

УДК 621-839

М.В. Алексеев, студент Московский Государственный Горный Университет

Научный руководитель: М.С. Островский, профессор, д.т.н. Московский Государственный Горный Университет

## **1. Применение современных нанопокровтий в горном машиностроении.**

*В статье рассмотрена возможность применения современных нанопокровтий в деталях и механизмах горной техники. Предложен экспресс метод оценки фреттингостойкости при широких возможностях моделирования условий испытаний.*

*The possibility of application modern nanocoatings in details and mechanisms of mining technique is considered in report. An express method of fretting examination with wide technique proprieties is offered in the report.*

*Фреттинг, покрытия, экспресс метод контроля качества противоизносных покровтий.*

*Fretting corrosion, coatings, quality monitoring of coatings.*

Повышение долговечности деталей машин и механизмов является одной из первоочередных задач горного машиностроения, где условия эксплуатации характеризуются наиболее высокими динамическими нагрузками.

При этом мы исходим из того, что более глубокое изучение триботехнических процессов, происходящих в лимитирующих элементах машин, и управление этими процессами являются большим резервом повышения ресурса и эффективности использования техники.

Как правило, наиболее уязвимыми элементами в функционировании любых машин являются места сопряжений ее деталей. В случае горной техники узлы трения и фрикционные соединения находятся в особо тяжелых условиях. Именно в этих местах и предлагается в первую очередь искать причины тех деградационных процессов, которые нередко и приводят к полному выходу из строя всей сложной техники. Наиболее пагубное воздействие на пары трения оказывает фреттинг. Именно этот процесс нуждается в более тщательном изучении и прогнозировании.

Повышенная интенсивность износа деталей наблюдаемая в горных машинах, как показывает опыт, обусловлена воздействием вибрации на трибосопряжения. Возникающие при этом знакопеременные малые микросмещения (с амплитудой от

нескольких до десятков мкм) вызывают снижение прочностных свойств поверхностных слоев. Такой процесс носит название фреттинг, который и является одной из главных первопричин отказа узлов и механизмов горного оборудования. В технике фреттинг встречается в таких элементах как внутренняя и наружная посадочные поверхности подшипников, посадочные шейки на валах (рис. 1) и элементы гидравлики (золотники и клапаны). [1].

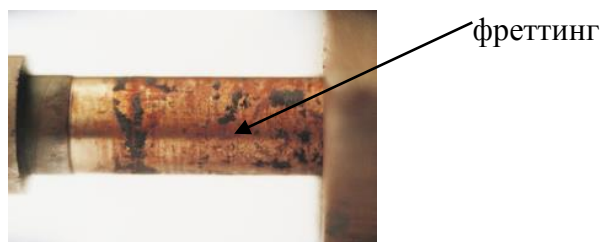


Рис. 1. Пример фреттинга на оси шарнирного соединения.

Механизм фреттинга (рис.2) можно представить при контактном взаимодействии 2х поверхностей нижняя из которых неподвижна, а верхняя прижата усилием  $Q$ . К верхнему образцу так же приложена тангенциальная периодическая сила частотой  $\omega$ , которая вызывает малые микропроскальзывания с амплитудой от нескольких до десятков мкм.

При таком взаимодействии наблюдаются интенсивные разрушения поверхностных слоев. Такое разрушение как показывают наши исследования и исследования других авторов обусловлено следующими процессами:

1. Пластическое течение, сопровождаемое наклепом отдельных зон области контакта.
2. Микросхватывания, сопровождаемые вырывами, возникающими в отдельных местах где нарушена сплошность защитных оксидных слоев.
3. Усталостные процессы, возникающие вследствие передеформирования отдельных участков микро выступов в условиях циклических нагрузок.
4. Абразивное действие запертых в зоне контакта продуктов разрушения.

Все названные физико-химические процессы активируют взаимодействие с окислительной средой. В результате всего этого фреттинг имеет особый характер проявления, отличный от того, что наблюдается при обычных видах износа так и при атмосферной коррозии.

