

А.И. Беликов¹, М.А. Братченко¹, А.И. Илларионов¹, С.Д. Карпухин¹
¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва, Россия, belikov@bmstu.ru

ФОРМИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ ДИСКРЕТНОЙ СТРУКТУРЫ

Аннотация

Представлены результаты исследования в вакууме трибологических характеристик упрочняющих покрытий на основе дискретных элементов твердого покрытия TiBN, а также композитных покрытий на основе дискретного TiBN-покрытия и нанесенного поверх него твердосмазочного MoS₂-покрытия. Дискретные покрытия с различными геометрическими параметрами формировали с использованием маскирования подложки методами фотолитографии на плоских подложках из стали 12X18H10T.

Ключевые слова: Инженерия поверхности, дискретные покрытия, трибология, коэффициент трения, вакуум.

Введение

В настоящее время технологии тонких пленок широко используются в инженерии поверхности для повышения износостойкости и снижения трения в различных механизмах. Наноструктурные покрытия обладают высокой твердостью и прочностью, но часто имеют высокий коэффициент трения скольжения. Использование многокомпонентных покрытий с твердосмазочными составляющими, такими как углеродные фазы, имеет ограничения. Для узлов трения, работающих при повышенных температурах в инертных средах или вакууме, преимуществом обладают твердосмазочные покрытия (ТСП) на основе дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ) со слоистой структурой. Наиболее распространённый представитель ДПМ — дисульфид молибдена (MoS₂). Тонкопленочные покрытия MoS₂, формируемые магнетронным распылением, характеризуются высокой износостойкостью и низкой интенсивностью изнашивания, но при толщине в несколько микрон их ресурс ограничен. Повысить ресурс MoS₂-покрытий можно за счёт оптимальной шероховатости подложки, создания регулярного микрорельефа, а также повышения твёрдости подложки.

В качестве решения предложено использование дискретной структуры твёрдого покрытия (рисунок 1а), создающего регулярный микрорельеф и повышающего твёрдость основания [1]. Сочетание дискретного износостойкого слоя и твердосмазочного покрытия обеспечивает синергетический эффект: повышение износостойкости благодаря дискретной структуре и снижение тангенциальных напряжений за счёт применения слоя ТСП. Экспериментальные данные показывают снижение коэффициента трения до 34,5% на режущих инструментах [2] и до 82% в цилиндрах двигателей [3] при использовании дискретных покрытий.

Методы и материалы

Цель работы – исследование влияния параметров дискретной структуры твердого покрытия (размеры дискретов и сплошность покрытия) на износостойкость и коэффициент трения. А также оценка влияния на трибологические характеристики твердосмазочного покрытия. Эксперименты проводились на образцах дискретных покрытий TiBN, полученных методом магнетронного распыления СВС-мишени TiB в среде аргона и азота. На подложках из стали 12Х18Н10Т методом взрывной фотолитографии, с использованием пленочного фоторезиста и фотошаблонов под разные конфигурации дискретной структуры, проводилось маскирование поверхности, затем осаждалось TiBN-покрытие на открытые участки, после чего маска удалялась. Внешний вид образца с дискретным покрытием представлен на рисунке 1б. Первоначально трибометрические испытания проводились на образцах с дискретным TiBN-покрытием. Затем на эти же дискретные покрытия проводилось осаждение слоя твердосмазочного MoS₂-покрытия методом магнетронного распыления в среде аргона стехиометрической мишени MoS₂ чистотой 99,87% и проводились трибометрические испытания для такого варианта композитной структуры. Параметры покрытий, которые использовались в работе приведены в таблице 1.

