

**Досліджено вплив багатослоєвого вакуумно-плазмового покриття ( $\alpha$ -Ti+TiN) $\times$ 5, а також покриття з MoS<sub>2</sub> на стійкість до руйнування зразків зі сталі в умовах фреттинг-корозії при різних комбінаціях контактуючих поверхонь та амплітудах циклічного навантаження**

**Ключові слова:** вакуумно-плазмове покриття, фреттинг-корозія, адгезія

**Исследовано влияние многослойного вакуумно-плазменного покрытия ( $\alpha$ -Ti+TiN) $\times$ 5, а также покрытия из MoS<sub>2</sub>, на устойчивость к разрушению образцов из стали в условиях фреттинг-коррозии при различных комбинациях контактирующих поверхностей и амплитудах циклического нагружения**

**Ключевые слова:** вакуумно-плазменное покрытие, фреттинг-коррозия, адгезия

**Influence of multilayer vacuum-plasma coating ( $\alpha$ -Ti+TiN) $\times$ 5 and also coating from MoS<sub>2</sub> on damage resistance of steel samples in conditions of fretting-corrosion at different combinations of contact surfaces and repeated loading amplitudes has been investigated**

**Key words:** vacuum-plasma coating, fretting-corrosion, adhesion

# ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ФРЕТТИНГ- КОРРОЗИИ

**С. В. Ляшок**

Аспирантка

Отдел материаловедения

Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного  
ул. Дм. Пожарского, 2/10, г. Харьков, Украина, 61046  
Контактный тел.: (057) 778-89-86, (057) 349-47-80  
E-mail: matsevlad@ipmach.kharkov.ua

## 1. Введение

Решение проблемы повреждений в результате изнашивания в условиях фреттинга ответственных узлов машин и механизмов является одной из первоочередных задач. Процессы фреттинга характеризуются следующими отличительными признаками:

- относительная скорость перемещения поверхностей контактирующих тел значительно ниже по сравнению со скоростью при трении скольжения;
- фреттинг, приводящий к разрушению, характеризуется амплитудами менее 25 мкм, но, в любом случае, – не более 130 мкм [1], при этом поверхности не выводятся из зоны контакта, а, следовательно, продукты износа не удаляются из зоны образования;
- внешний вид продуктов фреттинг-износа отличается по цветовым показателям: например, на стали они значительно краснее, чем обычная ржавчина;
- кислород интенсифицирует повреждения при фреттинг-коррозии. Так как фреттинг характеризуется малыми амплитудами взаимных перемещений контртел, то вторичные структуры в приповерхностных объемах, защищающие основу при других видах изнашивания, не успевают образоваться за счет частого взаимодействия одних и тех же неровностей в каждом цикле. Последовательное схватывание неровностей на соприкасающихся поверхностях с дальнейшим разрушением адгезионного шва является главной причиной разрушения при фреттинге.

Для уменьшения адгезии и повышения фреттинг-усталостной прочности применяют следующие технологические методы: пластическое деформирование, химическую и электрохимическую обработку, различные виды химико-термической обработки [2]. Снизить интенсивность процессов схватывания, как отмечается в работе [1], можно путем использования различных видов смазок, защитных неметаллических пленок. Высокую износостойкость в условиях адгезионно-усталостного изнашивания и низкую адгезионную активность продемонстрировали в качестве защитных при использовании в технике вакуумно-плазменные покрытия, состоящие из карбидов, нитридов, оксидов d-переходных металлов и sp-элементов [3].

Целью данной работы являлось исследование эффективности разработанных покрытий с большим сопротивлением фреттинг-коррозии для предотвращения разрушения или уменьшения интенсивности коррозионной повреждаемости деталей из стали 20Х13.

## 2. Методика исследований

Разрабатываемое защитное покрытие должно иметь следующие характеристики: крепкое сцепление с подложкой; высокую когезионную прочность; адгезионную пассивность внешнего слоя относительно контртела; низкую химическую активность относительно среды.

Крепкая связь с подложкой может быть реализована за счет химической адгезии (адгезия, обеспечиваемая путем создания между поверхностью подложки и материалом покрытия межатомных связей), либо диффузионным взаимопроникновением материалов подложки и покрытия. Среди современных методов нанесения защитных покрытий, обеспечивающих надежную адгезию покрытия к металлической подложке, можно выделить вакуумно-плазменные и детонационные методы.

