

**RESEARCH AND DEVELOPMENT OF SOLID LUBRICATE COATINGS
BASED ON THE TIN AND TIN-PB SYSTEMS FOR WEAR AND FRETTING RESISTANCE
ON THE LRE TURBOPUMP UNIT ELEMENTS**

L. N. Lesnevskiy ^a, A. M. Ushakov ^b, I. A. Nikolaev ^c

Moscow Aviation Institute (MAI)

^a *l.lesnevskiy@yandex.ru*, ^b *alexeioushakov@yahoo.com*, ^c *nikolaevia@mai.ru*

Submitted 2022, June 15

Abstract. The wear-resistant TiN coating and the developed TiN-Pb composite coating were studied to protect the elements of turbopump units (TPU) of liquid-propellant rocket engines (LRE). Coatings were obtained in planar magnetron sputtering systems (MPS) using sputtering, both from one target and co-sputtering from two targets (titanium and lead) in the medium of reaction N₂ and working Ar gases in a mixture with determination of its optimal composition. High performance of the seal within the specified resource, the required tightness against oxidant leakage and the absence of wear of the sealing ends of the support ring were ensured. Studies of the TiN-Pb coating made it possible for the first time to determine the optimal value of lead in the coating and to recommend this coating for protection against fretting of HPP elements.

Keywords: magnetron sputtering system; planar magnetron; mechanical seal; support ring; solid lubricant coating; turbopump unit; wear; fretting wear.

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТВЕРДЫХ СМАЗОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ
СИСТЕМ TIN И TIN-PB ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ИЗНОСА И ФРЕТТИНГ-ИЗНОСА
ЭЛЕМЕНТОВ ТУРБОНАСОСНОГО АГРЕГАТА ЖРД**

Л. Н. Лесневский ^а, А. М. Ушаков ^б, И. А. Николаев ^в

ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт» (МАИ)

^а *l.lesnevskiy@yandex.ru*, ^б *alexeioushakov@yahoo.com*, ^в *nikolaevia@mai.ru*

Поступила в редакцию 15.06.2022

Аннотация. Проведены исследования износостойкого покрытия TiN и разработанного композиционного покрытия TiN-Pb для защиты элементов турбонасосных агрегатов (ТНА) жидкостных ракетных двигателей (ЖРД). Покрытия были получены в планарных магнетронных распылительных системах (МРС) с использованием распыления, как из одной мишени, так и сораспылением из двух мишеней (титана и свинца) в среде реакционного N₂ и рабочего Ar газов в смеси с определением ее оптимального состава. Были обеспечены высокая работоспособность уплотнения в пределах заданного ресурса, требуемая герметичность по утечке окислителя и отсутствие износа уплотнительных торцев опорного кольца. Исследования покрытия

TiN-Pb позволили впервые определить оптимальное значение свинца в покрытии и рекомендовать это покрытие для защиты от фреттинга элементов ТНА.

Ключевые слова: магнетронная распылительная система; планарный магнетрон; уплотнение торцовое; опорное кольцо; твердое смазочное покрытие; турбонасосный агрегат; износ; фреттинг-износ.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время многие исследователи в области технологии покрытий сосредоточили свое внимание на дальнейшем увеличении твердости композиционных износостойких твердых смазочных покрытий (ТСП) за счет их наноразмерного легирования, в результате чего были получены более значительные значения твердости и износостойкости [1]. Но поскольку сама по себе твердость не гарантирует длительный срок службы или низкое трение в большинстве случаев контактов трения, значительное внимание было уделено тем композиционным покрытиям, которые основаны на сочетании твердой и мягкой фаз [2]. Такие покрытия, например, типа TiN-X достаточно просто могут быть синтезированы в магнетронных распылительных системах (МРС): или из одной мозаичной мишени из титана со вставками из мягкого смазочного металла X, или из двух магнетронов, где твердый нитрид титана может быть получен из титановой мишени также реакционным распылением ее в среде смеси газов Ar + N₂, а поток мягкого смазочного материала X на подложку получен из другого магнетрона.

Для обеспечения жестких эксплуатационных требований к износостойким ТСП в составе узлов трения изделий ракетно-космической техники (РКТ) было принято решение об использовании метода его нанесения осаждением в магнетронной распылительной системе. Эта система отличается следующими особенностями, которые позволяют выделить ее среди других вакуумно-плазменных методов и рекомендовать ее для формирования ТСП в составе узлов трения:

- универсальность магнетронных распылительных систем, позволяющих получать наноструктурные и наноразмерные пленки металлов, сплавов (при сохранении их стехиометрии) и полупроводников, как однослойные, так и многослойные, и, при необходимости, в едином технологическом цикле;

- пленки, получаемые с помощью магнетронных распылительных систем, не имеют дефектов (свойственных методу CAD) в виде капель, мелких частиц, нарушающих сплошность покрытия;

- более высокая воспроизводимость свойств и состава пленок, особенно при распылении материалов сложного состава;

- достаточно приемлемая скорость осаждения пленок (50 нм/с и выше) и, самое главное, возможность простого и эффективного регулирования этой скорости в широких пределах как при обычном, так и при реактивном распылении;

- локализация электронов плазмы вблизи мишени позволяет рассчитывать на низкое радиационное и тепловое воздействие их на получаемое покрытие (пленку), уменьшить число дефектов в их структуре;

- способность некоторых материалов к самораспылению при высоких плотностях тока на мишени, что позволяет существенно снизить загрязнение пленок рабочим газом;

- появившиеся в последние годы разновидности магнетронных распылительных систем (с несбалансированной магнитной системой, с несколькими мишенями, с устройствами для дополнительной ионизации, импульсные и др.) значительно увеличили возможности МРС и области их применения, в том числе в изделиях РКТ.

