

## ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЖАРСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ АВТОТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*Е.С. КУЛИШ*

*Научный руководитель - доцент, к.т.н. В.А. ЛОЙКО*

Расширение использования алюминия как конструкционного материала в высокотехнологичных изделиях сдерживается низкими поверхностными свойствами, в частности триботехническими характеристиками. Поэтому представляют значительный интерес методы поверхностного упрочнения изделий из железа или его сплавов нанесением материалов, улучшающих поверхностные свойства основы. Важнейшим требованием к ним является прочная адгезионная связь защитного слоя с основой, обеспечивающая покрытие выполнению функции защиты основного металла конструкции.

Целью работы являлась оценка возможности получения и основных характеристик интерметаллидных *Al-Fe* покрытий на поверхности *Fe* низкотемпературным плазменно-вакуумным напылением *Al* с последующей термической обработкой в условиях ионной бомбардировки. Интерметаллид - химическое соединение двух и более металлов, имеет структуру, отличающуюся от структуры его компонентов, характеризуется широкой областью гомогенности. Известно около 1300 интерметаллических соединений, кристаллизующихся в 200 типов структур.

**Методика эксперимента.** Поверхности образцов армко-железа (пластины 10×20×5 мм) перед нанесением покрытий полировали до  $Ra=0,01$  мкм, протирали бензином БР-1 и промывали этиловым спиртом в ультразвуковом поле УЗУ-0,25, просушивали в течение 10 минут при 150-200<sup>0</sup>С [1].

Краевой угол смачивания поверхности образца каплей дистиллированной воды составлял не менее 175-179<sup>0</sup>С. Образцы помещали в поворотное устройство в центре вакуумной камеры модернизированной установки «Булат-6», схема которой показана на рисунке 1 [1]. Камера откачивалась механическим и паромасляным насосами до предельного вакуума  $1 \times 10^{-3}$  Па, затем образцы обраба-

тывали потоком ионов аргона из источника ионов «Радикал» ( $P_{Ar}=(2-5)\times 10^{-2}$  Па,  $U=4$  кэВ). Температура контролировалась пирометром и составляла на момент осаждения 150-200<sup>0</sup>С. Схема камерной части вакуумно-плазменной установки для нанесения покрытий показана на рисунке 1. Фазовый состав покрытий оценивался с использованием дифрактометра «Дрон-3», оснащенного малоугловой камерой, рентгеновского микроанализатора «Cameka-2», комплекса «Nanolab-7». Толщина слоя контролировалась на поперечных шлифах при увеличении  $\times 1500$ . Микротвердость слоя определяли методом восстановленного отпечатка ГОСТ 9450 с использованием пирамиды Виккерса. Адгезионную прочность покрытий определяли на поперечных микрошлифах микроиндентированием в переходную зону и рассчитывали по формуле  $\sigma_A=2P/D^2$ , где  $P$  – нагрузка на индентор,  $D$  – длина трещины [2].

Слой  $Al$  толщиной 10-25 мкм наносили тремя независимыми электродуговыми источниками, установленными радиально в горизонтальной плоскости к центру вакуумной камеры ( $P_{ост}=10^{-3}$  Па.  $I_{дуг}=100$  А,  $U_{п}=80-100$  В). Заданная толщина слоя обеспечивалась контролем времени осаждения покрытия (60 мин).

Затем к образцам с  $Al$  покрытием прикладывали отрицательный потенциал смещения 1-1,5 кВ и образцы разогревали бомбардировкой ускоренными ионами  $Al$  до температуры, при которой визуально наблюдается экзотермическая реакция синтеза интерметаллида (0,6-0,7  $T_{пл,Al}$ ). Процесс протекал с высокой скоростью, сопровождался локальным повышением температуры (на 250-300<sup>0</sup>С), начиная с конденсированных макронеровностей и выступающих элементов образца, что приводит к их расплавлению и существенно интенсифицирует протекание реакций между алюминием и железом с формированием слоя интерметаллида  $Al_x-Fe_y$  на поверхности железа (рисунок 2).

