

УДК 621.2.082.18

А. С. БЫЧКОВ

*Государственный научно-исследовательский экспертно-криминалистический центр
МВД Украины, Киев*

ПОВЫШЕНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТИТАНОВЫХ ДЕТАЛЕЙ САМОЛЕТОВ

Представлены результаты испытаний на износо- и фреттингостойкость титановых сплавов с различными вариантами покрытий, применяемых в самолетостроении. Показано преимущество молибденовых покрытий, нанесенных электроискровым способом, в повышении триботехнических характеристик титановых сплавов. На основе результатов исследований структуры, фазового состава, механических и триботехнических свойства титанового сплава ВТ6 с электроискровым молибденовым покрытием показана возможность использования такого покрытия для узлов трения из титановых сплавов.

Ключевые слова: титановые сплавы, покрытия, износостойкость, топография поверхности, фазовый состав, структура

Опыт эксплуатации самолетов и анализ эксплуатационных разрушений деталей, изготовленных из титановых сплавов, показывает, что превалирующее количество случаев выхода из строя агрегатов можно разделить на три типа: усталостное разрушение, износ и фреттинг.

Усталостные разрушения характерны для высоконагруженных деталей самолетов, работающих в условиях динамических знакопеременных напряжений. Учитывая, что в настоящее время имеется довольно надежный методический инструментарий расчета конструкций на усталость, появление эксплуатационных усталостных разрушений свидетельствует о просчете конструктора и считается конструктивным браком или влиянием нерасчетных внешних воздействий. К последним могут быть отнесены производственно-технологические нарушения, воздействия внешних факторов, особенно их комбинацией (неучтенные загрузки, воздействие внешней среды, нештатные перегрузки и т.п.). Для предотвращения усталостных разрушений выполняют усиления деталей путем увеличения прочности, размеров или жесткости с целью снижения действующих напряжений ниже пороговых для данного материала. Предварительную оценку усталостной прочности особоответственных агрегатов проводят по результатам стендовых испытаний, имитирующих внешние воздействия на испытываемый объект, а окончательную картину позволяет получить только эксплуатация.

В отличие от усталости, выход из строя узлов трения от износа и фреттинга предварительно рассчитать невозможно, стендовые и лабораторные испытания дают приблизительный результат в силу многофакторности внешних воздействий, поэтому ответ на вопрос живучести трибоузла дает только эксплуатация. Важность вопроса надежности узлов трения подтверждается такими цифрами: более 50 % случаев выхода из строя узлов и агрегатов самолета связана с изнашиванием подвижных шарнирных соединений, 90 % ремонтных деталей в самолете – результат износа узлов трения [1]. Узлы трения в самолете подвержены значительным вибрационным нагрузкам, воздействию внешних факторов (пыль, существенные перепады температур от 213 до 373 К). В связи с этим практиче-

ски невозможно найти универсальный способ защиты трибоузлов от износа, и поэтому необходим индивидуальный подход к каждому узлу.

Известно [2], что титановые сплавы имеют низкие триботехнические характеристики, что не позволяет их использование в узлах трения, в частности, самолета. С другой стороны, титановые сплавы обладают максимальной (среди конструкционных материалов) удельной прочностью [3], что делает их незаменимыми при изготовлении некоторых конструкций самолета, например, узлов шасси, имеющих подвижные соединения. В триботехнике принято для узлов трения использовать защитные покрытия различного функционального назначения, изменяющие в нужном направлении свойства трущихся поверхностей. В случае самолетных конструкций необходимо учитывать воздействие покрытий на механические свойства основы (в первую очередь на усталость).

В самолетостроении для титановых трибоузлов традиционно используются гальванические никелевые и хромовые покрытия [4], которые существенно снижают усталостные характеристики основы и, следовательно, ограничивают область использования. В связи с этим поиск покрытий, которые бы повышали триботехнические свойства поверхности, а также не снижали усталостных и механических характеристик основы, является важным для титановых узлов трения самолета.