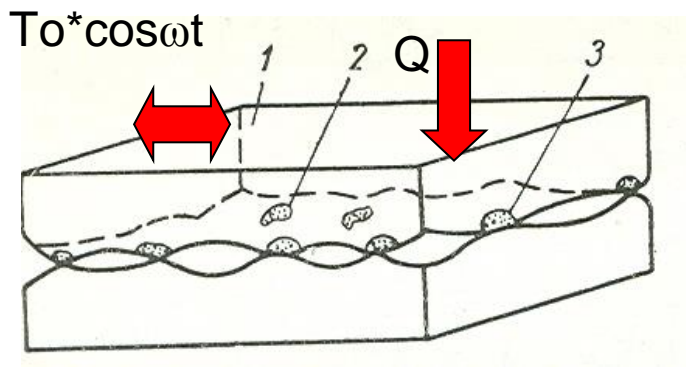


Рис. 2. Механизм фреттинга.

Снизить вредоносный эффект от фреттинга и тем самым продлить ресурс механизма – те задачи которые предлагается решать путем нанесения современных триботехнических покрытий.

Состав и свойства износостойких покрытий в значительной степени зависят от техники и технологии их нанесения. Методы нанесения путем осаждения делятся на две большие группы: физические (ФОП, или PVD) и химические (ХОП, или CVD) (рис. 3). Внутри этих двух основных групп существует довольно большое количество разновидностей.

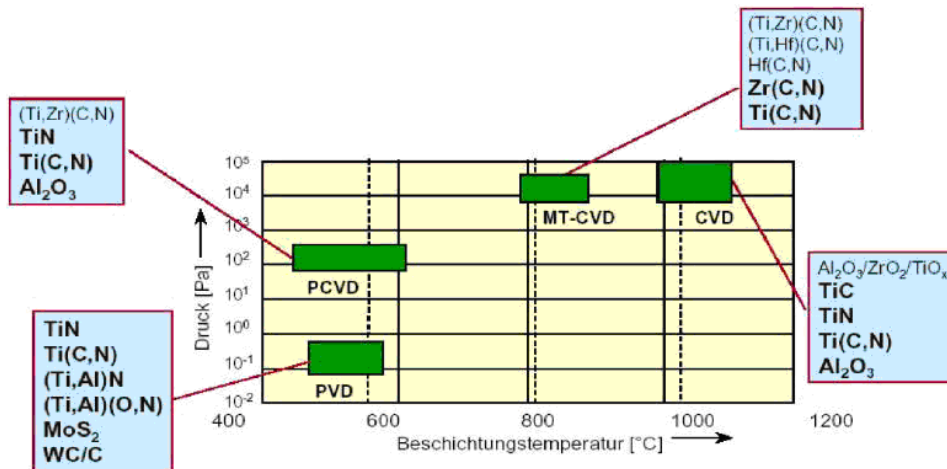


Рис. 3. Методы нанесения покрытий, материалы слоёв и условия осаждения

*Метод PVD (physical vapour deposition).*

При физическом осаждении (PVD) материал покрытия переходит в газовую фазу из твердого состояния в результате испарения под воздействием тепловой энергии или в результате распыления за счет кинетической энергии столкновения частиц материала. Энергия, распределение и плотность потока частиц определяется методом нанесения,

параметрами процесса и формой источника частиц. Нанесение покрытий методом PVD происходит при не высокой температуре (до 450°C), что не приводит к практическим ограничениям по материалам, на которые наносится покрытие. Все процессы PVD происходят в вакууме или в атмосфере рабочего газа при достаточно низком давлении (около  $10^{-2}$  мбар). Это необходимо для облегчения переноса частиц от источника (мишени) к изделию (подложке) при минимальном количестве столкновений с атомами или молекулами газа. Это же условие определяет обязательность прямого потока частиц. В результате покрытие наносится только на ту часть изделия, которая ориентирована к источнику частиц.

Одними из основных факторов, определяющих качество покрытия, нанесенного методом физического осаждения, являются чистота исходных материалов, необходимый уровень вакуума и чистота реакционного газа.

Все процессы нанесения покрытий методом физического осаждения можно разделить на две большие группы: процессы, использующие испарение, и процессы, использующие распыление.

