

ОСОБЕННОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ $FeAl_2-Ti-Si$ В ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛАХ ТРЕНИЯ

Проведён анализ особенностей изнашивания разработанного детонационного покрытия $FeAl_2-Ti-Si$, определены оптимальные нагрузочные диапазоны его эксплуатации, которые обеспечивают минимальный износ в условиях изменения скоростей скольжения и материалов контртел.

Ключевые слова: износ, детонационные покрытия, износостойкость, прочность, вторичные структуры.

EUGENE NIKOLAEVICH LISOVOY

State aviation enterprise "Ukraine", Borispol

SERGEY STEPANOVICH BYS

Khmel'nitsky National University

FEATURES WEAR DETONATION COATINGS $FeAl_2-Ti-Si$ IN SEVERE FRICTION

Abstract – The purpose of this work is to determine for developed detonation coatings $FeAl_2-Ti-Si$ optimal load range minimal wear in the changing sliding speeds and materials counterbodies.

In the study of the laws of friction and wear mechanisms causing surface damage coatings, use of modern physical methods, namely X-ray analysis and microphase. Tribological properties of the coatings was evaluated mechanical friction model samples in a distributed contact, after finishing coating thickness is $0,18 \div 0,25$ mm, roughness - $R_a 0,63 \div 0,32$ mm. For comparison, under the same conditions of test specimens with sprayed coating BK15 alloy, hardened steel 45 30XГСНА, ХВГ and antifriction bronze БрОЦС6-6-3.

The results of the research showed that the detonation coating $FeAl_2-Ti-Si$ has a sufficiently high tribological characteristics to use in heavy-duty friction instead of scarce and expensive coatings.

Keywords: wear, detonation coatings, wear resistance, strength, secondary structures

Вступлення. Одним из важных производственных факторов, оказывающих непосредственное влияние на процессы в контактной зоне и неразрывно связанных с исследованием закономерностей пластического деформирования при трении, является величина рабочей нагрузки [1, 2].

В настоящее время прикладные задачи поверхностной прочности покрытий при сложном напряженном состоянии, обусловленном воздействием нагрузки, остаются одним из наиболее важных разделов теории прочности и оцениваются с учетом целого ряда влияющих факторов [3–5]. Однако, несмотря на значительное количество работ, посвященных вопросам теории и практики упругопластической деформации в условиях тяжело нагруженного контакта, ряд принципиальных вопросов остаются нерешенными.

Целью испытаний на трение являлось определение для разработанного детонационного покрытия $FeAl_2-Ti-Si$ оптимальных нагрузочных диапазонов минимального износа в условиях изменения скоростей скольжения и материалов контртел.

Методика исследований. При изучении закономерностей трения и изнашивания, обуславливающих механизмы поверхностного разрушения покрытий, использовались современные физические методы исследований. Рентгеновский анализ осуществлялся с помощью дифрактометра ДРОН-УМ1. Съемка проводилась в широком угловом диапазоне в Co -излучении. Напряжение 25 кВ, ток 15 мА. Изучение физико-химических свойств, микрофазовый анализ проводили на электронном сканирующем микроскопе "Camscan". Для химического анализа вторичных структур использовалась программа ZAF-4FLS. Электронные микрофотографии для изучения поверхностей трения исследуемых покрытий были получены при съемке в трансмиссионном режиме на микроскопе IEM-100СХП. Триботехнические свойства покрытий оценивали при торцевом трении модельных образцов в условиях распределенного контакта, толщина покрытий после доводки составляет $0,18 \div 0,25$ мм, шероховатость – $R_a 0,63 \div 0,32$ мкм. Для сравнения при таких же условиях испытывали образцы с напыленным покрытием из вольфрамсодержащего сплава BK15, закаленных сталей 45, 30XГСНА, ХВГ и антифрикционной бронзы БрОЦС6-6-3.

Результаты исследований и их обсуждение. Структурно-фазовый состав исследуемых покрытий, а также получение вторичных структур с желаемыми физико-химическими свойствами (прежде всего, с высокими устойчивостью, температурой плавления, плотностью, адгезией, пластичностью) зависят от обоснованного выбора напыляемых порошков, в качестве которых использовались не содержащие дефицитных и дорогостоящих компонентов, разработанные многокомпонентные смеси $FeAl_2-Ti-Si$. Технологический процесс получения которых включал гетерогенизацию исходного сырья путем термодиффузионного насыщения легирующими элементами [6].

