

УДК 622.5; 621.9

DOI: 10.30987/article_5c652632e022e2.16320051

О.Б. Сильченко, М.В. Силуянова

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, АРМИРОВАННЫХ КВАЗИКРИСТАЛЛАМИ И ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ

Представлены составы покрытий из композиционных материалов, армированных квазикристаллами. Определены оптимальный состав и режимы нанесения покрытия методом холодного газодинамического напыления. При оптимальном технологическом режиме изготовлены образцы,

исследованы их механические и трибологические свойства.

Ключевые слова: газодинамическое напыление, квазикристаллы, покрытия из композиционных материалов, трибологические свойства.

O.B. Silchenko, M.V. Siluyanova

INVESTIGATION OF STRESS-STRAIN AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF COMPOSITE COATINGS ARMORED WITH QUASI-CRYSTALLINE AND OBTAINED THROUGH METHOD OF COLD GAS-DYNAMIC SPUTTERING

The work purpose consists in the development of the structure and mode definition for the cold gas-dynamic sputtering of antifriction coating based on composites armored with quasi-crystalline for manufacturing sliding bearings. The development object is quasi-crystals of Al-Cu-Fe system, metal composite coatings based on copper armored with quasi-crystalline particles.

During the work compositions of coatings armored with quasi-crystals were developed, the optimum composition and modes of coating application by a method of cold gas-dynamic sputtering is defined.

At the optimum technological mode samples are manufactured, their stress-strain and tribological properties were investigated.

Key words: gas-dynamic sputtering, quasi-crystalline, composite coatings, tribological properties .

Введение

В трибологии и материаловедении антифрикционных композитов можно выделить ряд проблем, отражающих современные тенденции в этой области знаний, решение которых необходимо для обеспечения научного и технического прогресса. Наибольшие усилия разработчиков сосредоточены на создании полимерных антифрикционных материалов, предназначенных для работы в режиме гидродинамического трения. Подшипники качения и скольжения с антифрикционными покрытиями являются наиболее эффективными конструкциями, позволяющими существенно повысить мощность и надежность работы фрикционных узлов машин.

Основными техническими преимуществами при работе в среде масла антифрикционных материалов на основе металлполимеров, керамополимеров и ком-

позиционных материалов являются меньшая разность между статическим и динамическим коэффициентами трения, что существенно улучшает динамику переходных процессов в машинах, а также бесшумность работы и малый удельный вес.

Энергия торможения высоконагруженных систем выделяется в зоне трения и преобразуется в тепловую энергию и энергию разрушения поверхности. В связи с этим антифрикционные материалы должны удовлетворять следующим требованиям: иметь высокий коэффициент теплопроводности, низкий коэффициент трения, стабильный до температур 450-500 °С, низкие параметры по износу, высокие упругие и прочностные характеристики.

Требованиям для эксплуатации узлов трения при температурах до 500 °С в полной мере удовлетворяют керамические и

композиционные материалы на основе карбида кремния и карбонитрида титана, исследования по определению физико-

механических свойств которых проведены в данной работе.

Разработка состава и режимов нанесения покрытия методом холодного газодинамического напыления

Нанесение покрытия проводилось с использованием метода холодного газодинамического напыления. Отработка режимов нанесения порошковых материалов производилась на плоских образцах размерами 90x20x2 мм. Рабочая поверхность образцов подвергалась перед напылением шлифованию, затем струйно-абразивной обработке. Нанесение покрытия проводилось на установке «Димет-403», использующей в качестве рабочего тела воздух. Скорость газопорошковой смеси на срезе сопла - 650-850 м/с. Температура торможения сверхзвуковой струи варьировалась в пределах от 150 до 350 °С.

Покрытие наносилось в защитной камере при использовании системы вентиляции с пылеочисткой. Давление воздуха в пневмосистеме устанавливалось во всех случаях равным 0,8 МПа. Благодаря невысокой температуре напыления квазикристаллическая фаза химически не взаимодействует с медью, а большая скорость

потока обеспечивает наклепывание пластичных частиц меди и твёрдых частиц квазикристаллов на подложку и образование прочных связей между компонентами покрытия.