Таким образом, сформулированные потенциальные возможности магнетронных систем распыления позволяют, при их использовании, рассчитывать как на эффективный перенос многокомпонентного материала типа твердая смазка с мишени на подложку (поверхность образца или детали), так и на организацию реактивного процесса формирования нитридов, карбидов и других веществ с высокой чистотой и требуемой стехиометрией.

Целью данной работы является изучение трибологического поведения покрытий из нитрида титана TiN, легированных свинцом Pb в заданном диапазоне условий сухого трения при фреттинге. Покрытия TiN давно и хорошо зарекомендовали себя в качестве высокоизносостойкого покрытия инструментов, используемых при различных методах механической обработки, а также при защите от износа и коррозии различных элементов узлов трения ДЛА и ЭУ. Так в работе [3] показано, что технологический процесс и режимы нанесения пленки TiN успешно реализованы в МРС на торцевую поверхность опорного уплотнительного кольца турбонасосного агрегата (ТНА) жидкостного ракетного двигателя (ЖРД), обеспечивая высокую степень уплотнения и низкий уровень (в соответствии с техническими требованиями Заказчика) утечек жидкого кислорода. В этой же работе была впервые показана возможность легирования твердой матрицы TiN мягкой фазой Pb, впоследствии закрепленная патентом на изобретение [4]. Это легирование свинцом Pb позволило значительно уменьшить износ покрытия TiN-Pb, сформированного реактивным распылением в МРС из мозаичной мишени [5], однако систематические исследования такого композиционного покрытия с определением оптимального содержания Pb в покрытии проведены не были, что является одной из основных задач настоящей работы.

Для решения этой задачи были выполнены исследования, развивающие ранее выполненные работы [3, 4] в направлении оценки влияния различного содержания свинца в Pb в покрытии против фреттинга системы TiN-Pb на его трибологические свойства.

Первоначально, при поиске рациональной конструкции композитного покрытия [6] формировались покрытия TiN на подложках размером 20×15×10 мм из титанового сплава ВТ-9 с предварительно отполированной поверхностью до шероховатости $Ra \leq 0,2$ мкм. Перед установкой в вакуумную камеру подложки очищались в изопропиловом спирте, а затем в деионизированной воде и сушились горячим воздухом.

С учетом опыта, накопленного в МАИ, по проведению экспериментальных исследований по осаждению пленок различного состава и проверки профиля пленок, осаждаемых на подложку, с использованием планарного магнетрона [4, 5], по разработке математической модели электрического разряда в МРС [6] для планарной конструкции и выполненных оценок параметров разряда был разработан опытный технологический процесс формирования ТСП на основе TiN на детали динамического торцового уплотнения и определены его физико-химические и эксплуатационные трибологические характеристики. Схема установки МАИ, на которой было получено покрытие, показана на рис. 1.

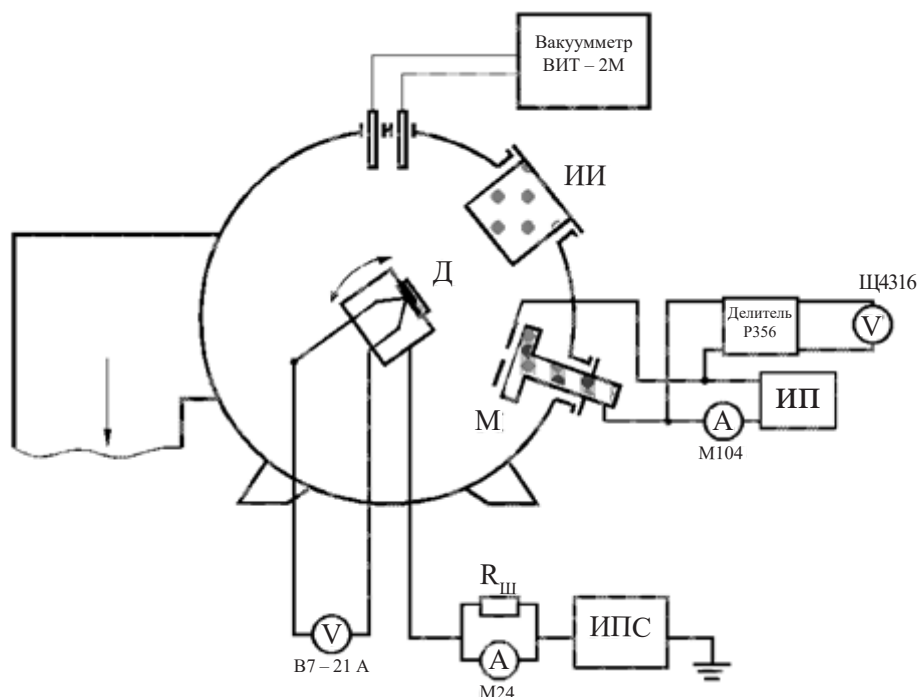


Рис. 1. Схема установки с магнетронной распылительной системой:
*Д – держатель с деталью; ИИ – ионный источник; ИП – источник питания магнетрона;
 ИПС – источник питания смещения; М – магнетрон*

Процесс осаждения в магнетронной распылительной системе осуществлялся в вакуумной цилиндрической камере промышленной установки ионно-плазменного напыления УВН 3.276.036. В состав установки входят: вакуумная камера с заслонкой, магнетрон (М), источник ионов МАИ-208Т (ИИ), коллектор рабочего газа аргона магнетрона, радиационный нагреватель подложки, изготовленный на базе лампы КГМ-1000-220, вмонтированной в водоохлаждаемый дюралевый отражатель, держатель (Д) подложек (деталей), шаговые приводы перемещения подложки и источники питания: магнетрона (ИП) и смещения (ИПС), используемый для управления энергией ионов, приходящих на подложку.