Управляя технологическим процессом получения композиционных порошков, удалось обеспечить не только желаемый химический состав, но и получить при напылении заданную структуру, оптимизирующую комплекс свойств, обуславливающих при определенных параметрах трения устойчивое

проявление структурной приспособляемости материала покрытия.

Как показали исследования, представленные на рис. 1, детонационные покрытия FeAl₂-Ti-Si практически не уступают по износостойкости вольфрамсодержащим покрытиям ВК15. Для них во всем диапазоне скоростей скольжения от 0,1 м/с до 2,5 м/с при нагрузке 5,0 МПа имеет место установившийся режим нормального механического износа, характеризующегося малыми величинами износа и низкими значениями коэффициентов трения. Исследуемые детонационные покрытия удовлетворяют основным требованиям, предъявляемым к антифрикционным материалам [7]. Как видно из представленной гистограммы, износостойкость детонационных покрытий в 15÷20 раз больше, чем закаленных сталей.

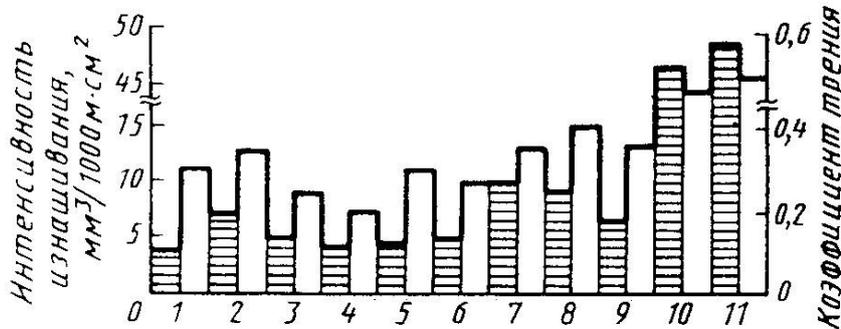


Рис. 1. Влияние материала контртела на интенсивность изнашивания (▨) и коэффициент трения (□) детонационных покрытий: 1÷3 – покрытие FeAl₂-Ti-Si, контртела из сталей 45, 30ХГСА и бронзы БрОЦС6-6-3 соответственно; 4÷6 – покрытие из сплава ВК15, контртела из сталей 45, ХВГ и бронзы БрОЦС6-6-3 соответственно; 7÷9 – покрытие на основе стали ПХ23Н15, контртела из сталей ХВГ, 30ХГСА и бронзы БрОЦС6-6-3 соответственно; 10 – закаленная сталь 45, контртело из стали 30ХГСА; 11 – сталь 30ХГСА, контртело из стали ХВГ.

Износ схватыванием, являющийся одним из наиболее нежелательных видов поверхностного разрушения, особенно интенсивно проявляется при невысоких скоростях и значительных нагрузках. Исходя из этого, покрытия испытывали при скольжении 0,3 м/с. Для определения границ нормального режима трения исследуемых покрытий оценивали критическую нагрузку ($P_{кр}$), при превышении которой происходит развитие патологических процессов, сопровождающихся скачкообразным изменением параметров трения и изнашивания. Были испытаны как одноименные, так и разноименные пары трения, у которых в качестве контртела использовали образцы из закаленных сталей (рис. 2). Анализируя полученные результаты, можно отметить, что для покрытий характерным является незначительное увеличение износа с ростом нагрузки и более высокие триботехнические свойства в одноименных сочетаниях, при трении по стали интенсивность изнашивания повышается, несущая способность снижается.