Наиболее широко применяемым в самолетостроении высокопрочным титановым сплавом является сплав ВТ22, химический состав которого представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав сплавов ВТ6 и ВТ22 в масс. % (ОСТ1 90013-81) [1]

Сплав	Ti	Al	V	Mo	Fe	Cr
ВТ6	основа	5,3–6,8	3,5–5,3	–	–	–
ВТ22	основа	4,4–5,7	4,0–5,5	4,0–5,5	0,5–1,5	0,5–1,5

Для повышения триботехнических свойств сплава ВТ22 на поверхность испытуемых образцов наносили различные покрытия как традиционные, так и новые. Образцы затем испытывались на трение в одинаковых условиях на машине трения М22М со смазкой гидрожидкостью АМГ10, которая подавалась в зону трения фитильным способом (граничное трение). Результаты испытаний представлены в табл. 2.

Таблица 2

Износостойкость покрытий на титане

Покры- тие	Без покры- тия	ДЭХО	ВКНА	N ₂	ПГ10Н-01	TiB ₂ - NiMo	Ni	Cr	Mo
Линейный износ, мкм/км	360	158	21,6	14,6	13,9	12,8	12,4	11,2	9,3
Примечание: ДЭХО (диффузионная электрохимическая обработка) и Cr наносили гальваническим способом; ВКНА и ПГ10Н-01 - плазменным способом; Ni – химическим способом; N ₂ – химико-термическая обработка (азотирование); TiB ₂ -NiMo и Mo – элект–роискровым легированием.									

Эти же покрытия испытывали на фреттингостойкость на машине МФК1 по одинаковому режиму: амплитуда перемещений $A = 175$ мкм; нагрузка 20 МПа; частота $\nu = 30$ Гц; температура $T = 273$ К; база испытаний $N = 500$ тыс. циклов. Результаты испытаний представлены в табл. 3.

Таблиця 3

Фреттингостойкость покрытий на титане

Покры- тие	Без пок- рытия	ДЭХО	ВКНА	N ₂	ПГ10Н-01	TiB ₂ - NiMo	Ni	Cr	Mo
Износ, мкм	212	196	31,2	14,6	26,9	19	28,4	12,2	11,7

Из представленных результатов испытаний следует, что электроискровое легирование титановых сплавов молибденом приводит к существенному повышению триботехнических свойств поверхности. Ряд исследователей [4; 5] отмечают хорошие триботехнические свойства молибденовых покрытий при работе в серосодержащих смазках. При использовании в качестве подложки под покрытие титановых сплавов можно ожидать и повышения механических характеристик композита молибденовое покрытие – титановый сплав. Молибден имеет более близкий к титану модуль сдвига (по сравнению с жесткими боридными, оксидными или нитридными покрытиями), высокую пластичность и неограниченную растворимость в β -титане [3]. Все это позволяет прогнозировать низкий уровень остаточных напряжений на границе покрытие-подложка, что должно обеспечивать высокую усталостную прочность и хорошие адгезионные свойства.

Для исключения влияния химического состава подложки на свойства электроискровых молибденовых покрытий исследование структуры, фазового состава, механических свойств, их изменения в процессе нагревов и трибоиспытаний дальнейшие исследования проводили на сплаве ВТ6, в состав которого не входит молибден (табл. 1).

Покрытие наносилось по ранее отработанному для сплава ВТ22 ручному режиму на установке ЭЛИТРОН 20: рабочий ток $I = 1,5$ А; емкость конденсатора $C = 210$ мкФ; электрод – проволока Мо диаметром 5 мм.

Для более четкого определения влияния молибденового покрытия на структуру и свойства сплава специально (методами скоростной термомеханической обработки [6]) была создана мелкозернистая глобулярная микроструктура, склонная к трансформации в более грубую при внешних механических и термических воздействиях и, соответственно, к изменению механических свойств в сторону ухудшения.

При исследовании микроструктуры образцов (рис. 1) после электроискрового легирования молибденом установлено, что структура подложки соответствует исходной и характеризуется мелкозернистым строением с глобулярными выделениями α -фазы и отсутствием границ бывшего β -зерна. Размер структурных составляющих ≈ 3 -4 мкм. Покрытие довольно равномерное толщиной около 20 мкм, граница между покрытием и основой четко обозначена. Покрытие имеет незначительную пористость.

Никаких структурных изменений на границе покрытие - основа не обнаружено, что свидетельствует о незначительном термическом влиянии процесса электроискрового легирования на материал основы.

