

**«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(Н И У « Б е л Г У »)**

ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

КАФЕДРА МЕТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ

**Влияние содержания Sn на структуру и трибологические свойства
антифрикционных покрытий на основе TiN**

Выпускная квалификационная работа
обучающегося по направлению подготовки 22.03.01 Материаловедение и
технологии материалов
очной формы обучения, группы 07001312
Ноздрачева Андрея Александровича

Научный руководитель:
н.с. лаборатории
биоматериалов НОиИЦ
НСМН, к.т.н.
Газизова М.Ю.

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР.....	5
1.1. ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ НИТРИДА ТИТАНА.....	5
1.2. СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ TiN.....	5
1.3. МЕТОДЫ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ НИТРИДА ТИТАНА	7
1.4. ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ ВОЗДУШНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ	8
1.5. ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ TiN	14
1.6. ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ОЛОВА.....	15
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ.....	20
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.....	27
3.1. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ TiN-Sn.....	27
3.2 ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ TiN-Sn В УСЛОВИЯХ СУХОГО ТРЕНИЯ.....	36
ВЫВОДЫ.....	45
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	46

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия все большую популярность приобретают многослойные и многокомпонентные покрытия, которые позволяют решать сразу несколько функциональных задач таких, как повышение износостойкости в комбинации с коррозионной стойкостью, улучшение механических характеристик, твердости поверхности и др. Комбинация покрытий, содержащих в своем составе сразу твердую износостойкую фазу с включениями мягкой, выступающей в качестве смазки при трении, позволяет создавать новые перспективные с точки зрения трибологии материалы, работающие без внесения дополнительной смазки в области фрикционного контакта. Так, широко известные и используемые покрытия на основе нитридов титана зарекомендовавшие себя, как износостойкие защитные покрытия, позволяющие существенно увеличивать срок службы деталей и готовых изделий могут использоваться для создания таких композиционных покрытий. Добавление в состав покрытий на основе нитрида титана олова, которое будет выступать в качестве смазки при трении, позволит обеспечить низкие значения коэффициента трения и высокую износостойкость. Однако, для достижения указанных свойств необходимо обеспечения равномерного распределения олово содержащей фазы.

Особым классом методов нанесения покрытий на воздухе являются методы газотермического напыления (газопламенное напыление, высокоскоростное газопламенное напыление и др.), позволяющие создавать на поверхности металлов покрытия разнообразного состава посредством порошковых материалов, которые в процессе обработки подвергаются воздействию высоких температур при переносе потоком смеси газов на напыляемую поверхность. Описываемая технология широко применяется для нанесения твердосплавных покрытий и служит хорошей альтернативой химико-термическим и гальваническим методам обработки.

В рамках представляемой работы были проведены исследования по изучению влияния структурно-фазового состояния на трибологические

свойства многокомпонентных покрытий системы TiN-Sn, нанесённых воздушно-плазменным методом при различных режимах.

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1. ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ НИТРИДА ТИТАНА.

В последнее десятилетие покрытия на основе нитрида титана привлекают все большее внимание специалистов, занимающихся синтезом таких соединений, изучением их структуры и свойств, а также применения данных покрытия в различных отраслях современной науки и техники. Сочетание таких свойств, как высокая температура плавления, большая твердость, стойкость к абразивному износу, тугоплавкость, пластичность при высоких температурах и др. обуславливают широкий интерес к покрытиям на основе TiN [1-3].

Одним из наиболее важных свойств нитридов является высокая твердость. Это свойство имеет особое значение при использовании таких соединений в качестве спеченных и литых твердых сплавов, для изготовления износостойких деталей, получения износостойких покрытий и т.д. Прежде всего, твердость – это характеристика, отражающая энергию связи и симметрию структуры. С другой стороны, это и деформационная характеристика, коррелирующая с некоторыми механическими свойствами. Твердость соединений связана с типом и характером распределения в них связей, она растет с ростом энергии решетки, теплоты образования и энергии атомизации, большей величине энергии межатомного взаимодействия соответствует большая твердость. Для соединений с более высоким модулем упругости характерна и большая твердость. Это является следствием пропорциональности между напряжением, необходимым для движения дислокаций, и модулем упругости [3]. Твердость определяется особенностями электронного строения [2]. Она коррелирует с плотностью состояний на уровне Ферми: чем ниже плотность, тем выше твердость.

1.2. СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ TiN

Наиболее изученными среди нитридов металлов 4 группы являются нитрид титана и покрытия на его основе, полученные как с помощью физических, так и с помощью химических методов осаждения. Область

гомогенности TiN очень широка, поэтому свойства TiN сильно зависят от процентного содержания азота в нитридах.

Как правило, при высокой скорости осаждения возможно получение мелкозернистой структуры покрытий и, следовательно, очень искаженной структуры, содержащей в своем составе метастабильные фазы, в то время как при низких скоростях осаждения формируются чешуйчатые структуры [4]. Микротвердость покрытий TiN изменяется в широких пределах от 20 ГПа до 40 ГПа в зависимости от количества азота и структурных особенностей. Повышенная твердость осажденного нитрида титана является следствием высокого уровня внутренних напряжений. Покрытия, полученные физическими методами, обычно находятся в состоянии сжатия, внутреннее напряжения в которых составляют 10^9 - 10^{10} Па. Наличие таких напряжений подтверждается увеличением параметра решетки a . Для стехиометрических покрытий, как правило, данная величина составляет 0,425 нм. Значение параметра решетки для TiN определяется рядом факторов, так отмечается рост величины a с повышением содержания азота, с уменьшением толщины покрытий, а также с ростом внутренних напряжений.

С целью повышения более износостойких состояний наиболее часто используются покрытия стехиометрического и близкого к нему составов. Субстехиометрические, а также двух- и многофазные покрытия, содержащие тетрагональную фазу ϵ -Ti₂N, оказываются неприменимыми, несмотря на высокую твердость, из-за экстремальной хрупкости. Однако существуют данные о том, что двухфазные покрытия, которые содержат Ti и Ti₂N отличаются повышенной износостойкостью в сравнении с однофазными состояниями TiN. Необходимо отметить, что структура и получаемые свойства многофазных покрытий очень сильно зависят от условий их нанесения.

1.3. МЕТОДЫ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ НИТРИДА ТИТАНА

Одним из широко используемых методов для создания покрытий TiN является вакуумно-дуговой метод. Формирование покрытий происходит в среде ионизированного реаквационного газа (азота) посредством распыления мишени, выполненной из титана. Данный способ формирования покрытий уже используется на многочисленных производствах. Как правило для создания покрытий TiN применяется серийно выпускаемые вакуумные установки типа «Булат».

Так в работе [6] авторами был описан вакуумно-дуговой метод нанесения таких покрытий с использованием установки "Булат-3Т" (рис. 1.1). Установка оснащена двумя испарителями, содержащих катоды, напыляемого металла. Было показано, что при помощи указанного метода возможно получение тугоплавких покрытий на основе нитридов и карбидов металлов переходной группы при осаждении на обрабатываемую поверхность потоков металлической плазмы в присутствии реактивного газа.

При вакуумно-дуговых методах генерация металлической плазмы происходит при горении дугового разряда между расходуемым электродом (например, титановым катодом) и нерасходуемым анодом. Оба электрода - водоохлаждаемые. Для обеспечения хорошей адгезии покрытия к подложки необходимо дополнительно обеспечить нагрев последней до температуры примерно $\geq 500\text{K}$ и очистить ее поверхность от органических загрязнений. И то, и другое достигается за счет бомбардировки ионами инертных газов, энергия которых зависит от приложенного к подложки напряжения смещения. На этапе нагрева-очистки подложки напряжение смещение, подаваемое на подложку, равняется примерно 1 кВ, в то время как при осаждении покрытий оно изменяется в пределах от 50 до 200В [7-9].

Особенность вакуумно-дуговой генерации металлической плазмы состоит в том, что наряду с ионами и электронами при распылении катода с его поверхности летит интенсивный поток микрокапель, так называемая

капельная фракция, размеры которых достигают порой десятки единиц микрометров. Оседая на поверхности образцов, капельная фракция существенно ухудшает свойства покрытий, в том числе и трибологические характеристики (например, повышают коэффициент трения). Как правило, для снижения количества и размеров капельной фракции установки дополнительно оснащают специальными устройствами. Однако, полностью исключить указанное явление до сих пор не удается.

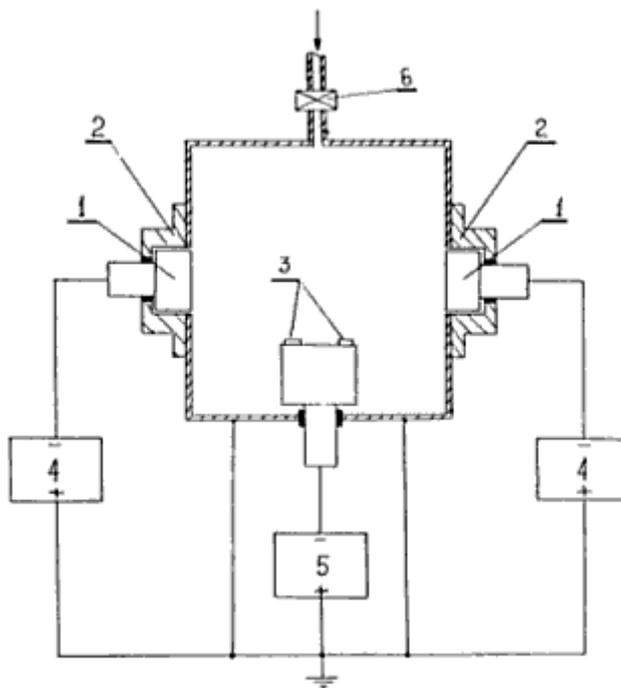


Рисунок 1.1. – Принципиальная схема установки типа «Булат» для осаждения покрытий: 1 – расходимый электрод (катод), 2 – не расходимый электрод (анод), 3 – подложка (образцы), 4 – источник питания дуги испарителей, 5 – источник смещения потенциала подложки, 6 – клапан-накататель подачи реактивного газа (азота) [6]

1.4. ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ ВОЗДУШНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

Методы воздушно-плазменного напыления эффективный способ изменения физико-механических свойств, а также структуры основной поверхности (подложки). Поэтому он часто используется с декоративными целями, и для увеличения коррозионной стойкости готовых изделий.

При воздушно-плазменном способе нанесения покрытий напыляемый материал разогревается до жидкого состояния и наносится на обрабатываемую поверхность при помощи потока плазмы. В качестве материала для напыления могут использоваться прутки, проволока или смесь порошков. Порошковый способ наиболее распространенный и дает больше возможностей для варьирования состава, получаемых покрытий. Пример процесса нанесения таких покрытий представлен на рисунке 1.2.

Уникальность методов воздушно-плазменного напыления заключается в высокой температуре плазменной струи и высокой ее скорости (до 500 м/с), позволяющей без существенного нагрева обрабатываемой поверхности (≤ 200 °С) формировать покрытия на воздухе.

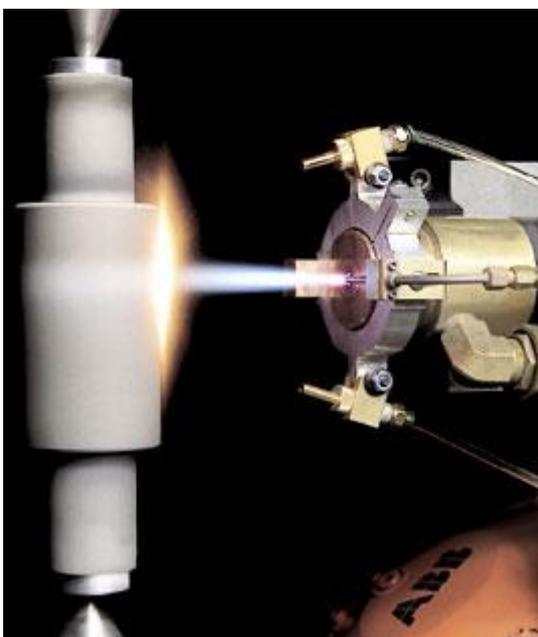


Рисунок 1.2. – Внешний вид процесса газотермического напыления

В качестве рабочих газов используют чистые или смесь газов, например таких, как азот, гелий, аргон, водород, а также смеси воздуха с метаном, пропаном или бутаном. Также за счет регулирования режимов нанесения можно получать покрытия из металлов и неметаллов (пластмасса, кирпич, бетон, графит и др.). Микроплазменный способ напыления позволяет наносить покрытия на небольшие поверхности, который экономит потери напыляемого материала (ширина напыления не более 1-3 мм).

Иногда, с целью повышения определенных свойств получаемых покрытий используется метод воздушно-плазменного напыления в защитной среде (азот, смесь азота с аргоном и водородом) и с применением специальных сопел, закрывающих область между распылителем и обрабатываемой поверхностью. Данный метод позволяет повысить адгезию покрытий и снизить количество дефектов. Перспективным направлением в технологии воздушно-плазменного напыления является сверхзвуковое газотермическое напыление.

Процесс газотермического напыления включает три основных этапа:

1. подготовка поверхности (например, пескоструйная обработка);
2. напыление и дополнительная обработка покрытия для улучшения свойств;
3. механическая обработка для достижения чистовых размеров (шлифовка или полировка).

