

УДК 621.891

**ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ
FeAl₂-Ti-Si В ПАРАХ ТРЕНИЯ С АНТИФРИКЦИОННЫМИ
И КОНСТРУКЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ****Е.Н. Лисовой¹**

Исследованы в широких нагрузочно-скоростных диапазонах триботехнические характеристики совместимости детонационных покрытий FeAl₂-Ti-Si с антифрикционными и конструкционными материалами.

Ключевые слова: износостойкость, трение, антифрикционность, исследования.

Одной из актуальных задач современной науки о трении и изнашивании твердых тел является оптимальный подбор материалов подвижных сопряжений и определение областей их рационального технико-эксплуатационного применения.

Опыт исследования сочетаний материалов в типовых узлах трения авиационной техники показывает неудовлетворительные результаты эксплуатации покрытий на основе хрома при скольжении по алюминиевым сплавам, поверхностей медных сплавов по алюминиевым сплавам, покрытий на основе хрома по хромовым сплавам, также пар трения закаленная сталь по хромовым покрытиям [1].

Детонационный метод формирования износостойких покрытий, как и другие технологии газотермического напыления, имеет предпочтительные с точки зрения технико-экономических показателей области наиболее эффективного применения.

Физической основой при определении оптимального подбора пар трения является реализация структурно-энергетической приспособляемости их контактных поверхностей, раскрывающих степень их структурной совместимости и обеспечивающей заданную долговечность [2].

Целенаправленные и научно обоснованные результаты испытаний, определяющие оптимальные с точки зрения эксплуатации сочетания материалов в системе покрытие-контртело, несмотря на их принципиальную важность, в технической литературе крайне не многочисленны. Поэтому исследования физических аспектов совместимости детонационных покрытий с антифрикционными и конструкционными материалами в подвижных

¹ © Лисовой Е.Н. , инженер, Государственное авиационное предприятие „Украина”

сопряжениях деталей и оборудования остается актуальной проблемой современной практики.

Цель работы – экспериментальные исследования совместимости детонационных покрытий $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si}$ с антифрикционными и конструкционными материалами, широко применяемыми в узлах трения авиационной техники.

При изучении процессов трения и изнашивания, обуславливающих явления нормального износа и повреждаемости, использовался комплекс методик, физико-химического анализа. Рентгенофазовые исследования проводили с помощью дифрактометра Дрон-УМ1. Съемка проводилась в широком угловом диапазоне в Co -излучении, напряжение 25кВ, ток 15 мА. Так как рентгеновский анализ не дает полную информацию о состоянии материала непосредственно с поверхности трения, потому как даже самые „мягкие” рентгеновские лучи проникают на глубину порядка 6-10 мкм, то для изучения тончайшего поверхностного слоя использовали метод дифракции электронов. Электронографические исследования проводились на установке ЭМР-100 в режиме дифракции на отражение при ускоряющем напряжении 100 кВ.

Испытания на износ осуществляли на машине трения типа УМТ2 на кольцевых образцах в условиях распределенного контакта ($K_{вз} \approx 1$) по методике, изложенной [3]. Толщина детонационных покрытий после доводки составляла 0,20-0,25 мм при шероховатости $R_a=0,63-0,32$. Испытания проводили при скоростях скольжения от 0,05 до 2,4 м/с, границы нормальных режимов трения определяли величиной критического давления.

Подбор материалов пар трения осуществлялся с позиции системного анализа [2]. Так бронза типа БрАЖН10-4-4, применяемая в качестве антифрикционного материала, широко используется при изготовлении опор скольжения, упорных колец, втулок, зубчатых колес, клапанов и т.п. Бронза типа БрОЦС6-6-3 используется, как правило, для подшипников, подпятников, шестерен, дисков, втулок и т.д. Как конструкционные материалы взят образцы из высокопрочной самолетной стали 30ХГСНА, используемой для зубчатых колес, валов, толкателей, рычагов, направляющих и т.п. и образцы из азотированной стали 38ХМЮА, применяемой при изготовлении шестерен, валов, распределительных валиков, втулок, штоков и других деталей.

Результаты исследований, полученные при испытаниях на износостойкость покрытий $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si}$ в парах трения с конструкционными материалами, представлены на рис. 1.