Нанесение разработанного вакуумно-плазменного покрытия осуществлялось по методу КИБ – конденсации с ионной бомбардировкой – на модернизированной установке «Булат-6». Бомбардировка подложки ионами металла или газа с энергией ~ 1 эВ позволяет распылять поверхностные пленки и нарушать стабильные электронные конфигурации валентных электронов металла на поверхности подложки для создания химических адгезионных связей. Непрерывность процесса осаждения покрытия, энергия, достаточная для организации химической адгезии, низкая микрохрупкость основной фазы покрытия и конструкция, состоящая из чередующихся слоев, обеспечивают высокую когезионную прочность покрытия. Для достижения низкой химической и адгезионной активности внешней стороны покрытия наносили поверхностный слой соответствующего химического и фазового состава – TiN.

Образцы из стали 20X13 изготавливались из листового проката в нормализованном состоянии (НВ 175) в виде пластин разных размеров с припуском на шлифование после термообработки. Химический состав стали: С – 0,19%, Mn – 0,2-0,3%, Si – 0,2-0,3%, Cr – 12-13%, Ni – 0,10%.

Режим термообработки: нагревание до 1050°C, выдержка 40 минут, закалка в масле, отпуск в течение 2-х часов при 700°C, последующее охлаждение в воде. Твердость образцов составляет HRC 18–20. После термической обработки образцы со стороны больших граней шлифовывали на глубину ~ 0,5 мм. Размеры образцов после шлифования следующие: длинные образцы ~ 110×14×4 мм; короткие образцы ~ 33×14×4 мм.

Было разработано защитное многослойное вакуумно-плазменное покрытие ( $\alpha$ -Ti+TiN)×5, состоящее из чередующихся слоев  $\alpha$ -Ti толщиной ~ 0,1 мкм и TiN толщиной ~ 1 мкм (приведена толщина для одного слоя каждого типа). Общее количество слоев в покрытии – 10, толщина полученного покрытия – 4-5 мкм.

Одним из методов защиты от фреттинг-коррозии является использование твердых смазок. По результатам экспериментов, проведенных авторами работ [4, 5], дисульфид молибдена – перспективное средство для уменьшения повреждений при фреттинг-коррозии. В связи с этим представляет интерес исследовать также взаимодействие поверхностей образцов в комбинации: сталь с покрытием ( $\alpha$ -Ti+TiN)×5, находящаяся в контакте с контртелом, покрытым MoS<sub>2</sub>.

После подготовки поверхности образцов для нанесения покрытия на основе MoS<sub>2</sub> на наждачной бумаге, они были подвергнуты влажной пескоструйной обработке, в результате чего поверхность стала достаточно шероховатой, содержащей значительное количество углублений и выступов. После этой обработки образцы тщательно промывали водой и выдерживали на

воздухе. После обезжиривания путем погружения в бензин Б70 образцы подсушивали на воздухе в течение 15 минут.

Для нанесения покрытия использовали суспензию ВНИИП-212, содержащую дисульфид молибдена, растворитель и мочевиноформальдегидную смолу. Покрытие наносили путем погружения нагретых до 100°C образцов в суспензию. После этого их подсушивали на воздухе до сухого состояния (10-15 минут) и далее переносили в термостат, нагретый до 100°C. Повышали температуру в термостате до 150°C, и выдерживали образцы при этой температуре на протяжении 2-х часов. После охлаждения на воздухе образцы готовы к использованию.

Долговечность образцов из стали в условиях фреттинга при различных комбинациях контактирующих поверхностей и амплитудах циклического нагружения оценивали по времени до полного разрушения плоских образцов на специальном стенде. На рис. 1 приведена схема нагружения образцов при испытаниях на фреттинг-усталость.

### 3. Результаты исследований

Исследование структуры поверхности полученных покрытий проводили на электронных сканирующих микроскопах JSM-840, а также ZEISS EVO 40XVP с системой рентгеновского микроанализа INCA Energy.

На рис. 2 продемонстрирована морфология поверхности и вид поперечного сечения образца с покрытием ( $\alpha$ -Ti+TiN)×5, свидетельствующие о формировании при осаждении четко выраженной двухфазной структуры покрытия.

