

## Износостойкие газотермические покрытия на алюминиевой подложке

Ю.С. Коробов, В.В. Астафьев, И.Г. Бродова, А.О. Окулов, М. Антонов<sup>1</sup>, С.Х. Эстемирова<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Tallinn University of Technology, г. Таллин, Эстония; <sup>2</sup>УрФУ; <sup>3</sup>ИМет УрО РАН

Проведены испытания на газоабразивное изнашивание алюминиевого сплава AlSi7Mg0,3, покрытий на этом сплаве, из WC-10Co-4Cr, Cr3C2-25NiCr и стали 180X27H17M4, полученных сверхзвуковым газозвуковым напылением, и проанализированы их результаты. Показано, что относительная износостойкость покрытий WC-10Co-4Cr выше, чем у альтернатив в 2-14 раз, и увеличивается при воздействии более твердых абразивов. Покрытия толщиной менее 100 мкм растрескиваются из-за проминания на пластичной Al подложке. При напылении в приповерхностном слое подложки, толщиной 20-40 мкм, формируется модифицированная эвтектика на основе сферических частиц кремния, что увеличивает твердость и прочность этого слоя. В приповерхностном слое металлокерамических покрытий наблюдается ~20 % снижение твердости относительно верхних слоев. Такое сочетание свойств на границе покрытие-подложка способствует повышению работоспособности износостойких покрытий на Al подложке, рис. 1. Результаты востребованы в авиационной, транспортной технике и машиностроении для упрочнения деталей из алюминиевых сплавов, подверженных газоабразивному износу.

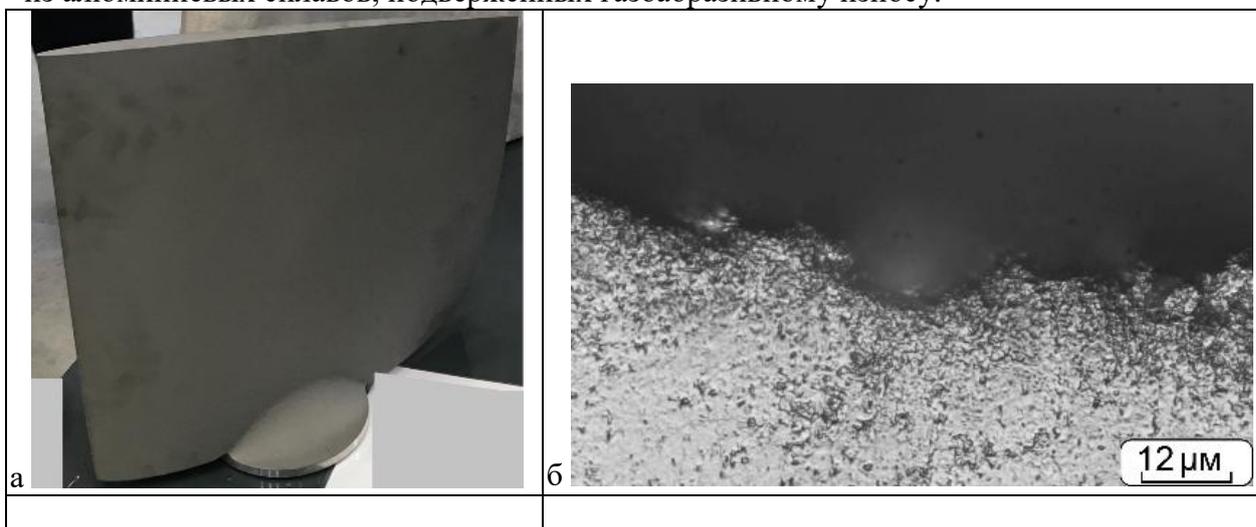


Рис. 1 Алюминиевая лопатка шахтного вентилятора с WC-10Co-4Cr газотермическим покрытием; а) общий вид, размер 300x300 мм. Обеспечено снижение массы, увеличение удельной мощности при снижении газоабразивного износа; б) Структура слоя покрытия WC-10Co4Cr толщиной 200 мкм после испытаний (абразив – гранитная крошка)

### Публикация:

1 [Erosion Wear Behavior of HVOF-Sprayed WC/Cr3C2-Based Cermet and Martensitic Stainless Steel Coatings on AlSi7Mg0.3 Alloy: A Comparative Study](#) / Yury Korobov<sup>2</sup>, Maksim Antonov<sup>0</sup>, Vladimir Astafiev<sup>1</sup>, Irina Brodova<sup>1</sup>, Vladimir Kutaev<sup>0</sup>, Svetlana Estemirova<sup>0</sup>, Mikhail Devyatyarov<sup>0</sup>, Artem Okulov<sup>1</sup>. – Текст: непосредственный // Journal of Manufacturing and Materials Processing. — 2024. — V. 8. — P. 231—244.

Работа выполнена по теме шифр «Структура».

