

ТРИБОЛОГИЯ

УДК 621.891

ИССЛЕДОВАНИЯ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ AVINIT

**А.В. Сагалович, начальник отдела, В.В. Сагалович, профессор, д.т.н.,
А.В. Кононыхин, зам. председателя правления, В.В. Попов, председатель
правления, к.т.н., ОАО «ФЭД», А.К. Олейник, начальник лаборатории, к.т.н.,
ГП «Завод имени Малышева»**

Аннотация. Проведены трибологические исследования усовершенствованных конструкций многокомпонентных многослойных покрытий Avinit в среде авиационного топлива ТС-1 с целью выбора материалов покрытий для пар трения прецизионных узлов агрегатостроения. Нанесение покрытий эффективно сказывается на увеличении стойкости пары к задиробработке. Усовершенствованные покрытия имели низкие коэффициенты трения (0,075–0,095) при нагрузках вплоть до 2,0 кН и показали высокую стойкость к износу.

Ключевые слова: вакуум-плазменные многокомпонентные многослойные покрытия, трибология.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИБОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ БАГАТОШАРОВИХ ПОКРИТТІВ AVINIT

**О.В. Сагалович, керівник відділу, В.В. Сагалович, професор, д.т.н.,
О.В. Кононихін, заст. голови правління, к.т.н., В.В. Попов, голова правління,
к.т.н., ВАТ «ФЕД», О.К. Олейнік, голова лабораторії, к.т.н.,
ДП «Завод імені Малишева»**

Анотація. Проведено трибологічні дослідження вдосконалених конструкцій багатоконпонентних багатощарових покриттів Avinit в середовищі авіаційного палива ТС-1 з метою вибору матеріалів покриттів для пар тертя прецизійних вузлів агрегатобудування. Нанесення покриттів ефективно позначається на збільшенні стійкості пари до задиротворення. Вдосконалені покриття мали низькі коефіцієнти тертя (0,075–0,095) за навантажень до 2,0 кН і показали високу стійкість до зносу.

Ключові слова: вакуум-плазмові багатоконпонентні багатощарові покриття, трибологія.

THE INVESTIGATIONS OF TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS
OF MULTICOMPONENT MULTILAYER COATINGS AVINIT

A. Sagalovych, Head of department, V. Sagalovych, Professor, Doctor of Technical Science, A. Kononykhin, Vice-chairman, V. Popov, President, Candidate of Technical Science, JSC «FED», A. Oleynik, Head of laboratory, Candidate of Technical Science, SE «Malyshev Plant»

Abstract. Conducted were tribological studies of improved designs of multi-component multi-layer coatings Avinit in fuel TS-1 media selecting coating materials for precision friction pairs of hydraulic units. Coatings are very effective in increasing stability of the pair to bore scuffing. Improved coatings have low friction coefficients (0,075–0,095) at loads up to 2.0 kN and showed high resistance to wear.

Key words: vacuum-plasma multicomponent multi-layered coatings, tribology.

Введение

В работах [1, 2] нами были проведены исследования по нанесению многокомпонентных многослойных и нанослойных упрочняющих покрытий на основе титана, молибдена и их соединений с азотом методами вакуум-плазменного осаждения с применением эффективных технологических устройств формирования плазменного потока вакуум-дугового источника с резко уменьшенной долей «капельной» составляющей для получения покрытий с высоким качеством поверхности.

Многокомпонентные многослойные покрытия продемонстрировали более высокие показатели износостойкости и трибологические характеристики сравнительно с однослойными покрытиями на основе одного соединения. Наилучшие трибологические свойства (повышение износостойкости и снижение коэффициента трения скольжения) показали разработанные нами многокомпонентные многослойные покрытия на основе системы Ti-Al-N и покрытия на основе системы Mo-N.

В работе [3] описано созданное нами экспериментально-технологическое оборудование – установка Avinit для нанесения многослойных функциональных покрытий.

Существенная отличительная особенность ее заключается в том, что установка позволяет реализовать комплексные методы нанесения функциональных покрытий (плазмохимические CVD, вакуум-плазменные PVD (вакуум-дуговые, магнетронные), процессы ионного насыщения, имплантации и ионной обработки поверхности), объединенные в одном технологическом цикле.

Значительное увеличение спектра источников, обеспечиваемое комплексностью используемых методов, позволяет получать покрытия практически из любых элементов и сплавов, тугоплавких оксидов, карбидов, нитридов, металлокерамических композиций на основе тугоплавких металлов и оксидов, что существенно расширяет возможности создания принципиально новых материалов и покрытий узлов и деталей различного назначения, работающих в экстремальных условиях по температуре, воздействию агрессивных сред, механических нагрузок.

Вторая отличительная особенность созданной установки – возможность перехода к нанодиапазону для реализации процессов контролируемого формирования многокомпонентных нано- и микроструктурных покрытий с заданными характеристиками.

Это стало возможным благодаря проведенной коренной перестройке управления работой всех систем технологического оборудования на базе технологии сквозной синхронизации работы систем ионно-стимулированного осаждения и оборудования диагностики наноразмерных покрытий за счет введения в состав оборудования новых микропроцессорных систем питания, синхронизации и управления процессами синтеза и диагностики и разработки комплекса методов контроля технологических параметров в процессе нанесения покрытий для целенаправленного управления технологическим процессом.

Проведенная реконструкция технологического оборудования на основе компьютеризации управления технологическим процессом и разработанные программные продукты позволили перейти к микроконструированию функциональных покрытий и обеспечить получение нано- и микрослойных многокомпонентных покрытий.