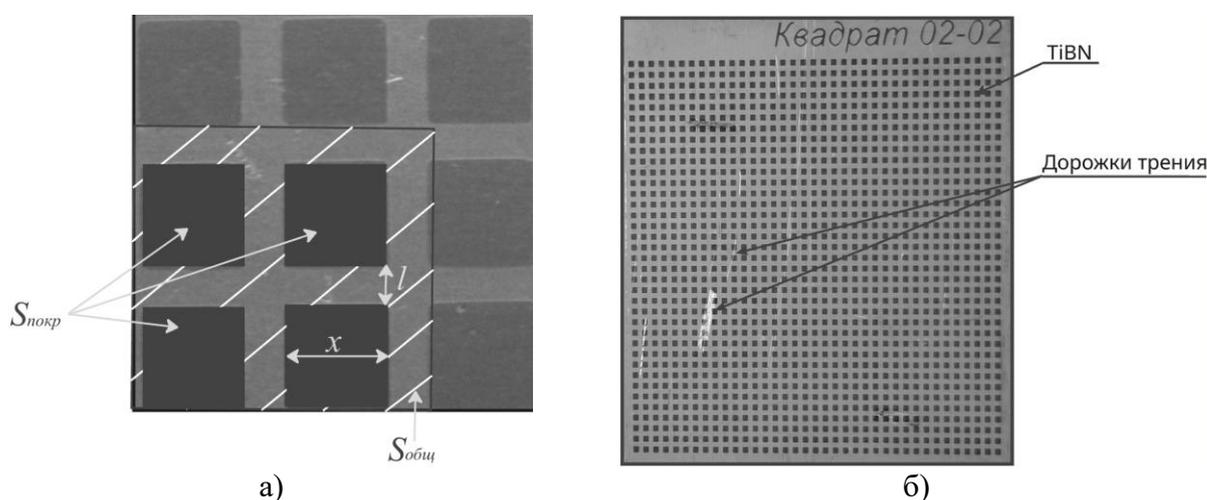


Рисунок 1 – а) Конфигурация дискретного покрытия: x – характерный размер дискрета (диаметр круга или сторона квадрата), l – расстояние между дискретами, S_p – сплошность покрытия ($S_{покр}/S_{общ}$); б) Внешний вид образца с дискретным покрытием и дорожками трения

Таблица 1 – Основные параметры экспериментальных образцов

Маркировка	Толщина TiBN (h), мкм	Размер дискрета (x), мкм	Сплошность, S_p	Толщина MoS ₂ , мкм
Квадрат03-04	0,98	697	0,63	
Круг02-02	1,01	750	0,60	
Круг03-02	2,11	725	0,38	1,1
Квадрат04-01	1,95	700	0,27	
Круг03-04	0,95	695	0,45	
Круг04-02	2,07	690	0,25	
Квадрат01-01	0,88	673	0,70	
Квадрат02-02	1,33	610	0,61	1,1
Круг01-03	1,86	460	0,42	1,1
Круг03-01	2,04	805	0,38	1,1

Трибометрические испытания проводились на высоковакуумном трибометрическом стенде [4] по схеме «сфера-плоскость» с возвратно-

поступательным движением (ASTM G133-05). Для измерения коэффициента трения использовалась тензометрическая система, данные с которой обрабатывались в режиме реального времени с помощью контроллера ZET 058 (ООО «ЗЕТЛАБ»). В качестве контртела использовались шарики диаметром 3 мм из стали ШХ15. Испытания проводились в условиях вакуума при следующих режимах:

- Нагрузка на контртело – 1 Н;
- Частота вращения привода – 30 об/мин;
- Давление в камере – $5 \cdot 10^{-3}$ Па;
- Температура – нормальные условия, $\sim 20^{\circ}\text{C}$

Для анализа механизмов разрушения дискретных покрытий и оценки изменения структуры поверхности после трибологических испытаний проводилось исследование образцов с дорожками трения с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ).

В соответствии с методикой эксперимента первоначально проводились трибометрические испытания исходной подложки, подложек с дискретными покрытиями, затем проводилось нанесение покрытия MoS_2 и последующие испытания.

Результаты и обсуждение

Перед проведением трибометрических измерений поверхность образцов обезжиривалась спиртом. Исследование процесса трения контртела по подложке без покрытия (Рисунок 2) в условиях вакуума свидетельствует о высокой нестабильности процесса трения. На начальном этапе наблюдается стремительный рост значения коэффициента трения от 0,15 до 0,65 в течение 23 с, что может быть объяснено удалением с поверхности сорбированных газов и разрушением оксидных пленок, после чего нестабильность процесса трения сопровождается цепочками пластической деформации, возникающими вследствие сильного адгезионного взаимодействия ювенильных поверхностей, как видно из изображения следов износа на дорожке трения (на вкладке рисунка 2).