Распылительное устройства (магнетрон) представляет собой усовершенствованный источник диодного распыления, где за счет приложенного постоянного магнитного поля значительно повышена мощность разряда, а, следовательно, и скорости распыления мишеней и нанесения покрытий. Магнетрон (М) и ионный источник (ИИ), служащий для подготовки (активации) поверхности подложки под осаждение покрытия, устанавливались на фланцы, расположенные на цилиндрической части камеры. На мишень мог подаваться от источника питания (ИП) отрицательный потенциал от 0 до 1000 В. Подложка устанавливалась в камере напротив распылительного устройства (рис. 1) на расстоянии $50 \div 200$ мм.

Экспериментальная установка с МРС и ее оборудование позволяли получать вакуум до 10^{-6} мм.рт.ст., обеспечить измерения и регулирование задаваемых расходов рабочего (Ar) и реакционного (N_2) газов, как при их независимой подаче в камеру, так и через специальный смеситель, осуществлять как нагрев подложки до 500 °С, так и охлаждать ее и анод с использованием системы охлаждения, электрически развязанной от корпуса вакуумной камеры, подавать на подложку потенциал смещения до 1000 В, обеспечивать электрическую мощность питания МРС до 10 кВт. Травление подложки перед осаждением пленки осуществлялось с использованием ионного источника МАИ-208Т при ионном токе до 150 мА, с энергией ионов до 1,5 КэВ и времени травления до 60 мин.

Для определения и выбора режима формирования TiN покрытия в реакционной МРС были проведены эксперименты по оценке темпа разогрева подложки до максимально допустимых температур в процессе ее очистки и осаждения покрытия (рис. 2) и определению влияния соотношений реакционного газа N₂ к рабочему газу Ar на микротвердость формируемых покрытий из нитрида титана TiN (рис. 3), полученных реактивным распылением титана VT-01.

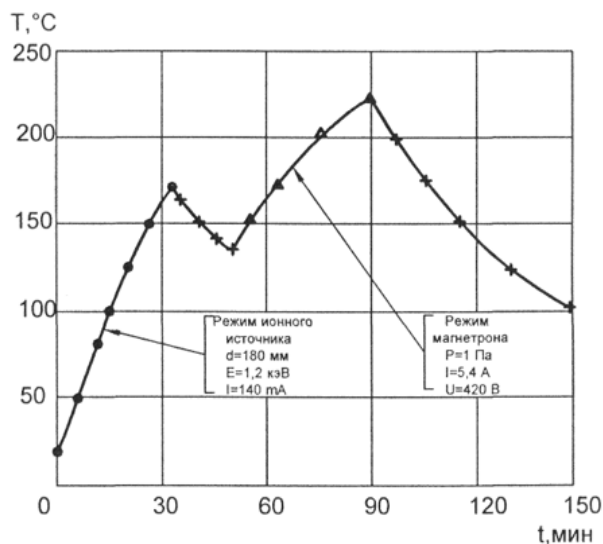


Рис. 2. Циклограмма температуры нагрева образца при осаждении покрытия

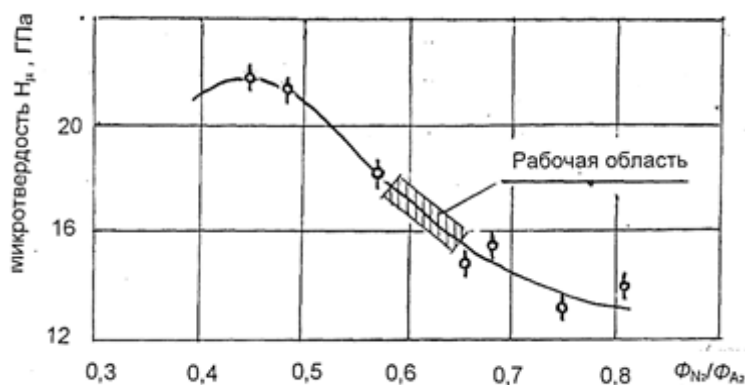


Рис. 3. Зависимость микротвердости покрытия TiN от соотношения газовых потоков Φ_{N_2}/Φ_{Ar}

На температуру подложки (образца) оказывают существенное влияние режимы очистки ее поверхности и нанесения покрытия. Как было определено Техническим Задаaniem, температура разогрева подложки (образца) не должна была превышать 200 ÷ 250 °С для того, чтобы обеспечить, как сохранение структуры предварительно термообработанного материала подложки, так и задаваемой в некоторых случаях неплоскостности поверхности покрываемого образца (детали). На рис. 2 представлена одна из типовых циклограмм нагрева образца, из которой следует, что работа ионного источника ограничивается ~30 мин, после чего проводятся вспомогательные операции по подготовке к работе магнетрона. Работа магнетрона в течении ~40 мин, обеспечивая рост толщины покрытия до 4 мкм, приводила к нагреву образца до 230 °С. Остывание образцов (деталей) в вакууме проводилось с невысокой скоростью около 2 °С/мин, поскольку коэффициенты термического расширения (КТР) материалов покрытия TiN и подложки (сталь 95X18) значительно отличаются.

Было установлено, что массовое соотношение реакционного N_2 и рабочего Ar газов в смеси оказывает существенное влияние на микротвердость получаемого покрытия из TiN (рис. 3). Как видно, наибольшей твердостью обладают покрытия из нитрида титана, полученные на этих материалах при соотношении газов Φ_{N_2}/Φ_{Ar} , равном $0,44 \div 0,46$, что соответствует композиции TiN_x (с $x \approx 1,0$). Однако такие покрытия, как показали оценки и испытания, имеют малую величину предельной относительной деформации и являются довольно хрупкими. Поэтому для дальнейших исследований были выбраны покрытия, полученные при соотношении потоков газов $\Phi_{N_2}/\Phi_{Ar} = 0,55 \div 0,63$, что соответствовало составу покрытий TiN_x (где $x = 1,09 \div 1,14$).