При использовании дугового испарения зажигается электрическая дуга (рис. 4). В англоязычной литературе этот метод носит название AIP (Arc Ion Plating — дуговое ионное осаждение). После зажигания дуги ее перемещение по поверхности мишени, установленной в медном охлаждаемом катоде, управляется с помощью системы магнитов.

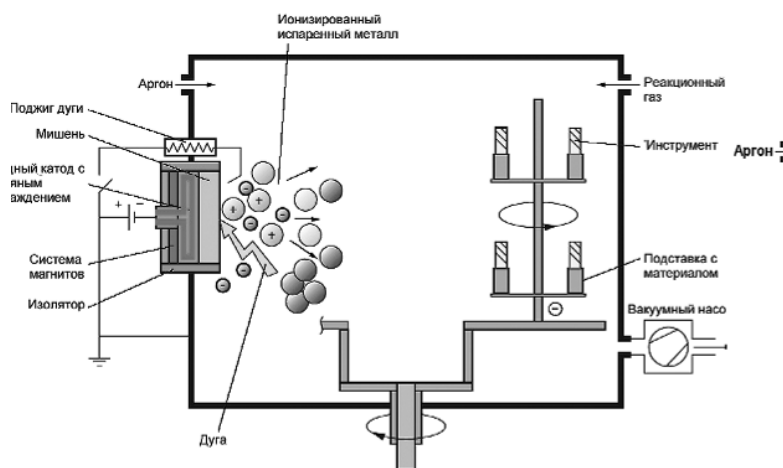


Рис. 4. Дуговое испарение.

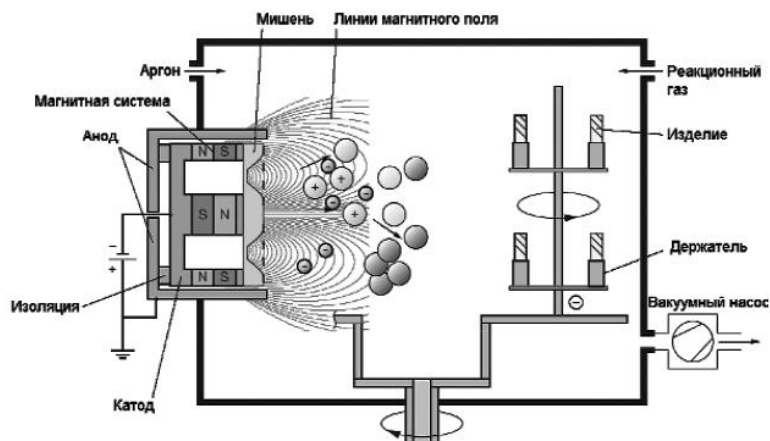


Рис. 5. Магнетронное распыление.

Катод устанавливается вертикально на стенки камеры и к нему подводится отрицательное напряжение. В момент розжига дуги на поверхности мишени возникает местный расплав. Начинается испарение металла мишени. Однако при испарении вместе с ионами материала ускоряются и неионизированные частицы металла (капли), которые также осаждаются на поверхности изделия. Наличие этой капельной фазы является основным недостатком дугового метода, так как капли ухудшают качество поверхности инструмента после покрытия. В ходе испытаний вредные последствия данного недостатка сводились к минимуму при помощи системы затворов, предохраняющих изделие на первом этапе процесса нанесения.

На дуговых установках наносились нанокompозитные (состоящие из нескольких металлов) и наномногослойные покрытия, а так же специальные трибологические покрытия. Для этого применялись различные мишени.

Из установок, использующих метод распыления, наибольшее применение находят установки на основе магнетронов (в английском языке MSIP — Magnetron Sputtering Ion Plating — ионное осаждение магнетронным распылением). При приложении высокого напряжения в атмосфере инертного газа (как правило, аргона) возникает тлеющий разряд (рис. 5). Ионы инертного газа из плазмы, обладающие высокой энергией, ударяются в мишень, включенную как катод. За счет ударного импульса происходит высвобождение материала, он распыляется, минуя промежуточную жидкую фазу. [2].

Эти два вышеописанных способа нанесения предложены нами, исходя из относительной простоты внедрения в производственный процесс.

