

УДК 621.793

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСКРЕТНЫХ АНТИФРИКЦИОННЫХ КОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ МЕТОДАМИ ВАКУУМНОГО ОСАЖДЕНИЯ И ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКОЙ****Беликов А.И., Петров В.В., Ивченко Е.А., Гункин Е.А.***ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Москва, e-mail: belikov@bmstu.ru, petrov.v.v@mail.ru, ivchenko724@bmstu.ru, gunkinevgeniy@yandex.ru*

Статья посвящена актуальной проблеме снижения трения и износа контактирующих поверхностей пар трения деталей машин и повышения стойкости обрабатывающего инструмента, влияющих на такие важные характеристики машин и оборудования, как ресурс, надежность и энергоэффективность. Это влечет необходимость разработки новых, все более эффективных покрытий, в основе создания которых лежат представления о контактном взаимодействии композита «основа – покрытие» в контакте сопряжений с учетом действия окружающей среды. Представлено исследование влияния размерной обработки тонких пленок на трибологические свойства комбинированного покрытия на основе TiAlN и MoS<sub>2</sub>, формируемого методами вакуумного осаждения и лазерной обработки поверхности. В работе показано изменение антифрикционных свойств и износостойкости от применения топологии единичных участков дискретных покрытий TiAlN, а также эффект от применения тонких пленок MoS<sub>2</sub> в составе дискретного композитного покрытия. Подготовлена серия экспериментальных образцов, на которых проводилось исследование трибологических характеристик покрытий. Результаты эксперимента показали преимущество образцов, у которых пустоты были заполнены твердосмазочным покрытием. На основании проведенных экспериментов сделан вывод, что диаметр дискрета, как чистого, так и с добавлением твердосмазочного покрытия, влияет на срок службы покрытия.

**Ключевые слова:** антифрикционные покрытия, упрочняющие покрытия, дискретные покрытия, композитные покрытия, магнетронное распыление, лазерная обработка, трибологические испытания

**DISCRETE ANTIFRICTION COMPOSITE COATINGS, FORMED BY VACUUM DEPOSITION AND LASER TREATMENT METHODS INVESTIGATION****Belikov A.I., Petrov V.V., Ivchenko E.A., Gunkin E.A.***Federal State Budgetary Education Institution of Higher Education «Bauman Moscow State Technical University» (BMSTU), Moscow, e-mail: belikov@bmstu.ru, petrov.v.v@mail.ru, ivchenko724@bmstu.ru, gunkinevgeniy@yandex.ru*

The article is devoted to the actual problem of reducing friction and wear of the contacting surfaces of friction pairs of machine parts and improving the durability of the processing tool, affecting such important characteristics of machines and equipment as resource, reliability and energy efficiency. This necessitates the development of new, more effective coatings, which are based on the concept of the contact interaction of the composite «basis – coating» in the contact of interfaces with the action of the environment. The effect of dimensional processing of thin films on the tribological properties of a combined coating based on TiAlN and MoS<sub>2</sub>, formed by vacuum deposition and laser surface treatment are presented. The change in the antifriction properties and wear resistance from the application of the topology of single sections of discrete TiAlN coatings, as well as the effect of using thin MoS<sub>2</sub> films in the discrete composite coating are compared. A series of experimental samples were prepared, on which the tribological characteristics of the coatings were studied. The results of the experiment showed the advantage of samples in which the voids were filled with a solid-lubricant coating. On the basis of the conducted experiments it is concluded that the diameter of the discret both pure and with the addition of a hard coating affects the service life of the coating.

**Keywords:** antifrictional coatings, hardened coatings, solid lubricant coatings, discrete coatings, composite coatings, magnetron sputtering, laser processing, tribometrical test results

Одной из актуальных проблем, влияющих на такие важные характеристики машин и оборудования, как ресурс, надежность и энергоэффективность, являются снижение трения и износа контактирующих поверхностей пар трения деталей машин и повышение стойкости обрабатывающего инструмента.