В рамках работы [3] выполнен ряд аппаратных и технологических разработок (применение усовершенствованных сепарирующих устройств, улучшенная диагностика плазменных и газовых потоков, совершенствование ИК измерений (в инфракрасном диапазоне) температурных полей покрываемых изделий, применение в технологической цепочке масс-спектрометрии газовых и плазменных потоков, значительно повышены параметры оборудования для управления технологическим процессом в нанорежимах). При применении традиционного PVD осаждения при одновременной работе однокомпонентных катодов в импульсном или постоянном режиме проведено совершенствование механических и электронных систем защиты от микродуг и модернизация катодных узлов и системы управления, что позволило существенно расширить возможности технологического оборудования и обеспечить нанесение качественных покрытий на прецизионные поверхности.

В свою очередь, эти усовершенствования позволили выйти на качественно новый уровень по дальнейшему модифицированию и совершенствованию конструкций покрытий Avinit, стабильности технологий и повышения контроля их качества при нанесении таких покрытий для разработанных пар трения, предварительно рекомендованных для возможного использования в деталях прецизионных пар трения.

Выполненные экспериментально-технологические исследования на новой экспериментально-технологической базе привели к разработке ряда усовершенствованных конструкций многослойных и нанослойных покрытий Avinit.

В данной работе представлены результаты трибологических исследований усовершенствованных покрытий Avinit на основе систем Ti-Al-N и Mo-N.

Образцы для трибологических исследований

Разработку процессов по нанесению новых функциональных нанослойных композиционных покрытий проводили на модернизированной вакуумной установке [3], созданной для реализации комплексных методов нанесения покрытий (плазмохимические CVD, вакуум-плазменные PVD (вакуум-дуговые, магнетронные), процессы ионного насыщения и ионной обработки поверхности).

Нанесение многокомпонентных многослойных покрытий осуществляли по разработанным нами технологическим схемам формирования многослойных покрытий Avinit, описанным в [4].

Для изучения трибологических характеристик пар трения с нанопокрытиями при испытаниях на трение и износ по схеме «кубик-ролик» были получены следующие образцы. На основные образцы – кубики из стали X12Ф1 с твердостью 56...61HRC с рабочими плоскостями, притертыми алмазной пастой до требуемых геометрических параметров (неплоскостность – $\leq 0,001$ мм, шероховатость – $R_a 0,08$ мкм), нанесены многослойные и микрослойные покрытия (на основе системы Ti-Al-N) Avinit C/P 310-ms1, Avinit C/P 300-t10, Avinit C/P 100-t10, Avinit C/P 320-n1, Avinit C/P 350-t10.

На рабочую поверхность роликов (контртела) из стали X12Ф1 с твердостью 56...61 HRC, притертую пастой KT10/7, нанесены многослойные покрытия (на основе системы Mo-N) Avinit C/P 210-m1 и Avinit C/P 220-t10.

Методика проведения исследований характеристик трения и износа

Трибологические испытания антифрикционных, износных свойств и схватывания образцов с покрытиями проводили в Центральной заводской лаборатории завода им. Малышева на машине трения 2070 СМТ-1 по схеме «кубик-ролик» при ступенчатом нагружении в интервале нагрузок 1-20 МПа по методикам, описанным в [2]. Испытания проведены в среде авиационного топлива ТС-1. Для определения схватывания поверхностных слоев материалов пар трения нагружение проводилось от P_{\min} до критического значения $P_{\text{кр}}$, при котором происходит схватывание.

В процессе трибологических испытаний регистрировали значения силы трения $F_{\text{тр}}$, нормальную нагрузку N , контактное давление P , по величине которых судили о механических потерях в трибосистемах.

Коэффициенты трения определялись как

$$f = F_{\text{тр}} / N.$$

Металлографические исследования образцов с покрытиями структуры и свойств рабочих поверхностей (микрошлифы, твердость покрытия, определение геометрии поверхности после покрытия) проведены с использованием современных методов: металлографического, химического, рентгеноструктурного и микрорентгеноспектрального анализов, измерения микро- и нанотвердости, шероховатости поверхностей трения, подробнее описанных в [4].

Результаты трибологических испытаний образцов с покрытиями

Проведены трибологические испытания (покрытия по покрытию) (по схеме «кубик-ролик») многослойных и нанослойных покрытий Avinit C/P 320-ms1 (микро) и Avinit C/P 510-μ1 (нано) с контртелами с многослойными покрытиями Avinit C/P 220-t10 и Avinit C/P 100-t10 (на основе TiN-Ti) толщи-

ной 10–15 мкм, осажденными из нефилтрованных плазменных потоков, с последующей дошлифовкой.

Результаты в виде таблиц и графиков приведены на рис. 1 и в табл. 1. В таблицах 1, 2 приведены абсолютные нагрузки, кН, а так-

же зависимости коэффициентов трения от нагружения для всех исследованных пар трения. Проведены исследования пар трения (морфология поверхности, шероховатость, величина выработки) после испытаний (геометрические характеристики следов приработки) (табл. 2).