С учетом того, что толщина покрытий порой достигает существенных размеров, то габаритные размеры обрабатываемых деталей и изделий должны быть скорректированы, учтены толщины напыления и припуски на последующую механическую обработку, при необходимости. Обрабатываемая поверхность перед напылением должны быть тщательно очищена от различного класса загрязнений и обезжирена. Детали для восстановления, имеющие следы масел и смазки, следует нагреть в печи при температуре 200-340°C в течение 2-3 часов для выпаривания масла. После этого производится активация поверхности по средствам придания ей определенной шероховатости для последующего обеспечения достаточного уровня адгезии. Активацию производят при помощи пескоструйной обработки: обдува детали потоком сжатым воздухом с абразивом. Абразив выбирают зернистостью от 80 до 150 мкм согласно ГОСТ3647, или применяют чугунную/стальную дробь ДЧК, ДСК №01 - 05 по ГОСТ 11964. Необходимо отметить, что металлическую дробь не применяют для обработки

жаростойких и коррозионностойких сталей, а также цветных металлов и их сплавов, в связи с тем, что это может вызвать их окисление. Поверхности, не подлежащие абразивной обработке, защищают специальными экранами. Зона обдува на 5 ± 2 мм должна быть больше, чем номинальный размер напыленной поверхности. Детали небольшого размера обычно закрепляют в специальных оснастках с целью предотвращения их коробления во время обработки. Расстояние от сопла до детали при абразиво-струйной обработке варьируется в пределах 80-200 мм, меньшие значения принимают для более твердых материалов, большие - для мягких. После такой обработки детали обеспыливают путем обдува сжатым воздухом. Промежуток времени между очисткой и напылением должен составлять не более 4 часов, а при модификации поверхности алюминия и других, быстро окисляющихся материалов - не более одного часа.

Для воздушно-плазменного напыления следует применять порошки одной фракции со сферической формой частиц (рис.1.3). Оптимальный размер частиц для напыляемых металлов составляет около 100 мкм, а для керамических материалов — 50 -70 мкм. В случае, если порошки хранились в негерметичной таре, их нужно прокалить при температуре 120-130°C в течение 1,5-2 часов в сушильном шкафу.



Рисунок 1.3. Порошки для напыления

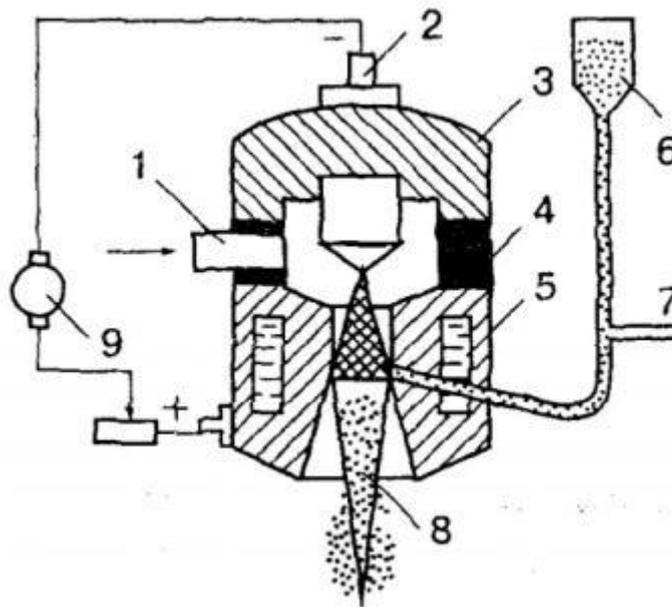


Рисунок 1.4. - Принципиальная схема плазменного порошкового напыления: 1 - подвод плазмообразующего газа, 2 - катод плазмотрона, 3 - корпус катода, 4 - изолятор, 5 - корпус анода, 6 - порошковый питатель, 7 - подвод газа-носителя порошка, 8 - плазменная дуга, 9 - источник питания

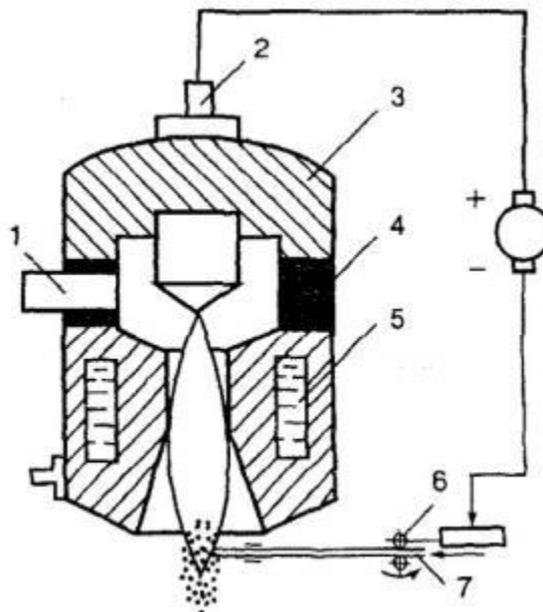


Рисунок 1.5. - Принципиальная схема плазменного напыления с применением проволоки: 1 - подвод плазмообразующего газа, 2 - катод плазмотрона, 3 - корпус катода, 4 - изолятор, 5 - корпус анода, 6 - механизм подачи проволоки, 7 - сплошная или порошковая проволока, 8 - плазменная дуга, 9 - источник питания

При использовании данного метода нанесения покрытий не исключены и такие недостатки, как дефекты структуры (рис. 1.6): поры, не расплавившиеся или окисленные частицы, трещины. Как правило, для улучшения качества напыляемых покрытий применяют следующие приемы:

1. обкатка роликами под электрическим током;
2. напыление с одновременной обработкой металлическими щетками;
3. оплавление покрытий из самофлюсующихся сплавов.

Оплавление производят с помощью печей, ТВЧ, нагретых расплавов солей и металлов, плазменным, лазерным или газопламенным способом.



Рисунок 1.6. – Схематическое представление структуры покрытия, формирующейся в процессе обработки

Далее производят окончательный контроль, в случае, если на поверхности детали с напылением есть трещины, отслоения, риски, чернота, не выдержаны чистовые размеры, то деталь возвращают на исправление дефекта, при этом область обработки должна быть увеличена на 10-15 мм по периметру.

Уровень шероховатости поверхности покрытий, нанесенных воздушно-плазменным методом, как правило, очень высок и составляет $Rz = 10-60$ мкм, в зависимости от режима обработки и используемого порошка. Адгезия на

отрыв покрытия с поверхностью подложки в среднем равен 10-55 МПа, а в некоторых случаях — до 120 МПа. Толщина покрытия обычно не более 1 мм, так как при ее увеличении в покрытии возникают напряжения, которые стремятся отделить покрытие от поверхности детали.

1.5. ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ TiN

Оценка износостойкости материалов после трибологических испытаний может проводиться разными методами, в том числе посредством расчет объемного износа (количество материала унесенного в период испытаний), в зависимости от времени, количества оборотов или длины пройденного пути. Так на рисунке 1.4 приведен пример зависимости изменения объема удаленного материала в процессе трибологических испытаний, от пути трения.

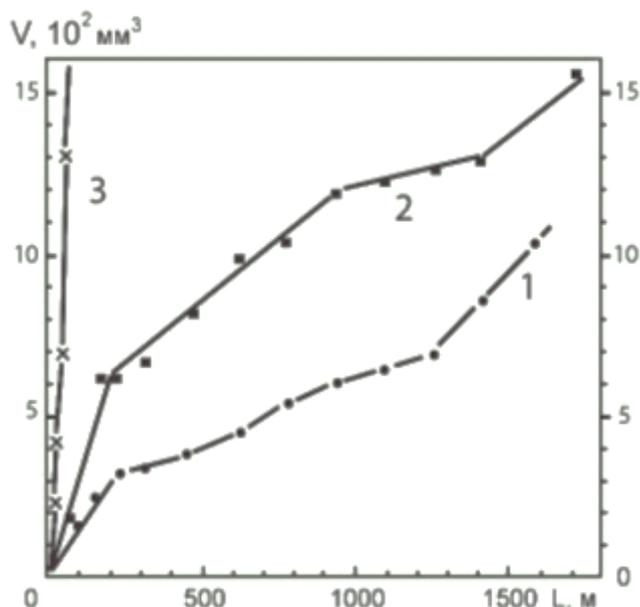


Рисунок 1.4. - Зависимость изменения объемного износа V от длины перемещения контртела L для образцов с покрытием из TiN, нанесенного в режиме ионно-плазменной имплантации (кривая 1), в режиме непрерывного осаждения (кривая 2), а также для образцов с покрытием (кривая 3) [8]

Результаты испытаний на износостойкость показали, что покрытия снижают объёмный износ V по сравнению с необработанным состоянием. Так уже после 500 оборотов объем унесенного материала подложки более

чем в 10 раз превышает количество удаленного материала для образцов с покрытием. Оценка конечного объема унесенного материала для образцов без покрытия показала, что объемный износ V для исходного состояния (кривая 3) в разы превышает V образцов с покрытием. При этом стоит отметить, что, несмотря на различные методы формирования покрытий, стадии их разрушения при испытаниях на износостойкость не наступает в исследуемых условиях. Вместе с тем объемный износ V для образцов с покрытием, осажденным методом ионно-плазменной имплантации, в 1,5-2 раза меньше, чем для покрытий, полученных при непрерывном осаждении. Измерение коэффициента трения, также показали преимущества покрытий, сформированных в режиме ионно-плазменной имплантации.

1.6. ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ОЛОВА.

Олово — легкоплавкий, очень пластичный, легко поддающийся обработке давлением металл, обладающий хорошей химической стойкостью. Благодаря своим свойствам олово нашло очень широкое применение в промышленности.

Сплавы с низким коэффициентом трения предназначены для повышения долговечности соприкасающихся поверхностей машин и механизмов. Трение происходит в подшипниках скольжения между валом и вкладышем подшипника. Поэтому для вкладыша подшипника подбирают такой материал, который предохраняет вал от износа, сам минимально изнашивается, создает условия для оптимальной смазки и уменьшает коэффициент трения. Исходя из этих требований, антифрикционный материал представляет собой сочетание достаточно прочной и пластичной основы, в которой имеются твердые включения. При трении пластичная основа частично изнашивается, а вал опирается на твердые включения. В этом случае трение происходит не по всей поверхности подшипника, а смазка удерживается в изнашивающихся местах пластичной основы.

Антифрикционными сплавами служат сплавы на основе олова, свинца, меди или алюминия, обладающие специальными антифрикционными

свойствами (табл.1.1). Антифрикционные свойства сплавов проявляются при трении в подшипниках скольжения. Это в первую очередь, низкий коэффициент трения, хорошая прирабатываемость к сопрягаемой детали, высокая теплопроводность, способность удерживать смазку и др. Из антифрикционных сплавов наиболее широко применяют баббит, бронзу, алюминиевые сплавы, чугун и металлокерамические материалы.

Антифрикционные сплавы хорошо прирабатываются в парах трения благодаря мягкой основе — олову, свинцу или алюминию. Более твердые металлы (цинк, медь, сурьма), вкрапленные в мягкую основу, способны выдерживать большие нагрузки. После приработки и частичной деформации мягкой основы в ней образуются углубления, способные удерживать смазку, необходимую для нормальной работы пары.

Таблица 1.1. Антифрикционные сплавы

Материал	Марка	Условия применения		Назначение
		Давление, Мпа	Окружная скорость, м/с	
Баббит	Б88	20	50	Подшипники быстроходных дизелей. Подшипники автотракторных двигателей
	БС6	15	—	
Бронза	БрОЦС5-5-5	8	3	Подшипники электродвигателей центробежных насосов
Латунь	ЛМцЖ52-4-1	4	2	Подшипники рольгангов, конвейеров, редукторов

Материал	Марка	Условия применения		Назначение
		Давление, Мпа	Окружная скорость, м/с	
Чугун	АЧС-1	25	5	Для работы с закаленным или нормализованным
	АЧС-5	20	1,2	
	АЧВ-1	20	1,0	
	АЧК-1	20	2,0	С термически необработанным валом (в стадии поставки)
	АЧС-3	6	0,75	
	АЧК-2	12	1,0	
Металлокерамика	Бронзо-графит	12-18	0,1	Подшипники конвейеров сельскохозяйственных и других машин; подшипники, работающие в местах труднодоступных для подачи смазки
		0,8-1,2	4,0	
	Железо-графит	15	0,1	
		0,6-1,0	4,0	

Баббиты - материалы с низким коэффициентом трения на основе олова или свинца. Их применяют для заливки вкладышей подшипников скольжения, работающих при больших скоростях, при переменных и ударных нагрузках. По химическому составу баббиты классифицируют на две группы: оловянные (Б83, Б88), оловянно-свинцовые (БС6, Б16). Лучшими антифрикционными свойствами обладают оловянные баббиты. Микроструктура оловянносурьмяномедного баббита Б83 состоит из мягкой основы, представляющей собой твердый раствор на базе олова. Твердыми частицами являются кубические включения SnSb и игольчатые кристаллы включений Cu_3Sn . Для оловянных и оловянно-фосфористых бронз характерны высокие антифрикционные свойства: низкий коэффициент трения, небольшой износ, высокая теплопроводность, что позволяет подшипникам, изготовленным из этих материалов, работать при высоких окружных скоростях и нагрузках.

Алюминиевые бронзы, которые используются в качестве подшипниковых сплавов, отличаются большой износостойкостью, но могут вызвать повышенный износ. Их применяют вместо оловянных и свинцовых баббитов и свинцовых бронз.

Свинцовые бронзы в качестве подшипниковых сплавов могут работать в условиях ударной нагрузки. Латунни по антифрикционным свойствам уступают бронзам. Их используют для подшипников, которые работают при низких скоростях и умеренных нагрузках. Из-за дефицитности олова и свинца применяют сплавы на менее дефицитной основе, например алюминиевые сплавы. Алюминиевые сплавы обладают хорошими антифрикционными свойствами, высокой теплопроводностью, хорошей коррозионной стойкостью в масляных средах и достаточно хорошими механическими и технологическими свойствами. Эти сплавы применяются в виде (покрытия) тонкого слоя, нанесенного на стальное основание, т. е. в виде биметаллического материала. В зависимости от химического состава различают две группы сплавов. Сплавы алюминия с оловом и медью, например АО20-1 (20% олова и до 1,2% меди) и А09-2 (9% олова и 2% меди). Они хорошо работают в условиях сухого и полужидкого трения и по антифрикционным свойствам близки к баббитам. Их используют для производства подшипников в автомобилестроении и машиностроении.

Таким образом, на основании проведенного литературного обзора в представляемой работе были поставлены следующие цели и задачи.

