

УДК 53.043

ФРЕТТИНГ-КОРРОЗИЯ ПОКРЫТИЙ ТИПА "ТВЁРДАЯ СМАЗКА" В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Л.Н. Лесневский

По данным [1], среди основных эксплуатационных дефектов в отечественных и зарубежных авиационных газотурбинных двигателях (ГТД) износ от фреттинг-коррозии составляет около 60% от всех видов износа. Фреттинг-коррозия развивается в ГТД в разных элементах соединений: болтовых, шлицевых, штифтовых соединениях, при различных прессовых посадках деталей, в шарнирных узлах замковых соединений, на поверхностях контакта бандажных полок лопаток, в местах посадок лопаток турбин и компрессоров и, в том числе, в местах посадок вентиляторных лопаток. Разрушения от фреттинг-коррозии проявляются в виде натиров, вырывов, наминаний, каверн, микротрещин и раковин, заполненных порошкообразными продуктами изнашивания.

Традиционно среди средств борьбы с коррозионно-усталостным разрушением при фреттинг-коррозии используются две группы методов [2,3]: конструктивно-технологические методы и методы защиты от основных процессов разрушения. Анализ этих методов показывает, что большинство из них, таких как применение деформируемых материалов в качестве промежуточных слоёв с низким модулем упругости, уменьшение коэффициента трения, упрочнение контактирующих поверхностей и защита их от воздействия окислительной среды, подбор и применение металлов и их соединений с низкой склонностью к схватыванию в контактах, повышение твёрдости сопряжённых поверхностей, защита от абразивного разрушения и др. могут быть реализованы с использованием защитных покрытий, и в частности, твёрдосмазочных покрытий (ТСП).

В настоящей работе приведены результаты исследований фреттинг-износа ТСП, полученных методом атмосферного плазменного напыления (APS) на образцах с использованием оборудования, моделирующего условия работы контактов узлов трения, длительно эксплуатируемых в экстремальных условиях: температуре испытаний от 20 до 800⁰С, начальном контактном давлении (давлении Герца) до 1000 МПа, частоте испытаний до 50 Гц, амплитуде от 0.1 до 2 мм.

В качестве материала для формирования плазменных покрытий использовался в основном порошок никель-графита Ni[Cg], широко используемый в ГТД для получения «срабатываемых» покрытий, которые напыляются на элементы конструкций уплотнений различного типа с целью обеспечения минимального радиального и/или осевого зазора за счет изнашивания «лишнего» количества материала покрытия на этапе приработки этих уплотнений. Такое использование покрытий существенно уменьшает утечку рабочего тела по зазорам, повышая тем самым эффективность работы двигателя. В данной работе представлены результаты исследования покрытий Ni[Cg], предлагаемых к использованию в качестве износостойких ТСП, обеспечивающих защиту конструктивных узлов изделий, работающих в условиях фреттинг-износа в широком диапазоне температур и контактных давлений.

Известно, что в мировой практике защиты контактирующих поверхностей от фреттинг-износа, и в частности, в узлах, работающих в экстремальных условиях, например, в замках вентиляторных лопаток большинства современных авиационных ГТД широко используется технология плазменного напыления покрытий состава CuNiIn (58,5Cu-36,5Ni-5In), около 20 лет тому назад предложенная фирмой General Electric, США [4]. Основой материала порошка для этого покрытия является сплав из меди и никеля,

который известен как высокоэффективный подшипниковый материал, обладающий достаточно низким коэффициентом трения и высокой несущей способностью. Добавка в этот сплав 5% индия, который благодаря своей способности образовывать на поверхности металла пленки с низким сопротивлением к сдвиговым напряжениям, позволил применить покрытие CuNiIn в условиях «сухого» трения в качестве твердой смазки.

Кроме того, авторы [4] отметили, что, учитывая наличие в плазмонапыленном покрытии CuNiIn значительной (до 10%) естественной пористости, на его поверхность и непосредственно внутрь покрытия можно добавлять суспензию дисульфида молибдена MoS₂, являющуюся хорошо известной «твердой» смазкой, тем самым дополнительно защищая место контакта от фреттинг-износа и коррозии.

Однако, в условиях существенного ужесточения режимных параметров современных и перспективных авиационных двигателей, когда температура пар трения может достигать 1000...1200°C, а контактные давления – 500...600 МПа и более, возможности увеличения ресурса изделий за счет уменьшения фреттинг-износа и коррозии с помощью покрытия CuNiIn с добавками MoS₂ практически исчерпаны.