Это было продиктовано, не только соображениями по снижению хрупкости пленки, но и полученными предварительными результатами определения коэффициента трения при работе нитрид-титанового покрытия, его минимальное значение было получено при массовом соотношении подаваемых газов $\Phi_{N_2}/\Phi_{Ar} = 0,55 \div 0,63$. Максимальная толщина покрытия составляла $\sim 3,8\text{--}4,0$ мкм.

Для анализа химического состава TiN покрытий на поверхности и по глубине до границы раздела (покрытие – подложка) был использован метод фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) в комбинации с ионным травлением. Исследования проводились на электронном спектрометре XSAM-800 фирмы «KRATOS» [7, 8]. Было установлено, что элементный состав в пяти различных точках поверхности образца одинаковый, т.е. везде обнаружен кислород, углерод, титан и азот, и определяется выражением $TiN_{0,8}O_{0,5}C_{0,05}$. Были также определены доли составляющих в покрытии на исходной поверхности, в стационаре (на глубине 1215 \AA) и на границе раздела (на глубине $3,8$ мкм). Процентный состав композиции TiN в зависимости от толщины покрытия представлен в табл. 1.

Таблица 1. Состав композиции в зависимости от толщины TiN

Глубина d, \AA	Составляющие композиции		
	TiN	TiN_xO	TiO_2
0	56 %	27,3 %	16,8 %
1215 \AA	89 %	6,0 %	5,2 %
3,8 мкм	78,3 %	13,1 %	7,2 %

Важно также отметить, что при исследовании образцов с TiN покрытием, полученных при различной температуре подложки, было установлено, что стехиометрический коэффициент X в нитриде титана TiN_x не может быть получен больше, чем единица при температуре подложки $300 \text{ }^\circ\text{C}$ и более. Поэтому в дальнейшем для получения более износостойких соединений использовались пленки сверхстехиометрического состава с коэффициентом $x = 1 \div 1,17$, которые были получены при температуре подложки $<250 \text{ }^\circ\text{C}$, и чаще всего при температуре $150 \div 180 \text{ }^\circ\text{C}$. Так как воспроизвести в лабораторных условиях эксплуатационные требования к импульсному контакту трения не представлялось возможным, то оценочные триботехнические испытания сформированного покрытия были проведены при нормальной температуре на машине трения УМТ-1 по схеме «торец–торец», образцы представляли собой кольца диаметром $\varnothing 47$ с толщиной стенки 3 мм [2, 3]. Покрытие из нитрида титана толщиной $5\text{--}6$ мкм было нанесено на торцевую поверхность кольца по разработанной технологии. Материал кольца – сталь 95X18. Была проведена предварительная приработка трущихся поверхностей с покрытием в течение 3 часов при удельном давлении от $0,5$ до 3 МПа и скорости скольжения $0,3$ м/с. Максимальная температура нагрева узла от трения при этом не превышала $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Полученные в данном эксперименте значения коэффициента трения находились в пределах $0,125 \div 0,17$. Наилучшее значение интенсивности объемного износа покрытия было равно $3,3 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3/\text{м}\cdot\text{Н}$,

что свидетельствует о довольно высокой износостойкости покрытия из нитрида титана в данных условиях испытаний.

Для оценки ресурса TiN покрытий были проведены длительные, 15-ти часовые испытания покрытия в модельном торцевом модуле трения для оценки его работоспособности и триботехнических характеристик. Испытания проводились отдельными циклами продолжительностью от 1 до 4 часов при скорости скольжения 0,2 м/с и характеризовались наличием частых запусков и остановок. Результаты испытаний показали, что при удельной нагрузке от 10 до 100 МПа значения коэффициента трения лежали в пределах $0,1 \div 0,18$.

Таким образом, в результате испытаний покрытия из нитрида титана было установлено, что покрытие удовлетворительно работало во всех циклах эксперимента при различных сочетаниях рабочих условий, величина коэффициента трения при этом не превышала значения 0,2, максимальная интенсивность износа покрытия находилась на уровне $(5 \div 6) \cdot 10^{-8}$ см³/Н·м. Из диаграммы записи величины момента трения во время ресурсных, 15-ти часовых испытаний было установлено, что работа узла трения проходила без значительных отклонений момента трения от средней величины и в отсутствии заеданий, на контактных поверхностях отмечались обычный для таких условий небольшой износ, риски и некоторые изменения внешнего вида. На поверхности контртела был отмечен небольшой перенос покрытия, но во время испытания не было остановок, связанных с какими-либо ненормальностями в работе покрытия (вибрации, специфические звуковые явления, задиры и др.).

Поскольку агрегаты ЖРД являются мощным источником вибраций, под воздействием которых происходит интенсивное контактное взаимодействие деталей двигателя [9], то дальнейшие исследования покрытия TiN и предложенных композитных модификаций на его основе были продолжены в направлении определения их фреттингостойкости. В процессе формирования покрытия, согласно рекомендациям [10], в его состав в качестве твердого смазочного материала добавлялся свинец Pb путем реактивного сораспыления из двух магнетронов с мишенями из титана и свинца. Схема нанесения и режимные параметры нанесения покрытий представлены в работе [11].

Исследования фреттингостойкости проводились в режиме возвратно-поступательного движения испытываемых образцов. В качестве модельного контакта была выбрана схема сфера/плоскость, использовались плоские дисковые образцы ВТ6 диаметром 22,5 мм и толщиной 2,5 мм с покрытиями толщиной до 4 мкм, при этом материал образца (подложки) не имел значения, поскольку фреттинг-изнашивание не достигало поверхности подложки. Для сравнения использовалось покрытие из TiN, нанесенное на элемент кольца из стали 95X18 по описанной выше технологии, исследовалась также и фреттингостойкость стали 95X18 без покрытия. В качестве контртела использовалась сфера – шарик диаметром Ø12,6 мм из ШХ-15.

