

3. Марков, А.И. Ультразвуковое алмазное выглаживание деталей и режущего инструмента / А.И. Марков. – М.: Наука, 1979. – 243 с.
4. Источники мощного ультразвука / Под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1967. – 380 с.
5. Гершгал, Д.А. Ультразвуковая технологическая аппаратура / Д.А. Гершгал. – М.: Энергия, 1976. – 320 с.

УДК 621.9

Бобошко И.Н.

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ТИТАНОВЫХ СПЛАВАХ**

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск,  
Республика Беларусь*

*Научный руководитель: канд. техн. наук, доцент Вегера И.И.*

Титан и его сплавы обладают уникальным комплексом свойств – высокой прочностью, коррозионной стойкостью и низким удельным весом. Благодаря своим высоким физико-механическим свойствам в условиях статического и динамического нагружения титановые сплавы являются перспективными материалами для авиакосмической и автомобильной промышленности. Однако широкое использование титановых сплавов сдерживается из-за их неудовлетворительных триботехнических характеристик. Одним из способов улучшения фрикционных свойств сплавов является создание модифицированных поверхностных слоев. Физико-механические свойства покрытий имеют большое значение для повышения ресурса изделий, работающих в условиях абразивного, коррозионного и циклического воздействия. В настоящее время существует множество различных методов получения покрытий, у каждого из них есть свои преимущества и недостатки. Поэтому на практике они имеют свою оптимальную, достаточно ограниченную, область использования.

Перспективным направлением создания износостойких покрытий является нанесение на основу из титановых сплавов порошковых смесей, включающих оксиды алюминия или титана, карбиды кремния, вольфрама и др. Для достижения оптимальной толщины и гомогенности данных покрытий целесообразно применять высокоэнергетические методы их нанесения, например, электронно-лучевые технологии [1], позволяющие получать покрытия требуемой толщины (вплоть до нескольких миллиметров) при обработке основного материала как в условиях вакуума, так и при атмосферном

### *Секция «Новые материалы и перспективные технологии обработки материалов»*

давлении. В качестве основы использованы листы толщиной 10 мм из титанового двухфазного  $\alpha+\beta$  – сплава ВТ23. Для наплавки применяли готовые порошковые смеси WC + 15%Ni. Для нанесения композиционных покрытий использовали ЭЛ установку на базе энергоблока ЭЛА-15 («Сэлми»), Сумы, ускоряющее напряжение 60 кВ, луч диаметром 1 мм, мощность до 15 кВт, остаточное давление  $10^{-2}$  Па).

Исследование фазовых и структурных превращений проводили с помощью металлографического, электронно-микроскопического, рентгеноструктурного и микрорентгеноспектрального (МРСА) анализов. Испытания физико-механических свойств выполняли по стандартным методикам. Микротвердость образцов измеряли на микротвердомерах ПМТ-3 и Struers Duramin. Структуру образцов изучали на оптическом и растровом электронном микроскопах, МРСА выполняли на рентгеновском микроанализаторе Genesis 2000 с энергодисперсионным литий-кремниевым детектором FEI515. Рентгеноструктурный фазовый анализ выполнялся на дифрактометре ДРОН-3.0.

Порошки карбида вольфрама (WC) на (Ni) никелевой связке наносили на подложку детонационным методом, при этом получали покрытия толщиной 0,3-0,4 мм. Далее проводили нагрев модифицируемой зоны с помощью электронного луча непрерывно-последовательного методом развернутым в полосу лучом.

Для обработки образцов применяли электронный луч с удельной мощностью (2-6)  $10^6$  Вт/м<sup>2</sup>, что обеспечивало нагрев со скоростью 50-300°C/с. Предварительно нанесенные покрытия (рис. 1а) имели пористость около 40-50% и хорошую адгезию с подложкой. В результате нагрева покрытия WC + 15% Ni до 950°C и 1050°C соответственно на границе покрытие – подложка формируется диффузионная зона шириной 10-20 микрометров (рис. 1б). При этом в переходной зоне происходит образование интерметаллидов и эвтектик на основе Ti и Ni. Повышение температуры до 1200°C приводит к проплавлению подложки и появлению жидкой фазы, которая резко интенсифицирует диффузионные процессы и в результате формируется превращенный слой, в котором роль связки между частицами карбида вольфрама выполняют эвтектики на основе титана и его соединений с Ni. После термообработки покрытие и прилегающий слой подложки разделяются на ряд характерных зон. При различных режимах нагрева число зон остается постоянным, изменяется лишь их толщина. В процессе электронно-лучевого нагрева удается сформировать беспористые покрытия (рис. 1 в) с твердостью 16-18 ГПа толщиной до 1,5 мм. При этом в структуре покрытия изменяется морфология частиц карбида вольфрама, они изменяют свою первоначальную угловатую форму (рис. 1 г) и становятся более округлыми вследствие растворения неровностей а так же имеют большую поверхность контакта с жидкой прослойкой (рис. 1д). Фазовый рентгеновский анализ показал, что кроме

карбидов вольфрама в покрытии присутствуют интерметаллидные соединения титана и никеля  $TiNi$ ,  $Ti_2Ni$ .