Металлографический анализ и профилографирование показывают, что поверхности трения характеризуются отсутствием визуальных повреждений (рис. 2), отдельные очаги схватывания, возникающие в данных условиях испытаний, локализируются в тонких поверхностных слоях и аннигили-

руют в процессе аккомодации зернограничного скольжения. Образующиеся тонкопленочные структуры механохимической природы [4], выполняя роль твердой смазки, препятствуют адгезионно-молекулярному взаимодействию рабочих поверхностей, предохраняя их от непосредственного контакта и разрушения.

Устойчивость профиля кривой $I_n=f(V)$ практически во всем диапазоне испытаний свидетельствует о проявлении структурной приспособляемости материалов пар трения и, как следствие, нормальном допустимом изнашивании.

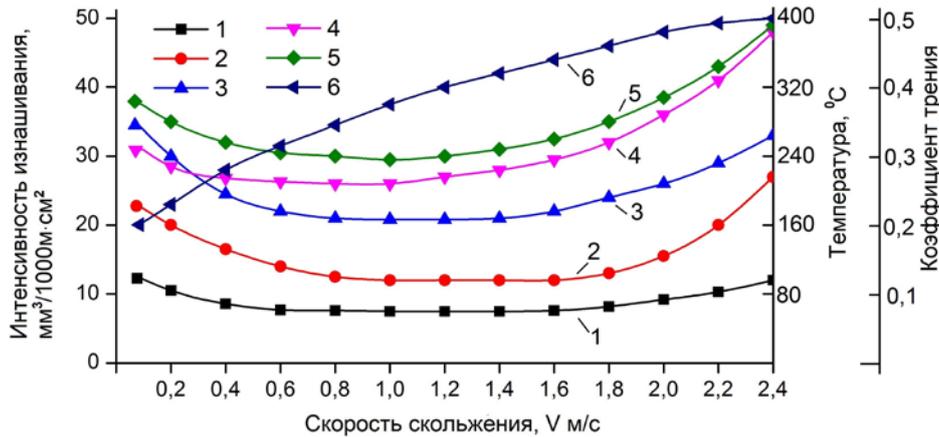
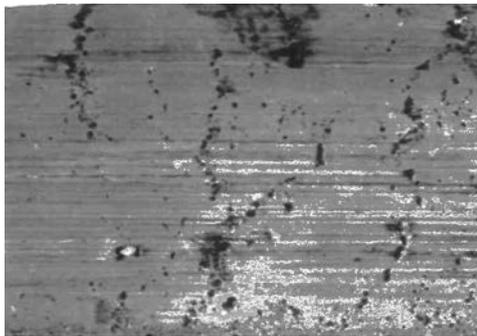


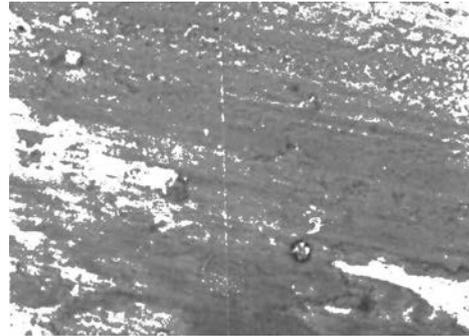
Рис. 1. Влияние скорости скольжения на:

1,3,5 – соответственно интенсивность изнашивания (I_n), коэффициент трения (μ), температуру для покрытия $FeAl_2-Ti-Si$ в парах трения с образцами из стали 30XГСНА;

2,4,6 – соответственно интенсивность изнашивания (I_n), коэффициент трения (μ), температуру для покрытия $FeAl_2-Ti-Si$ в парах трения с образцами из стали 38XMЮА.



а



б

Рис. 2. Поверхности трения покрытий $FeAl_2-Ti-Si$ испытанных с образцами из стали 30XГСНА при: а – 0,2 м/с, б – 2,0 м/с (x320).

Характер изменения коэффициентов трения, величина которых определяет степень потери энергии в узлах трения, согласуется с установленной закономерностью изнашивания и находится в пределах 0,23-0,36.

Поверхностная прочность покрытий при трении, в известном смысле обуславливающая их эксплуатационные возможности, является аддитивной функцией комплекса факторов, в том числе факторов как первого яруса, отражающих макроструктурный уровень, так и второго яруса, характеризующих особенности структуры на микроуровне.