Таблица 1 Зависимость коэффициента трения от нагружения

№ п/п	№ кубика (покрытие) № ролика (покрытие)	1-е нагружение, ступень (нагрузка, кН)				2-е нагружение, ступень (нагрузка, кН)						
		1 0,2	2 0,4	3 0,6	4 0,8	1 0,2	2 0,4	3 0,6	4 0,8	5 1,0	6 1,2	7 1,4
1	Avinit C/P 320-ms1 Avinit A/P 300 (Cr)	задир										
2	Avinit C/P 320-ms1 (Mo)	0,1	0,10 5	0,11	0,11							
3	Avinit C/P 320-n1 Avinit A/P 300 (Cr)	задир										
4	Avinit C/P 320-n1 Avinit A/P 200 (Mo)	0,1	0,1	0,123	задир							
5	Avinit C/P 320-n1 Avinit A/P 200 (Mo)	0,1	0,12	задир								
6	Avinit C/P 320-n1 Avinit A/P 300 (Cr)	задир										
7	Avinit C/P 510-n1 Avinit A/P 200 (Mo)	0,12	0,13 5	0,4	0,114 5	0,12	0,145	0,133	задир			
8	Avinit C/P 510-n1 Avinit C/P 220-t10	0,06	0,07	0,1		0,03	0,07	0,113	0,122	0,128	задир	
9	Avinit C/P 510-n1 (ЭИ415, цемент)	0,04	0,05	0,08		0,12	0,12	0,12	0,128	0,132	0,127	0,121
10	Avinit C/P 320-ms1 (ЭИ415, цемент)	0,03	0,05	0,063		0,05	0,09	0,087	0,09	0,092	0,097	0,106
11	Avinit C/P 320-ms1 Avinit C/P 220-t10	0,03	0,03	0,03		0,012	0,011	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03
		3-е нагружение				0,01	0,009	0,007	0,011	0,014		
		4-е нагружение				0,01	0,01	0,01	0,015	0,018		
12	Avinit C/P 320-ms1 (толстый Avinit C/P 110-t10)	0,08	0,085	0,087		0,07	0,09	0,093	0,105	0,12	0,117	0,113
13	Avinit C/P 320-n1 Avinit C/P 220-t10	0,1	0,115	0,13		0,06	0,13	0,13	0,11	0,102	0,1	0,097
14	Avinit C/P 320-n1 Avinit C/P 220-t10	0,05	0,05	0,073		0,03	0,05	0,067	0,09	задир		
15	Avinit C/P 510-n1 Avinit A/P 300 (Cr)	задир										
16	б/№ (X12Ф1) (толстый Avinit C/P 110-t10)	0,09	0,095	0,11		0,06	0,1	0,13	0,13	0,132	0,127	0,129
17	Avinit C/P 320- ms1=3:1 Avinit C/P 220-t10	0,01	0,013			0,01	0,01	0,01	0,012	0,018	0,02	0,024
18	(TiAlN-AIN) Avinit C/P 220-t10	0,04	0,04			0,043	0,01	0,01	0,013	0,015	0,022	0,021