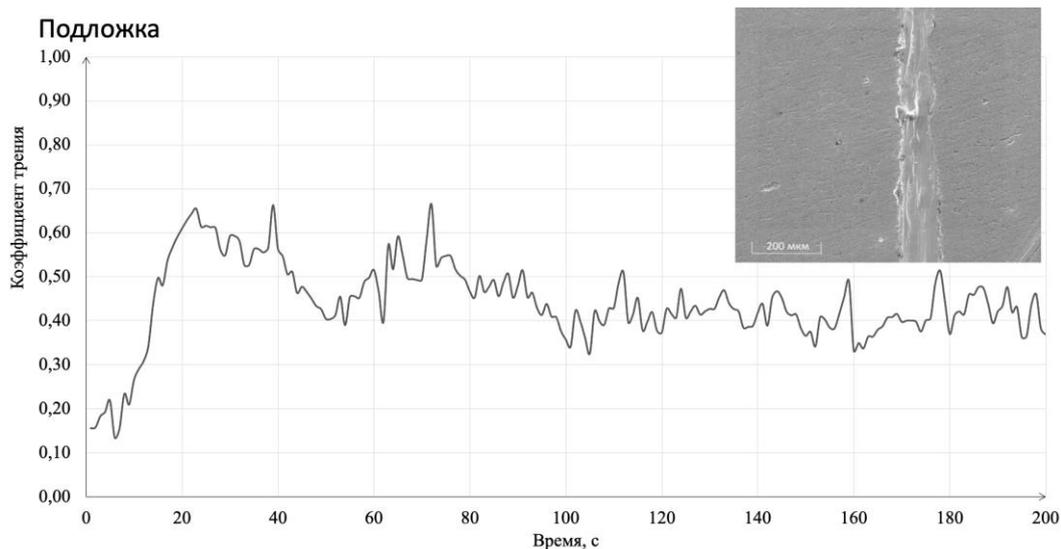


Рисунок 2 – График зависимости коэффициента трения от времени для подложки, на вкладке – РЭМ-изображение следа дорожки трения, оставшейся на поверхности

По характерным особенностям трения для образцов с дискретными покрытиями, на основании полученных графиков зависимости КТ от времени, результаты можно разделить на три группы:

Группа №1 – имеет четко выраженные три области на графике КТ (Рисунок 3):

- Область I – КТ определяется трением контртела по поверхности покрытия и имеет величину равную 0,15-0,2.
- Область II – рост КТ до значений, характерных для трения контртела по поверхности подложки, вследствие переноса в область трения материала подложки и разрушения элементов покрытия.
- Область III – выход на горизонтальное плато с высокой нестабильностью трения при высоких КТ, характерных для трения по подложке.

У образцов этой группы близкие размеры дискретов (около 700 мкм), толщина около 1 мкм, сплошность также схожа (примерно 0,6).

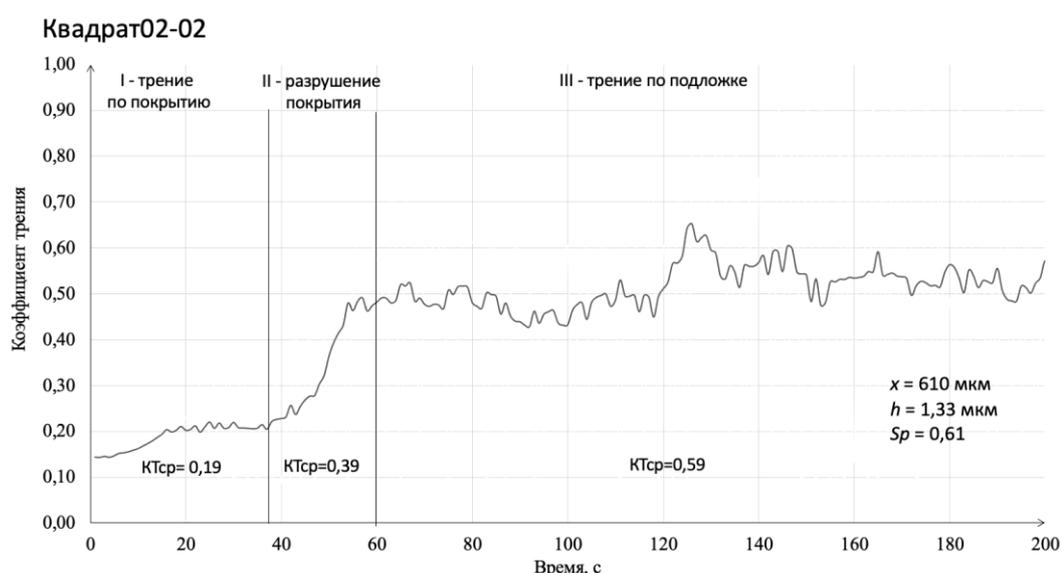


Рисунок 3 – График зависимости КТ от времени для образца «Квадрат02-02» с дискретным покрытием TiBN