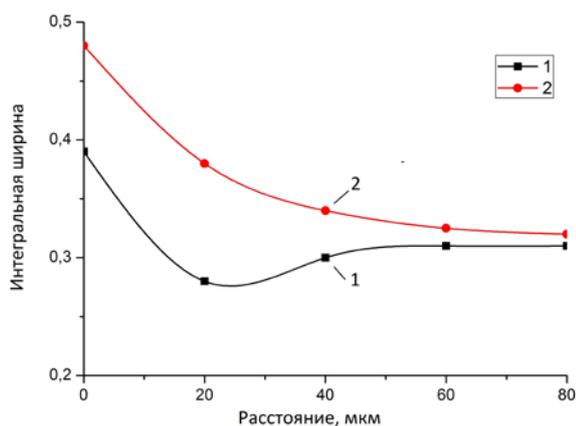


Рис. 3. Зависимость ширины дифракционной линии (220) α -Fe от расстояния от поверхности трения: 1 - в исходном состоянии; 2 - после испытаний.

По данным исследований касательные напряжения, возникающие в приповерхностных слоях покрытий, достигают максимальных значений на некоторой глубине и интенсивность изнашивания во многом определяется процессами, протекающими в этих слоях. В качестве информативных параметров, изменения которых отражают последовательные стадии процессов поверхностного взаимодействия при трении, были использованы методики определения ширины дифракционных линий и микротвердости, причем в первом случае фиксировали картину более усредненную по поверхности, чем во втором [5].

На рис. 4. представлены результаты измерений интегральной ширины рентгеновских линий (220) α -Fe для исследуемых покрытий в исходном состоянии и после испытаний. Можно отметить, что в результате нагружения трением имеют место трансформация поверхностного слоя, особенностью которой является изменение его структурного состояния и, как следствие, механических свойств, при этом напряженное состояние характеризуется усилиями сжатия.

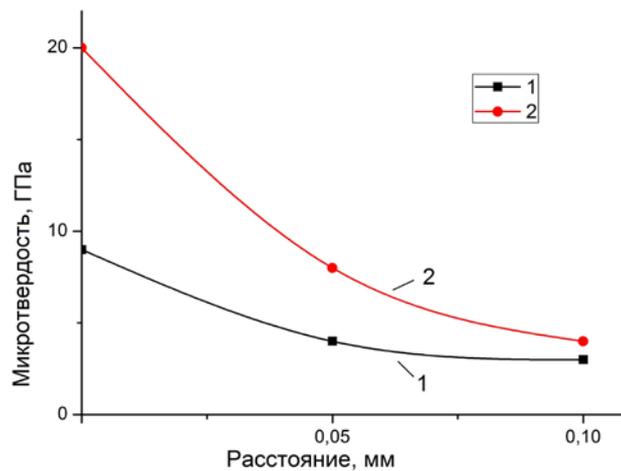


Рис. 4. Залежність мікротвердості від відстані від робочої поверхні: 1 – в вихідному стані; 2 – після випробувань

В даних умовах випробувань структура приповерхностного шару разом з тонкопленочними вторичними структурами механохімічного походження відповідає поєднанню високої міцності з достаточним запасом пластичності, іншими словами мають стійким проявленням структурної пристосованості, що забезпечує здатність протидіяти розвитку крихких тріщин і обумовлює мінімізацію параметрів тертя. Однак для кривої 2 залежності $I_n=f(V)$ з підвищенням швидкості ковзання інтенсивність зношування декілька зростає, що обумовлено, на наш погляд, абразивним впливом викидаються частинок за рахунок підвищення температури в зоні тертя азотированої сталі 38ХМЮА, так як робоспроможність азотированного шару обмежена температурою хіміко-термічного процесу азотирования.

Діапазон структурно-енергетичкої пристосованості детонаційних покриттів $FeAl_2-Ti-Si$ в парах тертя з конструкційними матеріалами може бути значно збільшено за рахунок застосування мастичних матеріалів. Так, використання масла МС-20 в спів'язанні покриттів $FeAl_2-Ti-Si$ і сталь 30ХГСНА дозволило розширити діапазон нормального механохімічного тертя в 7 раз значно при цьому підвищити надійність трибосистеми [1].

