

строение и техносфера XXI века : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 2009. – ДонНТУ, 2009. – Т. 1. – С. 276–279.

**7. Плазменно-вакуумные** покрытия: Монография / Ж.А. Мрочек [и др.]. – Минск: УП «Технопринт», 2004. – 369 с.

**8. Дороднов, А.М.** Методика инженерно-физического расчета электродугового источника плазмы для процессов нанесения покрытий в вакууме / А.М. Дороднов, А.Н. Кузнецов, С.В. Леонтьев. – М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 35 с.

*УДК 621.78*

**В.Г. ДАШКЕВИЧ**, канд. техн. наук,  
**В.Г. ЩЕРБАКОВ**,  
**А.А. БАКИНОВСКИЙ** (БНТУ)

## **СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ИСКРОБЕЗОПАСНЫХ ДИФфуЗИОННЫХ ПОКРЫТИЙ И НАПЛАВОК**

На предприятиях химической, нефтегазовой, горнодобывающей промышленности применяют множество легковоспламеняющихся газов и смесей. Образование фрикционных искр на подобных производствах недопустимо. Искры, образующиеся при ударе, например, стального стержня, охлаждаясь от 1630 °С до 1430 °С, отдают в окружающую среду  $38 \cdot 10^{-3}$  Дж, тогда как минимальная энергия поджигания при температурах 20–25 °С бензола и метана почти в 10 раз меньше [1]. Температура искр, возникающих при трении, также достаточно высокая (1640–1660 °С при трении стали о сталь) [2]. Поэтому все детали механизмов, при работе которых возможно искрение, а так же весь инструмент, при помощи которого проводятся ремонтные работы в помещениях с наличием легковоспламеняющихся газов, должны быть изготовлены из искробезопасных неискрящих материалов. На данный момент основным материалом для изготовления искробезопасного инструмента является бериллиевая бронза типа БрБ2 или БрБ2,5 [3]. На рисунке 1 представлена классификация решений по обеспечению фрикционной искробезопасности инструмента.



Рисунок 1 – Блок-схема вариантов исполнения искробезопасного инструмента

Производство инструмента из цветных сплавов обладает рядом бесспорных преимуществ: инструмент немагнитен, имеет высокую коррозионную стойкость, по прочностным характеристикам не уступает стальному [4]. Фирма Amrco дает на подобный искробезопасный инструмент пожизненную гарантию. Однако материал типа бериллиевой бронзы имеет очень высокую стоимость. При профессиональной работе инструментом в местах с небольшой концентрацией легковоспламеняющихся газов или для обслуживания транспорта, перевозящего взрывоопасные грузы, возможна замена цельнобронзового инструмента на омедненный гальваническим способом. Но такой инструмент сильно уступает по коррозионной стойкости и долговечности бронзовому. Кроме того, покрытие имеет очень низкую износостойкость. Однако мы считаем, что наряду с этими методами, перспективными способами обеспечения фрикционной искробезопасности являются диффузионное легирование и индукционная наплавка. Известен факт сильного снижения искробразования при фрикционном контакте борированной стали.

Структура поверхности после борирования состоит из высокобористой и низкобористой фазы. По нашему мнению, этот эффект можно объяснить механизмом, схематично изображенным на рисунке 2.