Для приготовления порошковых смесей использовались порошки квазикристаллов ВКК1Б (ТУ 1-595-31-1081) и меди ПМС-1 (ГОСТ 4960). Порошок квазикристаллов подвергался размолу в планетарной мельнице стеклянными шариками диаметром 2 мм в течение 30 мин (при соотношении мелющих тел (шариков) и порошка 10:1 по весу). Был получен порошок с дисперсностью менее 3 мкм.

Перемешивание порошков проводилось в турбулентном смесителе в течение 1 ч.

Были определены концентрации исходных элементов в зависимости от объёмной доли квазикристаллов. Концентрация исходных элементов определялась по формуле

$$\%_{\text{вес}A} = \frac{\%_{\text{об}A} * \rho_A}{(\%_{\text{об}A} * \rho_A + \%_{\text{об}B} * \rho_B)} * 100\%$$

где $\%_{\text{вес}A}$ - массовая доля квазикристаллов; $\%_{\text{об}A}$ - объёмная доля квазикристаллов; ρ_A - плотность квазикристаллов; $\%_{\text{об}B}$ - объёмная доля меди; ρ_B - плотность меди.

Опробовано несколько составов порошковых смесей с различным содержанием квазикристаллов, для напыления на установке «Димет-403» определены оптимальные режимы напыления.

Полученные образцы представляли собой прямоугольные стальные пластины (90x20x2) с композиционным покрытием толщиной 0,5 мм. Поверхность после шлифовки обладает медно-розовым цветом и небольшими дефектами в виде неравномерности напыления.

Были изготовлены шлифы покрытий. Металлографические исследования на оп-

тическом микроскопе с увеличением x950 показали, что частицы квазикристаллов равномерно распределены в медной матрице, пористость покрытия незначительная. Однако прочность сцепления частиц квазикристаллов с медной матрицей оказалась мала – вероятно, из-за низкого значения поверхностной энергии, характерного для квазикристаллов. При шлифовании квазикристаллы выкрашивались из матрицы.

Был скорректирован состав покрытий. В порошковую смесь введен порошок железа марки ПЖР2.200.22 (ГОСТ 9849). Порошок промышленного производства был рассеян на фракции на ситах с ячейкой 0,25 и 0,125 мм. Использовалась полученная средняя фракция. Крупные, сферической формы частицы железа не включа-

ются в состав покрытия, так как не успевают приобрести в воздушной струе скорость, необходимую для пластической деформации и приваривания. В то же время они обладают существенной кинетической энергией для того, чтобы дополнительно уплотнять и деформировать покрытие.

Количество добавляемого порошка железа подбиралось экспериментально. Избыток частиц железа в смеси приводит к сильной деформации наносимого слоя, появлению трещин в покрытии и уменьшению сцепления с подложкой вплоть до отслаивания (рис. 1). Недостаточное количество – не дает эффекта увеличения прочности сцепления квазикристаллов с медной матрицей.



Рис. 1. Растрескивание покрытия (стрелкой показана закрепившаяся частица железа)

Было обнаружено, что при добавлении порошка железа в количестве около 10 % по массе, при одновременном снижении

температуры напыления до 250 °С, покрытие получается удовлетворительного качества, но несколько снижается его адгезия к подложке (рис. 2). Для улучшения адгезии принято решение перед нанесением покрытия наносить подслоем чистой меди.

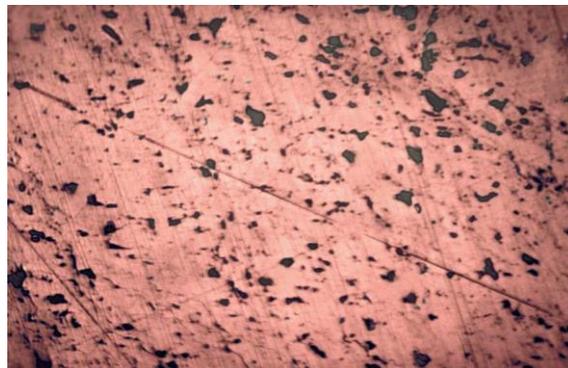


Рис. 2. Покрытие оптимального состава

Окончательно был принят следующий состав порошковой смеси: медь - 78,2 %, квазикристаллы – 12,7 %, железо – 9,1 % по массе. С учетом того, что порошок железа в состав покрытия не включается, это соответствует 14 % весового содержания квазикристаллов или 30 % объемного.