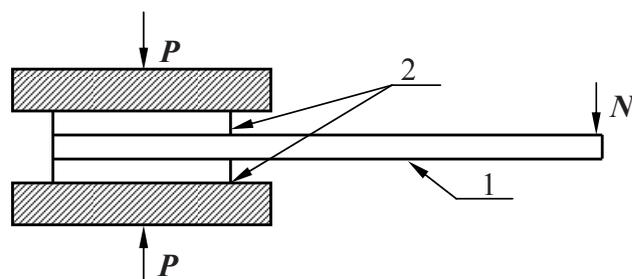


Рис. 1. Схема расположения образцов при испытаниях на фреттинг-усталость: 1 – усталостный (длинный) образец; 2 – прижимающие (короткие) образцы; P – нагрузка, обеспечивающее постоянное сжимающее напряжение 100 МПа; N – циклическая нагрузка

Большее увеличение (рис. 2 в) позволяет отметить присутствие на поверхности значительного количества капельной фазы титана, а также отдельных пор, круглых ямок. Последние можно идентифицировать как следы, оставшиеся на поверхности в результате скола отдельных элементов капельной фазы, размер которых от 1 до 14 мкм. Относительная площадь поверхности покрытия, занятая капельной фазой, составляет ~ 10%.

Фазовый рентгеновский анализ поверхности многослойного покрытия и его структурных составляющих показал, что основной фазой является TiN, но с различным соотношением Ti и N (рис. 3 и табл. 1). В

покрытии также присутствует некоторое количество  $\alpha$ -Ti, сосредоточенного в тонких титановых слоях и в капельной фазе.

Качество адгезии и когезии разработанного покрытия оценивали с помощью системы глубокого проникновения в поверхность образца с покрытием алмазного конуса при использовании системы нагружения твердомера Роквелла [6]. Анализ показал, что покрытие имеет удовлетворительную адгезионную и когезионную прочность: не наблюдается отслаивание слоев и скола отдельных участков покрытия от подложки.

На рис. 4 продемонстрирована поверхность покрытия  $\text{MoS}_2$  толщиной  $\sim 10$  мкм, по внешнему виду похожего на слой мелкой щебенки, которой засыпаны неровности поверхности образцов, образовавшиеся при влажной пескоструйной обработке.

Результаты испытаний образцов на фреттинг-усталость представлены в табл. 2, где  $\sigma$  – амплитуда изгибающего напряжения,  $N$  – количество циклов до разрушения,  $K$  – коэффициент повышения долговечности стали в сравнении с вариантом 1.

Использование вакуумно-плазменного покрытия на контактирующих поверхностях контрол обеспечивает максимальные коэффициенты повышения долговечности стали при амплитудах изгибающего напряжения 150 МПа и 100 МПа (вариант 2). Несколько меньшая эффективность (вариант 3) наблюдается при нанесении покрытия  $(\alpha\text{-Ti}+\text{TiN})\times 5$  на поверхность усталостного образца, находящуюся в контакте с поверхностью прижимающего, покрытого  $\text{MoS}_2$ . Покрытие из дисульфида молибдена (вариант 4) также приводит к повышению долговечности, однако в меньшей степени, чем вакуумно-плазменное покрытие (на 30% и 60% при соответствующих амплитудах).