Целью квалификационной работой является исследование влияния режимов воздушно-плазменного метода нанесения антифрикционных покрытий на основе нитрида титана и доли процентного содержания олова в их составе на структурно-фазовое состояние и трибологические свойства.

Задачи:

1. Исследование влияния режимов нанесения покрытий с различным процентным содержанием олова на изменение их микроструктуру и фазового состава.

2. Проведение трибологических испытаний полученных покрытий в режиме сухого трения на воздухе с последующей оценкой их износостойкости.
3. Определение оптимального состава антифрикционных покрытий системы TiN-Sn и режимов воздушно-плазменного нанесения.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Формирование покрытий на поверхности стали AISI 312 (табл.2.1) проводилось методом воздушно-плазменного напыления. В качестве исходных порошков использовалась смесь порошка титана и олова.

Таблица 2.1. Массовая доля элементов стали AISI 312,%

Эл.	Fe	C	Si	Mn	Ni	Cr
%	57,85	0,15	1	2	9	30

С целью исследования влияния режимов нанесения покрытий на их структуру и свойства, формирование покрытий проводилось с двух различных расстояниях между поверхностью и соплом плазматрона: 80 мм (режим 1) и 160 мм (режим 2) (табл. 2.2). Также были проведены исследования по выявлению закономерностей влияния доли процентного содержания олова в составе покрытий на основе нитрида титана на их микротвердость и трибологические свойства. Режимы и элементный состав покрытий представлен в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Режимы и элементный состав покрытий.

Режим 1 (80 мм)	Ti-Sn 50%-50%	Ti-Sn 70%-30%
Режим 2 (160 мм)	Ti-Sn 50%-50%	Ti-Sn 70%-30%

Исследование толщины и структуры покрытий выполнялись методами оптической микроскопии с использованием металлографического микроскопа Olympus GX71 (рис.2.1).

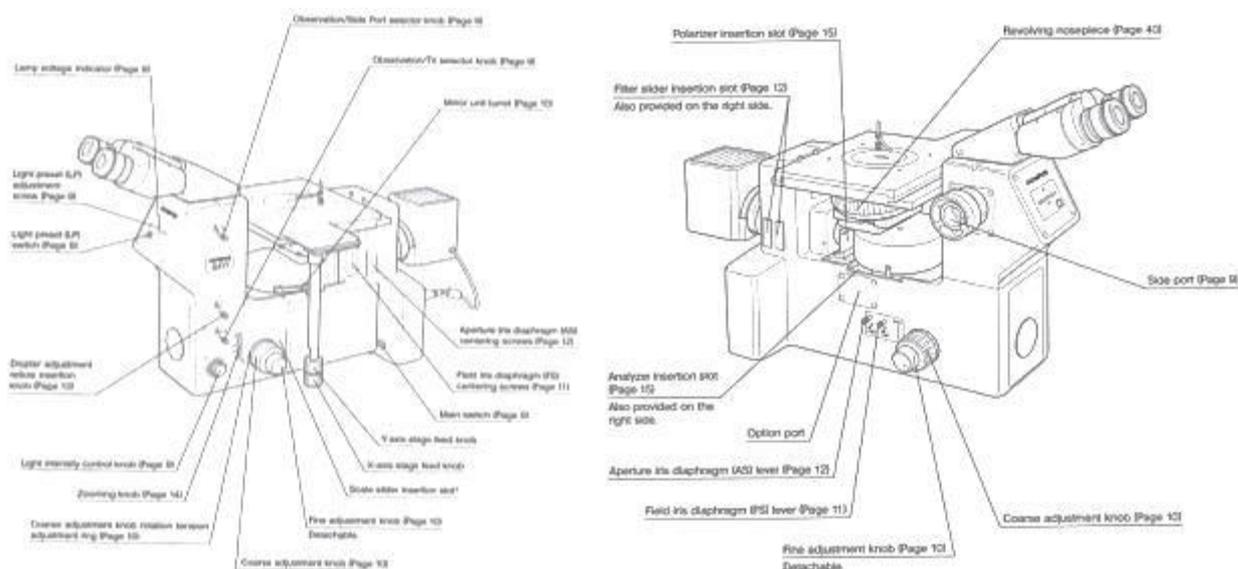


Рисунок 2.1. – Схематическое изображение микроскопа Olympus GX71 [17].

Измерение площади поперечного сечения дорожки износа и параметров шероховатости (среднее арифметическое отклонение профиля R_a , высота неровностей по 10 точкам R_z) проводились при помощи контактного прецизионного профилометра Surtronic 25 (рис. 2.2).



Рисунок 2.2. - Автоматизированный прецизионный контактный профилометр Surtronic 25

Измерение линейного профиля поверхности проходит путем измерения вертикального отклонения наконечника (щупа), который перемещается под действием минимальной нагрузки с постоянной скоростью при механическом контакте с образцом на заданное расстояние. Длина царапины, на которой проводится измерение, выбирается в соответствии с ГОСТ. В

результате измерений определяется профиль поверхности по средствам анализа, которого высчитываются основные параметры шероховатости: высотные, шаговые, гибридные [15]. Как правило, расчет указанных величин проводится при помощи специального ПО. Однако при необходимости основные параметры, наиболее часто используемые, в том числе и на производстве можно рассчитать по ниже приведенным формулам.

Среднее арифметическое отклонение профиля R_a определяется как среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины l :

$$R_a = \int_0^l |z(x)dx|,$$

где, $z(x)$ – уравнение профиля, которое часто задается графически или таблично. Если уравнение задано таблично, то R_a рассчитывается по формуле:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i,$$

где n – число выбранных точек на базовой длине. Обычно R_a находится как среднее по нескольким базовым линиям, от 2 до 20 в зависимости от национального стандарта.

Высота неровностей профиля по 10 точкам R_z есть сумма средних абсолютных значений пяти наибольших выступов профиля и глубины пяти наибольших впадин в пределах базовой длины:

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |z_{ip}| + \sum_{i=1}^5 |z_{iv}|}{5},$$

где z_{ip} – высота i -го наибольшего выступа, z_{iv} – глубина i -й наибольшей впадины.

Рентгенофазовый анализ проводился с помощью рентгеновского дифрактометра по схеме Брегга-Брентано.

Трибологические исследования проводились на автоматизированной машине трения High-Temperature Tribometer по схеме испытания шарик-диск в режиме сухого трения на воздухе (рис. 2.3). Данный вид испытаний соответствует международным стандартам ASTM G99-959 и DIN 50324. В качестве контртела был выбран корундовый шарик диаметром 6 мм. Нагрузка на держатель контртела составляла 5Н при скорости вращения образца 10 см/с, пути трения 1000 метров и радиусе испытаний 2,0 мм. Количественная оценка износостойкости исследуемых образцов и статистического партнера проводилась по величине значения фактора износа W .



Рисунок 2.3. - Автоматизированная машина трения High-Temperature Tribometer (SCM Instruments)

Расчет фактора износа W контртела и образца проводился по следующей формуле:

$$W=V/(Pl),$$

где V – объем удаленного материала, мм^3 ; P – нагрузка на держатель контртела, Н; l – путь трения, м.

Объем удаленного материала V на контртеле (шарике) рассчитывался по формуле:

$$V=\pi h^2(r-h/3),$$

где r - радиус шарика, мм; h – высота удаленного сегмента, мм.

$$h = r - \sqrt{r^2 - L^2/4},$$

где h – высота сегмента, мм; L -длина хорды, мм.

Объем удельного материала V на образце рассчитывался по формуле:

$$V=sl,$$

где l – длина окружности, мм; s – площадь поперечного сечения дорожки износа, мм².

Измерение твердости отдельных структурных составляющих покрытия проводилось с использованием нанотвердомера SHIMADZU Dynamic Ultra-micro Hardness Tester DUN-211. Данный нанотвердомер объединяет в себе прецизионный твердомер и оптический микроскоп. Измерения проводятся на образцах с плоскопараллельными поверхностями – опорной и исследуемой. В качестве индентора, как и в приборах для измерения микротвердости, используется алмазная трех или четырёхгранная пирамидка, получившая название по имени разработчиков – индентор Берковича или Виккерса, соответственно. Описываемая методика измерения твердости позволят также в едином цикле измерений определять модуль Юнга по средства анализа получаемой кривой нагрузки-разгрузки. На рисунке 2.4 приведена схема и пример проведения испытания.

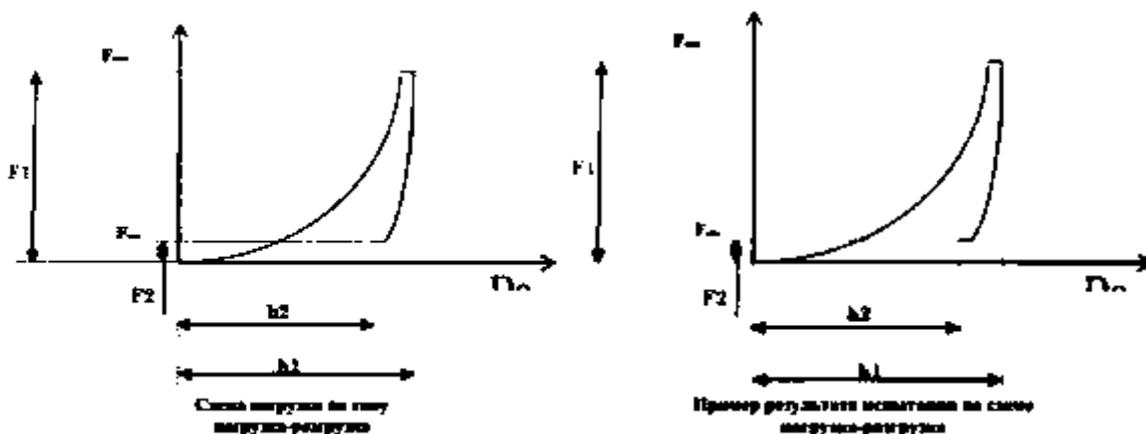


Рисунок 2.4 - Схема нагружения и пример результата испытания наноиндентирования

В соответствии с направлением движения зондирующего поверхность инструмента по отношению к плоскости образца их подразделяют на наноиндентирование (индентор движется по нормали к поверхности) и наносклерометрию (индентор движется по касательной к поверхности).

Сущность этих методов состоит в программируемом приложении малых или ультрамалых усилий к индентору и непрерывной регистрации зависимости силы сопротивления P от смещения (глубины погружения h или тангенциального перемещения x). Типичная диаграмма показана на рисунке 2.3.

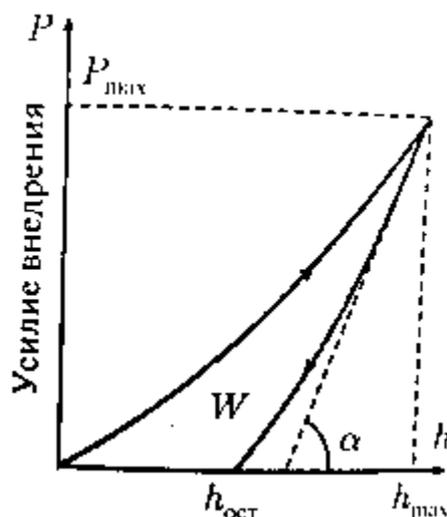


Рисунок 2.3 - Диаграмма, полученная при наноиндентировании: h_{max} - максимальная глубина погружения индентора; $h_{ост}$ - глубина отпечатка, оставшегося после снятия нагрузки; W – поглощённая энергия

Верхняя кривая соответствует нагружению и отражает сопротивление материала внедрению индентора, а нижняя описывает возврат деформации после снятия внешней нагрузки и характеризует упругие свойства материала. При внедрении индентора вблизи области контакта создаётся сложное напряженное состояние, близкое к всестороннему сжатию, а деформация, распространяющаяся вглубь материала, имеет как упругую (обратимую), так и пластическую (необратимую) составляющую. По средствам оценки доли упругой составляющей в общей деформации возможно проведение оценки модуля Юнга:

$$R = \frac{h_m - h_{ост}}{h_m},$$

где, h_m – наибольшая глубина погружения, $h_{ост}$ – глубина после снятия нагрузки.

Значение твёрдости рассчитывают как отношение максимальной нагрузки к площади проекции невосстановленного отпечатка. Размер отпечатка определяют по максимальной глубине погружения индентора h_m , принимая допущение, что индентор совершенно не деформируется при внедрении. Таким образом, в описываемом методе наноиндентирования твердость определяется исходя из невосстановленного отпечатка, в отличие от метода измерения микротвердости, предложенных Виккерсом и Бринелем, в которых измеряются визуально параметры восстановленного отпечатка: диагональ или диаметр, соответственно [18].

Также измерение твердости поверхности образцов с покрытием проводилось методом Рокквела по шкале HRA, соответствующего ГОСТ 9013-59. Число твердости по методу Рокквела является безразмерной величиной. Основными требованиями при измерениях данным методом также является уровень шероховатости ($R_a \leq 2,5$ мкм), толщина образца (не менее 8-кратной глубины отпечатка) и отсутствие смещения и прогибов.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ TiN-Sn

Измерение толщины покрытий выполнялось с использованием методов оптической микроскопии. Микроструктура покрытия на поперечном сечении приведена на рисунке 3.1.