Режим нанесения покрытия на установке «Димет-403»: температура - 250 °С, подача порошка – не более второго положения ручки регулятора питателя.

Исследование шлифов полученных покрытий (рис. 3) подтвердило отсутствие заметной пористости и улучшение сцепления частиц квазикристалла с матрицей.

Определение механических и трибологических свойств покрытия

Адгезия полученного покрытия оценивалась методом изгиба по ГОСТ 9.302-88. Стальные пластинки размером 90x20x2 с нанесенным покрытием изгибались под прямым углом. Оценивалось отслаивание покрытия, растрескивание не учитывалось (рис. 4). Образцы продемонстрировали удовлетворительную адгезию (протокол испытаний № 3615/31).

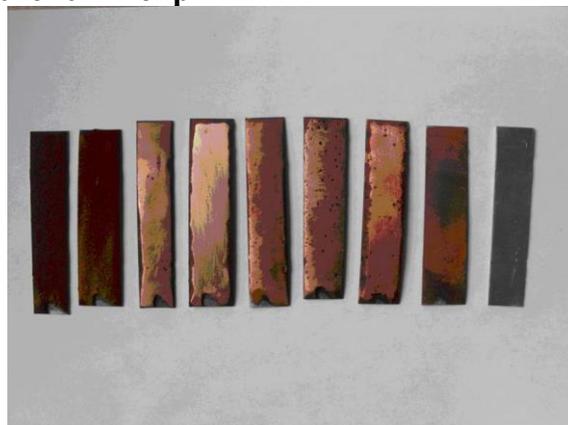


Рис. 3. Образцы покрытия, нанесённого методом холодного газодинамического напыления на стальные подложки



Рис. 4. Образец покрытия после оценки адгезии методом изгиба

Микротвердость покрытия определялась по ГОСТ 9450-76 на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 20 г. Отдельно определена микротвердость медной матрицы и зерен квазикристаллов на двух микрошлифах покрытия. Микротвердость составила от 388 до 407 МПа для матрицы и от 1290 до 1393 МПа для зерен квазикристалла (протокол № 3612/31).

Исследованы трибологические свойства покрытия. Проведены испытания на трение и износ (протокол испытаний № 3565/05). Для этого были изготовлены образцы с покрытием из металлического композиционного материала на основе ме-

ди с содержанием квазикристаллов 14 %_{вес.} Образцы представляли собой стальные кольца диаметром 28 мм с нанесённым на торцевую часть покрытием (рис. 5).

Испытания на износостойкость проводились в паре с контртелом из стали 30X13 на испытательной машине И-47 согласно ММ 1.595-5-315 в течение одного часа при осевой нагрузке 30 МПа и скорости перемещения 0,1 м/с в среде сухого помещения. Средний коэффициент трения - 0,48. Износ контртела - в среднем 408 мг/ч.



Рис. 5. Образцы покрытия на торцевых частях

Выводы

1. Разработаны составы антифрикционных покрытий, упрочненных частицами квазикристаллов системы Al-Cu-Fe.

2. Определены концентрации исходных элементов в зависимости от объемной доли квазикристаллов и оптимальный состав покрытия.

3. Определены оптимальные режимы нанесения покрытия методом холодного газодинамического напыления на установке «Димет-403».

4. Изготовлены опытные образцы покрытия.