С развитием новых типов защитных покрытий все больше требований предъявляется к высокому уровню прочностных и антифрикционных свойств разрабатываемых перспективных материалов. Это влечет

необходимость разработки новых, все более эффективных покрытий, в основе создания которых лежат представления о контактном взаимодействии композита «основа – покрытие» в контакте сопряжений с учетом действия окружающей среды [1, 2].

Одним из путей повышения износостойкости в условиях контактного взаимодействия является применение регулярированных микрорельефов и дискретных покрытий [3–5].

В современных твердых износостойких материалах для улучшения антифрикционных характеристик в структуру композита

добавляют твердосмазочные слоистые материалы типа диселенидов и дисульфидов тугоплавких металлов [6–8].

В этом направлении перспективным представляется вариант объединения дискретных единичных участков износостойкого покрытия и фрагментов твердосмазочного покрытия (рис. 1). Благодаря эффекту от объединения модифицированного поверхностного слоя и свойств нескольких материалов получается композиция с характеристиками, которые не могут быть достигнуты при применении каждого типа структуры в отдельности [9].

Целью работы явилось проведение сравнительных испытаний и исследование влияния размерной обработки тонких пленок на трибологические свойства комбинированного покрытия на основе TiAlN и MoS<sub>2</sub>.

#### *Формирование слоев композитных покрытий*

Был разработан план экспериментальных исследований, на основании которого были подготовлены образцы с дискретными покрытиями с последующим нанесением на дискретную поверхность твердосмазочного покрытия.

Для отработки технологии в качестве подложек под образцы в исследованиях использовались пластинки из стали 08X18N10T размером 70x70 мм и толщиной 1,5 мм.

Износостойкое покрытие TiAlN формировалось методом магнетронного распыле-

ния прессованной мишени TiAl в атмосфере N<sub>2</sub>, а твердосмазочное покрытие – прессованной мишени MoS<sub>2</sub> в атмосфере рабочего газа Ag на вакуумной технологической установке кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Рабочая камера установки откачивалась до остаточного давления 10<sup>-3</sup> Па, нанесение покрытий осуществлялось при давлении аргона 10<sup>-1</sup> Па. Предварительно, перед нанесением покрытий, поверхность образцов обрабатывалась с помощью автономного источника ионов с холодным катодом типа «Радикал».

#### *Формирование дискретных элементов покрытий*

Дискретное покрытие (рис. 2) характеризуется следующими параметрами:

1. Формой и размерами дискретных элементов покрытия. Для приведенной структуры из круглых элементов – диаметр дискретного элемента,  $d$ . Толщина дискретного элемента –  $h$ .

2. Шагом сетки элементов, или расстоянием между дискретными элементами –  $l$ . В рассматриваемом случае шаг одинаков по обеим координатам.

3. Сплошностью дискретного покрытия, оцениваемой как доля дискретных элементов на поверхности  $\Psi$ , равная отношению площади, занимаемой дискретными элементами  $S_{\text{дис}}$  к общей площади  $S_{\text{общ}}$ , на единице поверхности, т.е.  $\Psi = S_{\text{дис}} / S_{\text{общ}}$ .