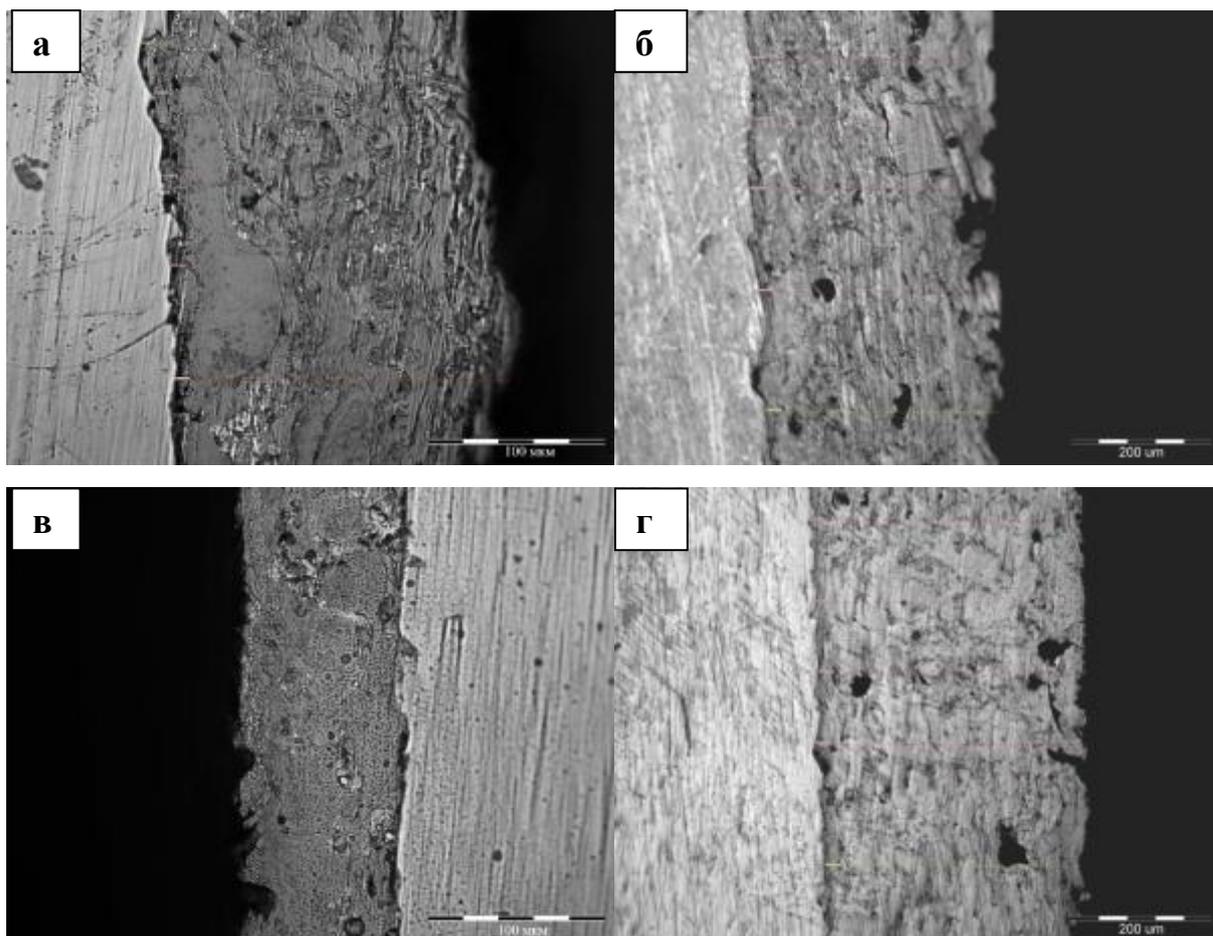


Рисунок 3.1 - Микроструктура покрытия в поперечном сечении: а) TiN-Sn 50%-50% (80 мм); б) TiN-Sn 70%-30% (80 мм); в) TiN-Sn 50%-50% (160мм); г) TiN-Sn 70%-30% (160 мм)

Микроструктура покрытий независимо от режима нанесения имеет многослойную структуру, представленную включениями олова и нитрида титана. Также структура покрытий характеризуется наличием небольшого количества дефектов: трещины и поры (рис. 3.1). Толщина покрытий

практически не изменяется для всех режимов нанесения и составляет более 300 мкм за исключением покрытия TiN-Sn 50%-50%(160 мм) (табл. 3.1). Последнее возможно связано с особенностями метода формирования покрытий и большего количества процентного содержания олова.

Таблица 3.1. - Толщина покрытий в зависимости от режима нанесения

Режим нанесения покрытия	TiN-Sn 50%-50% (80 мм)	TiN-Sn 50%-50%(160 мм)	TiN-Sn 70%-30% (80 мм)	TiN-Sn 70%-30%(160 мм)
Толщина покрытия, мкм	397	163	354	335

Исследования микроструктуры покрытий методами растровой электронной микроскопии показали, что слои олова (светлые области) равномерного распределены по всему объему независимо от режима обработки и элементного состава (рис. 3.2, 3.3). Проведенный элементный анализ указанных областей также подтвердил, что указанные области являются оловосодержащими (рис. 3.4). При этом в структуре всех покрытий кроме равномерно распределенных слоев наблюдаются включения частиц глобулярной формы размерами несколько сотен микрон (рис. 3.2, 3.3). Элементный анализ указанных частиц, показал только содержание титана (рис. 3.5). Стоит отметить, что используемый метод определения элементного состава имеет ограничения в применении, в том числе по средствам энергодисперсионного микроанализа невозможно оценить количества азота в титане. Но, несмотря на это, частицы такого размера возможно в процессе напыления не провзаимодействовали со средой реаквационного газа (азота) и остались в исходном состоянии. Такие частицы можно считать дефектами структуры, исключить которые можно при помощи использования порошка меньшей дисперсности. Стоит отметить, что в литературном обзоре было указано одним из требований к порошкам для воздушно-плазменного напыления однородность по размерам.

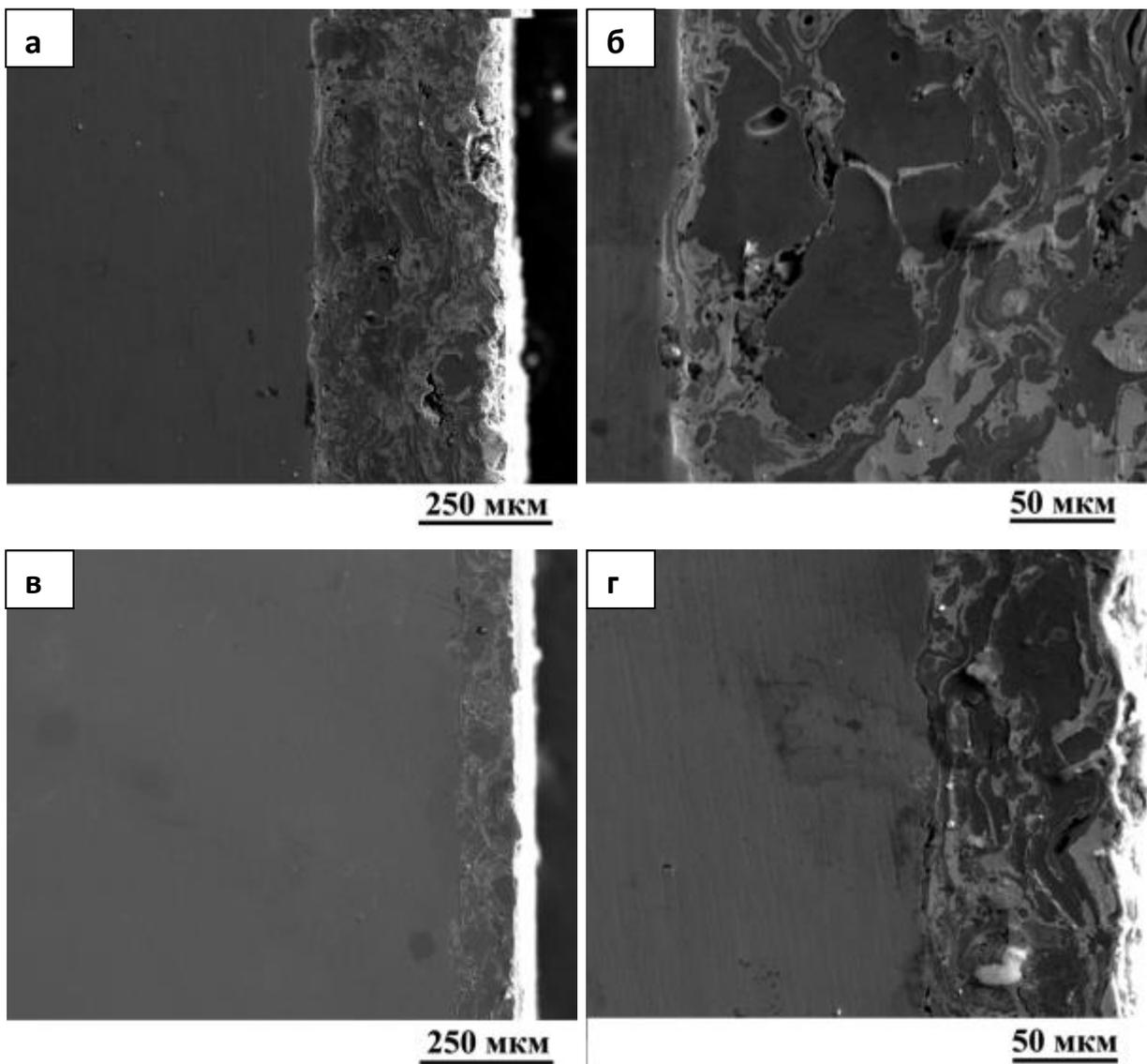


Рисунок 3.2 - Микроструктура покрытий: (а, б) TiN-Sn 50%-50% (80 мкм); (в, г) TiN-Sn 50%-50% (160 мкм)

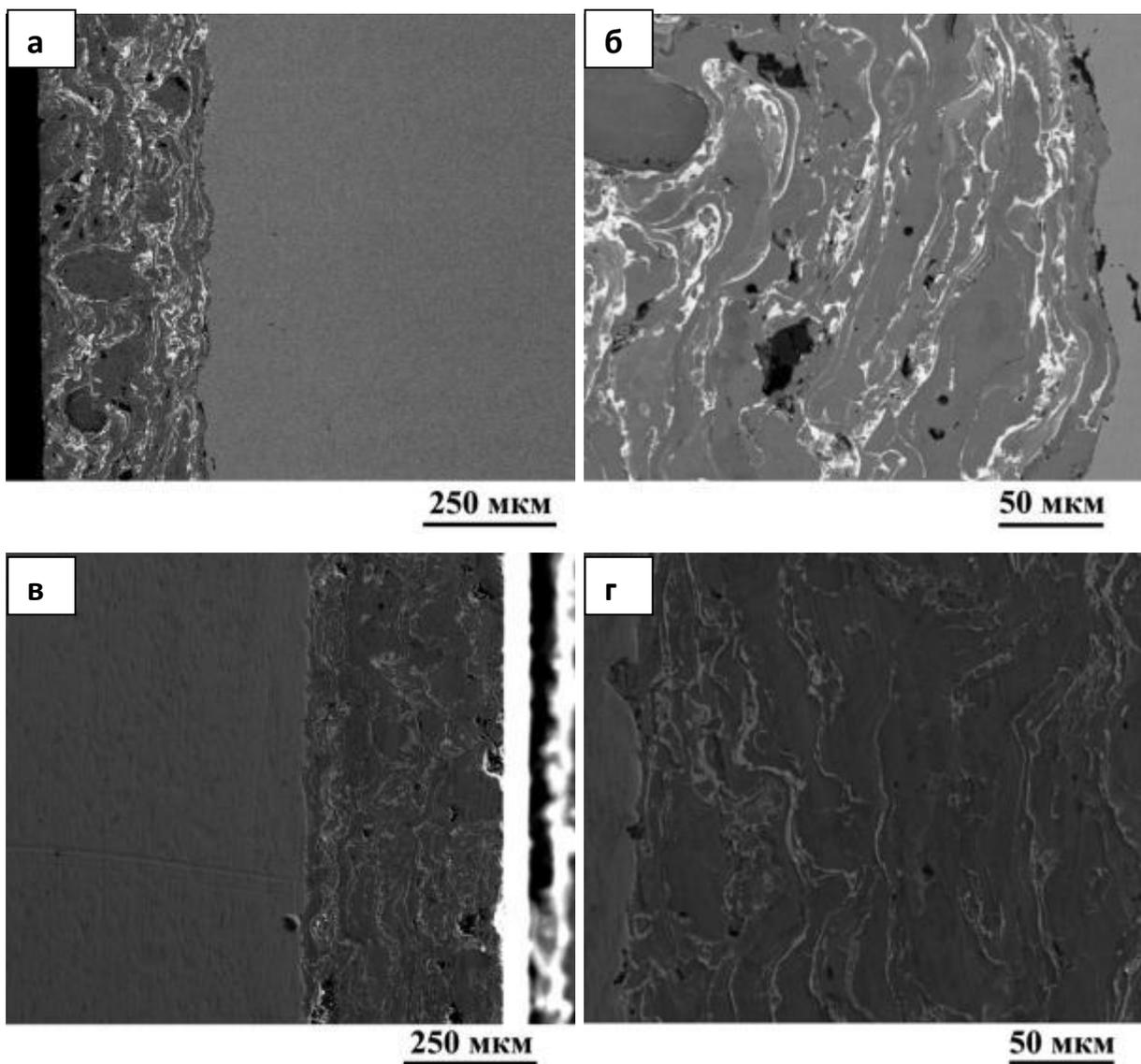
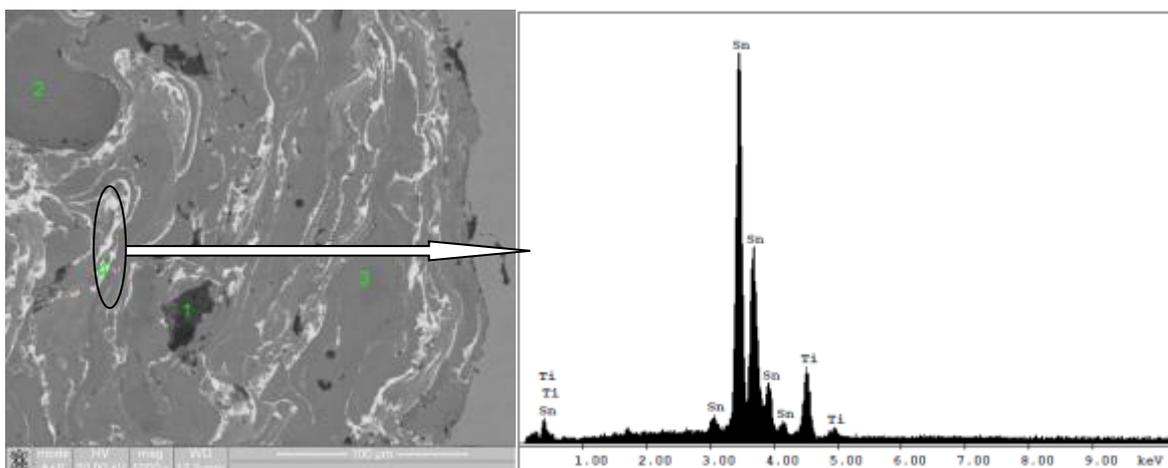
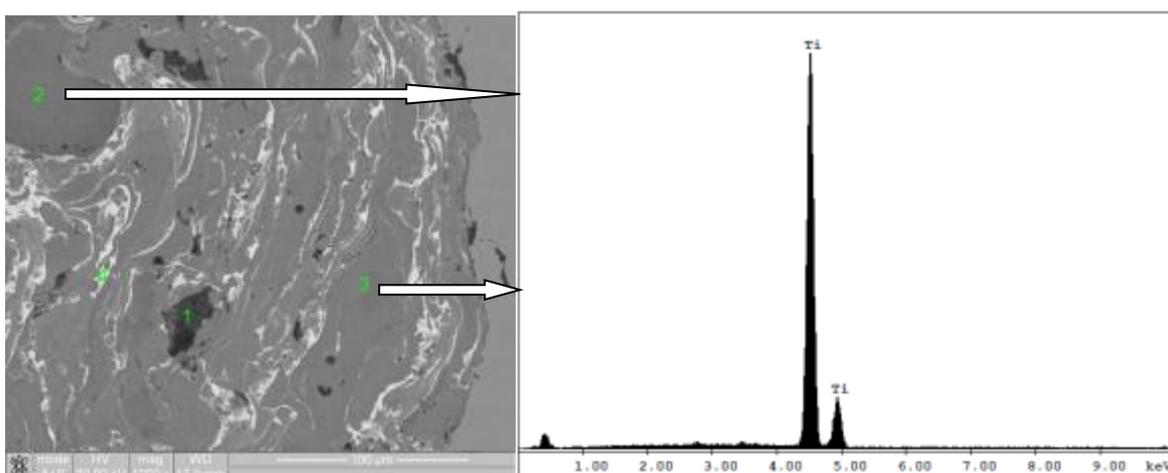