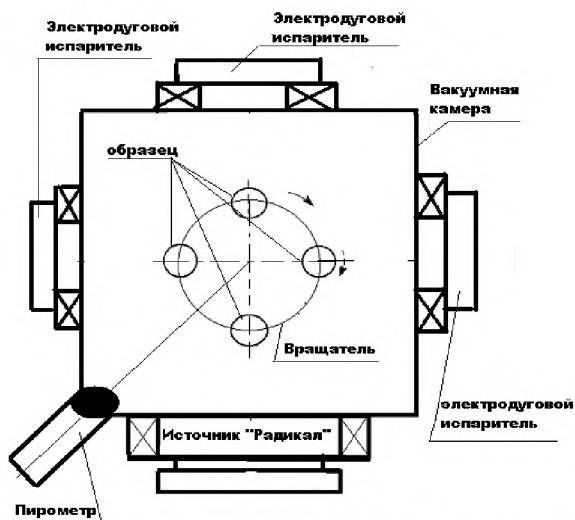
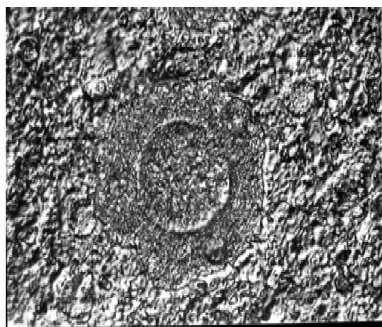


Рисунок 1 - Схема размещения образцов при нанесении покрытий в камере установки «Булат»

**Результаты и обсуждение.** Диффузионная зона в граничной поверхности контакта покрытия и основного металла имеет характерное зернистое строение с четко очерченными утолщенными границами (рисунок 3), очертания которых в известной степени повторяют подложку [3]. На поперечном шлифе, выполненном под углом  $3^0$  к поверхности покрытия, после травления выявляются три отличающихся участка: первый - темная подложка, далее - диффузионная зона - светлая в виде многочисленных направленных к подложке веерообразно расходящихся языков, далее - зона насыщения - светло-серый с многочисленными белыми включениями, образующими лабиринтную структуру участок. Размеры зерен уменьшаются с приближением к поверхности покрытия, на концентрационных кривых, полученных методом микрозондового рентгеноспектрального анализа при этом отмечается рост концентрации *Fe* и уменьшение содержания *Al*, затем на участке протяженностью 18 мкм вблизи к предполагаемой граничной поверхности концентрации изменяются незначительно, что свидетельствует о постоянном химическом составе фазы на этом участке, характерном для химических соединений, в данном случае интерметаллидов *Fe-Al*.

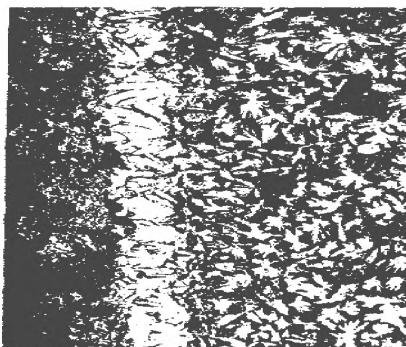


x800

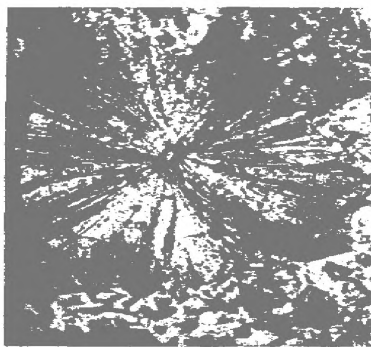


x1500

**Рисунок 2** - Топография поверхности стальных образцов после нанесения алюминиевого покрытия и обработки ионами



x800



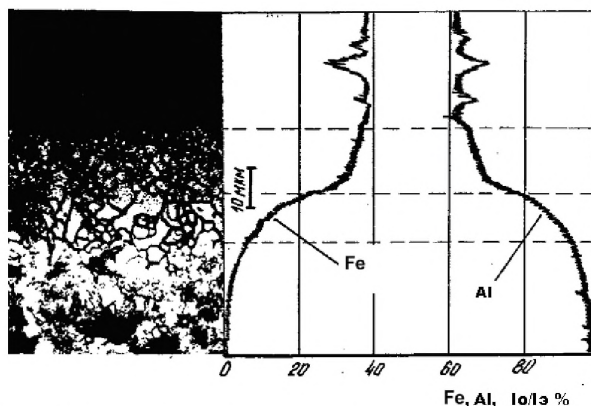
x1500

**Рисунок 3** - Структура переходной зоны на косом шлифе ( $\alpha$ -3 $^{\circ}$ ) образца *Fe* с *Al* покрытием

При этом наблюдается формирование обширных зон диффузии по поверхности и объему (рисунки 3, 4).