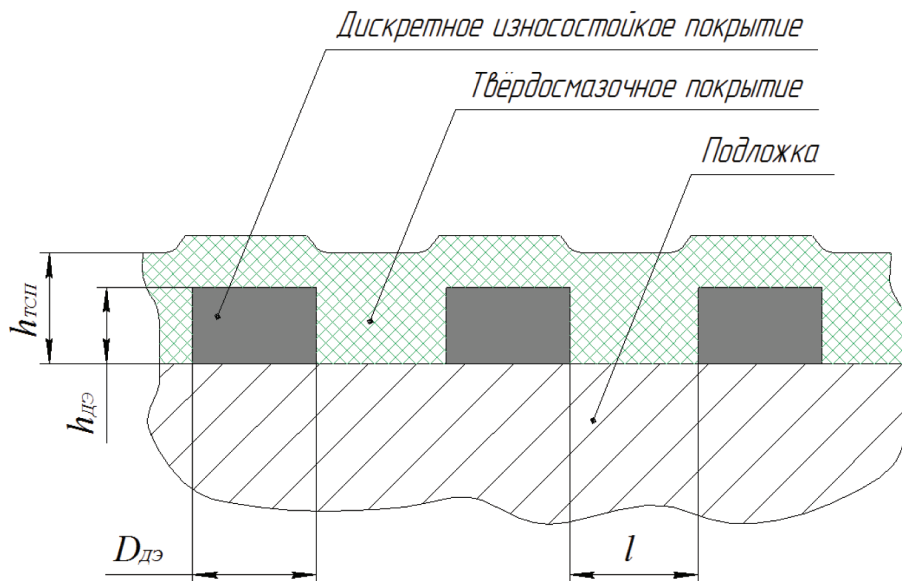


Рис. 1. Структура дискретного антифрикционного композитного покрытия:  
 $D_{\text{дэ}}$  и  $h_{\text{дэ}}$  – размер и толщина дискретного элемента износостойкого покрытия,  
 $l$  – расстояние между дискретными элементами,  $h_{\text{тсп}}$  – толщина твердосмазочного покрытия

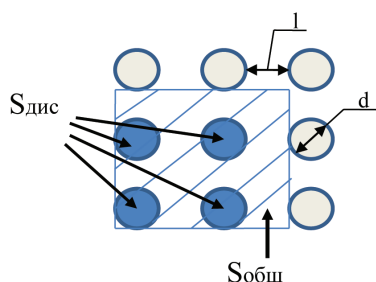


Рис. 2. Схема топологии дискретного покрытия

Геометрические параметры дискретно-износостойкого покрытия TiAlN, такие как сплошность, форма и размер единичных участков, выбирались исходя из работ [5, 6], в которых за основу бралась максимальная износостойкость. Так же учитывалось влияние регулярных микрорельефов на удержание твердосмазочного материала MoS<sub>2</sub> на поверхности трения [10, 11].

Из всего многообразия способов формирования единичных участков дискретного покрытия был выбран метод размерной обработки покрытия путем воздействия лазерного излучения малой мощности. Ранее в работе [11] были отработаны режимы лазерной гравировки поверхности. В качестве оборудования использовалась установка лазерной гравировки «LDesigner F2», оснащенная импульсным иттербиевым волоконным лазером, с режимами:  $\lambda = 1,06$  мкм;  $P = 4$  Вт;  $f = 20$  кГц; кол-во проходов  $N = 2$ ; скорость гравировки  $V = 600$  мм/с. В результате после размерной лазерной обработки покрытия TiAlN было получено дискретное покрытие (рис. 3) с параметрами, приведенными в табл. 1.

*Подготовка серии экспериментальных образцов*

На завершающем этапе подготовки экспериментальных образцов осуществлялось нанесение слоя твердосмазочного покрытия, толщина которого для варианта дискретного композитного покрытия определялась исходя из условия заполнения пустот между элементами дискретного покрытия TiAlN по формуле:  $h_{MoS_2} \geq (1 - \psi) \cdot h_{TiAlN}$ .

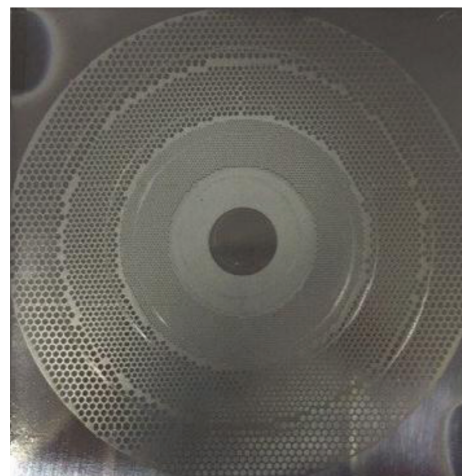


Рис. 3. Дискретное износостойкое покрытие TiAlN,  $h_{TiAlN} = 0,8$  мкм, на подложке из стали 08X18H10T

В соответствии с планом эксперимента были подготовлены образцы с различными вариантами покрытий:

1. Отдельные сплошные покрытия TiAlN и MoS<sub>2</sub> с толщинами, используемыми в композитных покрытиях.
2. Дискретное покрытие TiAlN.
3. Дискретные композитные покрытия TiAlN (дискретное) + MoS<sub>2</sub> с различной топологией дискретных элементов слоя TiAlN.