Рисунок 3.3 - Микроструктура покрытий: (а, б) TiN-Sn 70%-30% (80мм); (в, г) TiN-Sn 70%-30% (160 мм)



Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
SnL	87.34	73.58	0.8766	0.9796	1.0185	1.0060
TiK	12.66	26.42	0.0716	1.1095	0.5101	1.0000
Total	100.00	100.00				

Рисунок 3.4 - Микроструктура и элементный состав выделившейся фазы Sn в покрытии TiN-Sn 70%-30% (80 мм)



Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
TiK	100.00	100.00	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Total	100.00	100.00				

Рисунок 3.5 - Микроструктура и элементный состав частиц в покрытии TiN-Sn 70%-30% (80 мм)

Анализ рентгенограммы покрытий TiN-Sn нанесённых разными режимами и с разным содержанием элементов не показал наличие титана, возможно из-за небольшого его количества, которое находится в пределах

обнаружения указанным методом (3.6 – 3.9). Все покрытия имеют схожий фазовый состав, представленный ГЦК структурой Sn и нитридом титана TiN. Видно, что с увеличением толщины покрытия интенсивность пиков увеличивается, также с увеличением содержания TiN в покрытиях, интенсивность соответствующих пиков повышается.

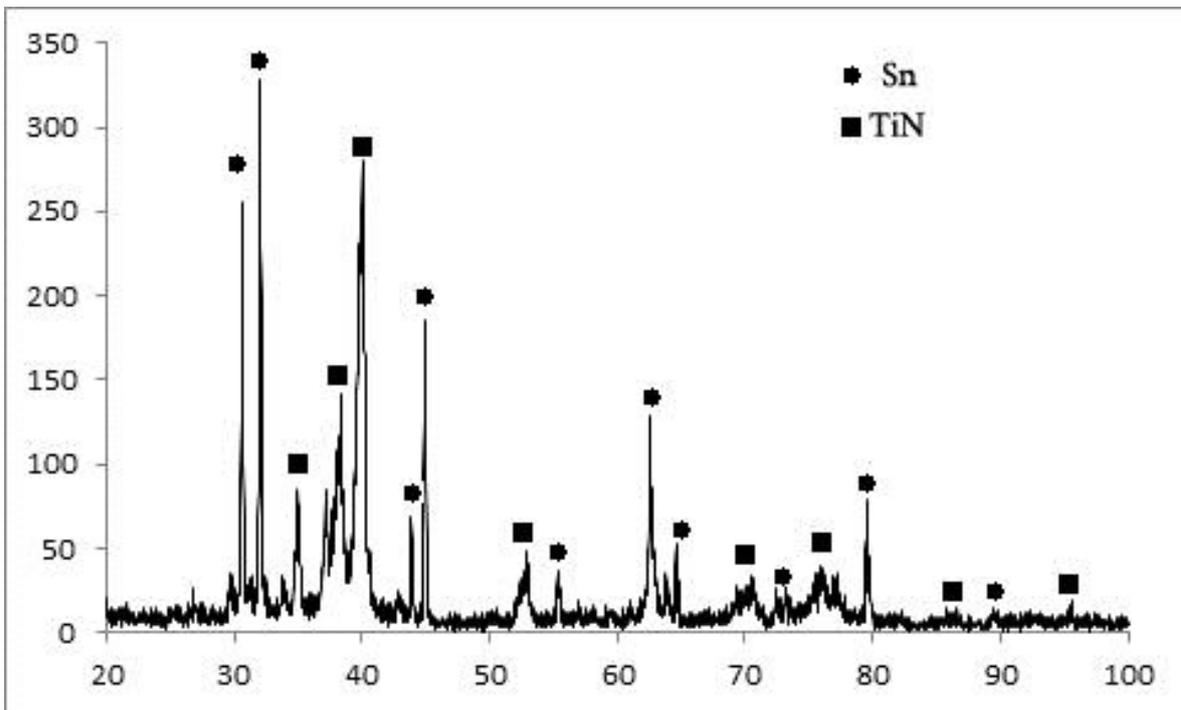


Рисунок 3.6 - Рентгенограмма покрытия TiN-Sn 50%-50% (80 мм)

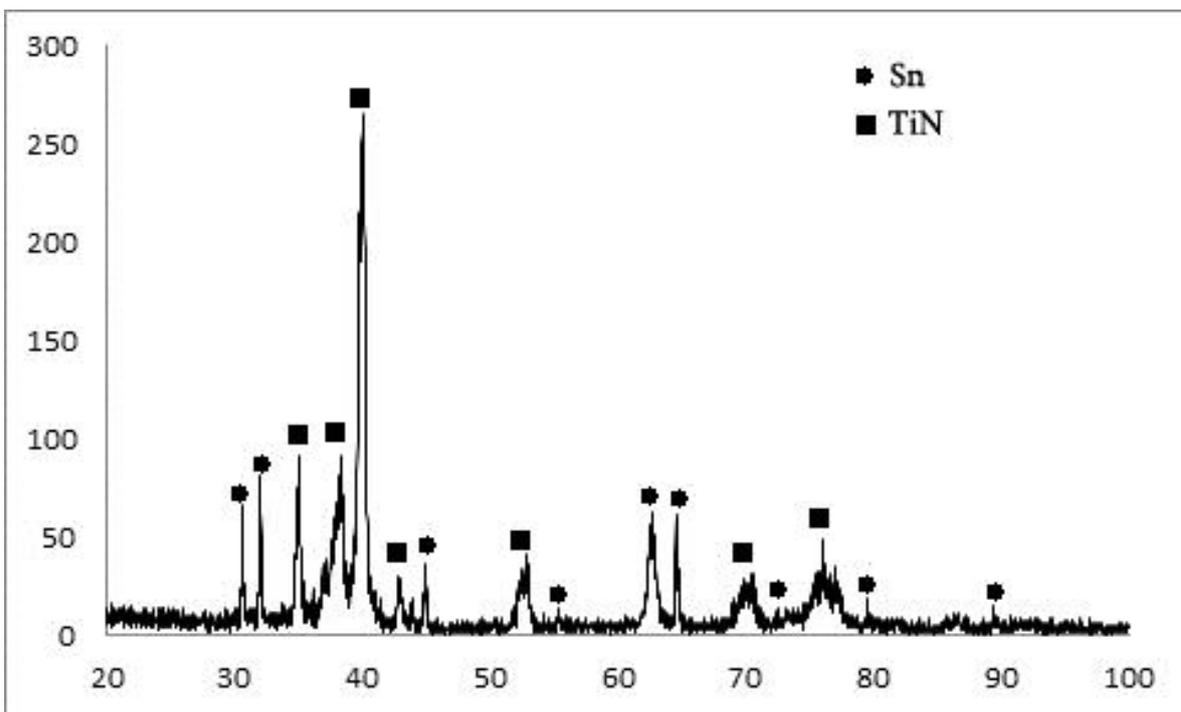


Рисунок 3.7 - Рентгенограмма покрытия TiN-Sn 70%-30% (80 мм)

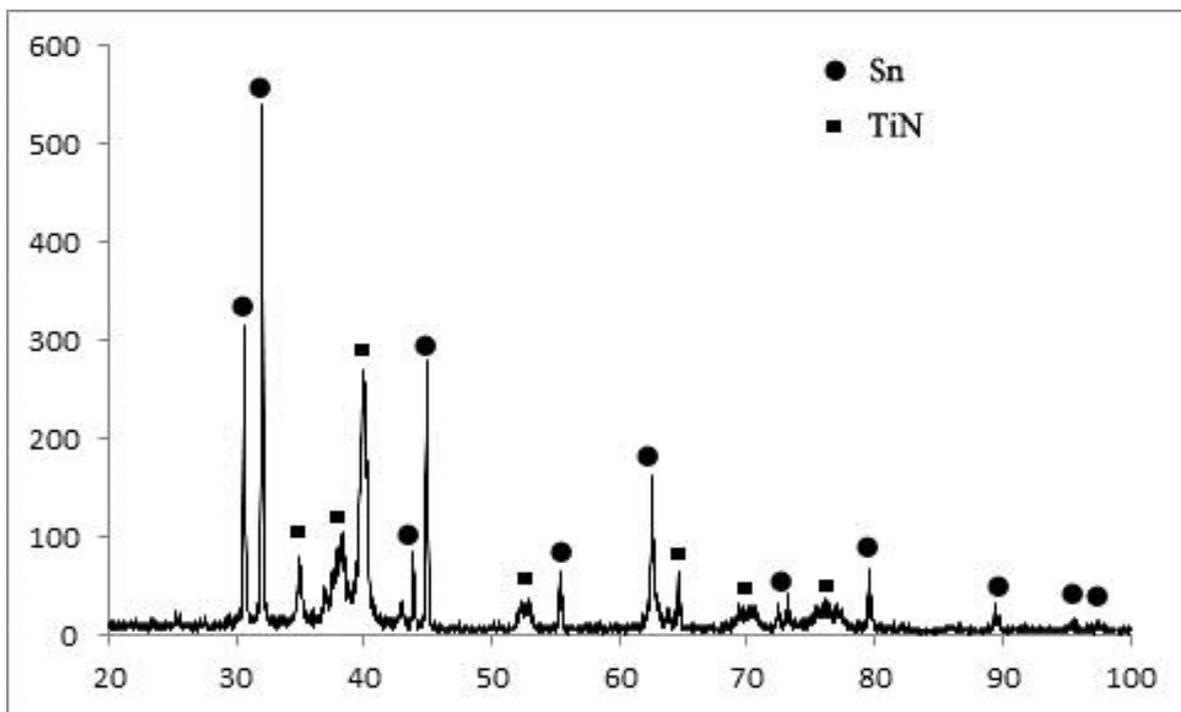


Рисунок 3.8 - Рентгенограмма покрытия TiN-Sn 50%-50% (160мм)

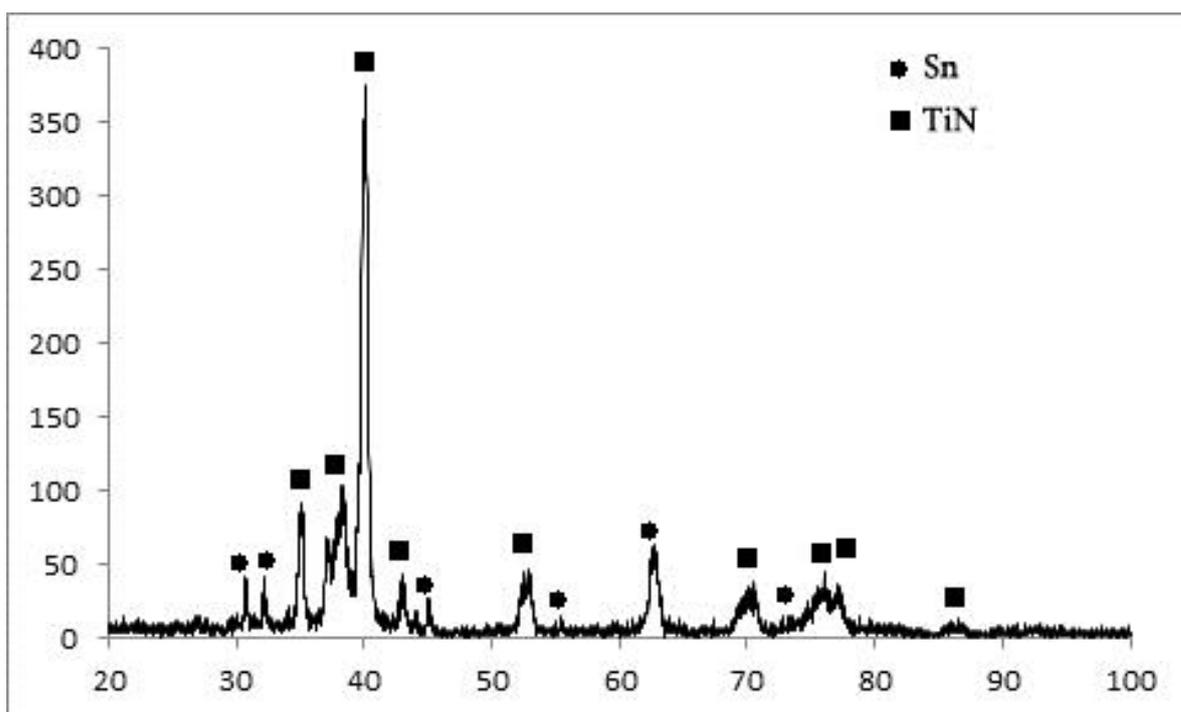


Рисунок 3.9 - Рентгенограмма покрытия TiN-Sn 70%-30% (160 мм)

С целью определения природы крупных частиц глобулярной формы был использован метод измерения твердости при помощи наноиндетора, позволяющего оценить твердость в отдельных включениях. Так как твердость олова, нитрида титана и чистого титана сильно отличается, то по

величине измеренной твердости можно определить состав исследуемой области. Измерение твердости проводилось при двух нагрузках: 50 мН и 25 мН. На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что крупные частицы представляют собой двухфазное состояние: титан и соединения Ti-N. Так, в центре частицы твердость соответствует твердости титана ~ 4 ГПа (рис. 3.10), измерения твердости по периферии частицы показали более высокие значения, типичные для нитрида титана (рис. 3.10).