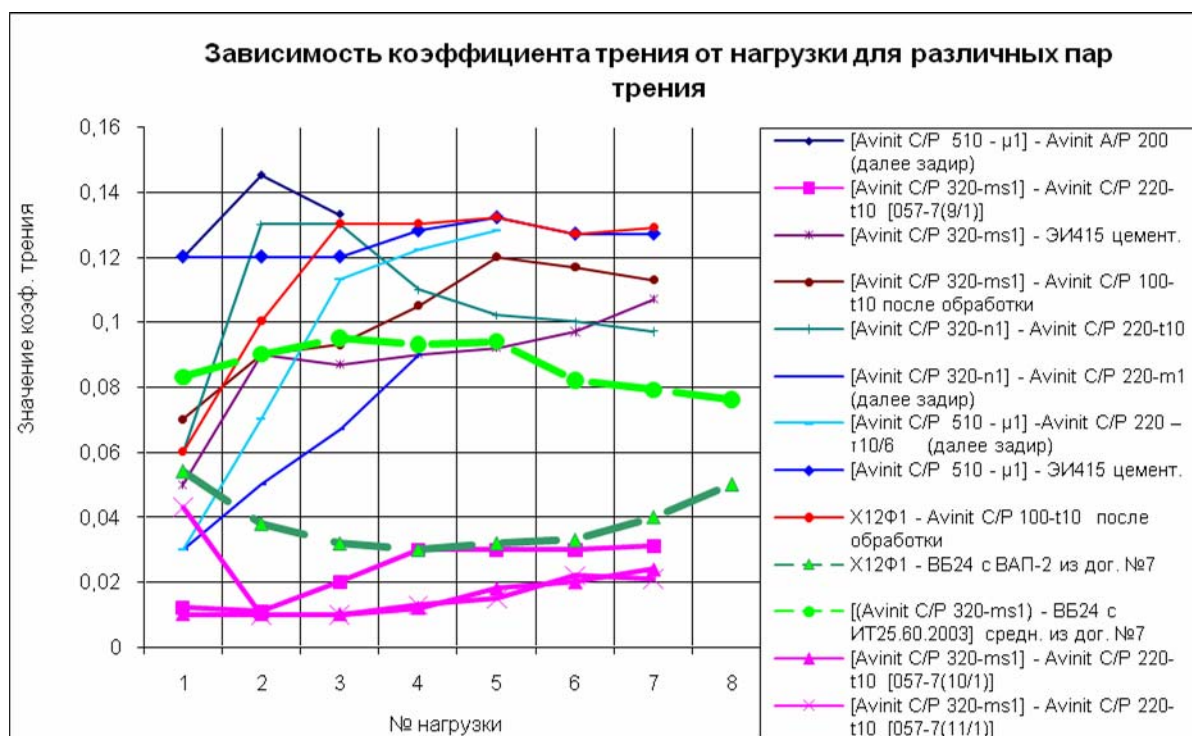


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от нагрузки

Таблица 2 Оценка следов приработки на образцах после трибологических испытаний

Абсолютная нагрузка, кН	Коэф. трения	№ образца	Геометрические характеристики следов приработки		
			Высота наливов, мкм	Ширина, мм	Шероховатость
0,2–0,8 далее задир	0,1–0,11	Основной 056 Avinit C/P 320-ms1,	110 max	2	
		Контртело 6 ₁ Avinit A/P 200	Глубина выработки, мкм до 3		
0,2 задир		Основной 056 Avinit C/P 320-ms1,	до 12 повреждений	2,5	
		Контртело 6 _{7/1} Avinit A/P 300,	Глубина выработки, мкм до 0,7		
0,2–0,4 далее задир	0,1–0,12	Основной 066 Avinit C/P 330-n1	до 0,8;	0,8	
		Контртело 6 ₃ Avinit A/P 200	Глубина выработки внутри следов, мкм до 2,5		
0,2–0,6 далее задир	0,1...0,123	Основной 061 Avinit C/P 330-n1	до 50	2	
		Контртело 6 ₄ Avinit A/P 200	Глубина выработки, мкм до 3,5		
0,2–1,0 далее задир	0,12–0,1145	Основной 071 Avinit C/P 510- $\mu 1$	12	1,7	
		Контртело 6 ₂ Avinit A/P 200	до 2	0,8	R _a 0,12

Продолжение табл. 2

Абсолютная нагрузка, кН	Коэф. трения	№ образца	Геометрические характеристики следов приработки		
			Глубина, мкм	Ширина, мм	Шероховатость
0,2–0,8 далее задир	0,03...0,09	Основной 067 Avinit C/P 510-ms1	Глубина, мкм	Ширина, мм	Шероховатость
			до 5	2,3	
		Контртело 7 _{7/1} Avinit C/P 220-t10	Глубина выработки, мкм		
			до 2,5		
0,2	задир	Основной 072 Avinit C/P 510-n1	Глубина, мкм	Ширина, мм	Шероховатость
		Контртело 6 _{8/1} Avinit A/P 300	Глубина выработки, мкм	Ширина, мм	Шероховатость
0,2	задир	Основной 067 Avinit C/P 320-n1	Глубина, мкм	Ширина, мм	Шероховатость
		Контртело 6 _{9/1} Avinit A/P 300	Глубина выработки, мкм		
0,2	задир	Основной 062 Avinit C/P 320-n1	Глубина, мкм	Ширина, мм	Шероховатость
		Контртело 6 _{10/1} Avinit A/P 300	Глубина выработки, мкм	Ширина, мм	Шероховатость
0,2–1,4 при 0,6	0,06–0,097 0,13	Основной 062 Avinit C/P 320-n1	Глубина, мкм	Ширина, мм	Шероховатость
			8	1,4	
		Контртело 7 _{6/1} Avinit C/P 220-t10	Глубина выработки, мкм		
			до 5		
0,2–1,0 далее задир	0,03–0,128	Основной 072 Avinit C/P 510-μ1	Глубина, мкм	Ширина, мм	Шероховатость
			до 10	2	
		Контртело 7 _{8/1} Avinit C/P 220-t10	Глубина выработки, мкм	Ширина, мм	Шероховатость
0,2–1,4 при 1,0	0,12–0,121 0,132	Основной 072 Avinit C/P 510-μ1	Глубина, мкм	Ширина, мм	Шероховатость
			до 1	0,8	R _a 0,032 (▼12a)
		Контртело 7 ₁ без покрытия	Глубина выработки, мкм		Шероховатость
			Выработки нет		
0,2–1,4 при 1,0	0,06–0,129 0,132	Основной б/№ без покрытия	Глубина, мкм	Ширина, мм	Шероховатость
			до 3	1	R _a 0,08 (▼11a)
		Контртело 7 ₃ Avinit C/P 110-t10	Глубина выработки, мкм		Шероховатость
			Выработки нет		R _a 0,023 (▼12в)
0,2–1,4	0,05–0,106	Основной 057 Avinit C/P 320-ms1	Глубина, мкм	Ширина, мм	Шероховатость
			1,8	0,8	
		Контртело 7 _{4/1} без покрытия	Глубина выработки, мкм		Шероховатость
			Выработки нет		

Окончание табл. 2

Абсолютная нагрузка, кН	Коэф. трения	№ образца	Геометрические характеристики следов приработки		
			Глубина, мкм	Ширина	Шероховатость
0,2–1,4	0,012–0,03	Основной 057 Avinit C/P 320-ms1	до 0,3	0,5	$R_a 0,023$ (▼12в)
		Контртело 7 _{9/1} Avinit C/P 220-t10	Глубина выработки, мкм	Шероховатость	
			Выработки нет	$R_a 0,02$ (▼12в)	
0,2–1,4	0,01–0,024	Основной 057 Avinit C/P 320-ms1	до 0,1	до 0,5	$R_a 0,025$ (▼12в)
		Контртело 7 _{10/1} Avinit C/P 220-t10	Глубина выработки, мкм	Шероховатость	
			Выработки нет	$R_a 0,02$ (▼12в)	
0,2–1,4 при 0,6	0,043–0,021 0,01	Основной 057 Avinit C/P 320-ms1	до 0,1	до 0,5	$R_a 0,025$ (▼12в)
		Контртело 7 _{11/1} Avinit C/P 220-t10	Глубина выработки, мкм	Шероховатость	
			Выработки нет	$R_a 0,01$	
0,2–1,4 при 1,0	0,07–0,113 0,12	Основной 057 Avinit C/P 320-ms1	до 0,3	до 0,6	
		Контртело 7 _{6/№} Avinit C/P 110-t10	Глубина выработки, мкм	Шероховатость	
			Выработки нет	$R_a 0,032$ (▼12а)	

Более подробное исследование образцов, подвергшихся трибологическим испытаниям, выполнено с применением методов по исследованию химической индивидуальности приповерхностной области функциональных покрытий [4].