В табл. 2 приведены характеристики полученных образцов. Для удобства проведения эксперимента считаем, что каждая вариация диаметра есть новый образец.

*Исследование трибологических характеристик покрытий*

Измерения динамического коэффициента трения покрытий осуществлялись на лабораторном трибометре [12]. Контактное взаимодействие контртела (Pin) и образца с покрытием осуществляется по схеме «Pin-On-Disk». В качестве контртела использовался шарик из оксида циркония диаметром 3 мм. Использовались следующие режимы испытаний: прикладываемая нагрузка – 1,5 Н; линейная скорость перемещения относительно образца –  $0,25 \div 0,8$  м/с; частота вращения координатного столика 260 об/мин.

Таблица 1

Параметры дискретного покрытия TiAlN

Диаметр дискретов $\varnothing d$ , мкм	Расстояние между дискретами $l$ , мкм	Сплошность	Толщина покрытия $h_{TiAlN}$ , мкм
200	19,8	0,65	0,8
400	39,6	0,65	0,8
800	79,2	0,65	0,8
1200	99	0,65	0,8

Таблица 2

## Структура подготовленных образцов

№ образца	Износостойкое покрытие TiAlN	Твердосмазочное покрытие MoS <sub>2</sub>
1	Без покрытия	
2	Сплошное $h_{TiAlN} = 0,8$ мкм	
3		Сплошное $h_{MoS_2} = 1$ мкм
4	Дискретное $h_{TiAlN} = 0,8$ мкм, Ø 200	
5	Дискретное $h_{TiAlN} = 0,8$ мкм, Ø 400	
6	Дискретное $h_{TiAlN} = 0,8$ мкм, Ø 800	
7	Дискретное $h_{TiAlN} = 0,8$ мкм, Ø 1000	
8	Дискретное $h_{TiAlN} = 0,8$ мкм, Ø 200	$h_{MoS_2} = 1$ мкм
9	Дискретное $h_{TiAlN} = 0,8$ мкм, Ø 400	$h_{MoS_2} = 1$ мкм
10	Дискретное $h_{TiAlN} = 0,8$ мкм, Ø 800	$h_{MoS_2} = 1$ мкм
11	Дискретное $h_{TiAlN} = 0,8$ мкм, Ø 1000	$h_{MoS_2} = 1$ мкм