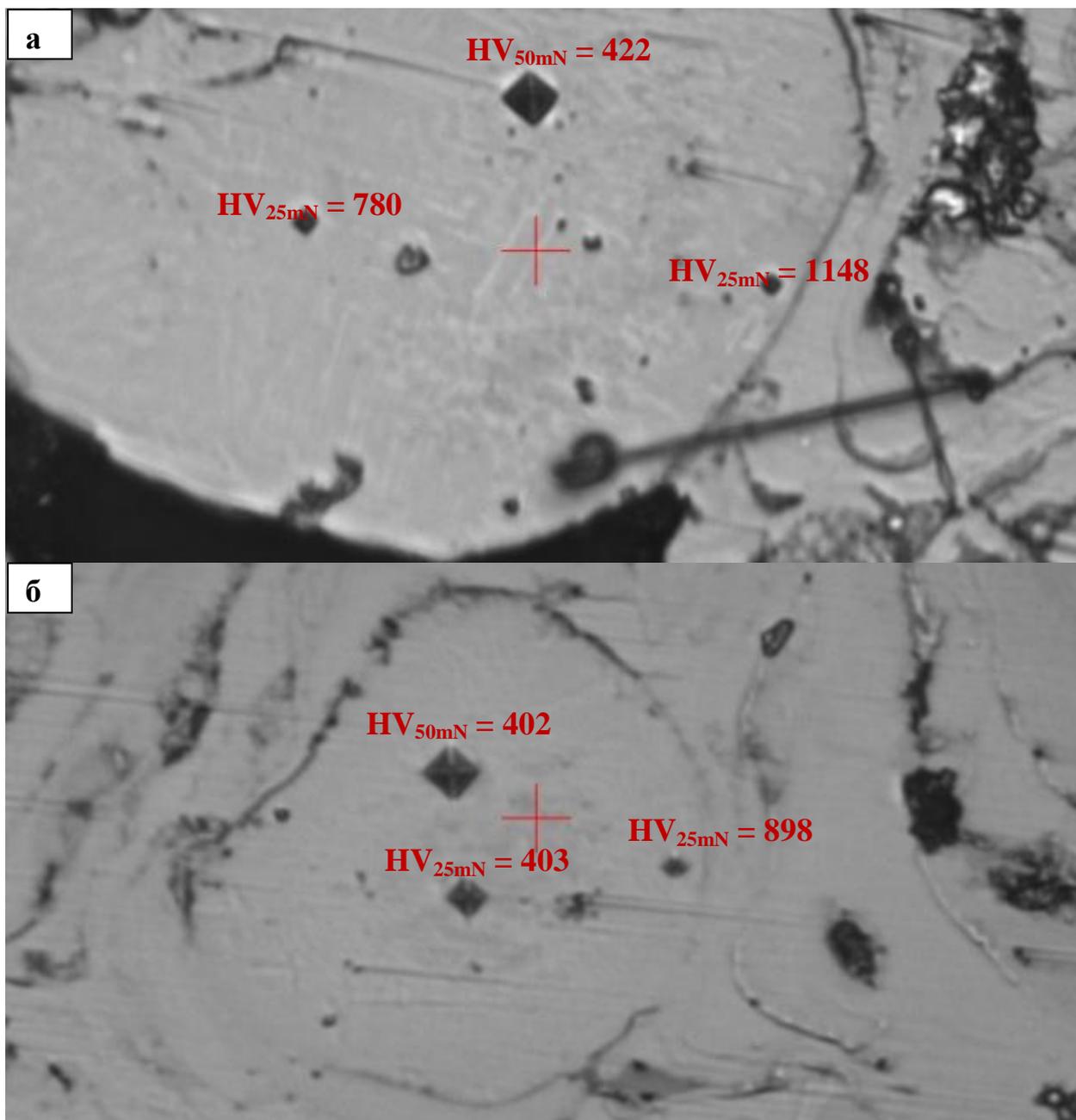


Рисунок 3.10. - Восстановленные отпечатки после измерения твердости методом наноиндентирования: а) TiN-Sn 50%-50% (80мм); б) TiN-Sn 70%-30% (80мм)

На основании полученных данных можно высказать предположение о том, что в процессе нанесения крупные частицы подвергают азотированию и на их поверхность формируется диффузионный азотированный слой, при этом центр частиц остается в исходном состоянии.

Измерение твердости тонких слоев, показали, что светлые области, соответствующие олову, как и предполагалось, показывают низкие значения твердости $HV_{50mN} \sim 50$, более темные слои имеют высокие значения твердости до $HV_{50mN} \sim 1840$ (18 ГПа), что соответствует нитриду титана.

Также проводились измерения интегральной твердости покрытия методом Роквелла (шкала HRA). Результаты измерения представлены в таблице 3.2. Видно, что наибольшие показатели значения твердости у покрытий TiN-Sn 70%-30% (80мм) и TiN-Sn 70%-30% (160 мм), они составляют 49,2 и 55,4 соответственно.

Таблица 3.2. -Измеренная твердость покрытий по Роквеллу (HRA)

Режим нанесения покрытия Номер измерения	1	2	3	4	5	6	Ср. значение
TiN-Sn 50%-50% (80 мм)	37,1	45,8	50,2	52,3	46,7	46,0	46,4
TiN-Sn 50%-50% (160 мм)	53,5	51,2	47,8	48,3	53,6	51,7	51,0
TiN-Sn 70%-30% (80мм)	42,1	46,2	51,6	50,8	53,4	51,2	49,2
TiN-Sn 70%-30% (160 мм)	46,9	58,8	58,9	47,7	60,0	60,0	55,4

3.2 ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ TiN-Sn В УСЛОВИЯХ СУХОГО ТРЕНИЯ

На рисунках 3.11 и 3.12 представлены графики зависимости изменения коэффициента трения от расстояния в условиях сухого трения. Анализ полученных зависимостей показал, что покрытия, нанесенные по режиму 2 ($l = 160$ мм) имеют более низкие значения коэффициента трения, чем покрытия, сформированные по режиму 1 ($l = 80$ мм). Так, покрытие TiN-Sn 50%-50% (80 мм), в начале испытания имеет низкий коэффициент трения 0,2, который после этапа приработки резко повышается до значения 0,85 (рис.3.11 а). Покрытие с меньшим содержанием олова TiN-Sn 70%-30% (80 мм) (рис.3.11б) также на этапе приработки имеет низкий коэффициент трения 0,2, который на этапе нормального износа возрастает до 0,95.

Противоположная зависимость наблюдается для образцов, обработанных с расстояния 160 мм (рис. 3.12). Значение коэффициента трения не зависит от содержания олова в покрытиях на этапе нормального износа имеет низкие и сверхнизкие значения, менее 0,03 (табл. 3.3). При этом стоит отметить, что длительность этапа приработки отличается для образцов с 30% и 50% содержанием олова. Так, приработка для образца TiN-Sn 70%-30% (160 мм) заканчивается после 350 метров, в то время как для TiN-Sn 50%-50% (160 мм) только после 550 метров. Необходимо отметить, что длительность этапа приработки является одной из основных характеристик трибологических свойств, так как именно на этот этап характеризуется максимально повышенным износом контактирующих поверхностей.

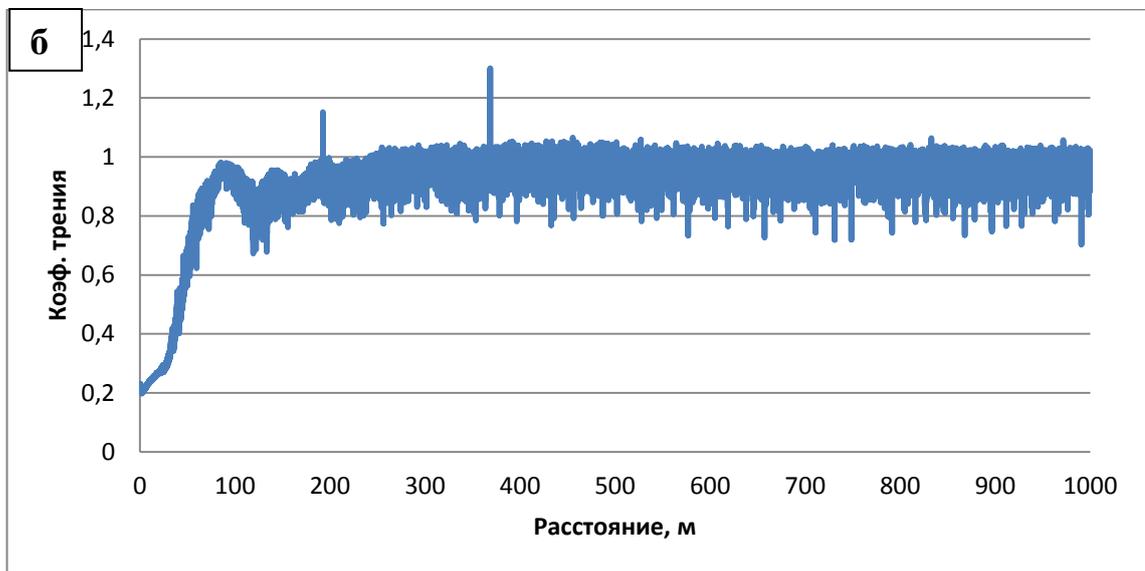
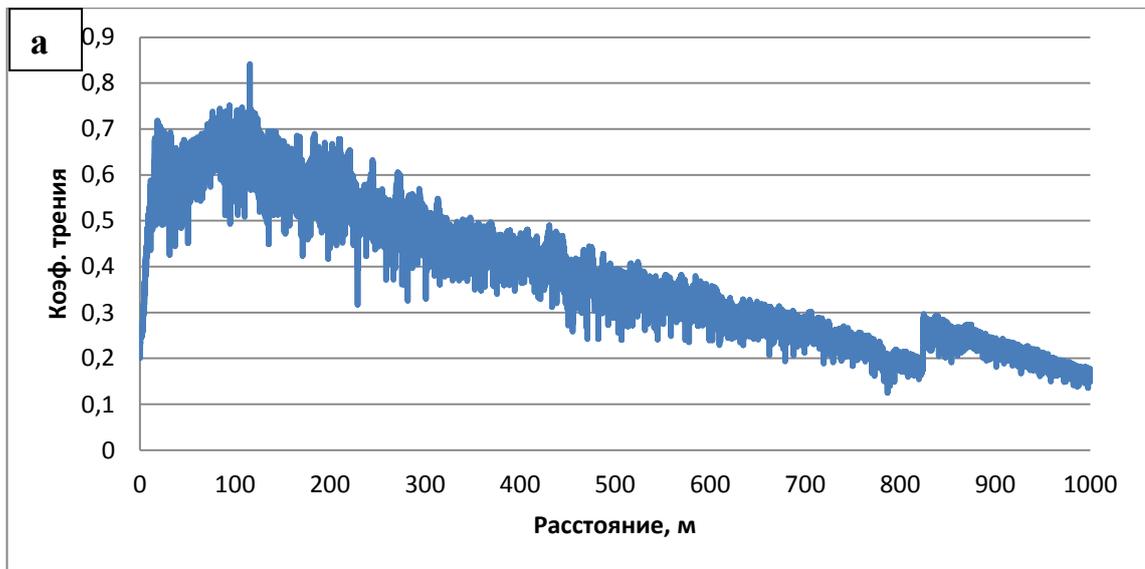


Рисунок 3.11 - Зависимость коэффициента трения от времени испытания: а) TiN-Sn 50%-50% (80 мм); б) TiN-Sn 70%-30% (80 мм)