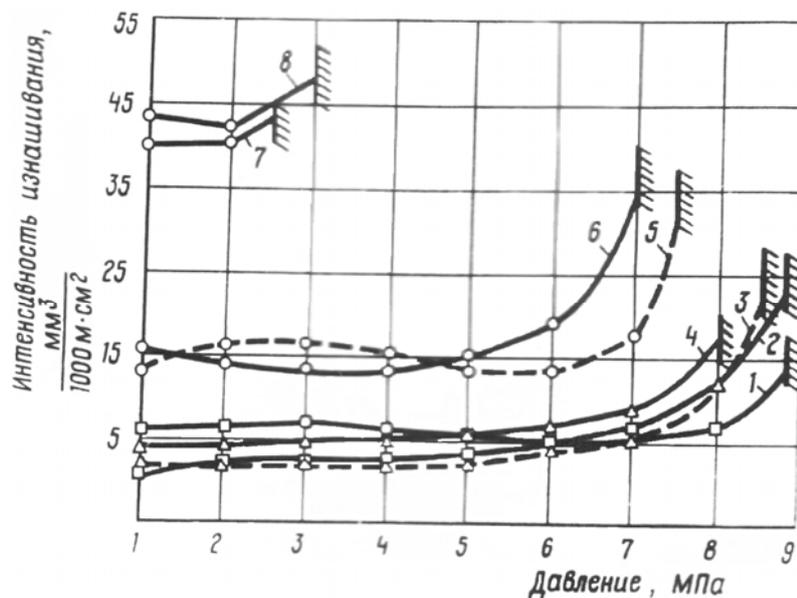


Рис. 2. Зависимость интенсивности изнашивания детонационных покрытий от нагрузки ($V=0,3$ м/с): 1 – покрытие твердого сплава ВК по закаленной стали 45; 2 – покрытие FeAl₂-Ti-Si по закаленной стали 45; 3 – покрытие FeAl₂-Ti-Si по закаленной стали 30ХГСА; 4 – покрытие Al₂O₃-TiO₂ по покрытию Al₂O₃-TiO₂; 5 – покрытие Cr₃C₂(Ni-Cr) по покрытию Cr₃C₂(Ni-Cr); 6 – покрытие на основе железа по закаленной стали 45; 7 – образцы из закаленных сталей 45 по стали 45; 8 – образцы из закаленных сталей 30ХГСА по 30ХГСА

При совместных деформациях в процессе трения покрытия и контртела существенную роль играют их механические свойства, в частности, прочность и пластичность, что, рассматривая с позиции

макроуровня, можно объяснить характером контактного взаимодействия покрытий и стальных образцов. При повышении нагрузки происходит хрупкое разрушение микронеровностей, чему способствует структурная и фазовая неоднородности, уровень внутренних напряжений, вследствие чего образуются абразивные частицы из материалов покрытий, которые активно шаржируют в поверхность стального образца, и в дальнейшем трение происходит по схеме – между поверхностью покрытий и "закрепленным абразивом", т.е. частицами износа, что приводит к более интенсивному их изнашиванию по стали, чем при трении в одноименных сочетаниях.

Детонационные покрытия типа ВК (кривая 1) характеризуются самыми высокими уровнями износостойкости и механической прочности.

Высокое сопротивление износу отличает также композиционные покрытия FeAl₂-Ti-Si (кривая 2), по результатам металлографического анализа можно заключить, что ведущим при данных условиях испытаний является механохимическое изнашивание. При увеличении нагрузки интенсивность изнашивания покрытий несколько возрастает, но качественно вид износа не изменяется. Вследствие общей закономерности явления структурной приспособляемости поверхностный слой переходит в термодинамически неравновесное активированное состояние из которого путем трибохимического взаимодействия с окружающей средой (при данных условиях испытаний) достигает равновесного, пассивного состояния. Результатом этого взаимодействия на поверхностях трения покрытий FeAl₂-Ti-Si образуются гетерофазные оксидные структуры типа β-тиалита (Al₂TiO₅), образующийся при твердофазном взаимодействии TiO₂ и Al₂O₃, и силиката фаялитного типа FeSiO₄, кроме того, установлено наличие муллита (Al₂SiO₅), которые, выполняя роль твердой смазки, препятствует адгезиозно-молекулярному взаимодействию. На рис. 3 представлены микрофотографии, отражающие кинетику изменения поверхностей трения покрытий FeAl₂-Ti-Si, испытанных при различных нагрузках.