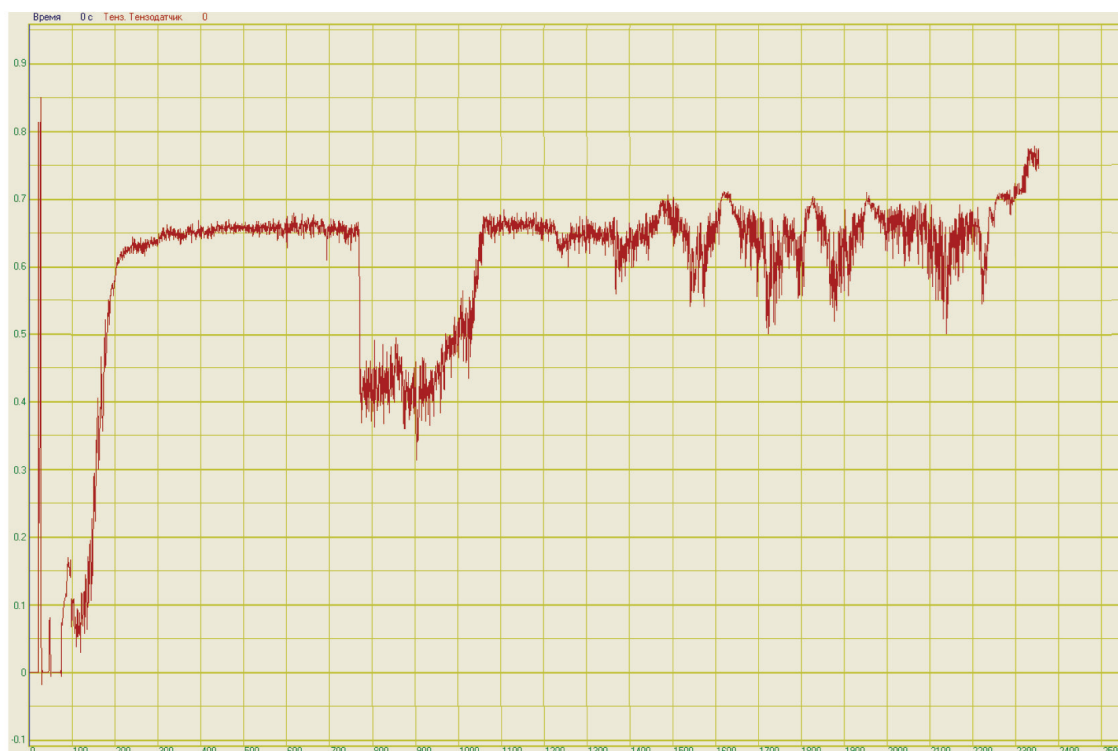


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения от времени для образца со сплошным покрытием TiAlN ( $h_{TiAlN} = 0,8$  мкм) в паре с контртелом – шаром из оксида циркония

Выбирая одинаковую частоту вращения, стало возможным в каждый момент времени  $t$  проводить сравнение полученных образцов. В процессе измерения коэффициент трения фиксировался в виде зависимости от времени  $t$ , с. Полученные значения коэффициента трения усреднялись. Для оценки износостойкости фиксировалось изменение коэффициента

трения. Приближение значения к коэффициенту трения основы являлось результатом полного износа композиции на образце. График изменения коэффициента трения от времени для образца со сплошным покрытием TiAlN представлен на рис. 4.

Результаты трибометрических испытаний представлены в табл. 3 и на рис. 5, 6.

**Выводы**

Результаты эксперимента показали, что для образцов с покрытием TiAlN с диаметром дискретов Ø 200 (рис. 5) сохраняется низкий коэффициент трения. Покрытия на образцах 4–8 разрушились полностью, что свидетельствует о приближении значения коэффициента трения к коэффициенту трения стали. Очевидно, индентор при уменьшении диаметра дискрета проходит по поверхности дискре-

тов и не попадает в пространство между ними (впадины).

Для образцов 8–11, у которых пустоты были заполнены твердосмазочным покрытием MoS<sub>2</sub> (ТСП), характерна обратная картина: при увеличении диаметров дискретов и равенстве объема ТСП, сохраняется низкий коэффициент трения. Причем структура покрытия на образце 11 (Дискретное Ø 1000 TiAlN 0,8 мкм + MoS<sub>2</sub> 1 мкм) в сравнении с образцом 7 (Дискретное Ø 1000 TiAlN 0,8 мкм) в 15 раз повышает срок службы покрытия.

**Таблица 3**

Трибометрические испытания

№ образца	Материал	Линейная скорость, м/с	Кол-во циклов	Время полного износа, мин	Среднее значение $\mu$ трения
1	Подложка, без покрытия	0,4			0,78–0,8
2	TiAlN 0,8 мкм				
3	MoS <sub>2</sub> 1мкм	0,4	3900	15	0,7
4	Дискретное Ø 200 TiAlN 0,8 мкм	0,25	14040	54	
5	Дискретное Ø 400 TiAlN 0,8 мкм	0,44	9750	37,5	
6	Дискретное Ø 800 TiAlN 0,8 мкм	0,60	7540	29	
7	Дискретное Ø 1000 TiAlN 0,8 мкм	0,82	5720	22	
8	Дискретное Ø 200 TiAlN 0,8 мкм + MoS <sub>2</sub> 1мкм	0,25	65780	253	
9	Дискретное Ø 400 TiAlN 0,8 мкм + MoS <sub>2</sub> 1мкм	0,44	101600	391	
10	Дискретное Ø 800 TiAlN 0,8 мкм + MoS <sub>2</sub> 1мкм	0,60	117780	453	
11	Дискретное Ø 1000 TiAlN 0,8 мкм + MoS <sub>2</sub> 1мкм	0,82	211380	813	

