

Машиностроение и машиноведение

УДК 539.3

DOI: 10.30987/article_5db95e857a4e02.22596904

А.Ю. Родичев, А.В. Горин, М.А. Токмакова, А.А. Киричек

**ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ПЛЕНОЧНЫХ
АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ**

Представлено исследование адгезионной прочности сцепления тонких антифрикционных покрытий. Описано проведение экспериментов на разрывной машине универсального назначения с электронным силоизмерителем ИР5047-50. Получен ряд качественных и количественных оценок в

виде зависимостей нормальных напряжений от относительного удлинения пленочного антифрикционного покрытия.

Ключевые слова: адгезия, прочность, сцепление, антифрикционное покрытие, экспериментальные исследования.

A.Yu. Rodichev, A.V. Gorin, M.A. Tokmakova, A.A. Kirichek

ADHESION STRENGTH INVESTIGATION OF FILM ANTIFRICTION COATINGS

The paper is dedicated to the investigation of adhesion strength in film coatings. The goal of the work is a qualitative estimate of the strength of film antifriction coatings applied on friction units of machines. The topicality is grounded by the fact that the friction decrease on surfaces in units ensures the increase of life, power effectiveness and reliability of machinery.

Most of the works are dedicated to the study of manufacturing films, their phase composition, structure, stress-strain properties, whereas in the material offered the adhesion properties of film antifriction coating are emphasized, which is a sufficient novelty.

During the investigations of the adhesion strength of antifriction film coatings there was used a method of a normal detachment. To carry out comparative tests there were prepared four groups of different

antifriction coatings. For each coating under testing there were prepared five samples which were loaded with the smooth increase of a breaking tension.

Therefore there are obtained experimental dependences of normal stresses (σ) upon relative elongation (ϵ), which allow using values obtained for surfaces coated with antifriction film coatings with different areas. Upon completion of coating tests both parts of the samples tested were subjected to visual analysis. In the course of the analysis a character of destruction was defined. As a result of the theoretical and experimental investigations carried out there were drawn conclusions describing a qualitative and quantitative estimate of the adhesion strength of antifriction film coating.

Key words: adhesion, strength, cohesion, antifriction coating, experimental investigations.

Введение

Все технологические и транспортные машины характеризуются ресурсом, энергоэффективностью и надежностью. Улучшение этих характеристик является чрезвычайно актуальной задачей. Решение этой задачи возможно путем снижения износа и трения поверхностей, входящих в контакт. Технический прогресс позволяет развивать новые типы защитных покрытий [1; 2]. Современные антифрикционные покрытия должны соответствовать высокому уровню прочностных и антифрикционных

свойств. Таким образом, возникает необходимость в создании более эффективных покрытий. Разработка таких антифрикционных покрытий основывается на представлениях о контактном взаимодействии «основа - покрытие» в контакте сопряжений с учетом действия окружающей среды [3]. Большая часть работ посвящена изучению получения пленок, их фазового состава, структуры, механических характеристик, а также адгезионных свойств.

Постановка задачи исследования

В настоящее время существует огромное разнообразие антифрикционных пленочных покрытий. Адгезия таких покрытий к основному металлу осуществляется преимущественно за счет механиче-

ского сцепления. В то же время взаимная диффузия, сплавление и физическая связь вандерваальсовыми силами рассматриваются как дополнение к механическому сцеплению.

При определении адгезионной прочности нанесенных антифрикционных покрытий необходимо определить методику испытаний, произвести оценку степени достоверности выбранного метода, так как результаты испытаний при различных методах значительно отличаются друг от друга [4; 5]. Методы контроля адгезионной прочности антифрикционных покрытий, применяемые в промышленности, основываются на таких способах, как растяжение, изгиб, нанесение сетки царапин и т.д. [6; 7]. Однако получение количественных значений величины адгезионной прочности пленочных антифрикционных покрытий достаточно затруднительно. Таким образом, возникает проблема отсутствия каких-либо данных о прочности сцепления