Учитывая изложенное, наши исследования по поиску твердосмазочного покрытия для защиты от фреттинг-износа и являющегося альтернативным покрытием CuNiIn, прежде всего были направлены на поиск, как состава покрытия, так и его конструкции.

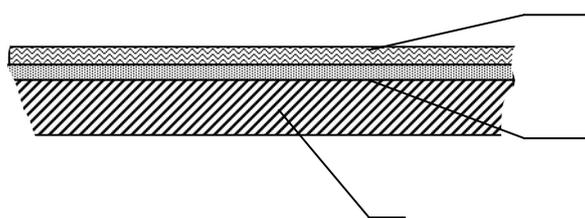
В качестве базового материала покрытия, способного обеспечить высокую несущую способность контактирующих поверхностей при сохранении их антифрикционных свойств и износостойкости, а также пригодного для формирования покрытий методом плазменного напыления, были использованы порошки плакированного никель-графита Ni[Cg] российского производства (ОАО «Институт Гипроникель», Санкт-Петербург) и порошок производства компании Sulzer-Metco. При этом наличие никеля должно обеспечивать достаточно жесткий и прочный каркас твердосмазочного покрытия, а графит способствовать повышению его износостойкости. В качестве второго синергетического компонента такого покрытия рассматривался дисульфид молибдена MoS₂, смешанный с эпоксидным лаком.

В основу проектирования конструкции альтернативного твердосмазочного покрытия закладывались следующие моменты.

В настоящее время в узлах трения авиационно-космической техники широкое применение нашли ТСП «пленочного» (тонкослойного) типа, получаемые различными методами: натиранием (шаржированием), диффузионным насыщением, гальваническим осаждением, химическим осаждением, электрофорезом, физическими методами осаждения в вакууме, осаждением с использованием органических связующих. Типичный вариант такого современного «пленочного» ТСП общей толщиной до 5...10 мкм показан на рисунке 1. Как правило, эти покрытия имеют небольшой ресурс и применяются в узлах трения, в которых длина пути трения незначительна и практически отсутствует унос продуктов изнашивания.

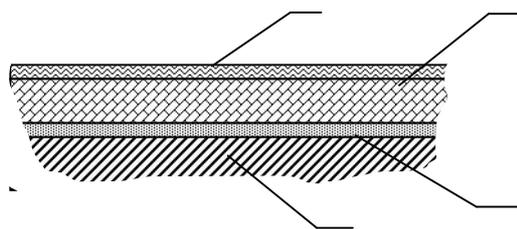
Для использования в высоконагруженных узлах трения с повышенным ресурсом при фреттинг-износе наиболее перспективны относительно толстые (до 200...300 мкм) ТСП, основу которых составляют износостойкие матрицы из неорганических материалов (рисунок 2). В этих покрытиях основную функциональную нагрузку несет слой 3 – носитель ТСП, который может быть выполнен как из мономатериала, так и представлять собой матричную композицию из различных компонентов, гарантирующих синергетическое повышение эксплуатационных характеристик ТСП. Слой 4 представляет собой или пропиточный слой с ТСП или слой твердой смазки в виде мономатериала без матрицы, являющийся приработочным слоем с низкой сдвиговой прочностью, и служащий более быстрому и эффективному выходу покрытия на рабочий режим. Важным элементом в обоих типах покрытий является наличие адгезионного подслоя 2, функции которого может также выполнять композиционный слой в подложке,

получаемый диффузионным насыщением или ионной имплантацией.