Рентгенофазовый анализ поверхности образцов после нанесения электроискрового молибденового покрытия показал существенное изменение фазового состава поверхности по сравнению с исходным состоянием (рис. 2). Исходное состояние сплава характеризуется двухфазной ($\alpha + \beta$)-структурой с содержанием β -фазы в пределах 10 % [3], что и наблюдается на рентгенограмме. После нанесения покрытия на поверхности образцов видны отражения только от β -фазы

или молибдена. Пики β -фазы титана и пики молибдена совпадают, поэтому для определения химического и фазового состава поверхности были проведены исследования на микроанализаторе.



Рис. 1. Структура сплава ВТ6 с электроискровым покрытием молибденом

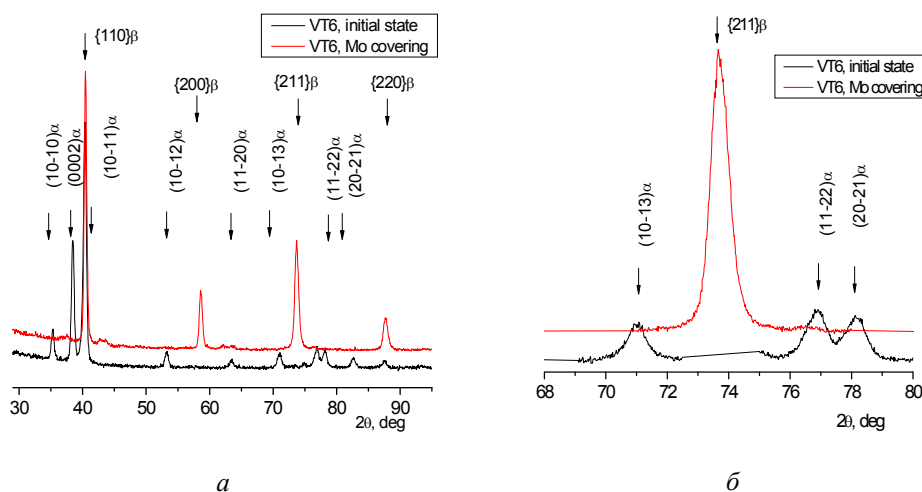


Рис. 2. Фазовый состав сплава ВТ6 до (а) и после (б) электроискрового легирования молибденом

Исследования проводились на образцах после нанесения покрытий и после трибоиспытаний на дорожке трения; результаты исследований представлены на рис. 3, 4.

После проведения испытаний на трение была изучена с помощью электронного микроскопа топография поверхности дорожек трения и фазовый состав на дорожке и вне ее; результаты исследований представлены на рис. 5-7.

Обсуждение результатов исследований. Отработанный режим электроискрового легирования молибденом позволяет наносить равномерные толщиной ≈ 20 мкм покрытия вне зависимости от марки титанового сплава (подложки). Режим нанесения покрытий не оказывает большого энергетического влияния на подложку, о чем свидетельствует отсутствие структурных изменений в сплаве, даже учитывая специально подготовленную мелкозернистую структуру. Электронномикроскопические исследования (рис. 3, 4), с одной стороны, подтвер-

ждают данные световой микроскопии о толщине и равномерности покрытия, а с другой – позволяют более досконально представить строение самого покрытия. Показано, что покрытия состоят из двух слоев, один из которых (наружный) является молибденом, а второй, находящийся под ним, представляет собой смесь переменного состава молибдена и сплава ВТ6. Соотношение между этими слоями различное и, очевидно, связано с импульсным характером нанесения покрытий, а, значит, неравномерностью энергетического воздействия по площади.