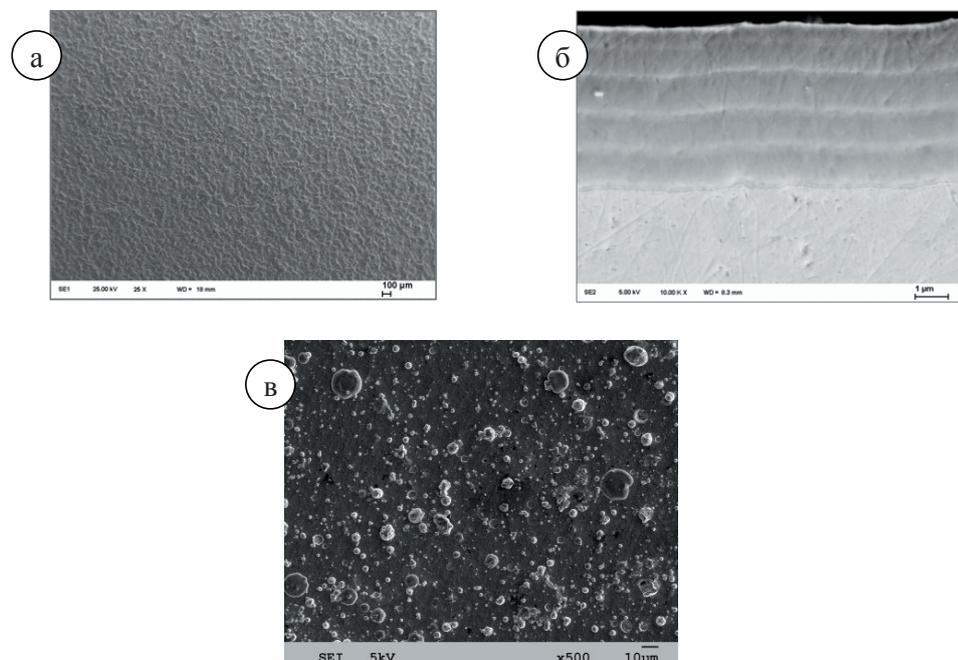


Рис. 2. Морфология поверхности при разных увеличениях (а, в) и микроструктура поперечного шлифа (б) многослойного покрытия  $(\alpha\text{-Ti}+\text{TiN})\times 5$

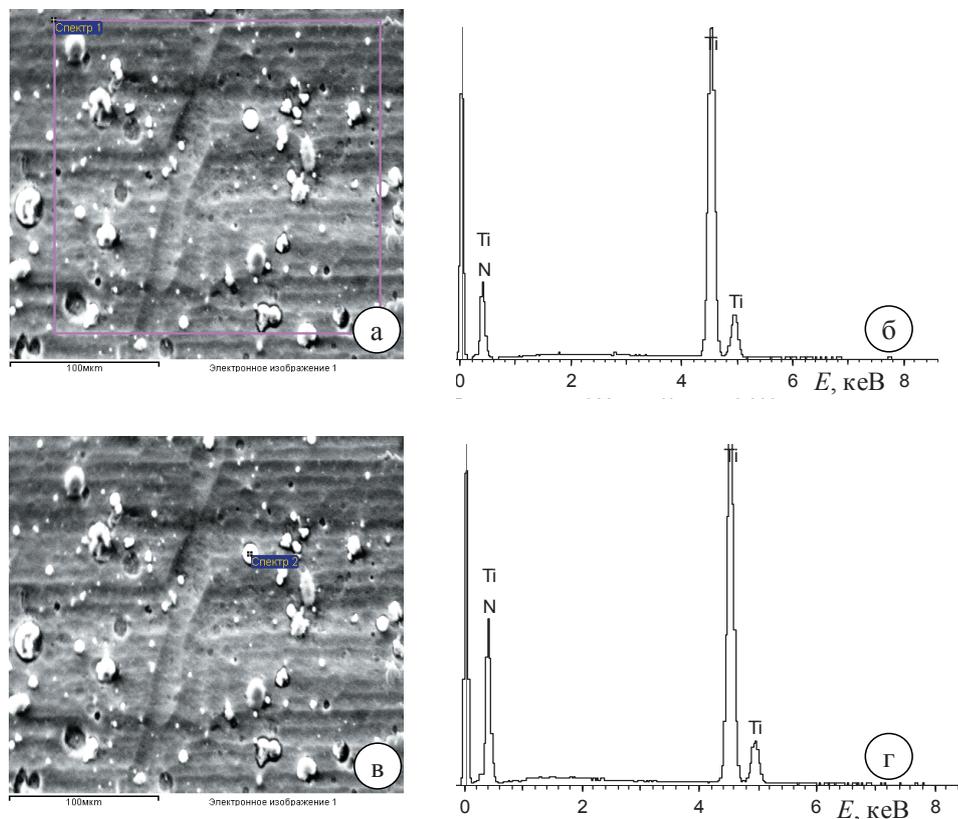


Рис. 3. Микрорентгеноспектральный анализ поверхности (а) и структурных составляющих (в) покрытия  $(\alpha\text{-Ti}+\text{TiN})\times 5$  и их спектрограммы (б, г)

**Таблица 1**

Химический состав поверхности и структурных составляющих вакуумно-плазменного покрытия

| Содержание элементов | Место точечного анализа |         |          |         |
|----------------------|-------------------------|---------|----------|---------|
|                      | Спектр 1                |         | Спектр 2 |         |
|                      | ат. %                   | масс. % | ат. %    | масс. % |
| N                    | 53,6                    | 25,5    | 66,4     | 36,7    |
| Ti                   | 45,4                    | 74,8    | 33,6     | 63,4    |