На рис. 5. представлені залежності інтенсивності зношування детонаційних покриттів $FeAl_2-Ti-Si$ від швидкості ковзання і антифрикційних матеріалів контртел, в якості яких використані бронзи БрАЖН10-4-4 і БрОЦС6-6-3.

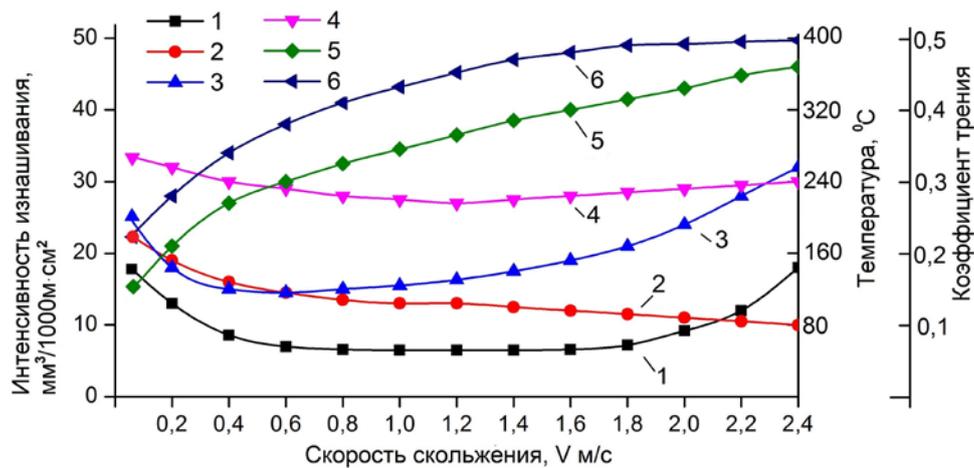


Рис. 5. Влияние скорости скольжения на:

1,3,5 – соответственно интенсивность изнашивания (I_n), коэффициент трения (μ), температуру для покрытия $FeAl_2-Ti-Si$ в парах трения с образцами из БрАЖН10-4-4;

2,4,6 – соответственно интенсивность изнашивания (I_n), коэффициент трения (μ), температуру для покрытия $FeAl_2-Ti-Si$ в парах трения с образцами из БрОЦС6-6-3.

Сочетание покрытий в парах трения с алюминиевой бронзой, как видно из графика, обладает высоким сопротивлением износу и хорошо противостоит поверхностному разрушению и схватыванию. Реализация структурной приспособляемости материалов контактных поверхностей в данных условиях испытаний обусловлена как свойствами вторичных структур, так и характеристиками поверхностей трения. Важным условием совместимости испытываемых материалов является и то, что для бронзы температура рекристаллизации сохраняется ниже средней температуры поверхности трения.

Для зависимостей пары трения покрытие $FeAl_2-Ti-Si$ с образцами из оловянной бронзы характерно, прежде всего, монотонное повышение температуры в зоне трения, сопровождающееся как понижением интенсивности изнашивания, так и коэффициента трения при повышении скорости скольжения. По данным металлографического анализа минимальный износ и оптимальное трение испытываемых пар обусловлены процессом экструзии свинца, то есть при увеличении температуры в поле действующих напряжений вследствие поверхностной деформации и различия коэффициентов линейного расширения, имеет место выдавливание свинца из структуры (рис. 6).