Машина трения, представленная на рис. 4, состоит из электромагнитного вибратора 1, который обеспечивает тестирование пар трения при возвратно-поступательном перемещении одного из образцов. Система нагружения в виде уравнивающего балансом рычага 4, передает в зону контакта 5 нормальную нагрузку, которая регулируется грузами различной массы. Системы регистрации и контроля параметров эксперимента включает: усилитель синусоидального сигнала (MMF VEB METRA) и систему регистрации и контроля параметров: пьезоэлектрический датчик силы 2 PCB Piezotronic 208B ($F_{\max} = \pm 200$ Н) и контроллер сигнала PCB Piezotronic 482A22, лазерный датчик перемещения 3 Keyence LC2420 ($D_{\max} = \pm 250$ мкм, $\Delta = 0,01$ мкм) с контроллером Keyence LC2400A; контроллер NI myRIO для управления режимными параметрами машины трения с разработанным программным обеспечением для определения триботехнических характеристик пар трения [12].

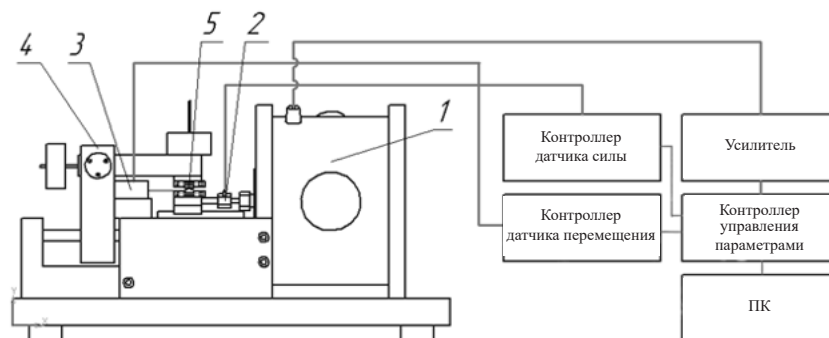


Рис. 4. Машина трения для исследования фреттинг-износа:

1 – электромагнитный вибратор; 2 – пьезоэлектрический датчик силы; 3 – лазерный датчик перемещения; 4 – уравновешенный баланс рычага; 5 – место контакта

Поскольку одним из основных источников вибраций является пульсация тяги ЖРД, то на первом этапе настоящих исследований, согласно рекомендациям [13], были выбраны относительно высокоамплитудные низкочастотные колебания в диапазоне до 50 Гц. Поэтому частота относительного перемещения образцов на этом этапе исследований f была принята равной 20 Гц, в большинстве экспериментов образцы совершали $N_{ц} = 5 \cdot 10^4$ циклов возвратно-поступательного перемещений (что составляет примерно 40 минут непрерывной работы), при значениях перемещений $D = 60$ мкм и нормальной силы в контакте $F_n = 1$ Н, что соответствует давлению в контакте ~ 400 МПа. Все эксперименты происходили в лабораторных условиях: температура окружающей среды – 23 °С, влажность – 30 %.

В ходе экспериментов и по их окончании фиксировались значения коэффициентов трения и характер изменения петель износа для различных значений циклов $N_{ц}$ перемещения. Проводилось также измерение объема износа и визуальная оценка фреттинг-повреждений с помощью оптического конфокального микроскопа Olympus LEXT OLS 5000. Технические возможности этого микроскопа позволили не только определять глубину пятен фреттинг-износа и величины объемного износа, но и оценивать величины объема перенесенного материала с образца на контртело.

Исследованные пары трения: ШХ15 (контртело) с покрытиями TiN и TiN-Pb (образец) с различным содержанием свинца от 2 до 22 % ат. Pb представлены в табл. 2.

Таблица 2. Исследованные пары трения

Номер пары трения	1	2	3	4	5	6
Покрытие	TiN-Pb (Pb 2 % ат.)	TiN-Pb (Pb 6 % ат.)	TiN-Pb (Pb 13 % ат.)	TiN-Pb (Pb 16 % ат.)	TiN-Pb (Pb 22 % ат.)	TiN
Контртело	ШХ 15	ШХ 15	ШХ 15	ШХ 15	ШХ 15	ШХ 15

Диаграммы сравнения на базе в $N_{ц} = 5 \cdot 10^4$ циклов величин объемного износа W_{v-} , мкм³ образцов с покрытиями и объема перенесенного материала контртела W_{v+} , мкм³ на поверхность покрытия, таких же диаграмм сравнения объемного износа контртела из ШХ15 и объема, перенесенного на поверхность контртела материала TiN-Pb и зависимость объемного износа W_{v-} , мкм³ от % ат. содержания Pb в составе композиционного покрытия показаны на рис. 5–7, соответственно.