Теоретическая часть

Интересующие нас антифрикционные покрытия выполняются в виде тонкой пленки. Толщина такой пленки варьируется от 5 до 20 мкм. Тонкая пленка покрытия - это полимерная матрица с расположенными в ее ячейках ультрадисперсными частицами твердого смазочного материала. Такой тип покрытия имеет высокое сопротивление сжатию и малое сопротивление сдвигу, что позволяет ему значительно снизить коэффициент сухого трения контактных поверхностей. Традиционно для нанесения таких антифрикционных покрытий используются пульверизатор с подходящими параметрами, а также источник очищенного сжатого воздуха с давлением 3-4 бар. Однако это выполнимо на промышленных предприятиях, в полевых же условиях применение этой технологии невозможно. Таким образом, данный вопрос решает применение антифрикционных материалов в виде аэрозолей.

Процесс образования пленочного антифрикционного покрытия состоит из трех последовательных этапов:

- подготовительная обработка поверхности (создание шероховатости и очистка от загрязнений) с целью увеличения прочности сцепления наносимого покрытия с основой (металл, пластик и т.д.);
- нанесение первого промежуточного слоя с целью выравнивания поверхности;

пленочных антифрикционных покрытий. Проведенный анализ литературных данных показывает, что основными методами определения адгезии являются метод отрыва покрытия от подложки [8; 9] и метод решетчатого надреза [10]. При этом окончательным этапом испытания методом решетчатого надреза является визуальный осмотр покрытия после отрыва ленты, который по своей природе субъективен. Следовательно, адгезия покрытия (качественная оценка), определенная разными операторами, может отличаться. Поэтому изучение прочности сцепления пленочных антифрикционных покрытий со стальным основанием является актуальным вопросом.

- наращивание антифрикционного покрытия (нанесение одного или нескольких слоев).

Представленный процесс имеет много общего с нанесением лакокрасочного покрытия. Для оценки адгезии антифрикционного покрытия будем использовать методики, применимые к лакокрасочному покрытию [11; 12].

Полученные в ходе экспериментов графики представляют собой зависимости усилия, выдерживаемого образцом до полного разрушения покрытия, от абсолютного перемещения. Данный вид графиков обладает незначительной информативностью. Поэтому перейдем к зависимостям нормальных напряжений (σ) от относительного удлинения (ε).

Для этого по оси абсцисс откладываем относительное удлинение, рассчитываемое по формуле

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L},$$

где L - начальный размер слоя покрытия; ΔL - абсолютное перемещение слоя покрытия.

По оси ординат изображается нормальное напряжение в слое покрытия, рассчитываемое по формуле

$$\sigma = \frac{F}{S},$$

где F - усилие, воспринимаемое покрытием; S - площадь покрытия.

Полученная диаграмма зависимости нормальных напряжений от относительно-

Экспериментальная часть

Экспериментальные исследования заключались в определении прочности сцепления пленочного антифрикционного покрытия методом нормального отрыва. Для проведения сравнительных испытаний были подготовлены четыре группы различных пленочных покрытий:

- бесцветное антифрикционное покрытие на основе ПТФЭ (политетрафторэтилен) с акриловым связующим, отверждаемое при нормальной температуре (образцы группы № 1);

- антифрикционное покрытие на основе дисульфида молибдена (19 %) и графита (4,9 %) с титанатовым связующим, отверждаемое при нормальной температуре (образцы группы № 2);

го удлинения позволяет применять полученные значения для поверхностей различных площадей.

- антифрикционное покрытие на основе дисульфида молибдена (12 %) с органическим связующим, отверждаемое при нормальной температуре (образцы группы № 3);

- антифрикционное покрытие на основе дисульфида молибдена (16 %) и графита (1,6 %) с полиамидимидным связующим, отверждаемое при нагреве (образцы группы № 4).

На каждое испытуемое покрытие подготавливались пять образцов из стали марки Ст 3 по ГОСТ 380-2005 в виде двух оснований цилиндрической формы. На поверхности оснований наносилось пленочное антифрикционное покрытие (рис. 1).