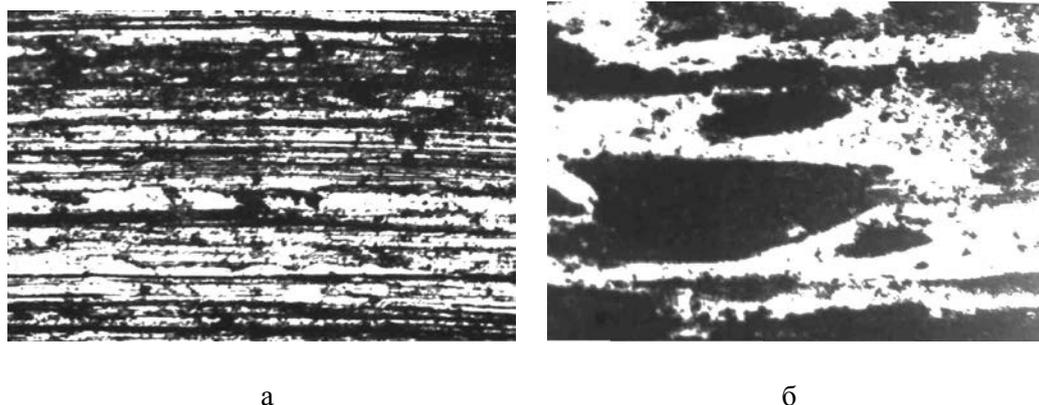


Рис. 6. Поверхности трения покрытия FeAl₂-Ti-Si после испытаний в парах трения с образцами из бронзы БрОЦС6-6-3 при скоростях: а - 0,2 м/с; б - 1,5 м/с (x240).

В результате чего поверхность трения покрывается тончайшим слоем свинцовой пленки, выполняющей роль смазки, что препятствует схватыванию и обеспечивает в данных условиях устойчивое проявление процесса структурной приспособляемости.

В зависимости от свойств материалов и среды изменяется диапазон и уровень минимального трения и износа. Действенным методом расширения области минимальных значений параметров трения остается рациональное применение смазочных материалов и присадок в подвижных сопряженных поверхностях узлов трения. При испытаниях покрытий FeAl₂-Ti-Si в парах с антифрикционными материалами в условиях смазки удалось расширить диапазон структурной приспособляемости при сравнении с результатами испытаний без смазки до 9 раз, при этом показатели трения и износа были устойчивы и значительно ниже, чем вне этих диапазонов

При создании условий структурно-энергетической приспособляемости контактное взаимодействие материалов пар трения локализуется в тонкопленочных структурах, которые экранируют рабочие поверхности от механических и физико-механических воздействий. При испытании в условиях структурно-энергетической приспособляемости для исследуемых пар трения интенсивность нормального изнашивания достигала порядка $0,2-0,5 \text{ мм}^3/1000\text{м}\cdot\text{см}^2$.

Таким образом, обобщение результатов работы подтверждает целесообразность и перспективность продолжения испытаний детонационных покрытий FeAl₂-Ti-Si с целью их применения для повышения износостойкости и долговечности деталей, работающих в условиях трения.

Выводы

1. Установлена правомерность использованных методологий и алгоритмов проведения экспериментальных исследований покры-

тий FeAl₂-Ti-Si в парах трения с широко применяемыми в авиационной технике конструкционными и антифрикционными материалами.

2. Определено, что на структурную совместимость покрытий FeAl₂-Ti-Si в парах трения с высокопрочными самолетными сталями и авиационными бронзами значительное влияние оказывают внешняя среда. Экспериментально подтверждено, что в условиях смазки диапазон минимизации параметров трения увеличивается в 7-9 раз.
3. Использование результатов измерения интегральной ширины рентгеновских линий (220) α-Fe и микротвердости, которые отражают последовательные стадии процессов поверхностного взаимодействия, позволило установить напряженное состояние и структуру приповерхностного слоя.
4. Установлено, что устойчивое проявление структурно-энергетической приспособляемости испытываемых материалов пар трения обуславливает минимальные параметры изнашивания, чем обеспечивает заданную долговечность.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Отчет о НИР. Исследование эксплуатационных повреждений типовых узлов трения авиационной техники. – К.: НАУ, 2006. – 143 с.
2. Костецкий Б.И., Носовский И.Г., А.К. Караулов и др. Поверхностная прочность материалов при трении. – К.: Техника, 1976. – 296 с.
3. Носовский И.Г., Щепетов В.В. Повышение долговечности узлов трения за счет создания на рабочих поверхностях износостойких покрытий // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 1990. - № 11. – С. 83-89.
4. Лисовой Е.Н. Сопротивление износу детонационных покрытий системы FeAl₂-Ti-Si при трении без смазки // Проблемы техники: Научно-виробничий журнал. – Одеса: ДиолПринт, 2012. - №4. – С. 46-54.
5. Избранные методы исследования в материаловедении / Под ред. Г. Хунгера. – М.: Металлургия, 1990. – 416 с.

Рукопись поступила в редакцию 28.04.2013 г.