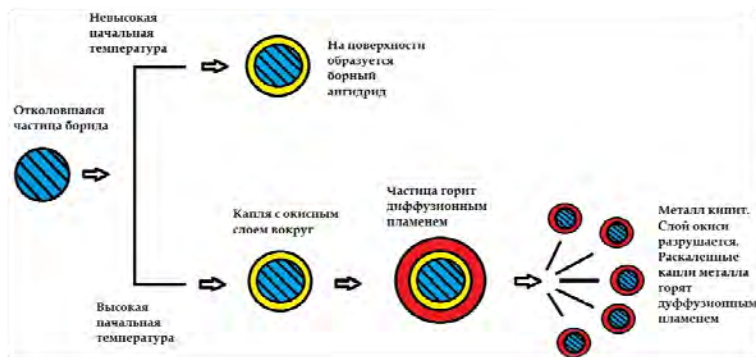


Рисунок 2 – Механизм горения искры боридов железа

Рассмотрим оторвавшуюся частичку боридов железа. Принципиально развитие процесса горения зависит от ее начальной температуры и, соответственно, от условий фрикционного контакта. Если температура не высока, то происходит следующее: бор окисляется гораздо легче и при более низких температурах, чем железо. В результате частица борированного слоя мгновенно покрывается борным ангидридом ( $B_2O_3$ ), который в свою очередь имеет низкую температуру плавления ( $460\text{ }^\circ\text{C}$ ). Он слабо пропускает кислород к самому материалу. В результате железо практически не окисляется и постепенно остывает, сохраняя на поверхности слой окиси бора. Таким образом, этот маленький кусочек боридов железа не разогревается до высоких температур и не является взрыво- и пожароопасным. Если же начальная температура велика, то кусочек металла под слоем борного ангидрида может дойти до кипения и, следовательно, приводит к разрушению оксидного слоя. В этом случае капли металла разлетаются и горят. Поэтому нельзя говорить об абсолютной безопасности боридов. Просто условия, при которых оторванному в процессе фрикционного контакта кусочку покрытия сообщается достаточно большое количество энергии, очень маловероятны [5].

Однако наряду с высокой износостойкостью и хорошей коррозионной стойкостью в некоторых средах боридные слои обладают высокой хрупкостью и довольно легко скалываются, что делает невозможным или очень затруднительным применение их в качестве покрытия для слесарного инструмента. Ввиду этого была поставлена задача исследовать влияние многокомпонентных боросодержащих диффузионных покрытий на уровень искрообразования в условиях фрикционного контакта.

В качестве процессов были выбраны боросилицирование, боротитанирование, борохромирование и однофазное борирование. насыщение проводили в порошковых смесях на стали 40ХФА – популярного материала для изготовления слесарного инструмента. На рисунках 3 и 4 показаны микроструктуры диффузионных слоев на стали 40ХФА после борохромирования и боросилицирования соответственно. Процессы проводились порошковым методом. При борохромировании образовались бориды железа, легированные хромом. Микротвердость поверхности составляет порядка 1800 НV. После боросилицирования образовался твердый раствор с невысокой твердостью. В качестве наплавляемого материала была выбрана борированная чугунная дробь ДЧЛ 08 ГОСТ 11964-81. Метод наплавки – индукционный. Параметры высокочастотного генератора ВЧГ2-100/0,066 для индукционной наплавки порошковой смеси следующие: накал – 13V, ток на сетке – 1,6 А, анод – 7,5 А, анодное напряжение 10 кВ.

С целью удешевления разрабатываемого наплавочного материала на основе чугунной дроби ДЧЛ 08 нами использовались отходы металлургического производства. На первом этапе было проанализировано количество годной для последующей переработки в наплавочный материал фракции. Химический состав дроби ДЧЛ 08: 2,9–3,5 % С, 0,4–0,7 % Мn, 1,2–2,0 % Si,  $\leq 0,12$  % S и P. Исходная микроструктура чугунной дроби представляет собой ледебурит и дендритные включения перлита различной дисперсности. Распределение микротвердости по сечению дроби составляет 7730–8450 МПа и у поверхностного слоя твердость возрастает до 10240 МПа, что объясняется большой скоростью охлаждения поверхности при изготовлении и получении большего количества метастабильной фазы в поверхностном слое. Микроструктура дроби после обработки (а) и полученный наплавленный слой (б) показаны на рисунке 5. Наплав-

ленный слой имеет участки доэвтектического, эвтектического и заэвтектического строения, что свидетельствует о достаточно большой продолжительности наплавки и медленной скорости охлаждения наплавленного слоя [5]. Полученные толщины слоев составляют порядка 1,0–1,5 мм. Пористость полученных слоев составляет порядка 3–5 %.