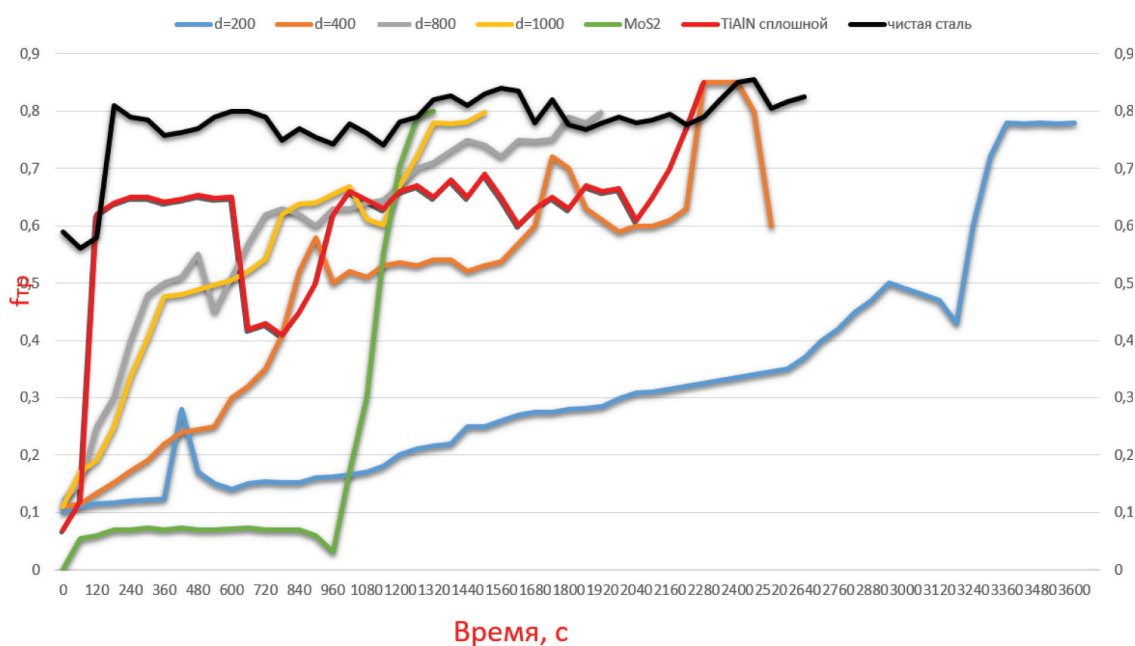


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения от времени для образцов 1–7 (см. табл. 3), в паре с контртелом – шаром из оксида циркония