Твердые DLC покрытия решают трибологическую проблему с компонентами машин, которые могут быть покрыты при температуре 100-500°C. Благодаря высокой твердости (до 36 ГПа), снижается абразивный износ. Это приводит к повышению

надежности детали при “сухой” эксплуатации и, с точки зрения окружающей среды, наносит меньший вред чем смазочные вещества.

Отдельную группу покрытий составляют самосмазывающиеся покрытия. Это трибологические покрытия, создающие эффект смазывания даже в сухом состоянии. В результате сокращается поверхностное трение между деталями и связанное с ним выделение тепла.

Так же для нанесения на поверхности деталей в трибосопряжениях машин мы использовали твёрдые самосмазывающиеся покрытия. Одним из основных преимуществ такого рода покрытия перед традиционным MoS<sub>2</sub> является возможность их нанесения в том же цикле, что и основные покрытия. К ним относятся, среди прочих, покрытия на основе аморфного углерода (графита) и водосодержащие покрытия металл-углерод. [3].

Diamond-like carbon (DLC) - это алмазоподобная метастабильная форма аморфного углерода, содержащая значительную долю sp<sup>3</sup> связей. Имеет высокую твердость, химическую инертность, оптически гладкую поверхность и низкие фрикционные свойства.

Цели, преследуемые нами при нанесении DLC-покрытий: обеспечение сочетания свойств традиционных и нанокompозитных покрытий (особенно с хорошей адгезией) с преимуществами DLC-покрытий (таких как очень гладкая поверхность и низкий коэффициент трения).(Рис.6.). Это достигается путем двойного осаждения покрытий (PVD и DLC-покрытия) в одной камере за один технологический цикл.

Применение DLC покрытий выгодно даже при единичном производстве для:

-деталей машин высокого качества, медицинских приборов, деталей авиакосмической промышленности.

-режущего инструмента для композитных материалов, а также штампов и пресс-форм

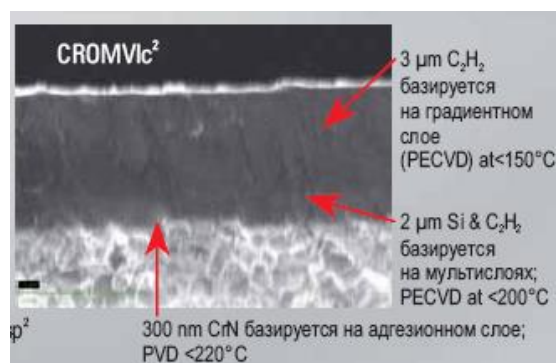


Рис.6. Пример структуры DLC покрытия.

Характеристики DLC покрытий:

- двойное нанокompозитное покрытие;
- предельно высокая твёрдость;
- высокая стойкость к царапанию (Рис.7.);
- низкий коэффициент трения 0,06;
- возможность применения для деталей машин из высокопрочных материалов;
- малая шероховатость: Ra 0.1-0.03 мкм.



Рис.7. Контроль адгезии. Высокая стойкость к царапанию.

Выявленные и подтверждённые в ходе экспериментов свойства DLC покрытий способствуют широкому их применению в трибосопряжениях горных машин. (Рис. 8 – Рис.9)

В частности в ходе испытаний наиболее эффективно себя зарекомендовала структура, в которой алмазоподобное (DLC) покрытие наносилось на слой нанокompозитного покрытия (Рис.6). Такой симбиоз напылений привёл к значительному росту износостойкости при вибрациях по сравнению с другими покрытиями.



Рис. 8. – Рис.9. Примеры применения покрытий в машиностроении.

Многие трибосопряжения машин (особенно горных) имеют большие габариты, что затрудняет проведение испытаний непосредственно в рабочих условиях. В связи с этим возникает необходимость разработки экспресс метода оценки технических характеристик покрытий, как общего назначения так и триботехнических. Нами создана установка, которая позволяет проводить испытания покрытий при вибрациях. (Рис.10). Даная

установка, которая называется нами «Вибротрибометр» позволяет моделировать эффект фреттинга, который и является наиболее пагубным при работе механизмов.