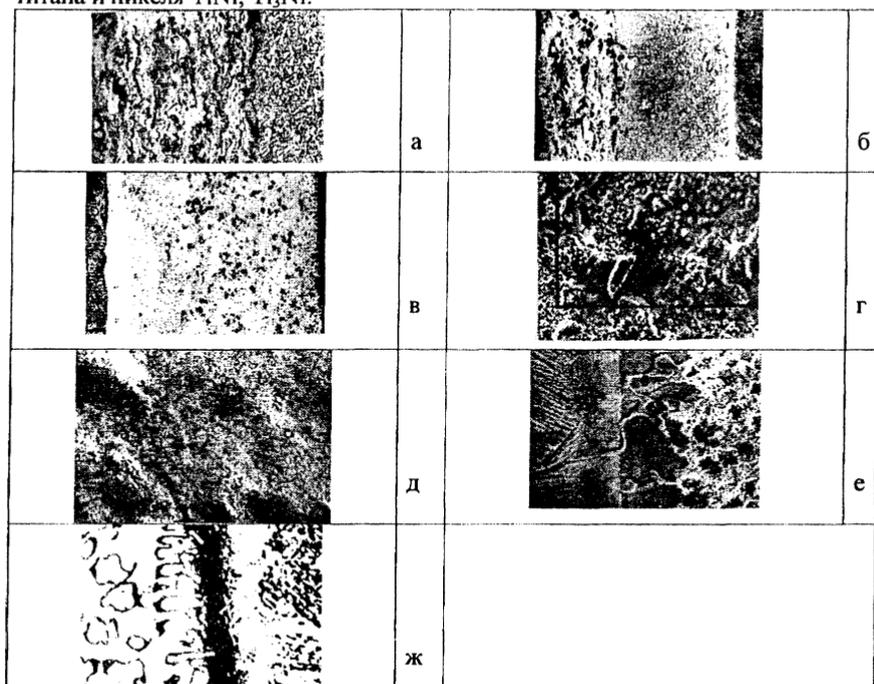


Рисунок 1 – Микроструктура слоя покрытия WC+ 15% Ni.

За покрытием следует переходная зона (рис. 1е, ж) состоящая из перемешанной подложки и материала покрытия. В ее структуре наблюдаются частицы карбида вольфрама, интерметаллиды и эвтектика на основе титана и его соединений с Ni. После переходной зоны располагается слой эвтектики  $Ti + Ti_2Ni$  (рисунок 1е, ж) толщиной 20 мкм нагретой до оплавления, а под ним слой  $\beta$ -твердого раствора никеля в титане. По данным МРСА вместе с никелем в титановую подложку диффундирует до 5% вольфрама. В результате нагрева диффузия никеля вызывает интенсивный переход его из покрытия в подложку, при этом в слое эвтектического состава концентрация никеля в два раза превышает концентрацию в самом покрытии. Таким образом, концентрационный профиль никеля в покрытии после электронно-лучевого нагрева понижается от поверхности к подложке, а для титана – понижается от подложки к поверхности. В результате этого в слое, прилегающем к подложке, формируется твердый раствор никеля в титане, а под ним – слой эвтектики  $Ti + Ti_2Ni$ . У самой поверхности покрытия, где

концентрация титана недостаточна для образования эвтектики, также образуется  $\beta$ -твердый раствор титана.

## ЛИТЕРАТУРА

Шипко, А.А. Упрочнение сталей с использованием электронно-лучевого нагрева / А.А. Шипко, И.Л. Поболь, И.Г. Урбан. – Минск: Навука і тэхніка, 1995. – 280 с.

УДК 551.22.19.15

Валюк В.С.

## **МНОГОТИГЕЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ**

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск,  
Республика Беларусь*

*Научный руководитель: канд. техн. наук, доцент Боженков В.В.*

Процесс нанесения покрытий термическим напылением в вакууме основан на свойстве паров металла осаждаться на поверхности [3], поставленной на их пути. Металл, из которого хотят получить покрытие, помещают в вакуумную камеру (давление  $10^{-2} - 10^{-3}$  Па) и нагревают до температуры, при которой давление его паров достигает порядка 1 Па. Теплоту к испарителю можно подводить различными методами: резистивным, индукционным и электронно-лучевым. Защищаемую поверхность располагают на пути потока паров металла, которые, конденсируясь, образуют при соответствующих условиях плотное, прочно сцепленное с основой покрытие.

До сравнительно недавнего времени термическое напыление в вакууме применяли в микроэлектронике, декоративной отделке изделий (игрушки, ювелирные украшения, зеркала, пластмассовые изделия и пр.) и в стоматологии и т.д. из-за незначительной толщины покрытия (несколько десятых микрометра).

Применение в вакууме металлизации для получения толстых покрытий считается нерентабельным по следующим причинам: нужно обеспечить непрерывное и быстрое испарение больших количеств металла, что вызывает значительные трудности; практика показала, что толстые покрытия обладают худшей адгезией, чем тонкие, и часто растрескиваются и отслаиваются.

Разработка методов непрерывного длительного испарения большого количества металла в вакууме позволяет в настоящее время получать