На рис. 2 приведены результаты электронно-зондового рентгеновского микроанализа (ЭЗРМА) для трех элементов: алюминия, железа и титана на образце: Avinit C/P 320-ms1 при сканировании электронным пучком образца вдоль ширины кольца от внешней поверхности к внутренней.

Результаты представлены в виде зависимостей характеристического рентгеновского излучения атомов данных металлов из места расположения электронного зонда на поверхности образца (диаметр электронного зонда $\varnothing = 30$ нм, характеристическое излучение регистрируется из приповерхностного слоя образца глубиной на уровне 1 мкм).

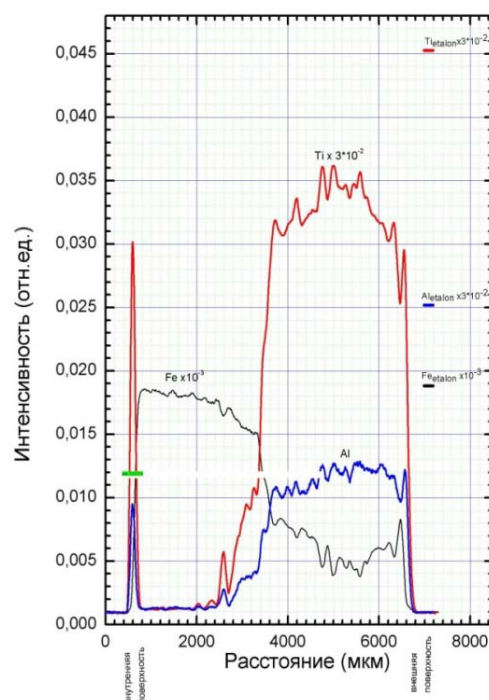


Рис. 2. Распределение элементов в покрытии Avinit C/P 320-ms1

При сканировании от большого диаметра в сторону меньшего кривые начинаются с пиков интенсивностей титана и алюминия, обусловленных характеристическим излучением данных металлов, нанесенных на внешнюю цилиндрическую часть образца. Величины пиков характеристического излучения Al и Ti с интенсивностями такого же порядка наблюдаются и на стыке внутренней торцевой и цилиндрической поверхностей кольца. Распределения Al и Ti по всей анализируемой поверхности качественно близки друг к другу.

С поверхности с незатронутым функциональным покрытием, несмотря на существование покрытия, уже наблюдается характеристическое излучение Fe, интенсивность которого намного меньше, чем от Al и Ti. Вид зависимости сигнала от Fe имеет противоположный характер по сравнению с ними. Показательной является наблюдаемая закономерность распределения металлов по поверхности образца вдоль линии анализа. Всем максимумам на кривых распределения для Al и Ti соответствуют минимумы на кривой распределения Fe и наоборот. В то же время на поверхности, подвергнутой трибологическим испытаниям, интенсивность Fe является основной. При этом наблюдается весьма широкая переходная область (200–360 мкм).

Результаты, приведенные на рис. 2, были дополнительно обработаны и представлены на рис. 3. Если представить, что сумма количества атомов Al и Ti в каждой анализируемой точке равна 100 % от интересующего нас состава, то на данном графике показано распределение отношения количества атомов Ti к количеству атомов Al вдоль линии анализа. Из рассмотрения данной зависимости видно, что количество титана по всей линии анализа намного больше, чем алюминия. Причем в области поверхности, не затронутой испытаниями, коэффициент превышения Ti над Al на уровне 50.

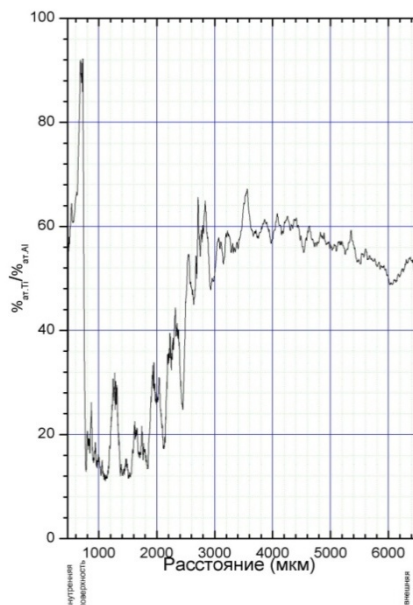


Рис. 3. Распределение элементов (% ат. Ti / % ат. Al) в покрытии Avinit C/P 320-ms1

С помощью метода масс-спектрометрии вторичных ионов (МСВИ) исследовались следующие участки поверхности образца Avinit C/P 320-ms1, подвергнутого трибологическим испытаниям: 1) поверхность с нанесенным покрытием – внешняя часть торцевой поверхности кольца (цвет желтый) – K1; 2) поверхность с покрытием, подвергшимся трибологическим испытаниям, – внутренняя часть торцевой поверхности кольца (цвет белый) – K2.