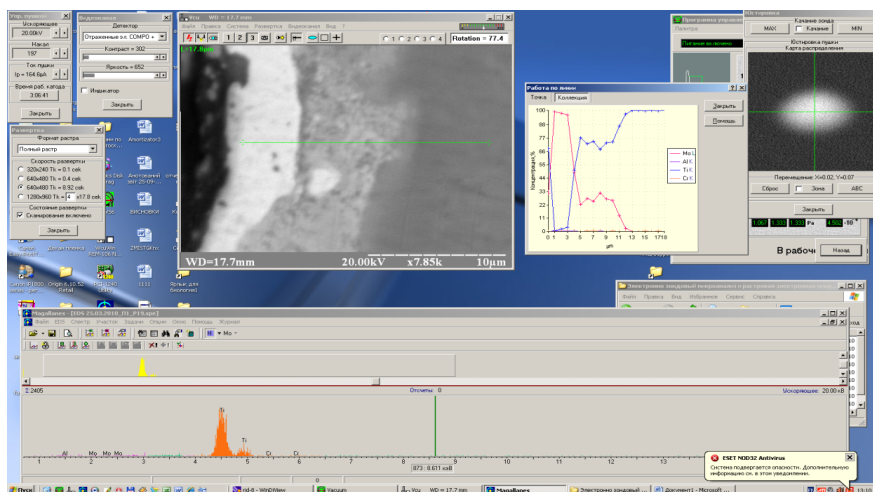


Рис. 3. Распределение молибдена и титана в покрытии после электроискрового легирования

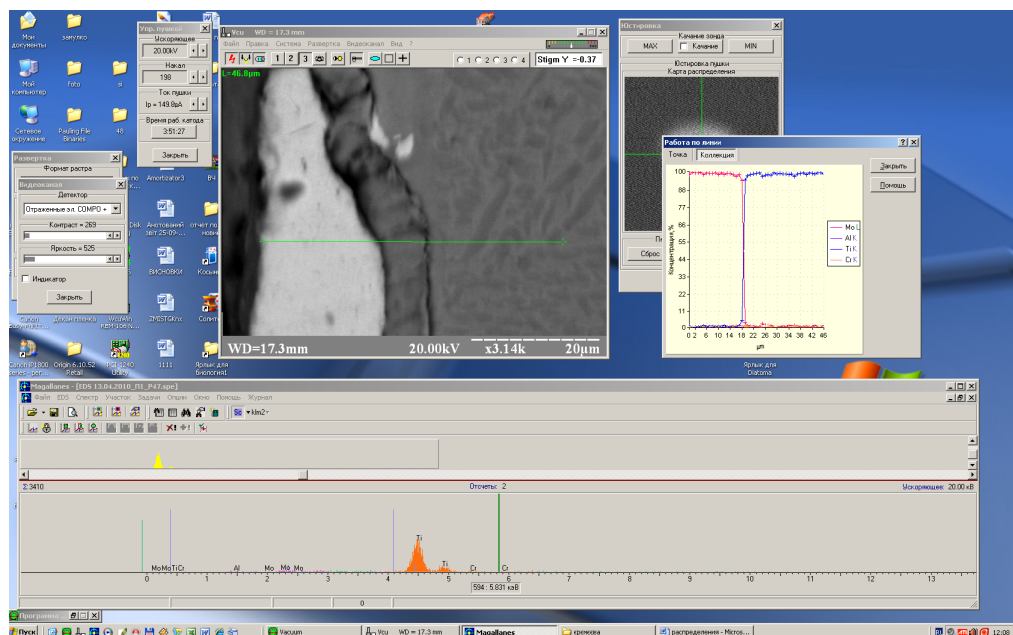
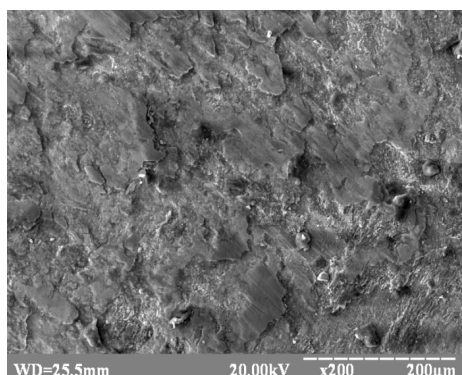


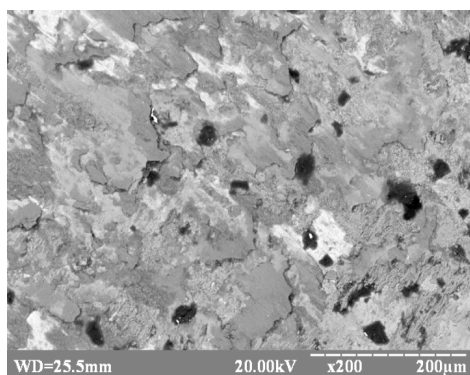
Рис. 4. Распределение молибдена и титана в покрытии после трибоиспытаний