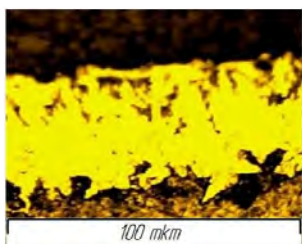


Рисунок 3 – Микроструктура после борохромирования

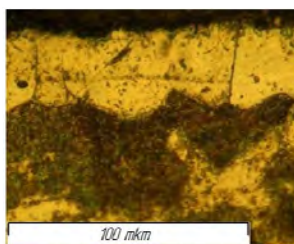
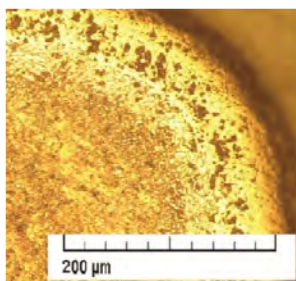
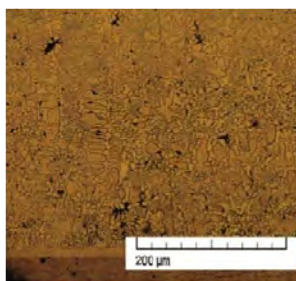


Рисунок 4 – Микроструктура после боросилицирования



а

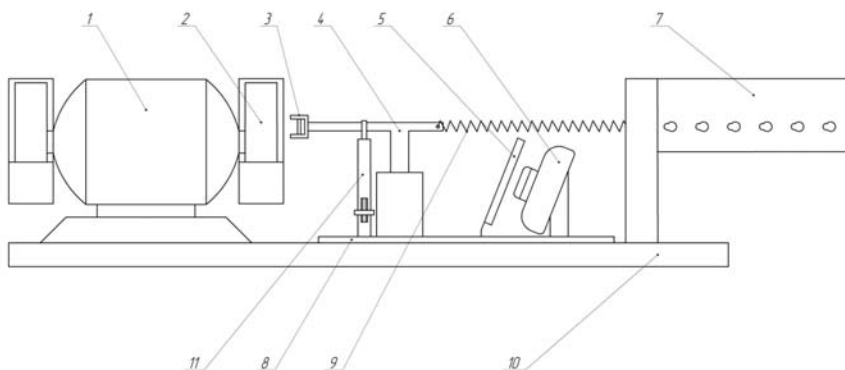


б

Рисунок 5 – Микроструктура дроби ДЧЛ08 после диффузионного легирования (а) и покрытие (б)

Следует отметить тот факт, что во всех наплавленных слоях присутствует переходная зона между наплавленным слоем и основным металлом. Это свидетельствует о полном сплавлении наплавочного порошка с металлической основой.

Чтобы исследовать уровень искрообразования довольно тонких диффузионных слоев на стали, была сконструирована специальная установка. Ее схема приведена на рисунке 6.



- 1 – привод; 2 – абразивный круг; 3 – устройство крепления образца;  
 4 – механизм поворота образца; 5 – защитное стекло; 6 – камера фото-  
 и видеосъемки; 7 – система регулировки силы удара образца о поверхность  
 абразивного круга; 8 – система регулировки положения поворотного  
 механизма; 9 – упругий элемент (пружина); 10 – станина;  
 11 – спусковой механизм