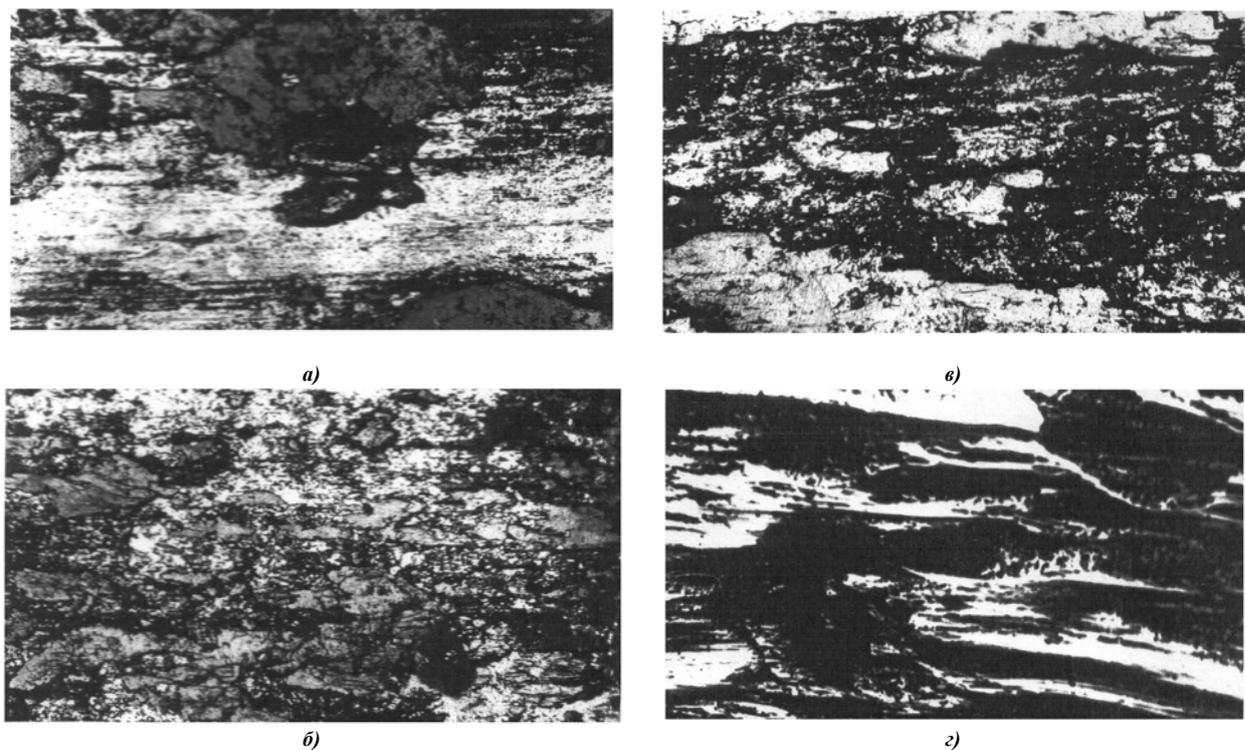


Рис. 3. Кинетика изменения поверхностей трения детонационных покрытий FeAl₂-Ti-Si, испытанных при: а) – 3,0 МПа; б) – 5,0 МПа; в) 7,0 МПа; з) 8,0 МПа (x 320)

Образование вторичных структур, экранирующих поверхности трения, происходит в определенном диапазоне при наличии динамического равновесия процессов активации пассивирования, если в силу влияния внешних условий динамическое равновесие сдвигается в сторону повышения энергии активации, то не образуется достаточно прочного и износостойкого слоя вторичных структур, защищающих основной материал пары трения от непосредственного взаимодействия, и процесс трения происходит в условиях повреждаемости. Так при дальнейшем повышении давления до 8 МПа происходит качественное изменение процесса изнашивания, сопровождающееся увеличением коэффициента трения и интенсивности износа. На боковой поверхности образца отчетливо видны цвета побежалости от темно-синего у кромки поверхности трения до желтого у ненапыленного торца.

Методом оже-электронной спектроскопии был проведен локальный анализ различных участков поверхностей трения, установлено, что содержание кислорода с глубиной травления независимо от режимов нагружения монотонно снижается вплоть до нижней границы чувствительности прибора.

С увеличением нагрузки в динамически активных поверхностных слоях деформационные процессы

протекают более интенсивно, пластическая деформация распространяется на большую глубину. На рис. 4 представлены продольное сечение поверхности трения (а), в активном слое которого отмечается ротационное закручивание деформированной структуры и микроструктура поверхности трения (б) с развивающимся очагом разрушения.

Развитие процессов контактного взаимодействия при трении, образование продуктов износа обусловлены кинетикой развития тонкой структуры поверхностного слоя при нагружении. Изучение тонкой структуры испытанных при трении покрытий методом трансмиссионной электронной микроскопии обусловлено определенными методическими сложностями, так как на фоне высокой плотности дислокаций, связанных в скопления, имеют место деформационной двойки и выраженная ячеистая структура, при этом высокая плотность переплетенных дислокаций обуславливает значительную разориентацию, приводящую к тому, что некоторые участки находятся вне контраста, поэтому существенным информационным источником при этом являются электронографические исследования, которые анализируются с соответствующими структурными фрагментами.