Рис. 1. Основание цилиндрической формы из стали Ст 3 по ГОСТ 380-2005

В соответствии с нормативно-технической документацией основания с нанесенным покрытием выдерживались при температуре 20 ± 2 °С и относительной влажности 65 ± 5 %. Каждый последующий слой наносился после полного высыхания предыдущего. Толщина покрытия в трех точках поверхности измерялась с помощью толщиномера ЕТ 11Р. Затем к основанию с нанесенным покрытием приклеивали другое основание из стали марки Ст 3. Поверхность другого основания обработана

пескоструйным способом. Клеящий состав наносили на склеиваемые поверхности тонким слоем до полного смачивания. Затем основания совмещали. После этого образцы были помещены в специальное приспособление для склеивания. Время выдержки составило не менее 72 ч. После удаления образцов из приспособления для склеивания зачищались клеевые потеки на торцах шва. Для установки в разрывную машину в образцы вкручивались шпильки (рис. 2).

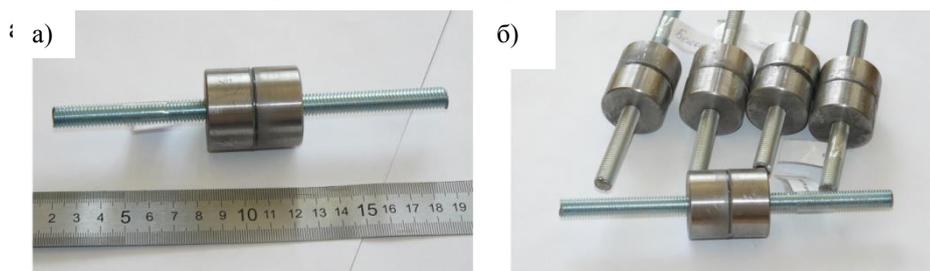


Рис. 2. Экспериментальные образцы:
а - образец для испытаний; б - комплект образцов для проведения испытаний

Испытания образцов проводили на разрывной машине универсального назначения с электронным силоизмерителем

ИР5047-50 при температуре 20 °С и относительной влажности 70 % (рис. 3).



Рис. 3. Стадии проведения экспериментов:
а - разрывная машина ИР5047-50; б - образец в центрирующем приспособлении

Подготовленные для испытания образцы закреплялись в разрывной машине в приспособлении для центрирования образцов (рис. 4). Нагружение испытуемых образцов производилось с плавным наращиванием разрывного усилия. Скорость перемещения захватов разрывной машины составляла не более 5 мм/мин.

Нагрузка разрушения фиксировалась с помощью специального программного обеспечения, при этом распечатывался протокол испытаний. Полученные экспериментальные данные были обработаны. Результаты обработки представлены на рис. 5.

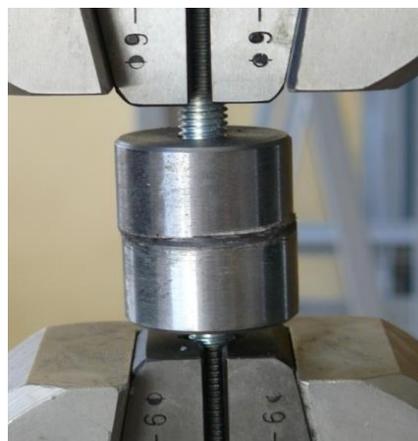


Рис. 4. Разрушение антифрикционного Покрытия

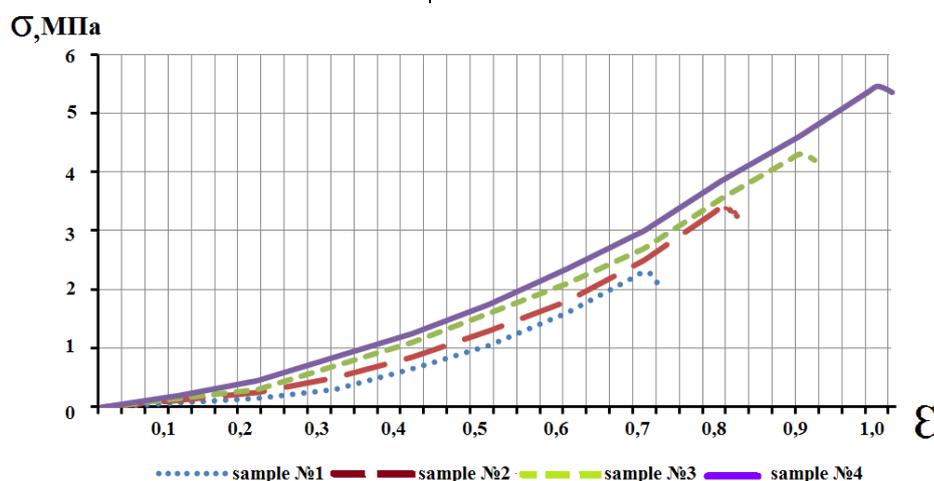


Рис. 5. Результаты экспериментальных исследований

По завершении испытаний покрытия обе части испытанного образца подвергались визуальному осмотру. В ходе осмотра