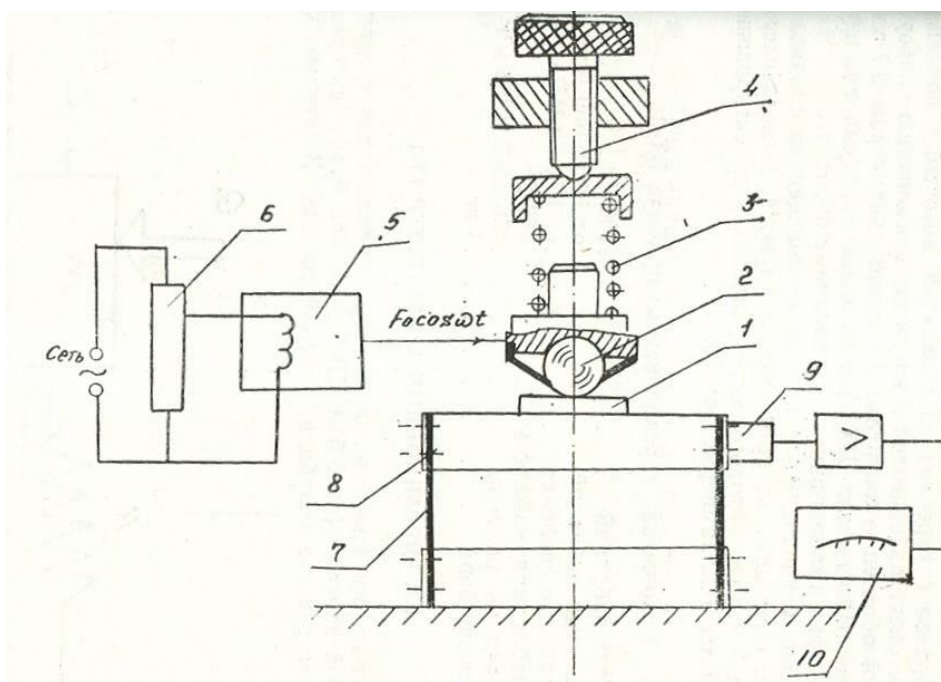


Рис. 10. Вибротрибометр

Техническая характеристика прибора:

- Частота вибраций.....50 Гц
- Амплитуда вибраций.....10-30 мкм
- Контактные давления.....1-60 МПа
- Потребляемая мощность.350 Вт

В ходе испытаний на плоский образец с покрытием воздействуют сферическим индентером, к которому приложена нормальная и тангенциальная нагрузка. Таким образом индентеру задаются знакопеременные микроперемещения (вибрации) с нужной амплитудой. В результате взаимодействия соприкасающихся поверхностей на образце возникают разрушения поверхностного слоя. Изменяя амплитуду и частоту мы моделируем различные трибосопряжения машин, в том числе и горных.

В комплекс оборудования, применяемого для экспресс метода определения качества износостойких покрытий входят оптический микроскоп и профилометр. Данные приборы позволяют получить наиболее полную характеристику применяемому средству защиты от фреттинга.

Оптический микроскоп позволяет вести визуальный контроль характера разрушений, а так же производить измерения геометрических размеров пятен контакта. (Рис.11. - Рис.14.)