Следует отметить, что размеры зоны, в которой выявлено образование новых фаз, значительно превышают толщину слоя покрытия и достигают 30 мкм. Рентгенофазовым анализом выявлен ряд алюминидов железа от  $Fe_3Al$  до  $FeAl$ , соотношение между интенсивностями которых меняется по толщине слоя. Формирование обширной зоны взаимодействия материалов покрытия и основы с образованием интерметаллидов связано с ионной стимуляцией процесса взаимной диффузии и ионной активацией исходных компонент реакций вследствие ионной бомбардировки поверхности

ионами железа с энергией 2-4 кэВ. На металлографических шлифах отсутствует четкая граница между покрытием и основой, что свидетельствует о прочной металлической связи покрытия с подложкой. Адгезионная прочность покрытия составила 1,2-2,0 ГПа. Механические свойства поверхности на первом этапе определяются толщиной слоя, содержащего интерметаллиды  $Fe-Al$ , а также соотношением концентраций интерметаллидов различной стехиометрии. Микротвердость от 0,8 ГПа, близкой к микротвердости  $Fe$ , до 9,5 ГПа, соответствующей микротвердости высших интерметаллидных фаз  $Fe-Al$  [1].



**Рисунок 4** - Распределение элементов в переходной зоне от покрытия к основе при сканировании на косом шлифе ( $\alpha-3^\circ$ ) от поверхности покрытия к основе образца

**Заклучение.** При разработке высокопрочных материалов основные усилия направлены на установление связи между прочностными характеристиками и основными физическими свойствами кристаллов. Этот подход вытекает из известного факта зависимости прочности кристалла, а также адсорбции и коррозии от характера величины межатомных сил связи и такие важные для практики свойства, как прочность, твердость и износостойкость. Проведенными исследованиями установлена возможность получения интерметаллидных фаз нанесением  $Al$  покрытий на основу  $Fe$  и последующей термообработкой за счет нагрева бомбардировкой ионами материала покрытия. Ионно-стимулированный синтез интерметаллидов по характеру протекания напоминает СВС-процесс.

Полученные слои имеют удовлетворительные триботехнические

характеристики, значительно улучшающие поверхностные свойства (твердость, коррозионную стойкость и другие характеристики) изделий на основе железа. Ограничения при производстве и эксплуатации этих соединений связаны с низкой пластичностью интерметаллида FeAl и с нестабильностью структуры при повышенных температурах. Повышение пластичности возможно посредством дополнительного легирования и управлением размером зерна.

1. Лойко, В.А. Вакуумно-плазменные технологии в ремонтном производстве. / В.А. Лойко и [др.] – Минск: УО БГАТУ, 2007. – 190 с.

2. Статья: Формирование интерметаллидных Al-Fe покрытий плазменно-вакуумным напылением. Лойко В.А. 2010.

3. Аксенов, И.И. Покрытия, полученные конденсацией переменных потоков в вакууме (способ конденсации с ионной бомбардировкой) / И.И. Аксенов [и др.] // Украинский физик. журн. – 1979 –Т-24, №4. – С. 515-525.

## **СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НАПЛАВКИ ДЕТАЛЕЙ КОРМОУБОРОЧНЫХ КОМБАЙНОВ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ РЕМОНТЕ**

*С.Г. ОРЕШКО*

*Научный руководитель – доцент, к.т.н. В.В. КУРАШ*

Для восстановления изношенных поверхностей деталей и создания износостойких металлопокрытий с высокими физико-механическими характеристиками, обладающими высокой степенью надежности, в ремонтном производстве деталей машин используются способы наплавки поверхностей, способствующие повышению ресурса машин и технологического оборудования.

Существуют три группы способов наплавки:

– термические (электродуговая, электрошлаковая, плазменная, электронно-лучевая, лазерная, индукционная, газовая, печная и намораживание);

– термомеханические (электроконтактная, плакирование, проковка, плакирование экструдированием);

– механические (наплавка трением, плакирование взрывом).

На предприятиях технического сервиса агропромышленного комплекса республики широко применяется технология электротермического нанесения металлопокрытий методом наплавки [1].