Рис. 5. Дорожка трения на сплаве ВТ6 после испытаний на фреттинг-коррозию



a



б

Рис. 6. Топография поверхности дорожки трения молибденового покрытия в отраженных электронах (*a*) и режиме «сепро» (*б*)

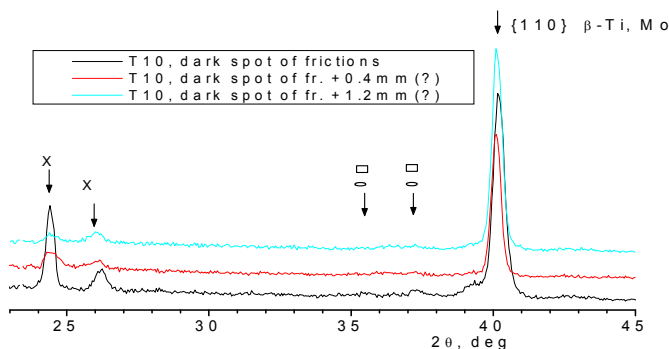


Рис. 7. Рентгенофазовый анализ на дорожке трения и за ее пределами:
o – α'' – мартенсит $2\theta = 34^{\circ}48'$ (11-20), $36^{\circ}12'$ (02-20), $38^{\circ}36'$ (0002);
 $\square$ – α' – мартенсит $2\theta = 35^{\circ}$ (10-10), $38^{\circ}24'$ (0002); *x* – MoO_3 ; *xx* – Mo_2O_3

Триботехнические испытания (на износ и фреттинг-коррозию) показали существенное, на порядок (табл. 2, 3) повышение износостойкости по сравнению с непокрытым сплавом и более высокие триботехнические характеристики по сравнению с другими покрытиями, используемыми в авиационной промышленности. Учитывая преимущества молибденовых покрытий в дальнейшем, исполь-

зуя методы электронной микроскопии и рентгенофазового анализа, была сделана попытка объяснить природу такого повышения триботехнических свойств.

Исследование топографии поверхности трения после испытаний позволяет утверждать, что существенное уменьшение износа связано со сменой механизма износа непокрытого сплава и молибденового покрытия. Дорожка трения на непокрытом сплаве (рис. 5) как при испытаниях на фреттинг-коррозию, так и на трение-износ, характеризуется грубой поверхностью, вырывами металла и следами абразивного изнашивания. Такая поверхность трения характерна для адгезионного механизма изнашивания, что говорит о непригодности испытанных пар трения для использования в трибоконструкциях. Дорожки трения молибденовых покрытий характеризуются ровной гладкой поверхностью без видимых повреждений. Топография поверхности дорожки трения (один и тот же участок), снятая в отраженных электронах и режиме «сетро» (рис. 6), позволяет утверждать, что изнашивание молибденового покрытия происходит по окислительному механизму. На рис. 6, б показана дорожка трения, снятая в режиме «сетро», на которой видны светлые и темные участки, которые можно интерпретировать как участки с «толстыми» оксидными слоями (светлые участки) и участки с «ювенильной» поверхностью (темные участки), на которых произошло отслоение оксидов, толщина слоя которых превысила критическую. Если изнашивание трибопары происходит по окислительному механизму, то интенсивность изнашивания, как правило, является минимальной, что мы и наблюдали.

Рентгенофазовый анализ сплава ВТ6 с молибденовым покрытием до и после трибоиспытаний подтверждает и расширяет результаты электронномикроскопических исследований. Фазовый состав поверхности после нанесения покрытия меняется (рис. 2) и характеризуется наличием только высокотемпературной метастабильной при комнатной температуре β -фазы титана, пики которой совпадают с молибденом, и полным отсутствием низкотемпературной α -фазы, которой в равновесном состоянии в сплаве ВТ6 должно быть 90 %. Это свидетельствует о термически нестабильном фазовом составе покрытия. После триботехнических испытаний на дорожках трения появляются пики α -фазы, что свидетельствует о прохождении фазовых превращений, стимулированных трением, причем α -фаза появляется в виде мартенсита α' - и α'' -фаз, то есть мартенсита деформации (рис. 7). Кроме того, на дорожках трения и за ее пределами наблюдается существенная разница в наличии на поверхности оксидов молибдена (MoO_3 и Mo_2O_3), что также подтверждает окислительный механизм изнашивания покрытия. Изменение химического состава по сечению покрытия (рис. 3, 4) также свидетельствуют о прохождении диффузионных и структурных процессов при трении. Поскольку основной задачей износостойкого материала при трении является диссипация энергии, то наличие структурных превращений как диффузионного, так и мартенситного характера объясняет повышенную износостойкость молибденовых покрытий, полученных электроискровым легированием титановых сплавов. То есть часть энергии, которая выделяется в трибоконтакте до или параллельно с образованием поверхностных оксидов, расходуется на фазовые и структурные превращения, чем уменьшает износ материала.