Сравнение масс-спектров вторичных ионов, выбитых с двух участков поверхности K1 и K2, указывает на наличие в нанесенном покрытии K1 (табл. 3 и рис. 4) большого количества алюминия, гидрида алюминия, титана, гидрида титана, нитрида титана и небольших включений в виде окислов титана.

Таблица 3 Сравнение масс-спектров вторичных ионов, выбитых с двух участков поверхности K1 и K2

Масса (а.е.м.)	Белая область	Желтая область	Интерпретация	Масса (а.е.м.)	Белая область	Желтая область	Интерпретация
23	79	19	Na ⁺	50	15	75	Ti ⁺ , TiH ⁺
24	6	3	Mg ⁺	51	–	2	Ti ⁺ , TiH ⁺
27	345	2760	Al ⁺	52	635	5	Cr ⁺
28	75	515	AlH ⁺	53	6	–	Cr ⁺

Окончание табл. 3

Масса (а.е.м.)	Белая область	Желтая область	Интерпретация	Масса (а.е.м.)	Белая область	Желтая область	Интерпретация
39	505	21	K ⁺	54	8	–	Fe ⁺
40	96	70	Ar ⁺ , Ca ⁺	55	7	–	Mn ⁺
41	5	2	K ⁺	56	118	10	Fe ⁺
44	35	11	AlOH ⁺	62	4	12	TiN ⁺
46	18	119	Ti ⁺	63	6	17	TiO ⁺
47	18	131	Ti ⁺ , TiH ⁺	64	42	102	TiO ⁺
48	176	3000	Ti ⁺ , TiH ⁺	65	26	49	TiO ⁺ , TiOH ⁺
49	20	140	Ti ⁺ , TiH ⁺	66	5	11	TiO ⁺ , TiOH ⁺

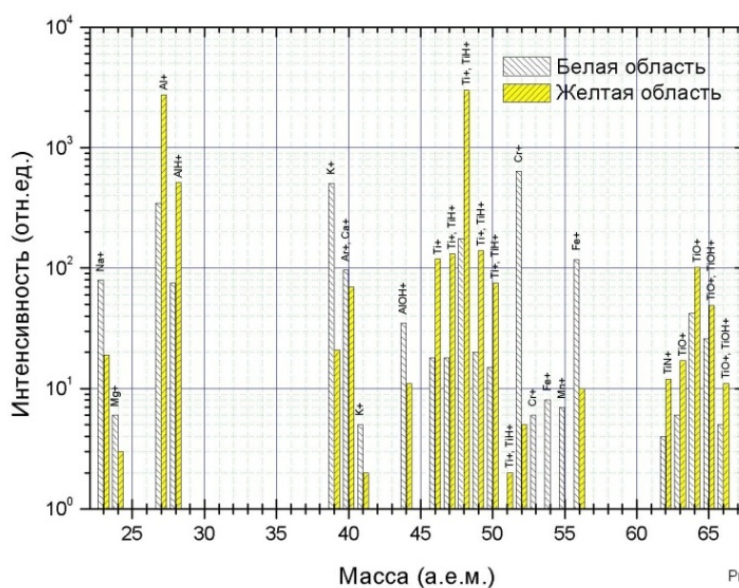


Рис. 3.3.3.7-а

Рис. 4. Сравнение масс-спектров вторичных ионов в покрытии Avinit C/P 320-ms1 до и после трибологических испытаний

На поверхности К2 (табл. 3 и рис. 4) после трибологических испытаний зонд «чувствует» подложку образца, о чем свидетельствуют вторичные ионы хрома и железа. В то же время на этой поверхности покрытие осталось, о чем свидетельствует заметное количество алюминия, титана и их соединений.

Выполненные металлофизические исследования позволяют более полно судить о динамике процесса износа по толщине покрытия и более обоснованно подходить к выбору технологических параметров процесса нанесения нанослойных покрытий с различной толщиной.

Анализ результатов

Для выполнения анализа результатов проведенных трибологических исследований весь полученный массив трибологических данных

для исследованных покрытий в осредненном виде представлен на рис. 5.

Приведены также сводные графики весового износа образцов за 8 часов испытаний на износ, коэффициентов трения при испытаниях на износ и задиростойчивость испытанных пар трения с нанопокртиями Avinit (табл. 4).

Сравнение с полученными нами ранее результатами испытаний «сталь с покрытием – бронза Бр.010С2Н3», а также с бронзами Бр.010С2Н3, ВБ-23, ВБ-24 со сталью без покрытия показывает, что наличие разработанных покрытий существенно увеличивает стойкость трибопар к задирам, повышая значения $P_{кр}$ задиобразования и практически предотвращая задиобразование.