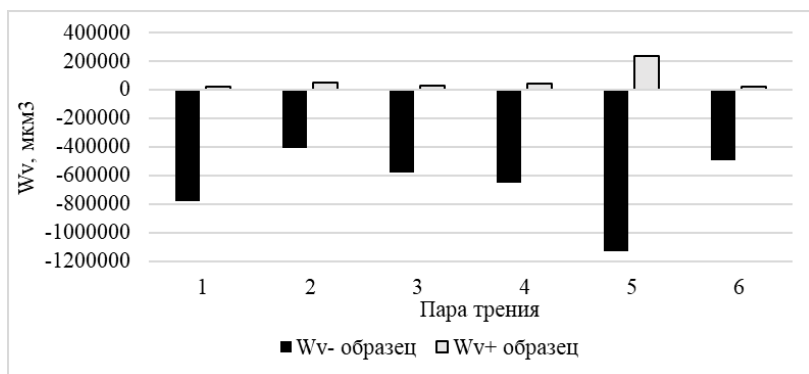


Рис. 5. Диаграмма сравнения износа (переноса) на плоских образцах с покрытиями

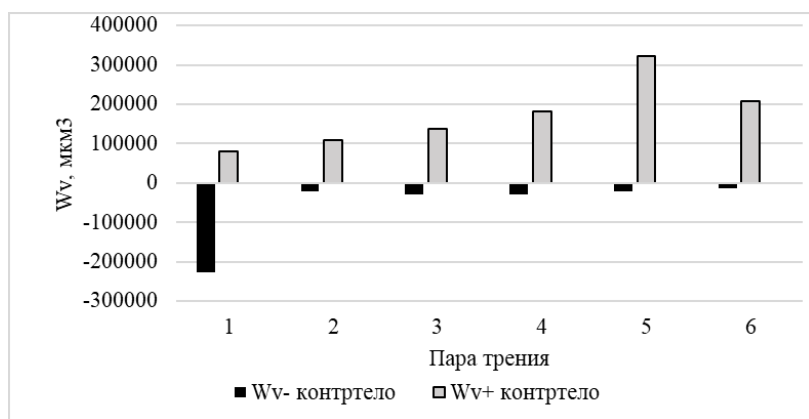


Рис. 6. Диаграмма сравнения износа (переноса) на контроле из ШХ15

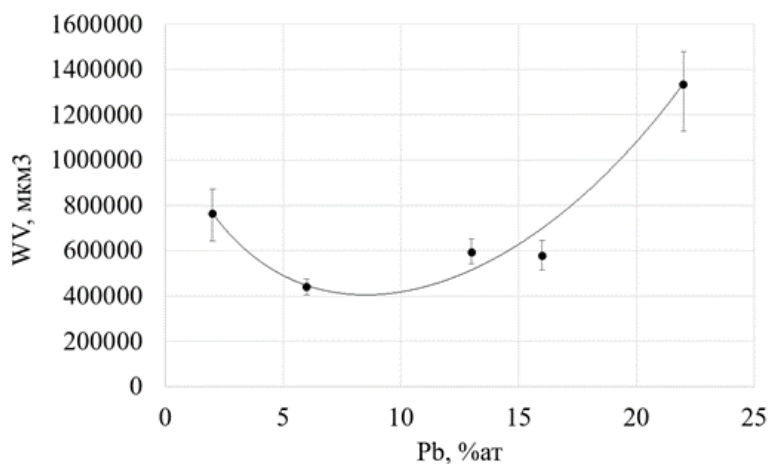


Рис. 7. Зависимость объемного износа W_{v-} , μm^3 от % ат. содержания Pb в покрытии

Анализ этих диаграмм и графика позволил установить, что для композиционного покрытия TiN-Pb найдено оптимальное значение свинца Pb в составе покрытия, лежащее в диапазоне 5–10 % ат. Дальнейшее увеличение свинца в покрытии не только не приводит к улучшению его износостойкости, и, следовательно, фреттингостойкости, в заданных условиях тестирования, но и значительно повышая его износ, снижает ресурс работы покрытия, ограничивая его возможности по многократному использованию, характерному для современных ЖРД. Одновременно, можно отметить наличие в данных условиях тестирования постоянного переноса

композиционного покрытия TiN-Pb на стальную поверхность контртела, что способствует пониженным значениям коэффициента трения по сравнению с парами трения 95X18-ШХ15 и TiN-ШХ15. Сравнение зависимостей коэффициента трения μ для исследуемых пар в зависимости от числа циклов фреттинга, в котором представлены значения только для покрытия с величиной свинца в покрытии равном 6 % ат., показаны на рис. 8.

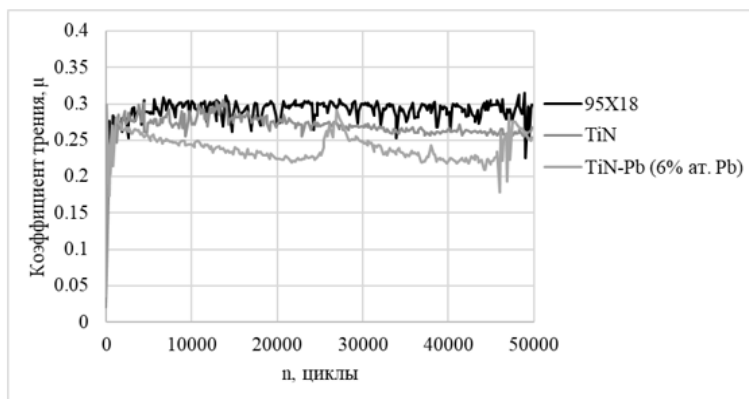


Рис. 8. Зависимости сравнения коэффициентов трения для трех пар трения: а – 95X18-ШХ15; б – TiN-ШХ15; в – TiN-Pb (6 % ат. Pb)-ШХ15

Технические возможности используемой машины трения позволили не только провести измерения коэффициентов трения для различных покрытий, но и определять энергию диссипации E_d , Дж, затрачиваемой на разрушение покрытия за каждый цикл, оценить ресурс каждого покрытия при известной толщине.

Энергию диссипации рассчитывали путем прямого измерения работы, затрачиваемой на разрушение покрытий, при одновременном измерении силы трения ($F_{тр}$, Н) и перемещения (D , мкм). На рис. 9 представлены петли гистерезиса $F_{тр}-D$, полученные при возвратно-поступательном фреттинг-изнашивании за один цикл трения в конце испытания при общем числе циклов $5 \cdot 10^4$.