1-подложка; 2-адгезионный подслои; 3-слой носитель ТСП

Рисунок 1. Конструкция «пленочного» ТСП

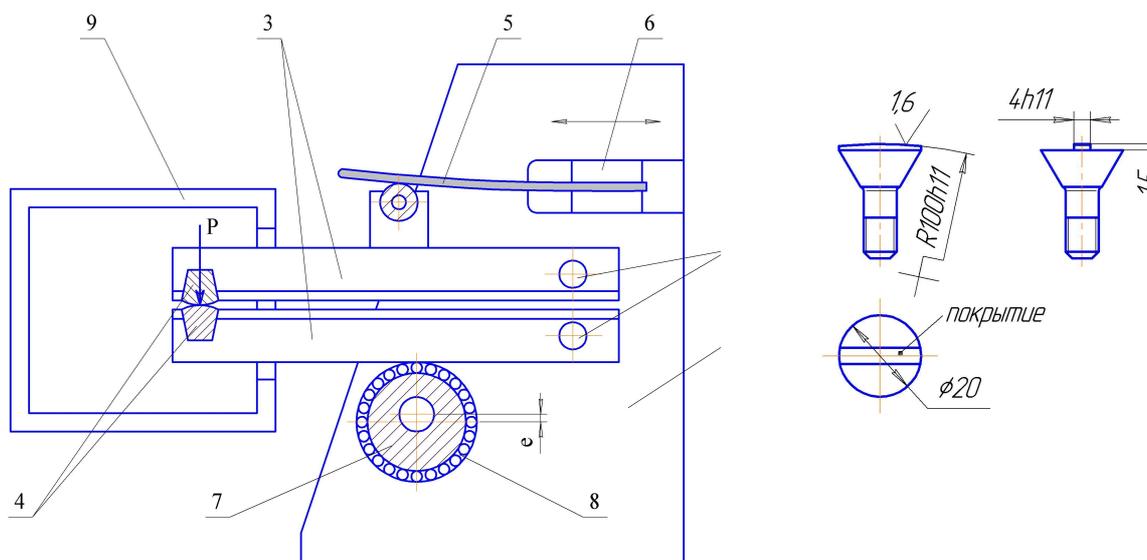


1-подложка; 2-адгезионный подслои; 3-износостойкий слой носитель ТСП; 4-слой с пропиткой ТСП

Рисунок 2. Конструкция ТСП на основе «толстой» износостойкой матрицы

Плазменное напыление покрытий осуществлялось с использованием установки «Plasma Technik» (Швейцария), оборудованной управляющими консолями, которые обеспечивали управление четырьмя плазмообразующими газами: аргоном, азотом, гелием и водородом. Установка была оснащена порошковыми питателями TWIN 10 фирмы «Plasmadyne», плазматронами типа F4 и источником питания с максимальной потребляемой мощностью 55 кВт.

Для исследования фреттинг-износа (сухого знакопеременного трения) была изготовлена специальная машина трения, схема которой показана на рисунке 3.



1- оси рычагов; 2- плиты корпуса установки; 3-рычаги; 4- испытуемые образцы; 5- плоская пружина; 6- узел перемещения пружины; 7-вал; 8- внешняя обойма подшипника; 9-объем моделирования среды трения.

Рисунок 3. Схема машины сухого трения знакопеременного трения (фреттинг-износа)

Рисунок 4. Образец для испытания покрытий

На осях 1, закрепленных между двумя стойками 2 корпуса установки, размещены два рычага 3, на конце которых в специальных гнездах крепятся испытываемые образцы 4. Под действием плоской листовой пружины 5 с помощью узла ее перемещения 6 между образцами 4 образуется контакт трения с усилием P , которое может изменяться при использовании листовых пружин разной толщины. Возвратно-поступательное движение образцов 4 друг относительно друга обеспечивается при вращении вала 7, закрепленном с эксцентриситетом “ e ”, при этом внешняя обойма подшипников 8 находится в постоянном контакте с нижним рычагом. Внешние концы рычагов 3, вместе с образцами 4 могут размещаться в объеме 9, в котором создается требуемая по условиям эксплуатации внешняя среда и температурные условия трения.

На рисунке 4 представлен чертеж тестовых образцов, которые жестко закрепляются с помощью цанговых зажимов в специальных гнездах машины трения и на рабочие, контактные поверхности которых напыляются исследуемые покрытия.

Изготовленная машина трения позволяет обеспечить следующие условия испытаний на фреттинг-износ: давление в контакте до 1 ГПа, частота до 50 Гц, амплитуда от 0,1 до 2 мм, температура среды от 20 до 800°C. Величина износа определялась по измерению хорды износа на цилиндрической контактной поверхности образца.

На рисунке 5 показаны зависимости относительной скорости износа $V_{\text{отн.ед.}}$ от времени T мин испытаний для рассмотренных выше материалов и конструкций покрытий. Испытания проводились при следующих условиях: контакт – цилиндр-цилиндр, амплитуда перемещений – 0,2 мм, частота взаимных перемещений – 10,7 Гц, давление Герца в контакте – 600 МПа.

