

ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАЦИОНАЛЬНОМУ ВЫБОРУ МЕТОДА ОЦЕНКИ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

И.Э. Гинсар

irinaginsar07@rambler.ru

Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены основные методы измерения адгезионной прочности лакокрасочных покрытий. Указаны нормативные документы, определяющие оборудование, инструменты, последовательность выполнения испытаний по адгезионной прочности лакокрасочных покрытий и обработки полученных результатов в ходе опытов каждого метода. Дана оценка основным методам измерения адгезионной прочности с точки зрения эффективности применения в производственных или лабораторных условиях. Предложены рекомендации по выбору метода для конкретных задач с учетом оценки объема затрат на проведение испытаний. Выбран метод, являющийся наиболее доступным для оценки адгезионной прочности лакокрасочных покрытий.

Ключевые слова

Лакокрасочные покрытия, адгезионная прочность, отслаивание, методы измерения, механическое разрушение, покрытие-подложка, рекомендации, проведение испытаний

Поступила в редакцию 05.07.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Наряду с электрохимическими и химическими способами защиты металлических изделий и конструкций от агрессивного воздействия окружающей среды, широко применяют лакокрасочные покрытия (ЛКП). Этот способ получил наибольшее распространение вследствие низкой себестоимости и простоты процесса восстановления, не требующего дорогостоящего оборудования и позволяющего достичь желаемого внешнего вида.

ЛКП представляют собой сложные химические соединения, которые образуют защитную, а также декоративную пленку после высыхания при предварительном нанесении на обработанную поверхность. Качество ЛКП определяется их механическими, химическими и адгезионными свойствами и технологией процесса окраски [1]. Существенной оценкой ЛКП является его адгезионная прочность (АП). Для обработки поверхностей чаще всего используют эмали, грунтовки, шпатлевки и другие ЛКП.

Согласно ГОСТ 28246–2006 [2], АП ЛКП — это совокупность сил, связывающих высохшее ЛКП с окрашиваемой поверхностью.

Разрушение защитного покрытия может происходить по адгезионному, когезионному и смешанному механизму. Следовательно, для определения АП необходимо выбрать методику с учетом только адгезионного разрушения соединения на границе покрытие-подложка [3]. Большинство методов оценки АП основано на механическом разрушении соединения на границе покрытие-подложка. Существует много разнообразных методов оценки АП, но широкое применение получили лишь некоторые.

Цель работы — разработка рекомендаций по рациональному выбору наиболее оптимального метода оценки АП ЛКП и определение эффективной области его применения.

Рассмотрим основные методы оценки АП, некоторые из которых стандартизованы и соответствующий ГОСТ.

Метод отслаивания. Сущность метода заключается в определении адгезии отслаиванием гибкой пластинки от армированного стеклотканью покрытия и измерении необходимого для этого усилия. Отличительной особенностью метода является применение разрывной машины. Адгезию (Н/м (гс/см)) вычисляют как среднее арифметическое из восьми–десяти определений, допускаемые расхождения между которыми не должны превышать 10 %.

Область применения такого метода ограничивается специально оборудованными лабораториями. Использование его в производственных условиях трудоемко и в ряде случаев экономически нецелесообразно.

Метод определения АП нормальным отрывом. Метод основан на измерении силы, необходимой для отрыва покрытий в направлении, перпендикулярном его поверхности. Образец для проведения испытания получают склеиванием двух оснований цилиндрической формы. Испытания проводят постепенным нарастанием нагрузки до разрыва образца [5], для чего используют разрывные машины. По области применения такой метод аналогичен методу отслаивания.

Метод решетчатых надрезов. Сущность метода заключается в оценке степени прилипания лакокрасочной пленки к подложке по числу ячеек, отпавших от подложки при нарезании пленки. Для нанесения ЛКП готовят два образца — металлические пластины. Вид металла испытываемых пластин, обработку их поверхности перед нанесением лакокрасочного материала, вязкость последнего, метод нанесения, количество слоев, возможность использования системы ЛКП, режим сушки и толщину пленки указывают в нормативно-технической документации на испытываемый лакокрасочный материал [6]. Согласно методике, толщина нанесенной эмали не должна быть более 60 мкм. На каждой поверхности испытываемого образца делают не менее шести параллельных надрезов до металла с помощью режущего инструмента, и аналогичным образом выполняют надрезы в перпендикулярном направлении. В результате получается решетка из квадратов одинакового размера.

Адгезию оценивают в соответствии с табл. 1.