Особенно эффективны покрытия на основе Avinit C/P 220-t10, которые имеют наиболее

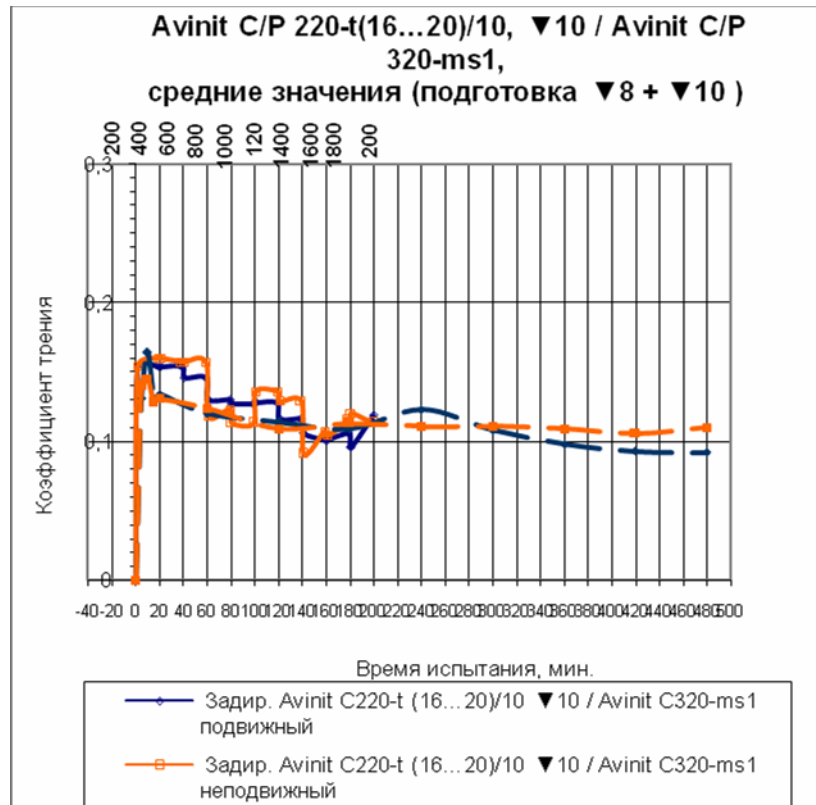


Рис. 5. Коэффициенты трения

Таблица 4 Величины износа образцов в процессе испытаний на износ за 8 часов

Пара трения	Авинит C220-t(16...20)/10, ▼10 / Авинит C320-ms1		
Износ, гр. Время испытаний 480 мин.	Авинит t(16...20)/10	Авинит C320-ms1	суммарный
	неподвижный	подвижный	0,00091
	0,00091	0	
	подвижный	неподвижный	0,00101
	0,00087	0,00014	

высокие значения $P_{кр}$ и наиболее низкие значения коэффициента трения. Об этом свидетельствует не только увеличение нагрузки при испытаниях до предельной, но и ход зависимости коэффициентов трения от нагрузки, который после некоторого подъема с увеличением нагрузки до 0,6–0,8 кН понижался вплоть до максимальной нагрузки 2 кН.

Применение многослойных покрытий (например, Авинит C/P 110 типа TiN-Ti) ведет к увеличению $P_{кр}$ по сравнению с монослойными покрытиями (например, Авинит C/P 100 типа TiN).

Коэффициенты трения для всех видов покрытий имеют достаточно близкие значения, и при нагрузках более 1,0 кН они находятся в пределах от 0,06 до 0,1.

Наименьший коэффициент трения имела пара покрытие Авинит C320-n1 – покрытие Авинит C220-t20/10. Величина коэффициента трения пары не превышала 0,095 во всем диапазоне нагрузок, а при максимальной нагрузке составляла 0,065, что соответствует минимальному значению, полученному в данной работе для пар трения с исследованными покрытиями.

Все покрытия в испытаниях показали высокую стойкость к износу, величина которого не превышала 0,8 мкм. Величина износа на образцах с покрытием колеблется в пределах 0,6–0,8 мм.

Сравнение поверхности бронзы после испытаний с различными типами покрытий показало, что покрытия Авинит C320-n1 обеспечивают наилучшую прирабатываемость ролика

среди испытанных пар трения. С другой стороны, величина износа покрытия этого типа имеет минимальные значения, что, в целом, позволяет рассматривать эту пару как наилучшую по результатам проведенных испытаний.

Пары трения, рабочие поверхности которых имеют микро- и нанослойные покрытия Avinit C/P 320-ms1, Avinit C/P 320-n1, Avinit C/P 350-t20/10, Avinit C/P 220-t20/10, Avinit C/P 220-t16/10, Avinit C/P 220-t16/5, испытанные в условиях граничной смазки, характеризуются:

– высокой устойчивостью к задираобразованию;

– отсутствием вторичной прирабатываемости;
 – довольно высокой стабильностью во времени коэффициента трения при работе на неизменной нагрузке;
 – существенно меньшим различием между «прямой» и «обратной» парами, в сравнении с «базовой» парой бронза ВБ23НЦ / азотированная сталь 30Х3ВА.

Все испытанные пары трения с нанопокрывтиями имеют ярко выраженный период приработки, продолжительностью ≈ 60 мин, после которого величины коэффициентов трения стабилизируются и, при неизменной нагрузке 1600 Н, находятся в пределах 0,09–0,132 (рис. 6).