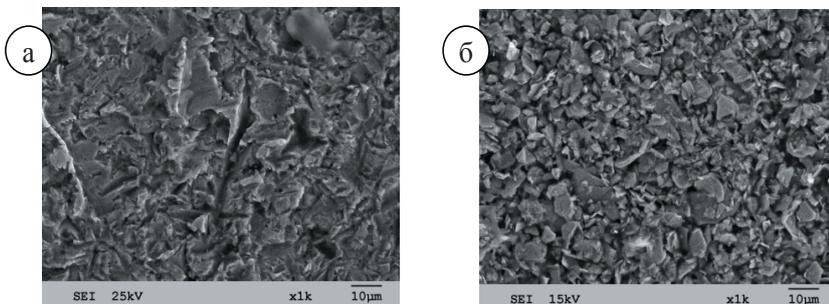


Рис. 4. Поверхность образца после пескоструйной обработки (а) и нанесения покрытия, содержащего дисульфид молибдена (б)

установлено, что при нанесении вакуумно-плазменного покрытия на сопряженные поверхности контртел наблюдается наибольшее повышение долговечности. Использование покрытия ( $\alpha$ -Ti+TiN) $\times$ 5 на поверхности только одного образца (усталостного), а на другой – MoS<sub>2</sub>, также способствует значительному повышению долговечности стали. Таким образом, применение покрытий – вакуумно-плазменного с низкой адгезионной активностью и твердосмазочного – позволяет снизить интенсивность процессов схватывания при фреттинг-коррозии, а, следовательно, повысить долговечность изделий из стали.

Литература

1. Уотерхауз Р. Б. Фреттинг-коррозия / Р. Б. Уотерхауз. – Л.: Машиностроение, 1976. – 272 с.
2. Шевеля В. В. Фреттинг-усталость металлов / В. В. Шевеля, Г. С. Калда. – Х.: Поділля, 1998. – 299 с.
3. Мацевитый В. М. Покрытия для режущих инструментов / В. М. Мацевитый. – Х.: Вища школа, 1987. – 128 с.
4. Weismantel E. E. Friction and Fretting with Solid Film Lubricants / E. E. Weismantel // Lubrication Engineering. – 1955. – Vol. 11. – P. 97 – 100.
5. Batten B. K. Fatigue Tests in Air on Model Propeller-Tailshaft Assemblies / B. K. Batten, A. J. Couchman // Trans. N. E. Coast Instn. Engrs. Ship-builders. – 1963. – Vol. 79, N 5. – P. 189 – 228.
6. Мацевитый В. М. Способ контроля качества адгезии износостойких покрытий / В. М. Мацевитый, Л. М. Романова, В. М. Береснев // Применение прогрессивных инструментальных материалов и методов повышения стойкости режущих инструментов: I науч.-техн. конф., 1983 г.: тезисы докл. – Краснодар: НТО Машпром, 1983. – С. 93 – 94.

**Таблица 2**

Влияние покрытий на фреттинг-усталость

| Вариант | Характеристика вариантов             |                                      | $\sigma = 100$ МПа         |             | $\sigma = 150$ МПа         |             |
|---------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|-------------|----------------------------|-------------|
|         | Усталостный образец                  | Прижимающий образец                  | N $\cdot$ 10 <sup>-6</sup> | К           | N $\cdot$ 10 <sup>-6</sup> | К           |
| 1       | Сталь                                | Сталь                                | 0,532                      | <b>1</b>    | 0,217                      | <b>1</b>    |
| 2       | Сталь+( $\alpha$ -Ti+TiN) $\times$ 5 | Сталь+( $\alpha$ -Ti+TiN) $\times$ 5 | 1,81                       | <b>3,40</b> | 0,794                      | <b>3,66</b> |
| 3       | Сталь+( $\alpha$ -Ti+TiN) $\times$ 5 | Сталь+ MoS <sub>2</sub>              | 1,45                       | <b>2,73</b> | 0,548                      | <b>2,5</b>  |
| 4       | Сталь                                | Сталь+ MoS <sub>2</sub>              | 0,854                      | <b>1,6</b>  | 0,282                      | <b>1,3</b>  |

**3. Выводы**

По результатам исследования влияния разработанных покрытий на устойчивость к разрушению контактирующих образцов в условиях фреттинг-коррозии,