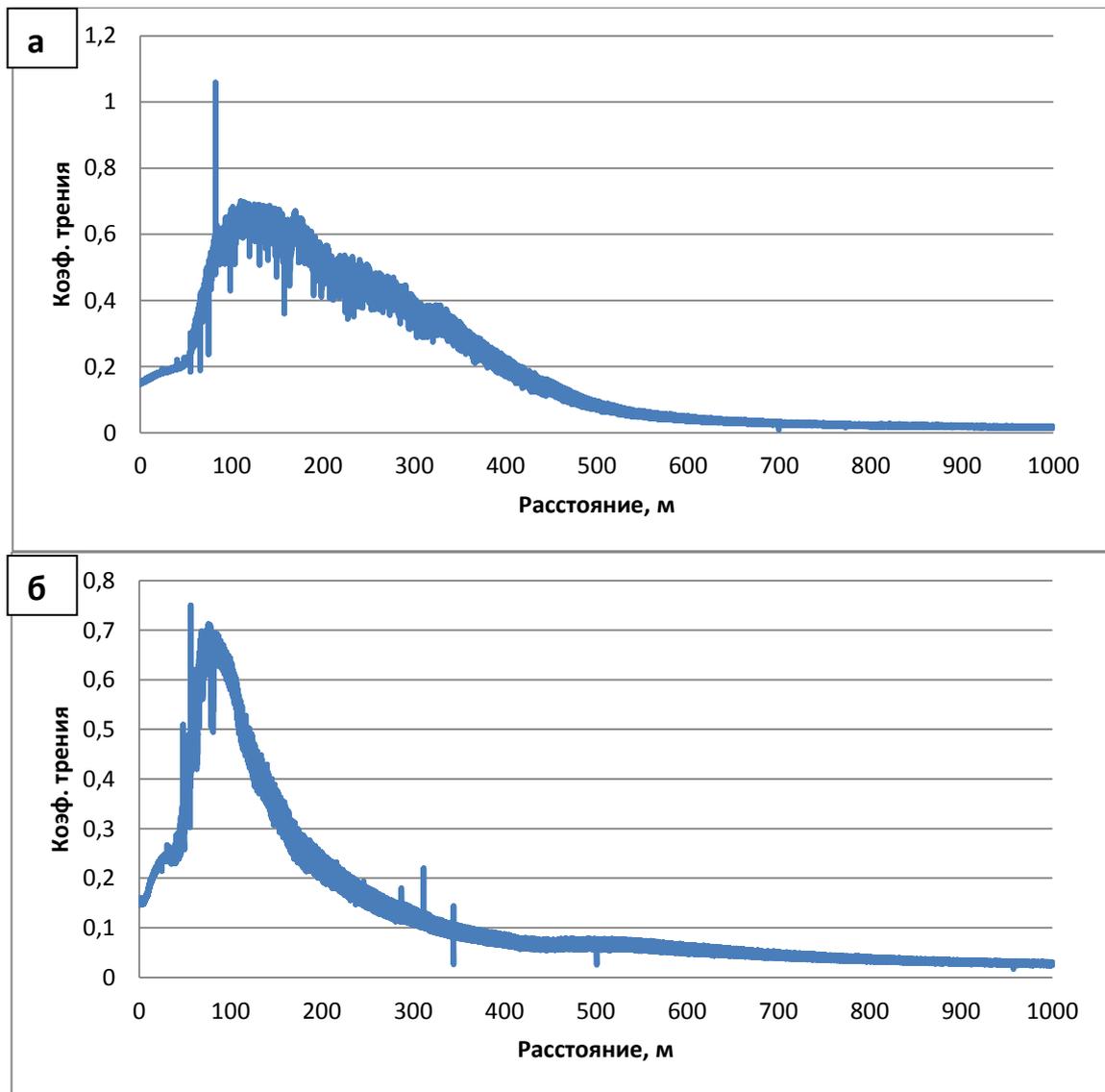


Рисунок 3.12 - Зависимость коэффициента трения от времени испытания: а) TiN-Sn 50%-50% (160 мм); б) TiN-Sn 70%-30% (160 мм)

Таблица 3.3 - Фактор износа и коэффициент трения в зависимости от режима нанесения покрытия

Режим нанесения покрытия	Фактор износа контртела, $10^{-5} \text{ мм}^3 \text{ Н/м}$	Фактор износа образца, $10^{-5} \text{ мм}^3 \text{ Н/м}$	$\mu_{\text{ср.}}$	$\mu_{\text{к.}}$
TiN-Sn 50%-50% (80 мм)	1,3	2,3	0,39	0,17
TiN-Sn 70%-30% (80 мм)	2,0	5,0	0,92	1,0
TiN-Sn 50%-50%(160 мм)	1,1	1,2	0,19	0,016
TiN-Sn 70%-30%(160 мм)	0,9	0,15	0,13	0,028

Как правило, для получения низких и сверхнизких коэффициентов трения долго время считалось необходимым создания поверхностей с низким уровнем шероховатости. Технологии, которые не позволяли получать в процессе обработки такие поверхности, включали ряд дополнительных операций, которые увеличивали конечную стоимость изделий. В настоящий момент появилось большое количество работ, в которых, наоборот, по средствам создания многоуровневого рельефа удается получить низкие значения коэффициента трения. В нашем случае, уровень шероховатости достаточно высок (табл. 3.4), в том числе из-за предварительно пескоструйной обработки. Однако, даже при таких высоких значениях R_a и R_z удается получить коэффициент трения менее 0,03.

Таблица 3.4. - Значение шероховатости покрытий

Режим нанесения покрытия	R_a, мкм	R_z, мкм
TiN-Sn 50%-50% (80 мм)	13,7	66,4
TiN-Sn 70%-30% (80 мм)	16,5	82,3
TiN-Sn 50%-50%(160 мм)	11,9	57,0
TiN-Sn 70%-30%(160 мм)	12,3	59,4

Такое поведение возможно связано со следующим механизмом трения. При контакте образца с контртелом на начальном этапе (приработки) трение происходит в основном по выступающим неровностям нитрида титана, который отличается высокой твердостью и износостойкостью. Данный этап характеризуется высокими значениями коэффициента трения (рис.3.13). Затем происходит «выдавливание» олова на поверхность фрикционного контакта (этап 2, рис. 3.13) с последующим формированием тонкой пленки олова, которое выступает в качестве смазки (этап 3, рис. 3.13). При этом наличие большого количества выступов и впадин служат дополнительно

ловушками для продуктов износа и тем самым снижают количества абразива в месте контакта.

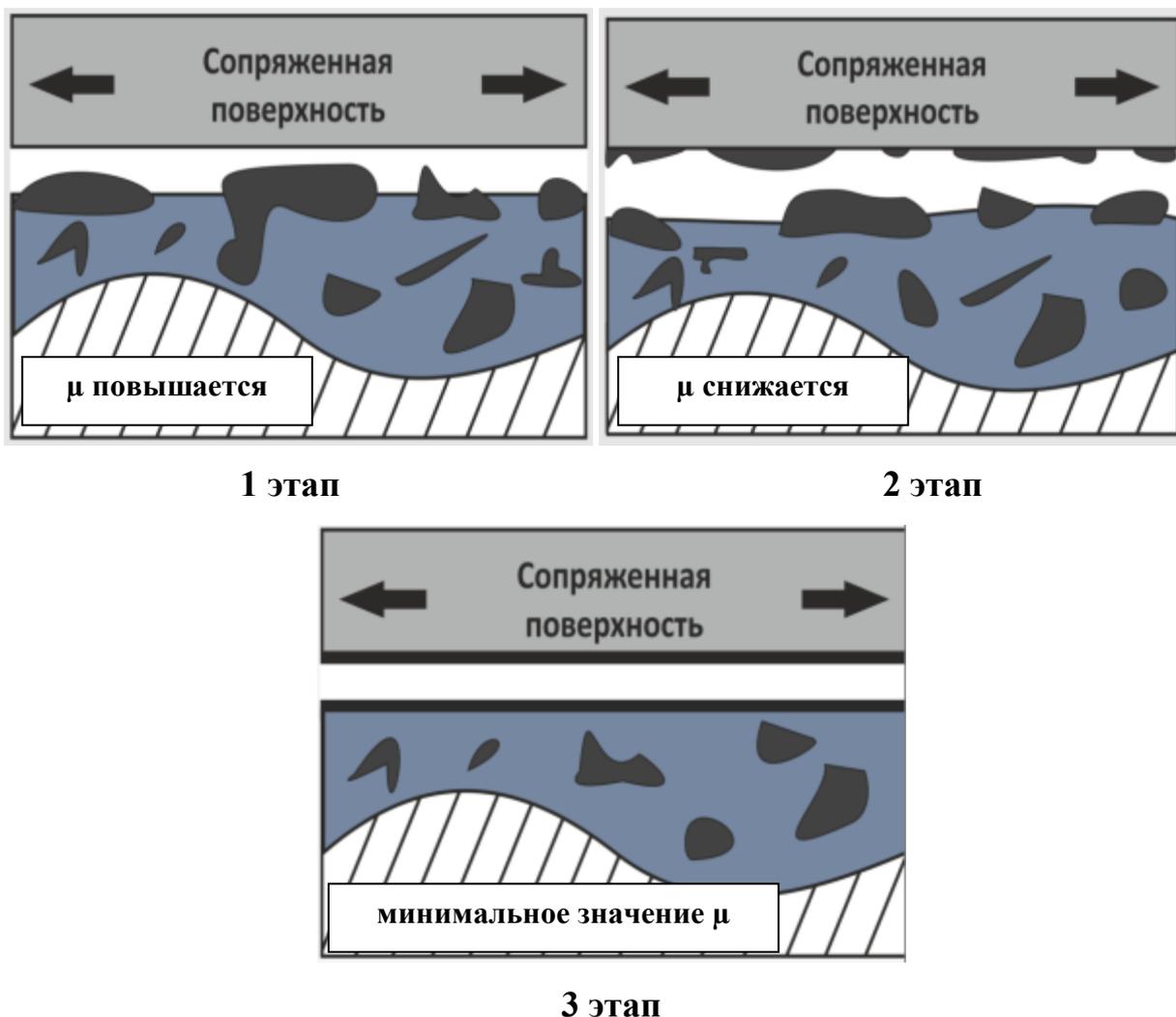


Рисунок 3.13 - Механизм формирования антифрикционных пленок в процессе трения композиционных покрытий, содержащих в своем составе смазку

При таком механизме изнашивания на поверхности контртела должны наблюдаться следы воздействия твердых частиц абразива (нитрида титана). Исследования морфологии поверхности контртела после трибологических испытания подтверждаю сделанное предположение. Поверхность сопряженного тела (корундового шарика) характеризуется наличием бороздок, канавок (рис. 3.14).

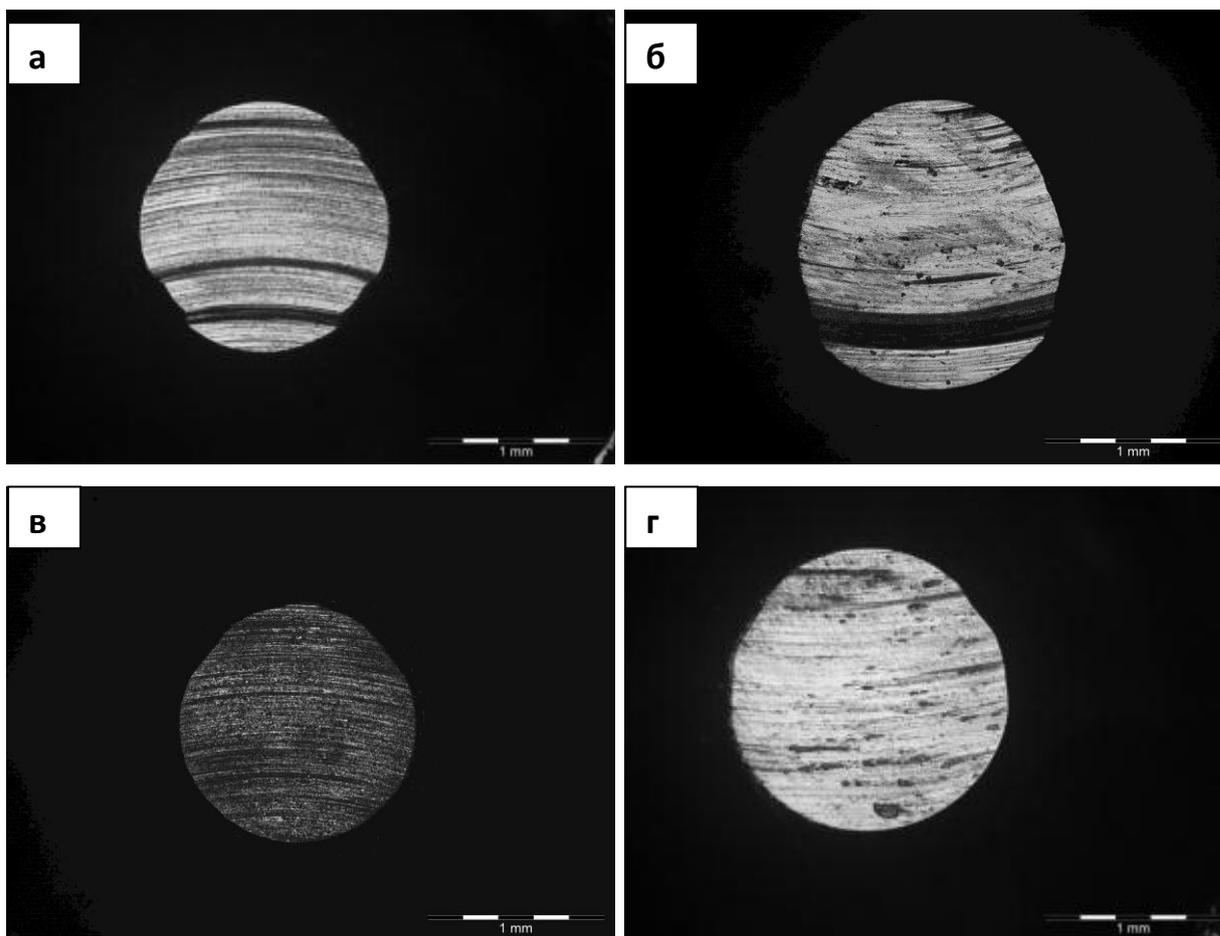


Рисунок 3.14 - Морфология поверхности пятна износа контртела после испытаний: а) TiN-Sn 50%-50% (80 мм); б) TiN-Sn 70%-30% (80 мм); в) TiN-Sn 50%-50% (160 мм); г) TiN-Sn 70%-30% (160 мм)

Значения фактора износа для образцов и контртела представлены в таблице 3.3. Наибольшее значения фактора износа контртела наблюдается при испытаниях с образцом TiN-Sn 70%-30%, нанесенного с расстояния 80 мм, в тоже время наименьший фактор износа соответствует этому же составу, но сформированного с расстояния 160 мм. Минимальное значение фактор износа образца также относится к данному состоянию TiN-Sn 70%-30% (160 мм) (тал. 3.3). При этом коэффициент трения для таких покрытий примерно в два раза выше 0,28 в сравнении с 0,16 для состава TiN-Sn 50%-50% (160 мм). На основании проведенного анализа, полученных значений фактора износа, можно сделать следующий вывод, что наибольшей износостойкостью обладает покрытие с 30% содержанием олова, нанесенное с расстояния 160 мм.