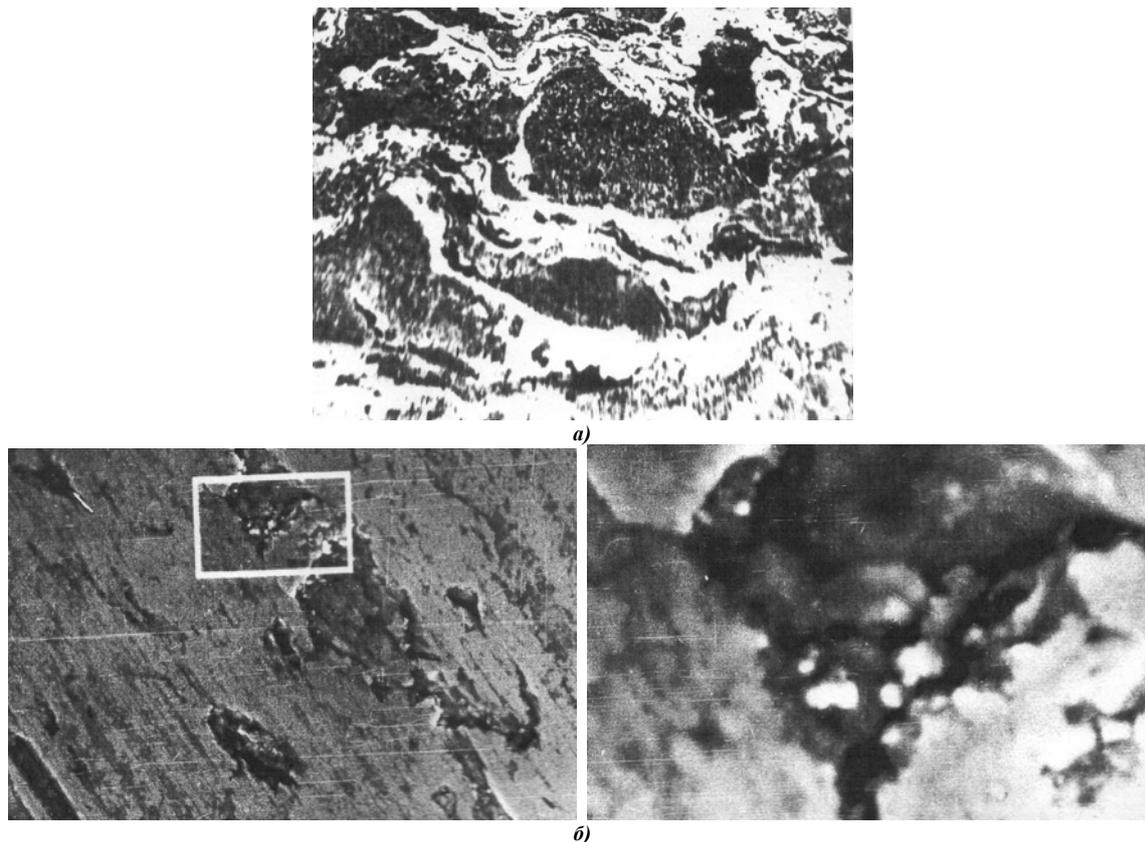


Рис. 4. Микрофотография продольного сечения (а) и микроструктура (б) поверхности трения с развивающимся очагом разрушения

На рис. 5 представлены результаты электронографических исследований детонационных покрытий на основе легированного железа.