Алюминиевые сплавы значительно превосходят стали по удельной прочности, что делает их перспективными для широкого круга конструкций. В частности, в промышленных вентиляторах замена стальных лопаток на алюминиевые приведет к увеличению мощности при снижении энергозатрат. Однако низкая стойкость против износа резко ограничивает область их применения. Применение газотермических покрытий может решить эту проблему, но пластичная Al подложка, в сравнении со стальной, меняет условия формирования покрытия, что потребовало дополнительных исследований.

Была выполнена сравнительная оценка эрозионной стойкости покрытий (Таллин, TUT) из материалов WC-10Co-4Cr, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr, нержавеющей стали мартенситного класса 180X27H17M4 (или SS-steel), полученных сверхзвуковым газозвдушным напылением (ООО УИС-Металлургия, Екатеринбург) на подложку из алюминиевого сплава AlSi<sub>7</sub>Mg<sub>0,3</sub>, у которого хорошие литейные свойства, необходимые при изготовлении лопаток. Выбор нужного материала актуален, поскольку они различаются как по твердости, так и по стоимости. Изучено влияние размера, твердости, угла атаки эродента, толщины покрытий на стойкость как покрытий, так и основы при испытаниях на сухую эрозию в условиях, характерных для лопаток вентиляторов при комнатной температуре. Проведен сравнительный анализ покрытий до и после испытаний с применением светового микроскопа NEOPHOT-32, сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) QUANTA 200 с приставкой для EDS количественного анализа, дифрактометра Shimadzu XRD-7000 (CuK<sub>α</sub> излучение), микротвердомера ПМТ-3. Сотрудники ИФМ разработали методики нанесения покрытий, газоабразивных испытаний, выполнили структурно-фазовые исследования и анализ результатов.

Для покрытий толщиной 200 мкм износостойкость максимальна у WC-10Co-4Cr относительно других материалов, и различается в зависимости от вида абразива (кварцевый песок, гранит), параметров струи. Она выше в 2-3 раза относительно Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr и в 2-14 раз относительно стального покрытия и основного металла лопаток, рис. 2. При этом относительная стойкость против износа у покрытий WC-10Co-4Cr в сравнении с альтернативами увеличивается при воздействии более твердого абразива (гранит). Износостойкость покрытий относительно основного металла лопаток снижается при уменьшении их толщины, рис. 3.

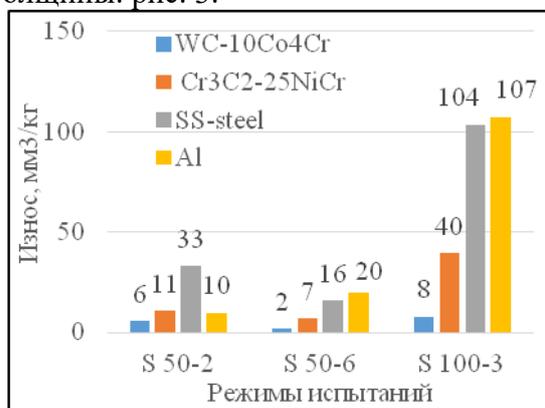


Рис. 2 Объемный износ покрытий при загрузке струи песком; в обозначениях: индекс S - абразив песок, далее следуют индексы газоабразивной скорости струи, м/с, и загрузки струи абразивом, кг. Например, G 50-2 означает, что абразив гранит, при скорости газоабразивной струи 50 м/с и загрузке струи абразивом 2 кг.

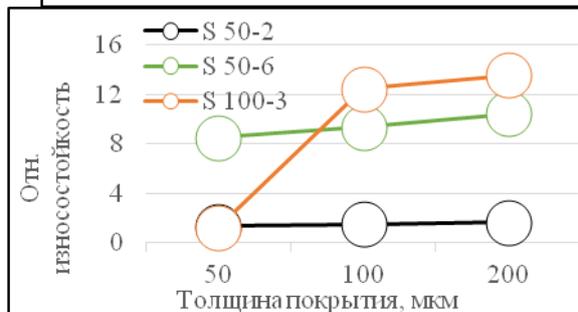


Рис. 3 Относительная износостойкость покрытий WC-10Co4Cr различной толщины при загрузке струи кварцевым песком

На основе структурно-фазовых исследований даны объяснения результатам испытаний.

Для алюминиевой основы характерна скелетообразная форма роста Al-Si эвтектики, рис. 4а. При ударе частицы WC-10Co4Cr заметно деформируют мягкую алюминиевую подложку и в поверхностном слое, толщиной 20...40 мкм, происходит 5-кратное измельчение и сфероидизация кристаллов кремния в эвтектике, рис. 4б, что увеличивает твердость приповерхностного участка основы.