5. Исследованы механические и трибологические свойства опытных образцов

покрытия. Адгезия покрытия к подложке удовлетворительная. Пористость образцов покрытия оценивалась на изготовленных шлифах при помощи оптического микроскопа при увеличении $\times 950$, покрытие плотное. Микротвердость покрытия составляет для медной матрицы от 388 до 407 МПа, для зерен квазикристалла - от 1290 до 1393 МПа. Коэффициент трения по стали 30X13 составил в среднем 0,48. Износ контртела при осевой нагрузке 30 МПа и относительной скорости 0,1 м/с составил в среднем 408 мг/ч.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Захаров, Б.М. О прочности сцепления покрытий, наносимых методом плазменного напыления / Б.М. Захаров, М.Г. Трофимов, Л.И. Гусева [и др.] // Порошковая металлургия. - 1970. - № 11. - С. 71-76.

2. Денисов, Л.В. Обеспечение эксплуатационных свойств деталей и узлов газотурбинного двигателя локальным поверхностным легированием / Л.В. Денисов, А.Г. Бойцов, М.В. Силюнова // Вестник Самарского университета.

- Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. - 2018. - № 2. - С. 19-24.
- Boitsov, A.G. Electric-Discharge Milling of Small Airplane-Engine Components / A.G. Boitsov, M.V. Siluyanova, V.V. Kuritsyna // *Russian Engineering Research*. - 2018. - Т. 38. - № 7. - P. 552-556.
 - Сильченко, О.Б. О перспективах применения наноструктурных гетерофазных полифункциональных композиционных материалов в авиадвигателестроении / О.Б. Сильченко, М.В. Силуянова, В.Е. Низовцев, Д.А. Климов, А.А. Корнилов // *Вопросы материаловедения*. - 2018. - № 1. - С. 50-57.
 - Zakharov, B.M. On cohesion strength of coatings applied by method of plasma spraying / B.M. Zakharov, M.G. Trofimov, L.I. Guseva [et al.] // *Powder Metallurgy*. - 1970. - No.11. - pp. 71-76.
 - Denisov, L.V. Operational properties support of parts and units in gas turbine engine by local surface doping / L.V. Denisov, A.G. Boitsov, M.V. Siluyanova // *Bulletin of Samara University. Aerospace Equipment, Technologies, and Mechanical Engineering*. - 2018. - No.2. - pp. 19-24.
 - Boitsov, A.G. Electric-Discharge Milling of Small Airplane-Engine Components / A.G. Boitsov, M.V. Siluyanova, V.V. Kuritsyna // *Russian Engineering Research*. - 2018. - Vol. 38. - No. 7. - P. 552-556.
 - Silchenko, O.B. On outlooks of nano-structural, heterophase, poly-functional composite application in aircraft engine manufacturing / O.B. Silchenko, M.V. Siluyanova, V.E. Nizovtsev, D.A. Klimov, A.A. Kornilov // *Problems of Material Science*. - 2018. - No.1. - pp. 50-57.
 - Siluyanova, M.V. Improvement of friction units in power-plants by ceramic composite spraying / M.V. Siluyanova, A.O. Fertikov // *Bulletin of Samara University. Aerospace Equipment, Technologies and Mechanical Engineering*. - 2018. - No.2. - pp. 122-131.
 - Silchenko, O.B. Diagnostics of Dimensionally Controlled Microgrinding to Meet Quality Specifications / O.B. Silchenko, M.V. Siluyanova, V.V. Kuritsyna // *Russian Engineering Research*. - 2018. - Vol. 38. - No. 8. - P. 604-609.

Статья поступила в редакцию
26.11.18.

Рецензент: д.т.н., профессор Северо-Кавказского
горно-металлургического института
Дмитрак Ю.В.

Статья принята к публикации 25.01.19.

Сведения об авторах:

Сильченко Ольга Борисовна, д.т.н., профессор
Московского авиационного института, e-mail:
silyaolya@yandex.ru.

Silchenko Olga Borisovna, Dr. Sc. Tech., Prof. of
Moscow Aircraft Institute, e-mail:
silyaolya@yandex.ru.

Силуянова Марина Владимировна, д.т.н., профессор
Московского авиационного института, e-mail:
dc2mati@yandex.ru.

Siluyanova Marina Vladimirovna, Dr. Sc. Tech.,
Prof. of Moscow Aircraft Institute, e-mail:
dc2mati@yandex.ru.