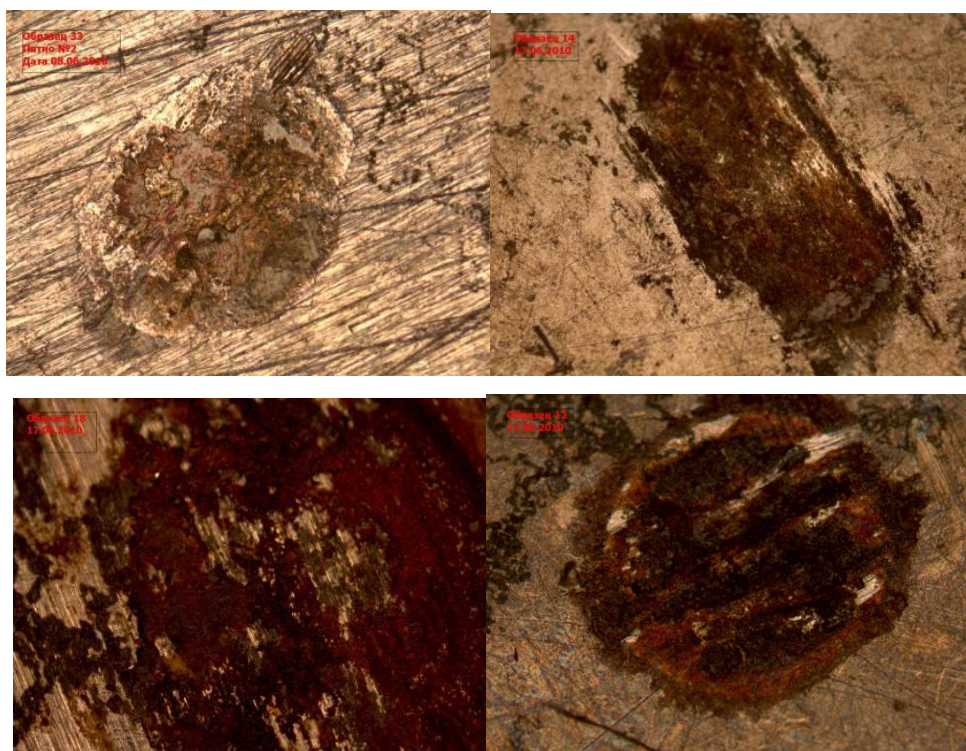


Рис. 11. - Рис.14. Вид зон разрушения при фреттинге. Увеличение x10.

Исследования проводимые на профилометре позволили оценить глубину разрушений в зоне контакта при нанесении различных покрытий (Рис. 15).

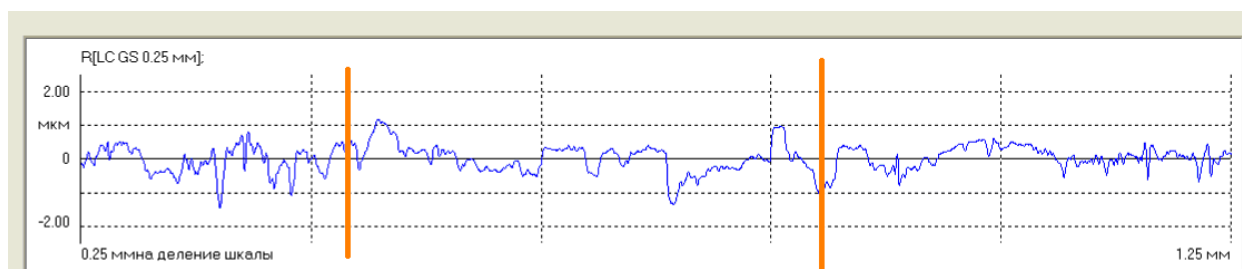


Рис. 15. Профилограмма зоны разрушения при фреттинге.

Комплексное исследование геометрических параметров зон разрушения, проведенное при помощи конфокального микроскопа дало возможность оценить преимущества фактора присутствия покрытия. Используя широкие возможности конфокального лазерного микроскопа получены 2D и 3D модели, которые являются весьма важным оценочным методом в ходе анализа полученных данных. Данные модели позволяют наглядно выявить все процессы протекания фреттинга, а так же оценить геометрические параметры разрушений. На 2D и 3D моделях представлено распределение глубины локальных повреждений пятен контакта. Рисунки 16 и 17

соответствуют испытаниям без покрытия, а рисунки 18 и 19 с алмазоподобным покрытием.

