ и безызносность. М.: Изд. МСХА, 2001. 616 с.
3. Гаркунов Д.Н., Бондюгин В.Н., Быченков В.И. Вопросы и ответы по триботехнике // Эффект безызносности и триботехнологии. 1992. № 1. С. 55–69.
4. Гриб В.В., Лазарев Г.Е. Лабораторные испытания материалов на трение и износ. М.: Наука, 1968. 141 с.
5. Pintaude G., Bernardes F.G., Santod M.M., Sinatora A., Albertin E. Mild and severe wear of steels and cast irons in sliding abrasion. *Wear* 267 (2009). P. 19–25.

Статья поступила в редакцию 01.06.2012