Группа №2 – практически отсутствует Область I, и сразу же начинается активное адгезивное взаимодействие контртела с подложкой, происходит перенос материала подложки на поверхность покрытия (Рисунок 4). Время роста КТ до выхода на плато нестабильного и высокого КТ примерно такое же, как и для случая с образцами группы №1. Для образца с меньшим значением Sp ($\approx 0,25$), рисунок 4а, величина и нестабильность КТ существенно выше, чем для образца с более высокой сплошностью покрытия ($\approx 0,42$), рисунок 4б.

Характерно для образцов с большей толщиной покрытия (около 2 мкм), размерами дискретов в диапазоне от 460 до 725 мкм и имеющим сплошность покрытия в диапазоне от 0,25 до 0,42, то есть дискретами покрыта малая доля поверхности.

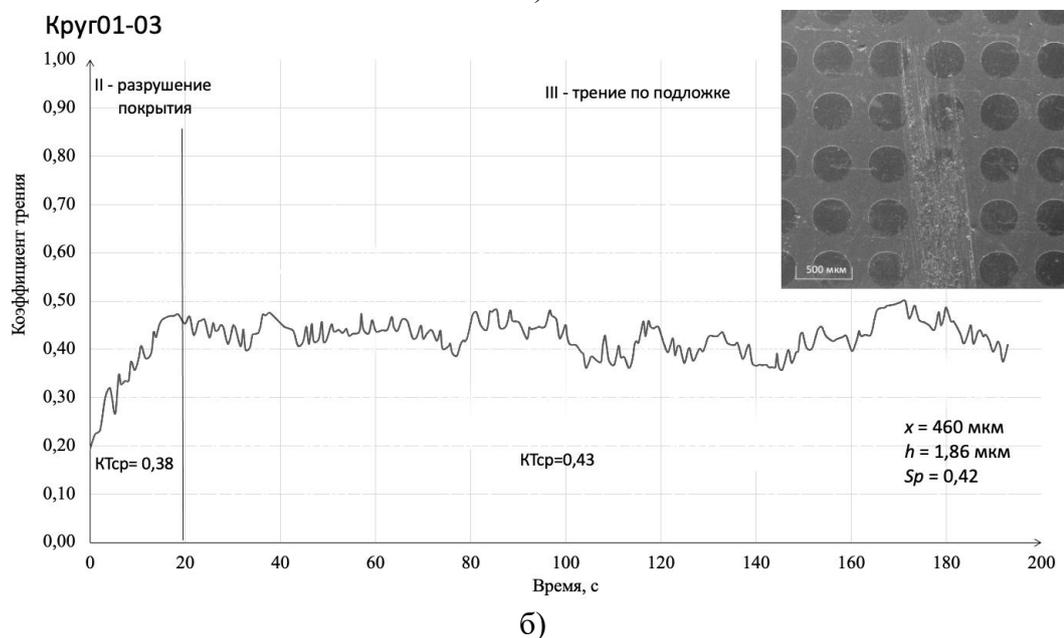
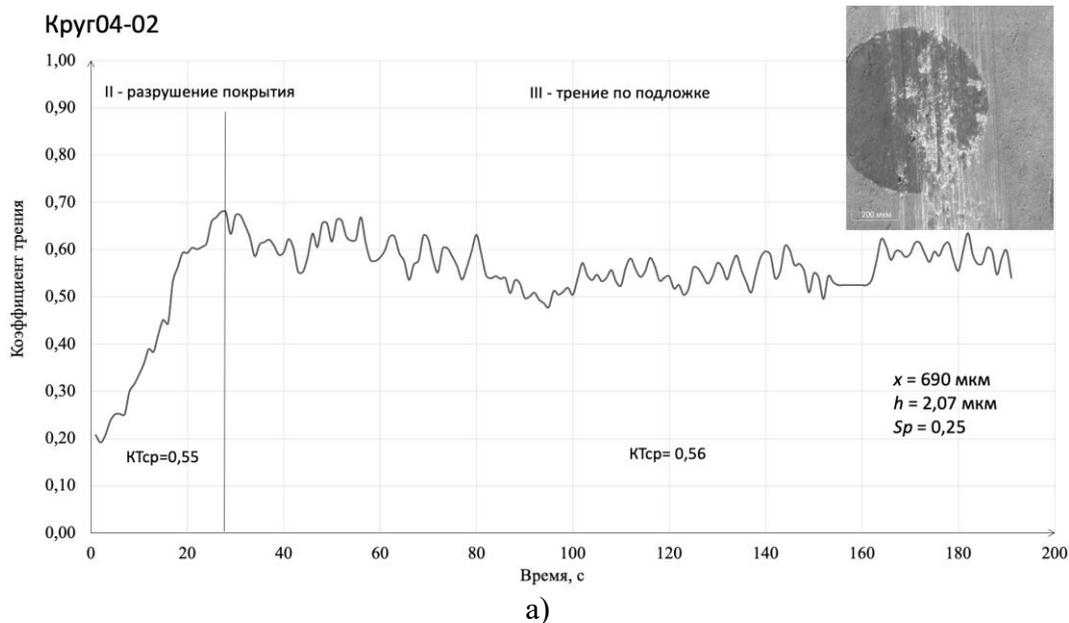
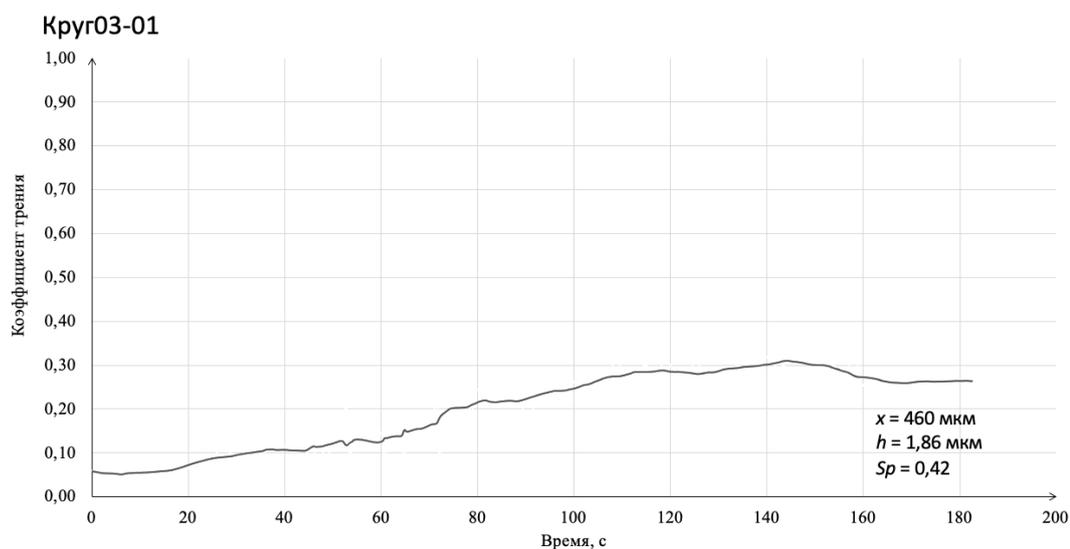
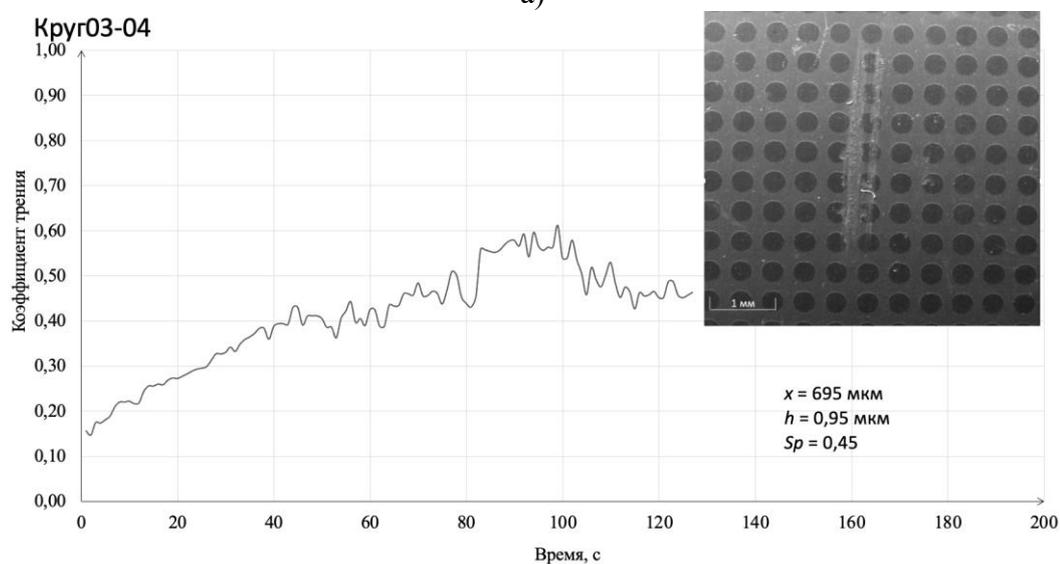