определялся характер разрушения (рис. 6, 7).



Рис. 6. Образцы групп № 1 (а) и № 2 (б)



Рис. 7. Образцы групп № 3 (а) и № 4 (б)

Выводы

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований были получены следующие выводы:

- для оценки адгезионной прочности сцепления антифрикционных пленочных покрытий чаще всего применяются метод нормального отрыва покрытия от подложки и метод решетчатого надреза;

- наиболее информативную качественную и количественную оценку предоставляет метод нормального отрыва

покрытия от подложки;

- анализ полученных экспериментальных зависимостей нормальных напряжений от относительного удлинения пленочного покрытия показывает, что наибольшей адгезионной прочностью обладают покрытия на основе дисульфида молибдена;

- характер разрушения образцов после испытаний на разрыв является адгезионным, когезионным или смешанным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lian, Weiqi. Two-dimensional Ti_3C_2 coating as an emerging protective solid-lubricant for tribology / Weiqi Lian, Yongjin Mai, Cansen Liu, Liuyan Zhang, Xiaohua Jie // *Ceramics International*. - 2018. - Vol. 44. - Is. 16. - P. 20154-20162.
2. Meng, Zhao. Application study of nano-copper based composite anti-friction coating for corrosion resistant couplings / Zhao Meng, Xue-feng Zhang, Jingchao Zhang, Bin Hu, Yun Yang // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. - 2017. - Vol. 157. - P. 1143-1147.
3. Minaev, A. Multifunctional Coatings for Gas-Lubricated Bearings Used in Marine Equipment / A. Minaev, R. Chizhikov, O. Portnova // *Procedia Engineering*. - 2017. - Vol. 206. - P. 746-751.
4. ГОСТ 9.302-88. Покрытия металлические и неметаллические, неорганические. Методы контроля.
5. Sheng, Zhu. Joining of AlN ceramic to metals using sputtered Al or Ti films / Sheng Zhu, W.