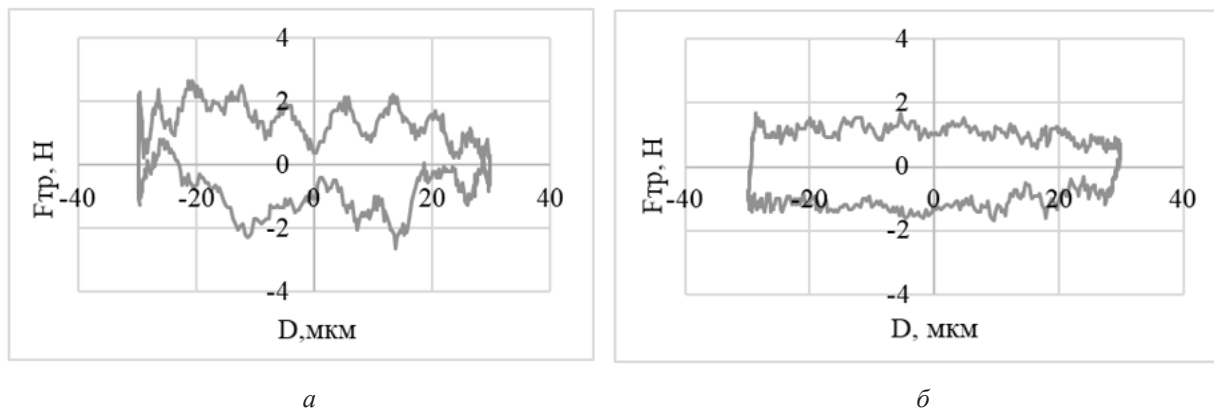


Рис. 9. Петли гистерезиса, полученные при изнашивании образцов с покрытиями: а – TiN; б – TiN-Pb (6 % ат.)

Суммируя эту энергию за каждый цикл ($E_d = \sum E_{di}$) и относя эту сумму к объемному износу, можно рассчитать энергетический коэффициент износа α ($\text{мм}^3/\text{Дж}$): $\alpha = W_v/E_d$. Измеренные и рассчитанные значения объемного износа, энергии диссипации и энергетические коэффициенты объемного износа приведены в табл. 3.

Таблица 3. Трибологические показатели покрытий

Образец	$Wv \cdot 10^{-4}$, мм ³	Ed , Дж	$\alpha \cdot 10^{-4}$, мм ³ /Дж
2	4,06262	6,08	0,66
6	4,89156	6,49	0,75

Анализ полученных значений показывает, что при одних и тех же режимах фреттинга объемный износ TiN-Pb (6 % ат. Pb) покрытий по сравнению с TiN покрытием несколько снижается (в 1,2 раза), снижаются при этом коэффициент трения μ . По петлям гистерезиса сила-смещение $F_{тр}-D$, зарегистрированным при тестировании TiN покрытия, наблюдается заметная волнообразная эволюция, свидетельствующая о наличии заедания («прилипания») в определенных точках контакта (рис. 9, а) аналогично показанной в [14]. Однако на петлях, записанных на TiN-Pb (6 % ат. Pb), не отмечены такие характеристики заедания (рис. 9, б). Поэтому предполагается, что низкий коэффициент трения μ скольжения при оптимальном значении свинца Pb в покрытии обусловлен своего рода граничной смазкой свинца, препятствующей заеданию контактирующих поверхностей.

Продолжение исследований и совершенствование технологии формирования фреттингостойких покрытий планируется продолжить по пути оптимизации режимных параметров технологий формирования ТСП плазменными методами для различных по форме и характеристикам поверхностей при различных нагрузках в целях достижения ресурса и надежности контактных пар трения агрегатов ЖРД.

ВЫВОДЫ

1. Проведены необходимые технологические отработки и материаловедческие исследования по выбору материалов и покрытий, обеспечивающих высокое качество уплотнения в процессе эксплуатации и удовлетворительное состояние уплотнительных торцовых поверхностей.

2. Принимая во внимание тот факт, что агрегаты ЖРД являются мощным источником вибраций, под воздействием которых происходит интенсивное контактное взаимодействие деталей двигателя, были продолжены исследования покрытия TiN и его композитных модификаций с добавлением в него в процессе магнетронного осаждения свинца Pb с различным % содержанием.

3. Из анализа полученных на машине трения результатов в ходе испытаний на фреттинг-изнашивание для композиционного покрытия TiN-Pb было определено оптимальное значение свинца Pb в составе покрытия, лежащее в диапазоне 5–10 % ат., при котором объемный износ был минимальным. На основании результатов трибологических испытаний и анализа петель гистерезиса $F_{тр}-D$, полученных при возвратно-поступательном изнашивании образцов, было установлено, что износ этого оптимального покрытия в 1,2 раза меньше, чем у покрытия TiN в заданных условиях тестирования.

БЛАГОДАРНОСТИ

Продолжение исследований выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90118.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bloch H. P. Improving Machinery Reliability. Chapter 13. Providing Safety and Reliability Through Modern Sealing Technology. Elsevier Science, 1998. Pp. 527-599.
2. Разработка динамического торцового уплотнения / Техническая справка № ТС. 724-2-94. Химки, 1994. 12 с. [*Development of a dynamic mechanical seal*, (in Russian), Technical information no. TS. 724-94. Himki, 1994.]

3. **Громько Б. М., Марцинковский В. А., Чернов А. Е.** Разработка уплотнений роторов ТНА // Труды 8-ой Международной научно-технической конференции «Насосы в современном мире» («Насосы-96»). Сумы: ИПП «Мрия-1» ЛТД, 1996. С. 122–135. [В. М. Gromyko, V. A. Marcinkovskij, A. E. Chernov, "Development of TNA rotor seals", (in Russian), in *Proceedings of the 8th International Scientific and Technical Conference «Pumps – 96»*. Sumy: IPP "Mriya-1" LTD, 1996.]