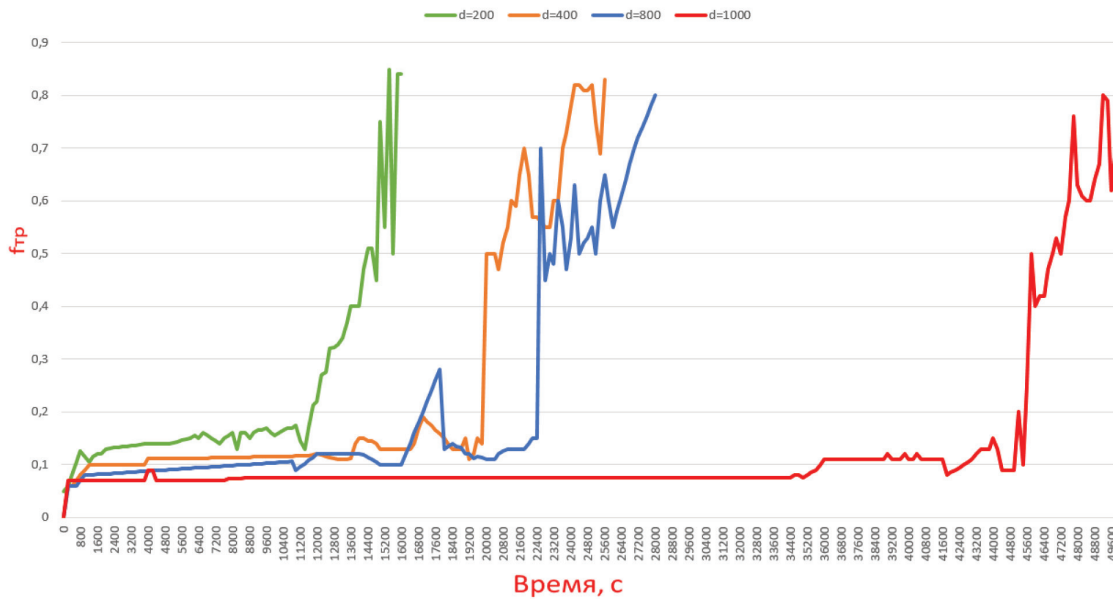


Рис. 6. Зависимость коэффициента трения от времени для образцов 8–11 (см. табл. 3), в паре с контртелом – шаром из оксида циркония

На основании проведённых экспериментов можно сделать вывод, что диаметр дискрета, как чистого, так и с добавлением ТСП, положительно влияет на срок службы покрытия.

### Список литературы

1. Цибизова Т.Ю., Гузева Т.А. Системы автоматического управления технологическими процессами отверждения изделий из полимерных композитов // Клеи. Герметики. Технологии. – 2015. – № 5. – С. 35–40.
2. Гузева Т.А. Методы изучения структуры полимерных композиционных материалов на различных масштабных уровнях // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2014. – № 4. – С. 26–28.
3. Адамов А.П., Адамова А.А. Метод расчета показателя загрязнения осаждаемого нанополеночного покрытия // В книге: НЕДЕЛЯ НАУКИ – 2015 Сборник тезисов докладов XXXVI итоговой научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет» / Под ред. Т.А. Исмаилова. – Махачкала: ДГТУ, 2015. – С. 185–186.
4. Тараскин Н.Ю., Филина Е.К., Малышева Г.В. Особенности методики исследования свойств полимерных композиционных материалов методом динамомеханического анализа // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2014. – № 7. – С. 9–13.
5. Ляшенко Б.А., Сорока Е.Б., Рутковский А.В., Липинская Н.В. Определение параметров дискретной структуры

покрытий с учетом остаточных напряжений // Проблемы прочности. – 2002. – № 4. – С. 119–125.

6. Сорока Е.Б. PVD-покрытия дискретного типа на режущем инструменте // Металлообработка. – 2010. – № 2. – С. 26–29.

7. Беликов А.И., Богданец Д.С., Васильев С.Г., Калинин В.Н., Шарапов М.А. Исследование влияния антифрикционных упрочняющих покрытий на энергоэффективность обработки при сверлении стали // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2017. – Т. 13, № 11 (155). – С. 483–486.

8. Панфилов Ю.В. Наноструктурированные тонкопленочные покрытия с различными упрочняющими эффектами // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2017. – Т. 13, № 11 (155). – С. 523–527.

9. Малышева Г.В., Сайфулин И.Р. Методы оценки содержания полимерной матрицы в композиционном материале // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2014. – № 1. – С. 2–5.

10. Беликов А.И., Калинин В.Н., Попова М.Г. Исследование нанокompозитных твердосмазочных покрытий, формируемых методом магнетронного распыления прессованной мишени Ti-AL-MOS<sub>2</sub> // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2016. – № 9 (141). – С. 35–39.

11. Беликов А.И., Петров В.В. Комбинированные композитные покрытия триботехнического назначения, формируемые методами вакуумного осаждения и лазерной обработки // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2012. – № 4. – С. 9–15.

12. Одинокоев В.В., Панфилов Ю.В. Выбор типа вакуумного нанотехнологического оборудования по критерию заданной производительности // Наноинженерия. – 2013. – № 11 (29). – С. 7–18.