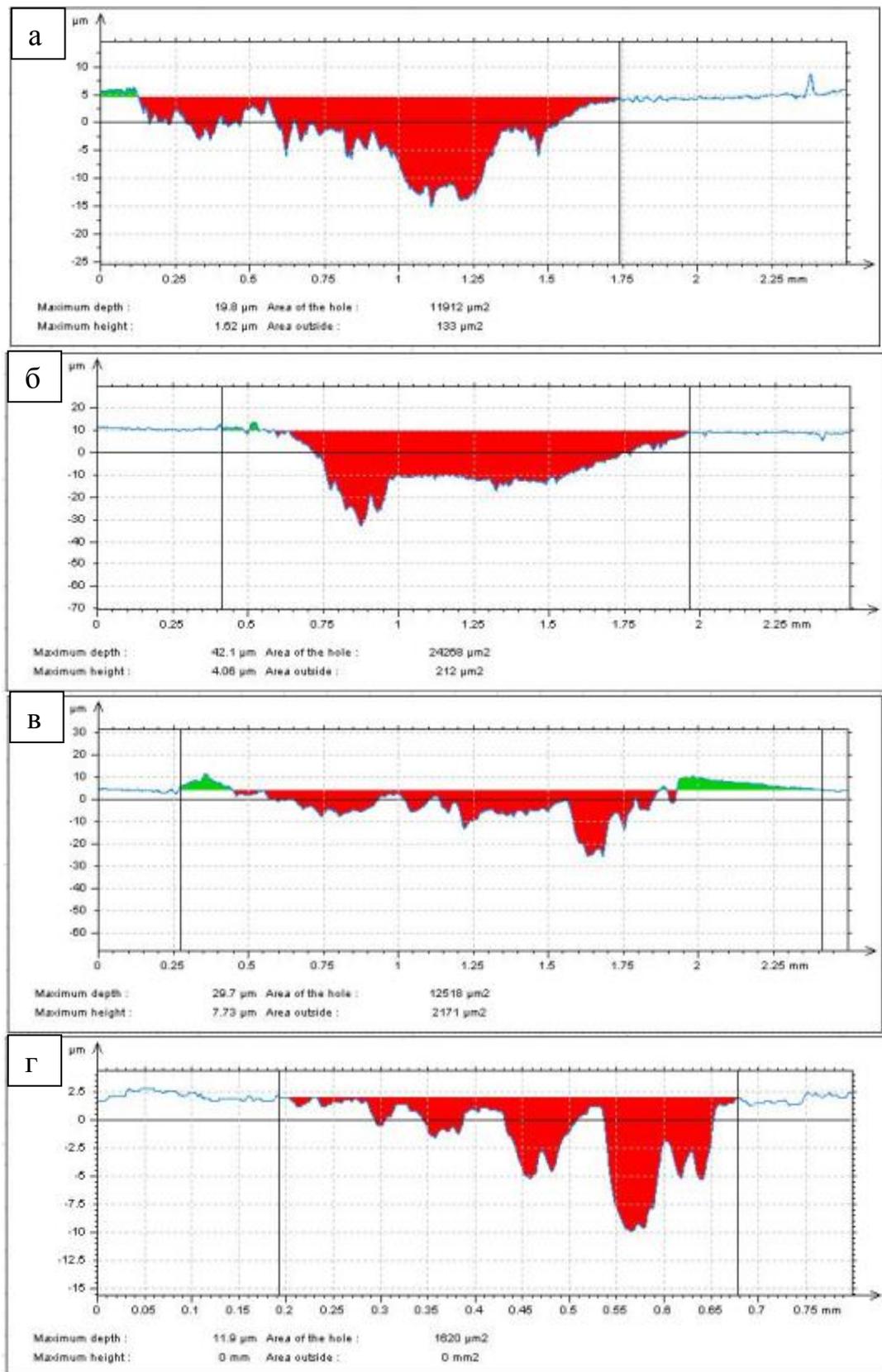


Рисунок 3.15 – Типичный вид профилограммы поперечного сечения дорожки износа: а) Ti-Sn 50%-50%(80 мм); б) Ti-Sn 70%-30%(80 мм); в) Ti-Sn 50%-50%(160 мм); г) Ti-Sn 70%-30%(160 мм)

Таблица 3.5. - Толщина покрытий и глубина разрушенного слоя после трибологических испытаний

Режим нанесения покрытия	Толщина покрытия, мкм	Глубина разрушаемого слоя, мкм
TiN-Sn 50%-50% (80 мм)	397	19,8
TiN-Sn 70%-30% (80 мм)	354	42,1
TiN-Sn 50%-50%(160 мм)	163	29,7
TiN-Sn 70%-30%(160 мм)	335	11,9

По данным, занесенным в таблицу 3.4 видно, что толщина нанесенного слоя у всех покрытий различна. Однако, при сравнении данных из таблицы 3.5 и рисунка 3.15 если сравнить с глубиной разрушаемого слоя можно сделать вывод, что толщина покрытия имеет на порядок превышает значение глубины разрушаемого слоя. Исходя из этих данных, можно сделать заключение, что ни в одном из случаев не произошло разрушение нанесенного покрытия в независимости от режима обработки.

Таблица 3.6. - Площадь поперечного сечения дорожки трения покрытия

Режим нанесения покрытия	Площадь поперечного сечения дорожки износа, мкм²
TiN-Sn 50%-50% (80 мм)	91000
TiN-Sn 50%-50% (160 мм)	4800
TiN-Sn 70%-30% (80мм)	19500
TiN-Sn 70%-30% (160 мм)	580

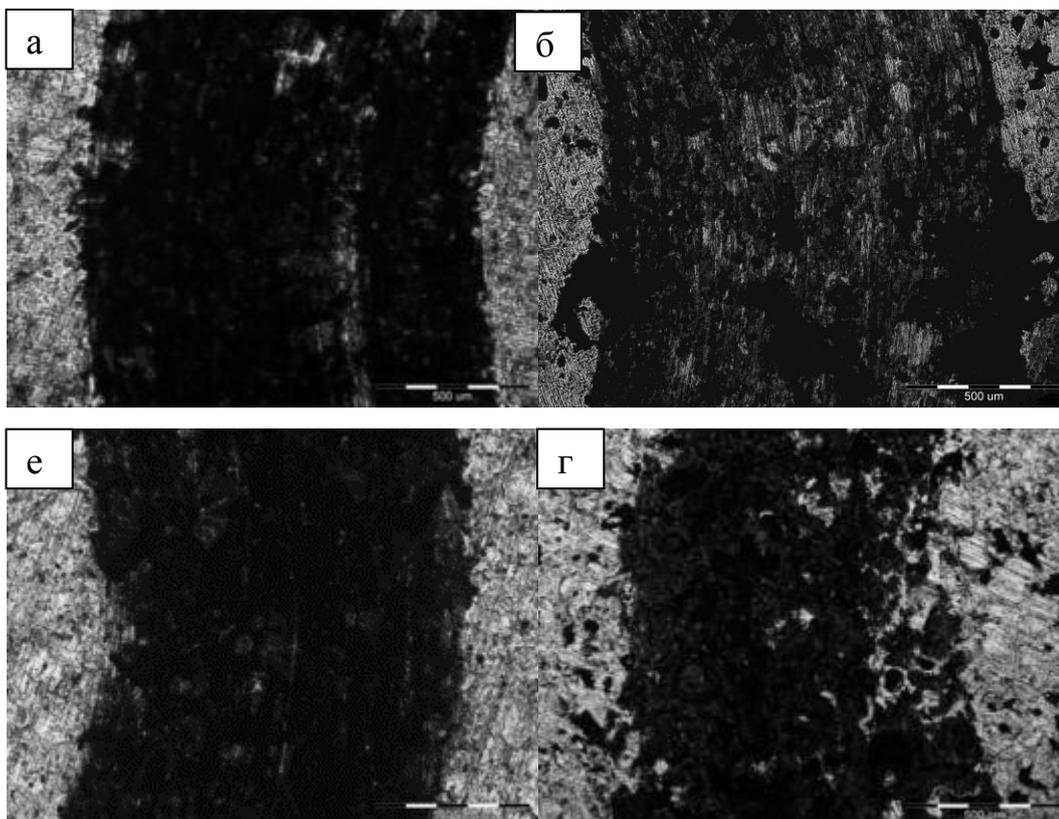


Рисунок 3.16 - Морфология поверхности дорожки износа на образцах: TiN-Sn 50%-50% (80 мм): а)х10; TiN-Sn 70%-30% (80 мм): б)х10; TiN-Sn 50%-50% (160 мм): в)х10; TiN-Sn 70%-30% (160 мм): г)х10

Анализ морфологии поверхности (рис.3.16) и площади поперечного сечения дорожки трения (табл. 3.6) показал, что преобладающим механизмом изнашивания является абразивный, но, как известно в чистом виде один из механизмов встречается редко. Также и в нашем случае, наряду со следами изнашивания характерными для абразивного механизма изнашивания, наблюдаются следа и адгезионного.

ВЫВОДЫ

1. Микроструктура покрытий независимо от режима нанесения представлена многослойной структурой с наличием небольшого количества дефектов (трещины, поры, крупные частицы титана, полностью не проазотированных). Основными фазами покрытия являются нитрид титана и олово.

2. Анализ зависимости изменения коэффициента трения от пути трения, а также морфологии поверхности дорожки трения показал, что разрушение покрытий не наступает в исследуемых условиях испытаний для всех режимов нанесения. При этом основным механизмом изнашивания является абразивный в комбинации с адгезионным.

3. Стоит отметить, что значения коэффициента трения в режиме нормального износа для покрытий, нанесенных с расстояния 160 мм $\mu = 0,016$, существенно меньше, чем с расстояния 80мм $\mu = 0,028$.

4. Результаты исследований трибологических характеристик показали, что наименьший показатель фактора износа для контртела и образца, что говорит о наибольшей износостойкости, наблюдается для фрикционной пары образец с покрытием 50%TiN-50%Sn (160 мм) и корундовый шарик – $9,0 \cdot 10^{-6}$ мм³/Нм и $1,5 \cdot 10^{-6}$ мм³/Нм, соответственно.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свойства, получение и применение тугоплавких соединений. Справочник / под ред. Т.Я.Косолаповой. - М.: Металлургия, 1986. -928 с.
2. Андриевский Р.А., Спивак И.И. Прочность тугоплавких соединений и материалов на их основе. Справочник. - Челябинск: Металлургия, 1989. - 368 с.
3. Андриевский Р.А., Ланин А.Г., Рымашевский Г.А. Прочность тугоплавких соединений. - М.: Металлургия, 1974. - 232 с.
4. Sundgren J.-E., Hentzell T.G. A review of the present state of art in hard coatings grown from the vapor phase // J. Vac. Sci. and Technol A. - 1968. - V. 4 - N5. - P.2259-2279.
5. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: Учебник для вузов / И.И. Беркович, Д.Г. Громаковский; Под ред. Д.Г. Громаковского; Самар. гос. техн. ун-т. Самара, 2000, 268 с.
6. Дедков Г.В. Нанотрибология: экспериментальные факты и теоретические модели // УФН. – 2000. – Т.170. - №6. – С.585 - 618.
7. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений. - М.: Машиностроение, 1990.- 528 с.
8. Балабанов В.И., Беклемышев В.И., Махонин Н.И. Трибология для всех. – М., 2002, 208 с.
9. Основы трибологии. Трение. Износ. Смазка / под ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2001, 664 с.
10. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений. - М.: Машиностроение, 1990.- 528 с.
11. Колпаков А.Я., Галкина М.Е. Тонкие твердые покрытия. Методы их получения, свойства и применение (учебное пособие) / Система «Пегас» БелГУ, www.pegas.bsue.edu.ru/course/category.php

12. Erdemir A., and Donnet C. Tribology of diamond-like carbon films: recent progress and future prospects // J. Phys. D: Appl. Phys. 39 (2006) R311–R327.

13. Журков С.Н., Бетехтин В.И., Бахтибаев А.Н. Временная и температурная зависимости прочности монокристаллов. // ФТТ. – 1969. – Т. 11. - № 3. – С. 690-695.

14. Matthews A., Franklin S., and Holmberg K. Tribological coatings: contact mechanisms and selection // J. Phys. D: Appl. Phys. – V.40. – 2007. – P.5463–5475.

15. Метрология поверхностей. Принципы, промышленные методы и приборы: Научное издание / Д. Уайтхауз – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2009. – 472с.

16. Вершинин Д.С., Смолякова М.Ю., Манохин С.С., Дручинина О.А., Ахмадеев Ю.Х. Исследование трибологических свойств азотирования титанового сплава ВТ16. Заводская лаборатория диагностика материалов – 2010. №12. Том76.

17. Olympus GX71 Инвертированные металлографические микроскопы [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://spegroup.ru/website//spegroup/upload/ecommerce/media/gx_51_71_rus.pdf

18. Э.Д. Браун, И.А. Буяновский и др. – Современная трибология итоги и перспективы. Издательство ЛКИ 2008 – С. 343.

19. www.efele.ru