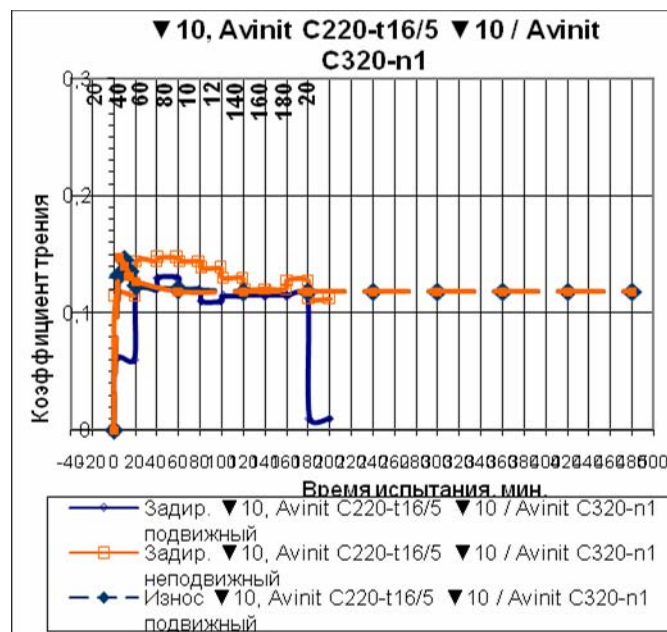


Рис. 6. Коэффициенты трения

Сопrotивление износу пары трения Avinit C/P 210-m1 / Avinit C/P 320-ms1 как собственно образцов, так и пары в целом, максимально и существенно превышает «базовую» пару ВБ23НЦ / азотированная сталь 30Х3ВА (выбранную как один из лучших вариантов, существующих в данное время, для работы пар трения в авиационном топливе).

Пара трения Avinit C/P 220-t(16–20)/10, ▼10 / Avinit C/P 320-ms1 проявила в данной работе наиболее продолжительный период приработки до стабилизации величин коэффициентов трения при постоянной нагрузке. Эта пара проявила полное совпадение величин коэффициентов трения «прямой» и «обратной» пар при длительной работе под не-

изменной нагрузкой. Весовой износ, выявленный после 8 часов износных испытаний, меньше, чем у «базовой» пары: в 2,7 раза для «прямой» пары и в 8,1 раза – для «обратной».

Пара трения Avinit C/P 220-t16/10 / Avinit C/P 320-n1 проявила наилучшие в данной работе трибологические характеристики, а именно:

– коэффициенты трения (0,109–0,129) при длительной работе под неизменной нагрузкой довольно близки к «базовой» паре ВБ23НЦ / азотированная сталь 30Х3ВА и стабильны;

– весовой износ, выявленный после 8 часов износных испытаний в «обратных» парах, меньше, чем у «базовой» пары а) в 12 раз минимум для пары в целом; б) в 2,5 раза минимум для более твердого образца пары; в) в 44 раза минимум для более мягкого образца пары.

Выводы

1. Проведены трибологические испытания усовершенствованных конструкций микроструктурных и наноструктурных покрытий Avinit – многослойные и микрослойные покрытия на основе системы Ti-Al-N – Avinit C/P 310-ms1, Avinit C/P 300-t10, Avinit C/P 100-t10, Avinit C/P 320-n1, Avinit C/P 350-t10 и многослойные покрытия на основе системы Mo-N – Avinit C/P 210-m1 и Avinit C/P 220-t10.

2. Как показали испытания, нанесение покрытий очень эффективно сказывается на увеличении стойкости пары к задирам, приводя к повышению значения $P_{кр}$ задиरोобразования. Об этом свидетельствует не только увеличение нагрузки при испытаниях до предельной, но и ход зависимости коэффициентов трения от нагрузки, который после некоторого подъема с увеличением нагрузки до 0,6–0,8 кН понижался вплоть до максимальной нагрузки 2,0 кН.

Исследованные пары с покрытиями имели низкие коэффициенты трения при нагрузках вплоть до 2,0 кН. Наименьший коэффициент трения имела пара Avinit C/P 320-ms1 / Avinit C/P 220-t16/10. Его величина не превышала 0,095 во всем диапазоне нагрузок, а при максимальной нагрузке составляла 0,075, что соответствует минимальному значению, полученному в данной работе для пар трения с исследованными покрытиями. Все усовершенствованные покрытия в испытаниях показали высокую стойкость к износу, величина которого не превышала 0,8 мкм.

Наилучшее сочетание износостойкости и трибологических свойств показала пара Avinit C/P 320-n1 / Avinit C/P 220-t16/10. Она имела наименьший коэффициент трения и практически нулевой износ за 8 часов испытаний.

3. По результатам трибологических испытаний выбраны оптимальные виды конструкций покрытий, показавших очень хорошие трибологические результаты.

Литература

1. Попов В.В. Разработка многокомпонентных покрытий для повышения износостойкости поверхностей пар трения в прецизионных узлах / В.В. Попов, А.В. Сагалович, С.Ф. Дудник и др. // Физическая инженерия поверхности. – 2007. – Т. 5, № 3–4. – С. 154–165.
2. Любченко А.П. Исследование характеристик трения и износа ионно-плазменных покрытий, полученных на алюминиевом сплаве / А.П. Любченко, А.В. Сагалович, В.В. Сагалович и др. // Физическая инженерия поверхности. – 2004. – Т. 2, № 1–2. – С. 110–114.
3. Сагалович О.В. Установка Avinit для нанесения багатозарових функціональних покриттів / О.В. Сагалович, О.В. Кононихін, В.В. Попов та ін. // Физическая инженерия поверхности. – 2010. – Т. 8. – С. 336–347.
4. Sagalovych A. The Tribological Investigation of Multicomponent Multilayered Ion plasma Coatings Avinit / A. Sagalovych, V. Sagalovych, A. Kononykhin // Tribology industri. – 2011. – Vol. 33, № 1. – P. 79–86.

Рецензент: В.И. Мошенок, профессор, к.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 17 мая 2011 г.