- Wlosinski // Journal of Materials Processing Technology. - 2001. - Vol. 109. - P. 277-282.
- Liao, Yi-de. Evaluation for adhesion strength of coating and substrate by burying beforehand specimen / Liao Yi-de, Li Zhuang-yun, Tang Guo-qun // Journal of Wuhan University of Technology Mater SciEd. - 2003. - Vol. 18. - Is. 1. - P. 31-35.
 - Piekoszenwski, J. Brazing of alumina ceramics modified by pulsed plasma beams combined with arc PVD treatment / J. Piekoszenwski, A. Krajewski [et all] // Vacuum. - 2003. - Vol. 70. - P. 307-312.
 - Wang, Y.H. Brazing of Ti/NicoatedmDiamond / Y.H. Wang, H.X. Wang [et all] // Key Engineering Materials Vols. - 2001. - Vol. 202-203. - P. 147-150.
 - Lian, Weiqi. Two-dimensional Ti_3C_2 coating as an emerging protective solid-lubricant for tribology / Weiqi Lian, Yongjin Mai, Cansen Liu, Liuyan Zhang, Xiaohua Jie // Ceramics International. - 2018. - Vol. 44. - Is. 16. - P. 20154-20162.
 - Meng, Zhao. Application study of nano-copper based composite anti-friction coating for corrosion resistant couplings / Zhao Meng, Xue-feng Zhang, Jingchao Zhang, Bin Hu, Yun Yang // Journal of Petroleum Science and Engineering. - 2017. - Vol. 157. - P. 1143-1147.
 - Minaev, A. Multifunctional Coatings for Gas-Lubricated Bearings Used in Marine Equipment / A. Minaev, R. Chizhikov, O. Portnova // Procedia Engineering. - 2017. - Vol. 206. - P. 746-751.
 - RSS 9.302-88. Metal, Non-metal and Inorganic Coatings. Methods of Control.
 - Sheng, Zhu. Joining of AlN ceramic to metals usings sputtered Al or Ti films / Sheng Zhu, W. Wlosinski // Journal of Materials Processing Technology. - 2001. - Vol. 109. - P. 277-282.
 - Liao, Yi-de. Evaluation for adhesion strength of coating and substrate by burying beforehand specimen / Liao Yi-de, Li Zhuang-yun, Tang Guo-qun // Journal of Wuhan University of Technology Mater SciEd. - 2003. - Vol. 18. - Is. 1. - P. 31-35.
 - Piekoszenwski, J. Brazing of alumina ceramics modified by pulsed plasma beams combined with arc PVD treatment / J. Piekoszenwski, A. Krajewski [et all] // Vacuum. - 2003. - Vol. 70. - P. 307-312.
 - Wang, Y.H. Brazing of Ti/NicoatedmDiamond / Y.H. Wang, H.X. Wang [et all] // Key Engineering Materials Vols. - 2001. - Vol. 202-203. - P. 147-150.
 - Pershin, V. Effect of substrate temperature on Adhesion Strength of plasmasprayed nickel coatings / V. Pershin, M. Lufitha [et all] // Journal of Thermal Spray Technology. - 2003. - Vol. 12 (3). - P. 370-376.
 - ГОСТ Р 54563-2011. Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом решетчатого надреза (ИСО 2409:2007).
 - ГОСТ 27890-88. Покрyтия лакокрасочные защитные дезактивируемые. Метод определения адгезионной прочности нормальным отрывом.
 - ГОСТ Р 51694-2000. Материалы лакокрасочные. Определение толщины покрытия (ИСО 2808:1997 «Краски и лаки. Определение толщины пленки», MOD).
 - RSS R 54563-2011. Paintwork Materials. Adhesion Definition through Method of Latticed Notch (ISO 2409:2007).
 - RSS 27890-88. Deactivated Protective Paintwork Materials. Method for Definition of Adhesion Strength by Normal Detachment.
 - RSS R 51694-2000. Paintwork Materials. Definition of Coating Thick (2808:1997 "Paints and Lacquers. Definition of Film Thickness", MOD).

Ссылка для цитирования:

Родичев, А.Ю. Исследование адгезионной прочности пленочных антифрикционных покрытий / А.Ю. Родичев, А.В. Горин, М.А. Токмакова, А.А. Киричек // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2019. - № 10. - С.4 - 10. - DOI: 10.30987/article_5db95e857a4e02.22596904.

Статья поступила в редакцию 7.10.19

Рецензент: д.т.н., профессор Муромского филиала (института)

Владимирского государственного университета,

член редсовета журнала «Вестник БГТУ»

Соловьев Д.Л.

Статья принята к публикации 21. 10. 19.

Сведения об авторах:

Родичев Алексей Юрьевич, к.т.н., научный сотрудник лаборатории «МГМС» Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева, e-mail: rodfox@yandex.ru.

Горин Андрей Владимирович, к.т.н., доцент кафедры подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева, e-mail: gogin57@mail.ru.

Токмакова Мария Андреевна, аспирант Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева, e-mail: tokmakova2303@gmail.com.

Rodichev Alexey Yurievich, Can. Sc. Tech., Scientific worker of the Lab. "MGMS", Turgenev State University of Orel, e-mail: rodfox@yandex.ru.

Gorin Andrey Vladimirovich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. "Lifting-Transport, Structural and Road Machinery", Turgenev State University of Orel, e-mail: gorin57@mail.ru.

Киричек Алексей Андреевич, студент магистратуры Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева, e-mail: alexkirichek@yandex.ru.

Tokmakova Maria Andreevna, Post graduate student, Turgenev State University of Orel, e-mail: tokmakova2303@gmail.com.

Kirichek Alexey Andreevich, Master student, Turgenev State University of Orel, e-mail: alexkirichek@yandex.ru.