Состояние поверхностного слоя при нормальном механохимическом износе характеризуется образованием фрагментированной структуры, ориентированной вдоль направления скольжения. Видно, что степень структурных изменений в основном определяется нагрузочно-температурным режимом испытаний, чем больше нагрузка, тем мельче величина зерна, больше протяженность границ, выше плотность кристаллических дефектов, при этом подавляются процессы коагуляции упрочняющих фаз, которые оказывают барьерное действие на рост зерен. Исследования показали, что, несмотря на повышение нагрузки в условиях механохимического изнашивания характер дислокационной структуры поверхностного слоя изменяется незначительно, границы частиц порошка по сравнению с границей зерен являются более значительным энергетическим и структурным барьером для дислокации, переход через который возможен либо на участках, свободных от включений, либо при их полном растворении за счет температурных флуктуаций. Смещение границ деформированных частичек возможно только после диффузионного перераспределения легирующих элементов и упрочняющих фаз, когда их сдерживающее влияние ослабевает и начинается рост зерен. Однако в большинстве случаев граница частиц является барьером не только для перемещения дислокаций, но и для смещения границ и роста зерен. Размер конечного зерна в основном близок к размеру исходных частиц порошка, однако ориентация зерен, по данным рентгеноструктурного анализа, отличается от исходной, что свидетельствует об образовании новых структур интерметаллидных соединений в пределах старых границ. Особенности изнашивания,

установленные на детонационных покрытиях FeAl₂-Ti-Si в условиях тяжелонагруженного контакта характерны и для остальных композиционных покрытий, полученных детонационно-газовым методом.