Рисунок 4 – Графики зависимости КТ от времени для образцов с дискретным покрытием TiBN: а) «Круг04-02»; б) «Круг01-03»

Группа №3 – особенности трения на протяжении испытаний проявляются в постепенном росте КТ, при этом, в одном случае, значения КТ ниже и не достигают, а в другом случае – достигают уровня значений КТ характерных для подложки (рисунок 5). Вероятно, во втором случае контакт контртела при скольжении незначительно касался областей покрытия (рисунок 5б) и наблюдалась нестабильность трения, характерная для подложки без покрытия.



а)



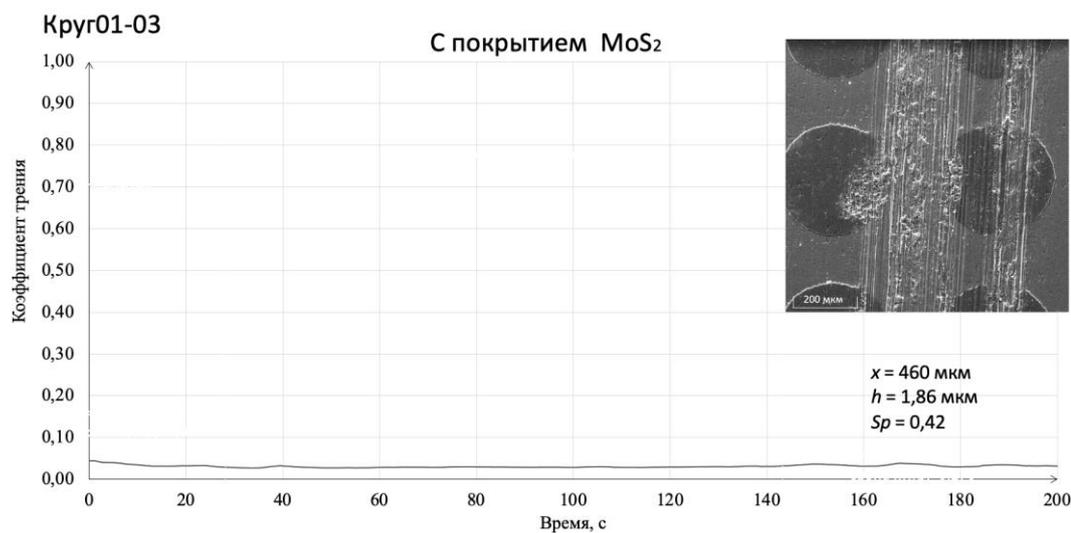
б)

Рисунок 5 – Графики зависимости КТ от времени для образцов с дискретным покрытием TiBN: а) «Круг03-01»; б) «Круг03-04»