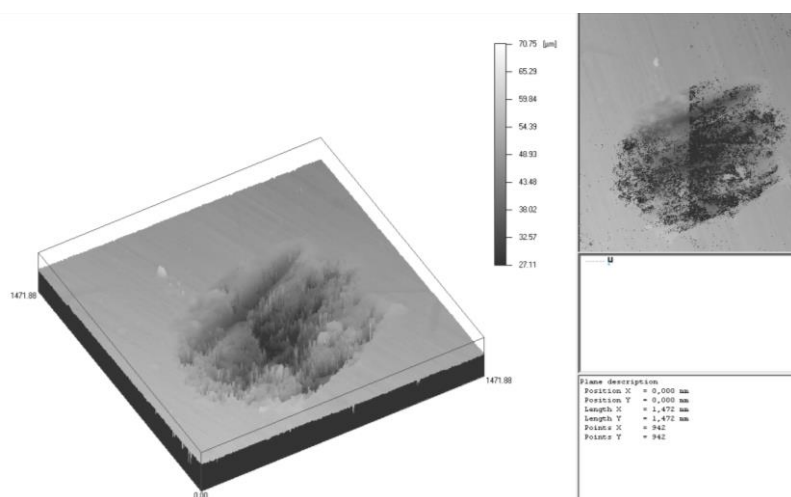


Рис. 16. Вид зоны разрушения при фреттинге без применения покрытия.

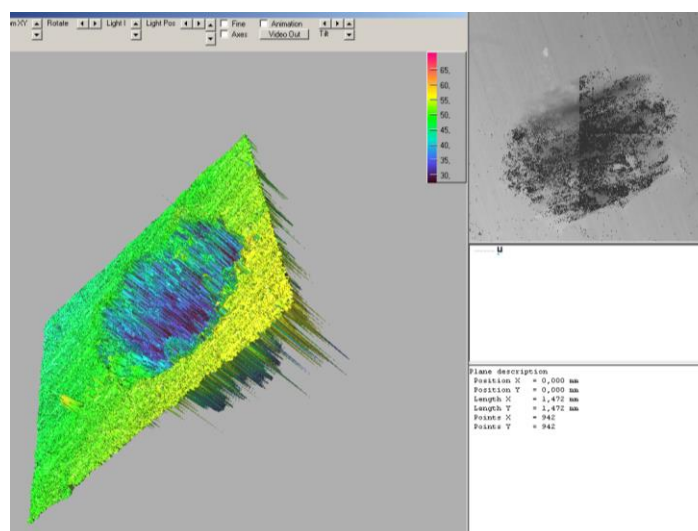


Рис. 17. Вид зоны разрушения при фреттинге без применения покрытия.

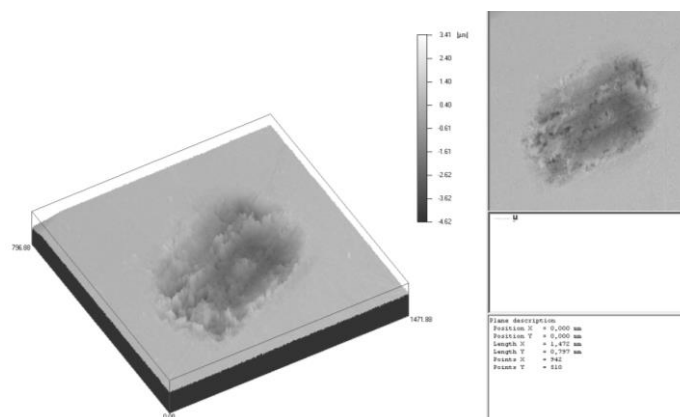


Рис. 18. Вид зоны разрушения при фреттинге с применением алмазоподобного покрытия.

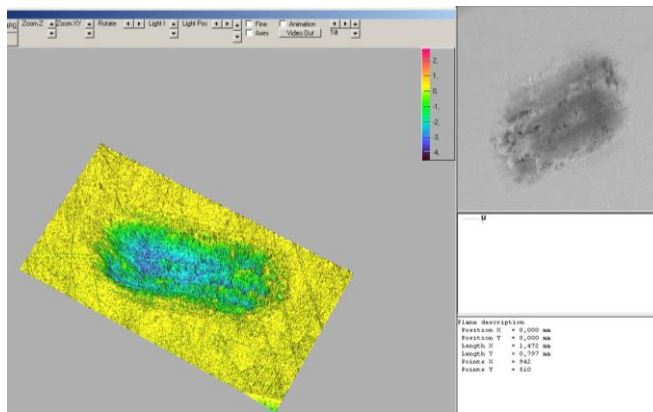


Рис. 19. Вид зоны разрушения при фреттинге с применением алмазоподобного покрытия.