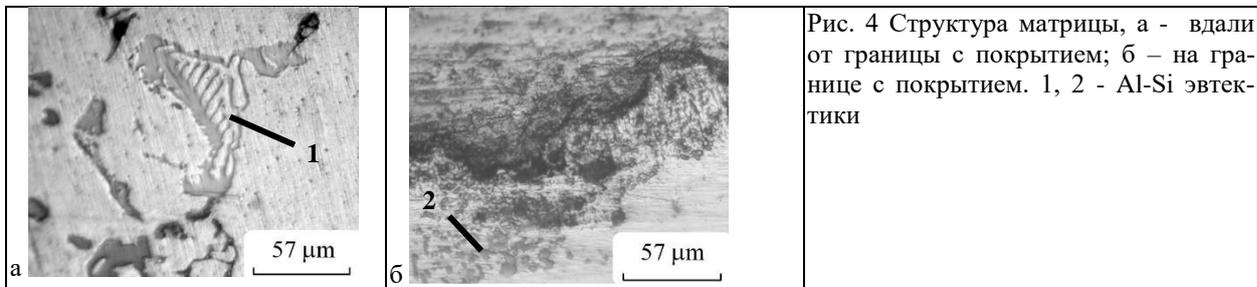


Рис. 4 Структура матрицы, а - вдали от границы с покрытием; б – на границе с покрытием. 1, 2 - Al-Si эвтектики

Вблизи алюминиевой основы наклеп слоя покрытия, при ударе о сформировавшийся слой частиц следующего прохода, ослаблен вследствие высокой пластичности основы. Также, вблизи основы слой покрытия охлаждается интенсивнее, чем у поверхности, вследствие высокой теплопроводности алюминиевого сплава. Поэтому выделение вторичных карбидов из раствора ограничено. Эти факторы приводят к тому, что при микротвердости покрытия 10-12 ГПа прослеживается тенденция ее уменьшения, ~ 20 %, при приближении к основе.

В случае WC-10Co4Cr покрытий не обнаружено отчетливых пиков карбидов  $W_2C$ , отличающихся повышенной хрупкостью, что свидетельствует о малой степени декарбюризации и, соответственно, хорошей пластичности покрытий. Это связано с низкой температурой горения пропановоздушной смеси как источника тепла при сверхзвуковым газоздушным напылением. Во случае  $Cr_3C_2$ -25NiCr покрытия содержание карбидов  $Cr_3C_2$  уменьшилось в сравнении с исходным содержанием в частицах распыляемого порошка с 75 до 49,5 %. Это вызвано, в основном, растворением карбида в матрице, а также его механическим удалением из расплавленной частицы при ее ударе о поверхность.

У частиц WC-10Co4Cr вблизи подложки меньше разбрызгиваний и отклонений от равномерного растекания, что указывает на мягкий удар о пластичную Al подложку. После испытаний только у WC-10Co4Cr покрытий поверхность без каверн и трещин, в других имеются микротрещины, расположенные перпендикулярно поверхности износа. При уменьшении толщины этого покрытиях до 50 мкм в приповерхностном слое, вследствие прогиба покрытия на пластичной Al основе, возникают трещины при многократном газодинамическом воздействии абразива, вызывающие хрупкое разрушение покрытия (рис. 5).

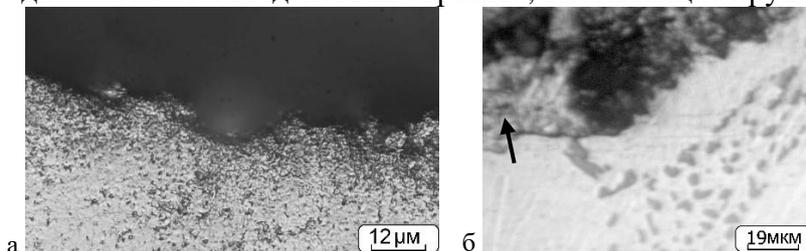


Рис. 5 Структура WC-10Co4Cr покрытия после испытаний. а – поверхностный слой, толщина покрытия 200 мкм; б – трещина (указана стрелкой) в приповерхностном слое покрытия толщиной 50 мкм

Выводы: 1) Испытания на эрозионную стойкость показали, что при высокой интенсивности газоабразивного воздействия стойкость покрытий WC-10Co4Cr выше, чем у альтернатив в 2-14 раз. При снижении интенсивности газоабразивного воздействия относительная стойкость альтернатив повышается; 2) Структурно-фазовые исследования показали причины повышенной эрозионной стойкости WC-10Co4Cr покрытий. 3) Установленное сочетание повышенной пластичности покрытия и увеличения твердости подложки в переходной зоне «WC-10Co4Cr покрытие - Al подложка» создает благоприятные условия для роста газоабразивной стойкости покрытия.

Областью возможного применения полученных результатов являются детали из алюминиевых сплавов, подверженные высокодинамичному газоабразивному износу. Они востребованы в авиационной, транспортной технике и машиностроении. В рамках тематики исследований, в частности, успешно выполнены работы по упрочнению Al лопаток по х/д № 14/2021 от 01.04.2021 в интересах АО Вентпром, крупнейшего в России производителя вентиляторов для шахт и метро.