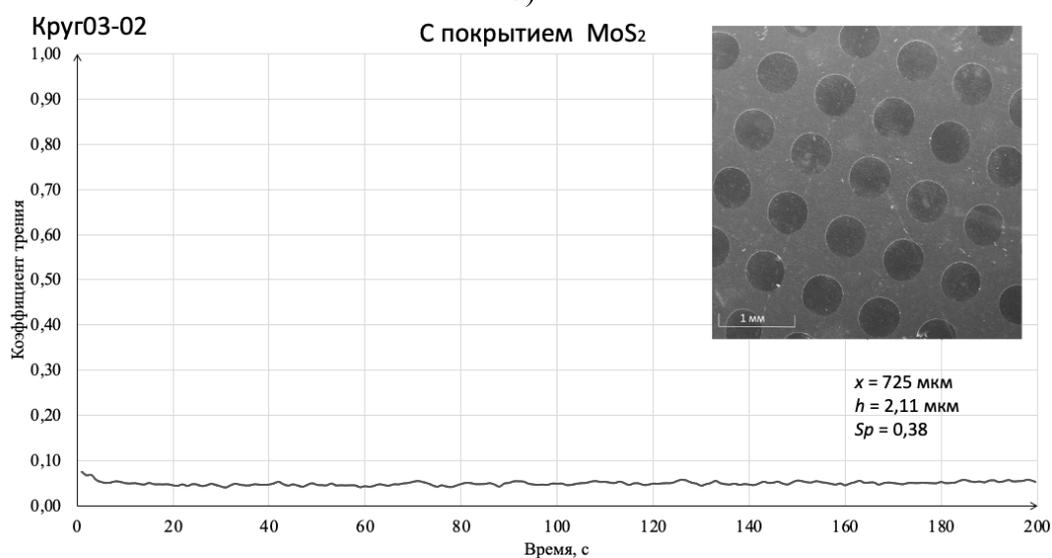
Образцы с покрытием MoS₂

На некоторые образцы в одном процессе было нанесено MoS₂-покрытие. Толщина покрытия TiBN на этих образцах была примерно равной (около 2 мкм).

Наименьший коэффициент трения наблюдался для образца Круг01-03 с большей сплошностью и меньшим размером дискретов (Рисунок 6а). Процесс трения характерен высокой стабильностью и низкими значениями КТ, на уровне 0.03-0.04.



а)



б)

Рисунок 6 – Графики зависимости КТ от времени для образцов с покрытиями дискретным TiBN и MoS₂: а) «Круг01-03»; б) «Круг03-02»

Заключение

Проведенные исследования позволили установить закономерности влияния геометрических параметров дискретных покрытий TiBN на трибологические свойства. Наилучшие стабильность и износостойкость продемонстрировали образцы с толщиной покрытия $\sim 1 \text{ мкм}$, размером дискретов $\sim 700 \text{ мкм}$ и сплошностью $\sim 0,6$. Такие покрытия обеспечивали стойкость к разрушению при высоких нагрузках.

Применение ТСП MoS₂ значительно улучшает антифрикционные свойства в вакууме, снижая коэффициент трения до 0,03–0,07.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беликов А.И., Данилов М.А., Петров В.В., Седых Н.С. Исследование влияния дискретной структуры на трибологические свойства антифрикционных упрочняющих композитных покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2017. - № 12. С. 562-567.
2. Сорока Е.Б. PVD-покрытия дискретного типа на режущем инструменте // Металлообработка. - 2010. - № 2. - С. 20-23.

3. Qipeng H., Xiaoliang S., Yawen X., Kaipeng Z., Chaohua W. Recent progress on surface texturing and solid lubricants in tribology: Designs, properties, and mechanisms // Materials Today Communications. - 2023. Vol. 35, 105854, ISSN 2352-4928.

4. Беликов А.И., Колесник Л.Л., Алиханов О.Э., Бражников В.Е. Разработка вакуумного трибометрического стенда для высокотемпературных испытаний и исследование твердосмазочных MoS₂-покрытий // Наноиндустрия. - 2022. - № 5. С. 300-307.

A.I. Belikov¹, M.A. Bratchenko¹, A.I. Illarionov¹, S.D. Karpukhin¹

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia, belikov@bmstu.ru

FORMATION AND RESEARCH OF DISCRETE STRUCTURE REINFORCING COATINGS

Abstract

Results are presented from a study of the tribological characteristics in vacuum of hardening coatings based on discrete elements of a TiBN hard coating, as well as composite coatings consisting of a discrete TiBN coating with a solid lubricant MoS₂ coating applied on top. Discrete coatings with varying geometric parameters were formed using substrate masking methods via photolithography on flat 12X18H10T steel substrates.

Keywords: Surface engineering, discrete coatings, tribology, friction coefficient, vacuum.