Рисунок 6 – Схема установки для испытаний на искробезопасность

Принцип работы установки следующий. Образец в форме, заранее подготовленный, с определенной площадью поверхности грани, которой он будет ударяться, фиксируется в устройство крепления образца 3. Зажимается двумя болтами в положении, при котором в момент удара образец будет соприкасаться с абразивным кругом 2 всей поверхностью своей грани. Ударение образца об абразивный круг производится при помощи механизма поворота образца 4, под действием пружины 9, закрепленной на пластине 7. Эта пластина, по сути, является системой регулировки силы и скорости удара образца о поверхность абразивного круга. Регулировка осуществляется путем закрепления конца пружины на одном из шести отверстий в пластине. Естественно, что, чем дальше расположено отверстие, тем больше сила натяжения пружины и, соответственно, сильнее удар. Абразивный круг 2 в момент испытания находится в движении под действием привода 1. В качестве привода в данном случае используется шлифовальный станок. Скорость вращения – 2950 об./мин. При помощи спускового механизма 11 происходит пуск системы. При этом ведется видеосъемка в высоком качестве с

видеокамеры 6, которая защищена защитным стеклом 5. Вся эта конструкция крепится к станине 10 болтами. Для гашения вибраций используются резиновые прокладки.

После того как получены видеозаписи испытаний всех покрытий, эти видеозаписи просматриваются в замедленном режиме и выбираются фотографии в первые моменты касания образца и абразивного круга. Это производится для повышения чистоты эксперимента, так как в большинстве случаев представляют интерес довольно тонкие покрытия, искрение которых происходит именно в первые секунды контакта. Также для большей достоверности результатов абразивный круг используется по одному разу каждой стороной. Это необходимое условие, так как при повторном использовании поверхность абразивного круга будет иметь частички поверхности первого образца.

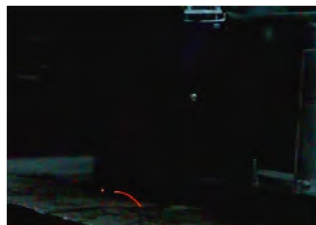
В качестве результатов испытаний на рисунке 7 приведены фотографии искрения образцов при одинаковых условиях проведения испытаний.



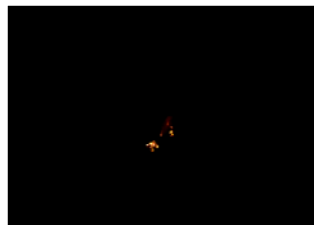
а



б



в



г

а – без покрытия; б – после боросилицирования; в – после борохромирования;  
г – после наплавленного слоя

Рисунок 7 – Результаты испытания на искрообразование стали

По результатам очевидно, что боросилицированные имеют наименьший уровень искрообразования. Борохромирование не так сильно снижает искрение при фрикционном контакте, однако диффузионный слой состоит из боридов железа, легированных хромом. Такая поверхность обеспечивает очень высокий уровень износостойкости, что, несомненно, является важной характеристикой инструмента. Покрытие, полученное наплавкой, имеет ряд преимуществ: очень прочная связь с основой, большая толщина покрытия относительно диффузионного легирования, соответственно, большая надежность наряду с соотносимой искробезопасностью. В качестве недостатков наплавки можно отметить большую трудоемкость получения данных покрытий и невозможность обработки деталей сложной формы.

## Литература

- 1. Крайнов, А.Ю.** Критические условия воспламенения искрой смеси газообразных окислителя и горючего с реагирующими частицами / А.Ю. Крайнов, В.А. Баймлер // Физика горения и взрыва. – 2002. – Т. 38. – № 3. – С. 30–36.
- 2. Моношко, В.Н.** Количественная оценка взрывоопасности фрикционных искр / В.Н. Моношко // Безопасность труда в промышленности. – 1983. – № 12. – С. 37–38.
- 3. Бериллиевые** бронзы: проблемы и перспективы [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.softmetall.ru/>. – Дата доступа: 18.09.2013.
- 4. Взрывобезопасный** инструмент [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.safetytool.ru/>. – Дата доступа: 06.09.2013.
- 5. Бакиновский, А.А.** Снижение фрикционного искрообразования стальных изделий с помощью процессов химико-термической обработки / А.А. Бакиновский // Литье и металлургия. – 2013. – № 2. – С. 118–120.