В ходе сравнительного анализа геометрических параметров зон разрушения было выявлено, что наличие покрытия увеличивает фреттингостойкость. На рисунке 20 приведена профилограмма мест повреждения в зоне контакта без применения покрытия, а на рисунке 21 с применением алмазоподобного покрытия.

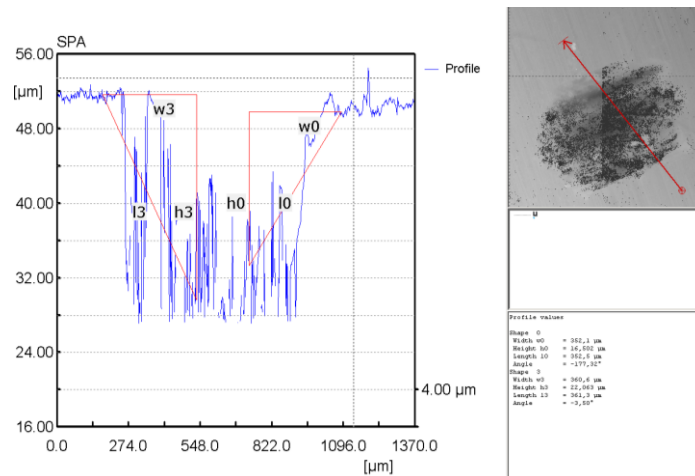


Рис. 20. Профилограмма зоны разрушения при фреттинге без применения покрытия.

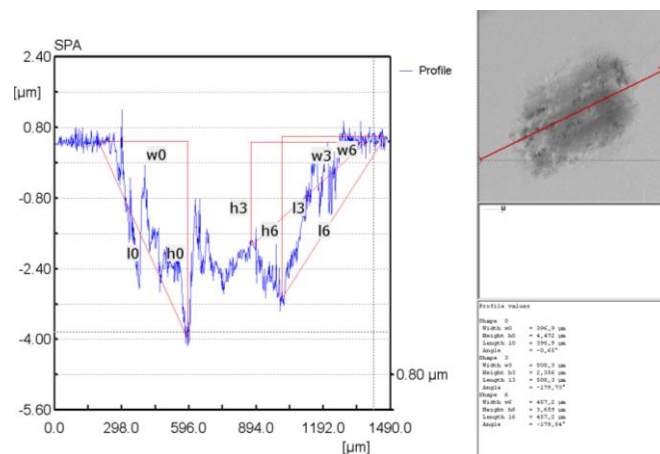


Рис. 19. Профилограмма зоны разрушения при фреттинге с применением алмазоподобного покрытия.

Отметим, что два описанных выше опыта проводились при одинаковых условиях, а именно:

- Частота вибраций.....50 Гц;
- Амплитуда вибраций.....10 мкм;
- Контактное давление.....60 МПа;
- Время испытания.....2 мин.

Таким образом, из приведенных выше рисунков видно, что глубина повреждений при фреттинге за счет применения алмазоподобных покрытий может быть уменьшена в 3...5 раз.

Применения алмазоподобных (DLC) покрытий является перспективным в деталях и механизмах горных машин, особенно для защиты от фреттинга.

Подбор вида покрытия, технологии и метода его нанесения может быть оперативно оценен при помощи предлагаемого нами вибрационного экспресс метода с последующим анализом зон разрушения с использованием конфокального лазерного микроскопа.

#### **Список литературы:**

1. **Островский М.С.** «Триботехнические основы обеспечения качества функционирования горных машин». Москва 1993 г.
2. **Локтев Д.А.** «Методы нанесения износостойких покрытий и оборудование для их реализации». Журнал «Стружка» №4(7) 2004 г. стр. 6-11
3. **Локтев Д.А.** «Основные виды износостойких покрытий». Журнал «Стружка» №2(5) 2004 г. стр. 22-26
4. **S. Harris, A. Weiner, W. Meng.** «Tribology of metal-containing diamond-like carbon coatings». Журнал «Wear» выпуск 211. 1997 г. стр. 208-216.