4. **Анализ** состава и триботехнические характеристики износостойкого покрытия TiN на сплавах и керамике при сухом трении / В. А. Кондратьев [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2004. № 2. С. 49–54. [V. A. Kondratiev, et al., "Analysis of the composition and tribotechnical characteristics of the TiN wear-resistant coating on alloys and ceramics with dry friction", (in Russian), in *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, no. 2, pp. 49-54, 2004.]

5. **Анализ** топографии поверхности и адгезионной прочности TiN – покрытие на стали / В. А. Кондратьев [и др.] // Известия РАН. Секция Физическая. 2004. Т. 68, № 3. С. 454–457. [V. A. Kondratiev, et al., "Study of surface topography and adhesion strength of tin coatings on steel", (in Russian), in *Izvestiya RAN. Sekciya Fizicheskaya*, vol. 68, no. 3, pp. 454-457, 2004.]

6. **Моделирование** и расчет параметров электрического разряда в планарном магнетроне / С. Г. Клопов [и др.] // Известия РАН. Серия Физическая. 2006. Т. 70, № 8. С. 1207–1212. [S. G. Klopov, et al., "Simulation and calculation of parameters of electrical discharge in planar magnetron", (in Russian), in *Izvestiya RAN. Sekciya Fizicheskaya*, vol. 70, no. 8, pp. 1207-1212, 2006.]

7. **Особенности** формирования и исследование состава пленок нитрида титана / Л. А. Васильев [и др.] // Материалы XI-ой Конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью». М., 1993. С. 170–174. [L. A. Vasil'ev, et al., "Features of the formation and study of the composition of titanium nitride films", (in Russian), in *Materials of the XI-th Conference "Interaction of ions with the surface"*, 1993, pp. 170-174.]

8. **Composition** and chemical state of titanium nitride films obtained by different methods / J. S. Colligon, et al. // Surface and Coating Technology. 1994. Vol. 70, No. 1. Pp. 9-17.

9. **Полянский А. М., Полянский В. М.** Особенности фреттинг-износа в ЖРД // Труды НПО «Энергомаш» имени академика В. П. Глушко. 2012. № 29. С. 265-276. [A. M. Poliansky, V. M. Poliansky, "Features of fretting-wear in liquid propellant rocket engines", (in Russian), in *Trudy NPO "Energomash" imeni akademika V. P. Glushko*, no. 29, pp. 265-276, 2012.]

10. **Лесневский Л. Н., Тюрин В. Н., Ушаков А. М.** Способ формирования композитных твердосмазочных покрытий на рабочих поверхностях узлов трения // Патент РФ № 2416675. Оpubл. 20.04.2011. Бюл. № 11. [L. N. Lesnevskij, V. N. Tyurin, A. M. Ushakov, "Procedure for formation of composite solid lubricating coating on working surfaces of friction units", Patent RF 2416675, 2011.]

11. **Tribological** properties of solid lubricating coatings of the TiN-Pb system at various Pb content / L. N. Lesnevskiy, et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1713 (1). Article number 012029.

12. **Система** трибомониторинга для исследования процесса фреттинг-изнашивания в условиях возвратно-поступательного скольжения / М. С. Еремкина [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. 2020. № 1. С. 84–87. [M. S. Eremkina, et al., "Tribomonitoring system for studying the process of fretting wear in conditions of reciprocating sliding", (in Russian), in *Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ya*, no. 1, pp. 84-87, 2020.]

13. **Перфильев А. С., Султанов А. Э., Герасименко С. Ю.** Условия возникновения высокоамплитудных низкочастотных колебаний корпуса ракеты носителя, снижающих надежность агрегатов двигателей установок // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. № 7. С. 391–400. [A. S. Perfil'ev, A. E. Sultanov, S. Yu. Gerasimenko, "Conditions for the occurrence of high-amplitude low-frequency vibrations of the body of the rocket, reducing the reliability of the propulsion units", (in Russian), in *Izvestiya TulGU. Tehnicheskie nauki*, vol. 7, pp. 391-400, 2018.]

14. **Comparison** of fretting wear of uncoated and PVD TiN coated high-speed steel under different testing conditions / P.-Q. Wu et al. // Surface and Coatings Technology. 2000. Vol. 127, Iss. 2-3. Pp. 114-119.

ОБ АВТОРАХ

ЛЕСНЕВСКИЙ Леонид Николаевич, проф. каф. «Технология производства двигателей летательных аппаратов» МАИ. Д-р техн. наук (МАИ, 2002). Исс. в обл. плазменных технологий формирования покрытий.

УШАКОВ Алексей Михайлович, доц. каф. «Технология производства двигателей летательных аппаратов» МАИ. Канд. техн. наук (2003). Исс. в обл. твердых смазочных покрытий, формируемых методами плазменных технологий.

НИКОЛАЕВ Илья Алексеевич, асп. каф. «Технология производства двигателей летательных аппаратов» МАИ. Дипл. маг. по авиац. двиг. (МАИ, 2018). Готовит дис. о повышении фреттингостойкости элементов ДЛА и ЭУ с использованием твердых смазочных покрытий.

LESNEVSKIY, Leonid Nikolaevich, Prof., Dept. of Tech. for the production of aircraft engines MAI. Dr. of Tech. Sci. (MAI, 2002). Research in the field of plasma technologies for the formation of coatings.

USHAKOV, Alexey Mikhailovich, Assoc. Prof., Dept. of Tech. for the production of aircraft engines MAI. Cand. of Tech. Sci. (2003). Research in the field of solid lubricating coatings formed by plasma technology methods.

NIKOLAEV, Ilya Alekseevich, Postgrad. Stud., Dept. of Tech. for the production of aircraft engines MAI. Accident (MAI, 2018). He is preparing a dissertation on increasing the fretting resistance of aircraft engines and power plants elements using solid lubricating coatings.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 26, no. 3 (97), pp. 66-77, 2022. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).