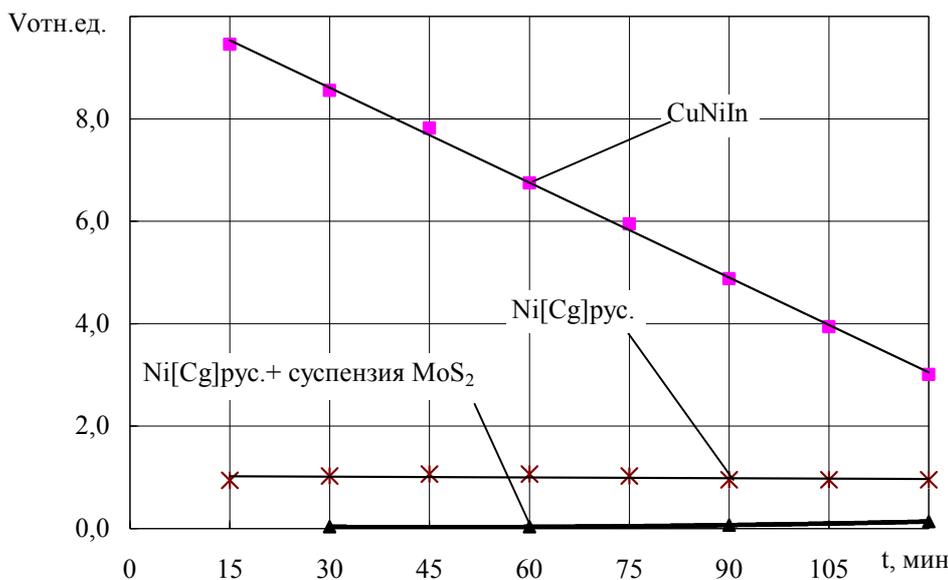


Рисунок 5. Скорость износа исследованных ТСП в зависимости от времени

В ходе проведения испытаний и многократного использования образцов с покрытиями одновременно была отработана технология ремонта (восстановления) ТСП, которая включала в себя: дефектацию рабочей поверхности использованных образцов, удаление ТСП методом абразивно-струйной обработки, проверку геометрии (радиуса) рабочей поверхности образцов, и, в случае ее сохранения, проведение дополнительной струйно-абразивной обработки перед плазменным напылением и окончательное плазменное напыление многослойного ТСП и его пропитку [5].

Полученные результаты предварительных исследований и результаты испытаний на фреттинг-износ позволили сделать следующие выводы:

- определен состав адгезионного слоя (NiAl) и исследованы ТСП: CuNiIn, Ni[Cg] и суспензия MoS₂, для каждого слоя определены режимы плазменного напыления, обеспечивающие наиболее высокую фреттингостойкость покрытий предложенной конструкции;
- особенности кинематической схемы используемой машины трения позволяют создавать условия испытаний близкие к условиям эксплуатации реальных узлов крепления (замков) лопаток авиационных двигателей;
- выполненные исследования и данные, приведенные в настоящей работе, позволили рекомендовать технологию плазменного многослойного покрытия на основе «толстой» износостойкой матрицы, состоящей из подслоя NiAl и твердого смазочного слоя на основе отечественного порошка никель-графита Ni[Cg], фреттингостойкость которого дополнительно можно повысить за счет нанесения внешнего слоя суспензии MoS₂ на эпоксидной смоле.

Показаны преимущества покрытий на основе отечественного порошка никель-графит Ni[Cg], значительно повышающих (в 2...3 раза) фреттингостойкость образцов с традиционными твердосмазочными покрытиями.

Литература

1. Ключников И.П., Крюков М.А. Восстановление ответственных деталей и узлов ГТД методами высокотемпературной пайки и сварки // Материалы 3-й Всероссийской практической конференции-выставки "Технология ремонта, восстановления, упрочнения и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций". СПб, Изд-во СПбГТУ, 2001. С.73-78.
2. Трение, изнашивание и смазка. Справочник. В 2-х кн. / Под редакцией И.В. Крагельского, В.В. Алисина. –М.: Машиностроение, Кн.1,1978.400с.
3. Дроздов Ю.Н., Павлов В.Г., Пучков В.Н. Трение и износ в экстремальных условиях. Справочник. –М.: Машиностроение, 1986. 224с.
4. Y.Raz, S.Dirnfeld Plasma Arc Spraying of Ti-6Al-V with CuNiIn //Surface Engineering, 6, N2, 1990, p.121-124
5. Лесневский Л.Н., Трошин А.Е., Тюрин В.Н., Гаврилов П.В., Клопов С.Г. Возможности использования покрытий Ni[Cg], напылённых методом APS, для защиты от фреттинг-износа в производственных и ремонтных технологиях. // Материалы 10-й Юбилейной Международной научно-практической конференции "Технология ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструментов и технологической оснастки. СПб, Изд-во СПбГТУ, Часть 1, 2008. С. 193-200.

*Московский авиационный институт (государственный технический университет), Россия,
Москва*