Выводы. В результате выполненных исследований установлено:

1. Нанесение молибденовых покрытий электроискровым способом позволяет существенно, на порядок, повысить износостойкость титановых сплавов, при этом меняется механизм изнашивания с адгезионного на окислительный.

2. Нанесение молибденового покрытия по разработанному режиму не приводит к структурным изменениям в материале полочки.

3. Установлено прохождение диффузионных процессов и фазовых изменений в покрытии в процессе трения.

4. Показана возможность использования электроискровых молибденовых покрытий для трибоузлов самолетов из титановых сплавов.

Список литературы

1. Конструкционные материалы в самолетостроении / А.Г. Моляр, А.А. Коцюба, А.С. Бычков, О.Ю. Нечипоренко – К. : КВИЦ, 2015. – 400 с.
2. Цвиккер У. Титан и его сплавы. – М. : Металлургия, 1979. – 512 с.
3. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы состав, структура, свойства / Справочник. – М. : ВИЛС-МАТИ, 2009. – 519 с.
4. Выбор износостойких покрытий для титановых деталей, работающих в условиях знакопеременных нагрузок и упругих деформаций / А.Г. Моляр, О.М. Ивасишин, В.А. Краля и др. // «Ti – 2007 в СНГ». Международная конференция, 15-18 апреля 2007 г., Ялта – сборник трудов: Изд-во ИМФ НАН Украины. – С. 287–292.
5. Хасуй А., Моригаки О. Наплавка и напыление. – М. : Машиностроение, 1985. – 240 с.
6. Ивасишин О.М., Марковский П.Е., Бондарчук В.И. Оптимизация термомеханической обработки титановых β -сплавов для получения дисперсной однородной структуры и повышения комплекса механических характеристик // Научно-технический журнал «Titan». – № 2 (17), 2005. – С. 42–49.

Стаття надійшла до редакції 17.02.2016

А. С. БИЧКОВ

ПІДВИЩЕННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТИТАНОВИХ ДЕТАЛЕЙ ЛІТАКІВ

Представлено результати випробувань на зносо- та фретінгостійкість титанових сплавів з різноманітними варіантами покриттів, що застосовують у літакобудуванні. Показано переваги молибденових покриттів, що нанесені електроіскровим способом, в підвищенні триботехнічних характеристик титанових сплавів. На основі результатів досліджень структури, фазового складу, механічних та триботехнічних властивостей титанового сплаву BT6 з електроіскровим молибденовим покриттям показано можливість застосування такого покриття для вузлів тертя з титанових сплавів.

Ключові слова: титанові сплави, покриття, зносо- та фретінгостійкість, топографія поверхні, фазовий склад, структура.

A. S. BYCHKOV

INCREASE OF TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF AIRPLANES TITANIC DETAILS

The results of tests on wear resistance and fretting resistance of titanic alloys with different variants of the coatings applied in aircraft construction are presented. The molybdenum coating in the electrospark way allows to raise wear resistance of titanic alloys. Thus there is a change of the mechanism of wear process with adhesive on oxidizing. The molybdenum coating on the developed technology does not lead to structural changes in a substrate material. Passage of the diffusion processes and phase changes during friction is established. On the basis of the researches results of structure, phase composition, mechanical and tribotechnical properties of titanic alloy BT6 with electrospark molybdenum coating the opportunity of use of such coating for friction units from titanic alloys is shown.

Keywords: titanic alloys, coatings, wear resistance, surface topography, phase composition, structure.

Бычков Андрей Сергеевич – кандидат юридических наук, заместитель заведующего лабораторией инженерных, экономических, товароведческих исследований и оценочной деятельности Государственного научно-исследовательского экспертно-криминалистического центра МВД Украины, г. Киев.