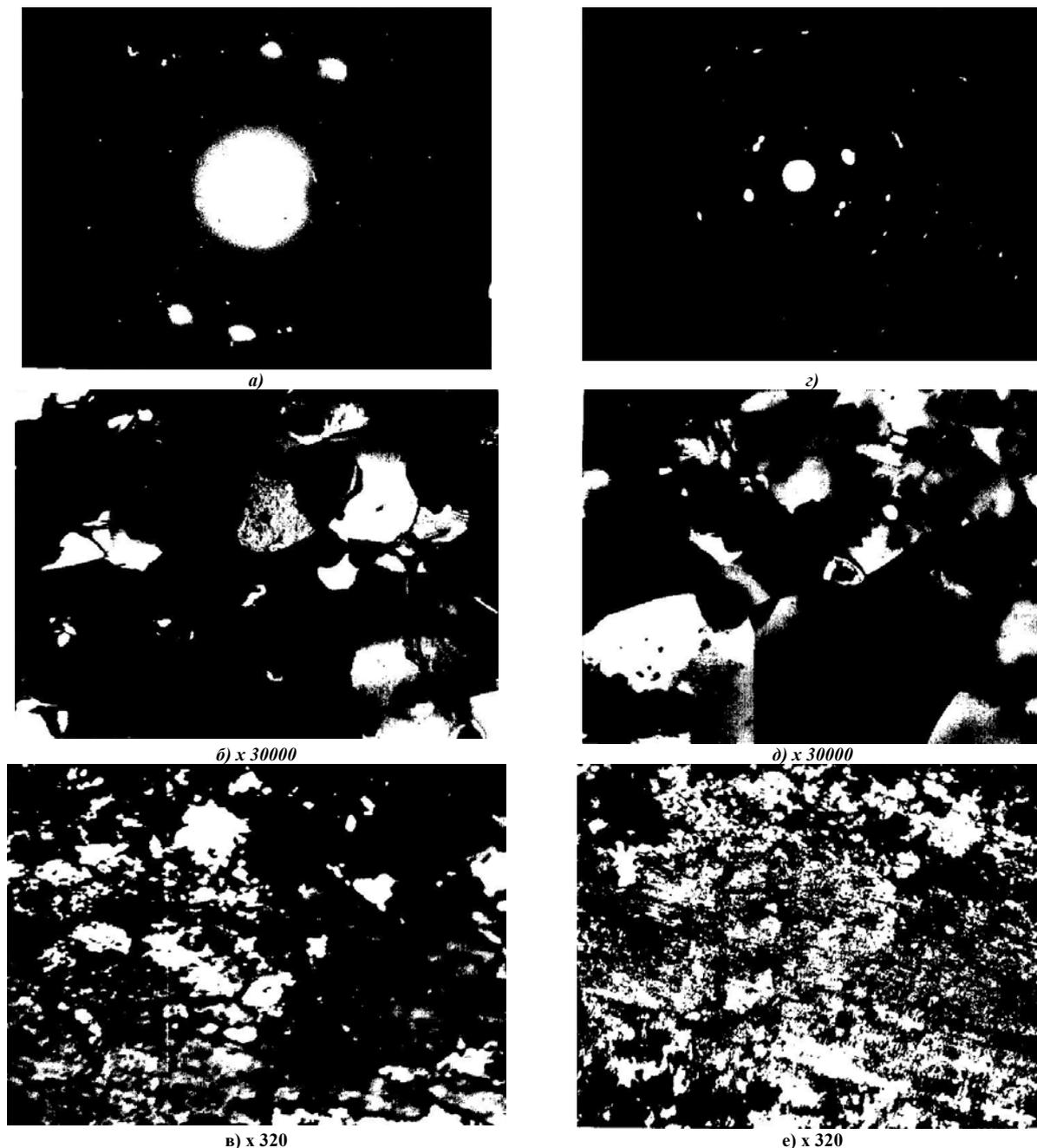


Рис. 5. Электронные микрофотографии и электронограммы поверхностей трения покрытий FeAl₂-Ti-Si, испытанных в условиях: а, б, в – механического изнашивания; г, д, е – начального этапа развития процессов повреждаемости

Выводы: Таким образом, детонационные покрытия FeAl₂-Ti-Si обладают достаточно высокими триботехническими характеристиками, позволяющими использовать их в тяжелонагруженных узлах трения вместо дефицитных и дорогих вольфрамосодержащих покрытий.

Создать универсальное антифрикционное покрытие, способное работать в узлах трения разного назначения и в различных условиях, практически невозможно. Поэтому, как правило, материалы трения разрабатываются для конкретных условий эксплуатации. В настоящее время покрытия, испытанные в данной работе, наносятся при стендовых испытаниях на рабочие поверхности посадочных мест валов, торцевых опор, колец торцевых уплотнителей, бандажные полочки компрессора ГТД.

Применение детонационных покрытий позволяет использовать более легкие сплавы в конструкциях двигателей и других узлах летательных аппаратов. Целесообразно также применение покрытий FeAl₂-Ti-Si в ремонтной практике.

Литература

1. Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, Л.И.

- Бершадский, В.А. Лященко // – К. : Техніка. – 1986. – С. 296.
2. Крагельский И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский.
 3. Седаков Л.М. Механические теории прочности / Л.М. Седаков // – Томск : ТПИ. – 2009. – С 147.
 4. Акимов В.В. Исследование триботехнических свойств твердосплавных композиционных материалов / В.В. Акимов // Трение и износ. – 2005. – Т.4. – С. 197–200.
 5. Яковлева Т.Ю. Вплив умов навантаження і технологічних чинників на втомне руйнування / Т.Ю. Яковлева, О.В. Войналович, Л.Є. Матохнюк // Металознавство та обробка матеріалів, 2006. – № 1. – С. 28–32.
 6. Лисовой Е.Н. Сопротивление износу детонационных покрытий системы FeAl₂-Ti-Si при трении без смазки / Е.Н. Лисовой // Проблемы техники. – 2012. – № 4. – С. 46–54.
 7. Федорченко И.М. Спеченные антифрикционные композиционные материалы / И.М. Федорченко, Л.И. Пугина // – К. : Наукова думка. – 1990. – С. 403.

References

1. Kostetskyi V.Y., Nosovskyi Y.H., Bershadskyi L.Y., Liashchenko V.A. Poverkhnostnaia prochnost materyalov pry trennyu. Kyiv. Tekhnika. 1986. P. 296.
2. Krahelskyi Y.V., Sedokov L.M. Trenye y yznos. Mekhanycheskye teoryy prochnosty. Tomsk. TPU. 2009. P. 147.
3. Akymov V.V. Yssledovanye trybotekhnicheskyykh svoystv tverdosplavnykh kompozytsyonnykh materyalov. Trenye y yznos. 2005. Volume 4. P. 197–200.
4. Yakovlieva T.Yu., Voinalovych O.V., Matokhniuk L.Ye. Vplyv umov navantazhennia i tekhnolohichnykh chynnykiv na vtomne ruinuvannia. Metaloznavstvo ta obrobka materialiv, 2006. Issue 1. P. 28–32.
5. Lysovoi E.N. Soprotivlenye yznosu detonatsyonnykh pokrytyi systemy FeAl₂-Ti-Si pry trennyu bez smazky. Problemy tekhniky. 2012. Issue 4. P. 46–54.
6. Fedorchenko Y.M., Puhyna L.Y. Spechennye antyfryktsyonnye kompozytsyonnye materyaly. Kyiv. Naukova dumka. 1990. P. 403.

Рецензія/Peer review : 20.3.2013 р.

Надрукована/Printed :6.4.2013 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Гордеев А.І.