Таблица 1

Баллы в зависимости от числа отпавших квадратов

Число отпавших квадратов, %	0	Не более 5	5...35	Более 35
Балл	1	2	3	4

За результат испытания принимают значение адгезии в баллах, соответствующее большинству совпадающих значений, определенных на всех испытываемых участках поверхности двух образцов. При этом расхождение между значениями не должно превышать 1 балл. Этот метод более точен, чем метод Х-образного надреза и обладает всеми его достоинствами. В пользу выбора рас-

смаатриваемого метода выступает тот факт, что он стандартизован межгосударственным (ГОСТ 31149–2014) и международным (ISO 2409:2013) стандартами.

Метод решетчатых надрезов с обратным ударом. Сущность метода состоит в нанесении на готовое ЛКП решетчатых надрезов и визуальной оценке состояния решетки покрытия после ударного воздействия, оказываемого на обратную сторону пластины в месте нанесения решетки. В этом методе, предназначенном для оценки адгезии высокоэластичных покрытий, используют прибор для определения прочности пленки. Адгезию оценивают значением прочности в сантиметрах при обратном ударе, который выдерживает покрытие без отслаивания надрезанных квадратов, что соответствует 1 баллу по табл. 1. Очевидно, что область применения метода ограничена эластичными материалами.

Метод Х-образного надреза. Сущность метода заключается в оценке АП по пятибалльной шкале. Образцы для проведения испытаний подготавливают так же, как и в методе решетчатых надрезов. Х-образные надрезы выполняют режущим инструментом, угол пересечения должен быть между 30° и 45° [4]. Адгезию оценивают в соответствии с рис. 1.







 <p style="text-align: center;">Балл 0</p> <p>Отсутствие отслаивания или удаления покрытия</p>	 <p style="text-align: center;">Балл 1</p> <p>Следы отслаивания или удаления покрытия вдоль надрезов или в местах их пересечения</p>
 <p style="text-align: center;">Балл 2</p> <p>Выкрашивание покрытий вдоль любого из надрезов шириной до 1,5 мм</p>	 <p style="text-align: center;">Балл 3</p> <p>Выкрашивание покрытий на большом количестве надрезов шириной до 3,2 мм</p>
 <p style="text-align: center;">Балл 4</p> <p>Удаление покрытия с большей площади Х-образного надреза</p>	 <p style="text-align: center;">Балл 5</p> <p>Удаление покрытия за пределами Х-образного надреза</p>



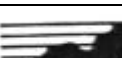
Рис. 1. Оценка результатов испытаний адгезии методом Х-образного надреза

Визуально при хорошем освещении определяют состояние надрезов на испытуемых образцах, применяя при необходимости лупу. За результат испытания принимают значение адгезии в баллах, соответствующее большинству совпадающих значений. Достоинства этого метода в простоте использования и отсутствии необходимости дорогостоящего оборудования. Однако он оценивает АП только от механических повреждений.

Метод параллельных надрезов. Сущность метода заключается в нанесении на готовое ЛКП параллельных надрезов и визуальной оценке состояния покрытия по трехбалльной системе. Испытания проводят с помощью нанесения липкой ленты на полиэтилентерефталатной основе на подготовленные пластинки. Перпендикулярно надрезам накладывают полоску липкой ленты и плотно прижимают ее, оставляя один конец полоски не приклеенным. Быстрым движением ленту отрывают перпендикулярно от покрытия. Адгезию оценивают по трехбалльной шкале, приведенной в табл. 2.

Таблица 2

Баллы в зависимости от состояния поверхности

Балл	Описание поверхности ЛКП после нанесения надрезов и снятия липкой ленты	Внешний вид покрытия
1	Края надрезов гладкие	
2	Незначительное отслаивание пленки по ширине полосы вдоль надрезов (не более 0,5 мм)	
3	Отслаивание покрытия полосами	

Метод стандартизован (ГОСТ 15140–78) и распространяется на проведение испытаний для методов отслаивания, решетчатых надрезов, решетчатых надрезов с обратным ударом и параллельных надрезов.

Метод одновременного отрыва. В зависимости от способа приложения нагрузки этот метод имеет ряд разновидностей. Применяют нормальный отрыв при растяжении или сдвиге (грибковый метод, метод штифтов, по отрыву диска), отрыв центробежной силой (метод ультрацентрифуги) и вибрацией (ультразвуковой (или вибрационный) метод). Их общей особенностью является то, что сила отрыва действует сосредоточено и распределяется равномерно по площади адгезионного контакта. Результаты выражают отношением усилия отрыва к площади адгезированной пленки. Варианты определения АП покрытий методом одновременного отрыва приведены на рис. 2.

Грибковый метод. Применение этого метода ограничено вследствие трудности подбора соответствующего клея. В образцах типа грибков под действием нагрузки возникают сложные и неоднородные напряжения. Адгезив растягивается сильнее, чем субстрат, и в большей степени подвергается поперечному сжатию. Грибковый метод является достаточно трудоемким, но другие разновидности метода одновременного отрыва, применяемые за рубежом, не получили распространения в нашей стране.

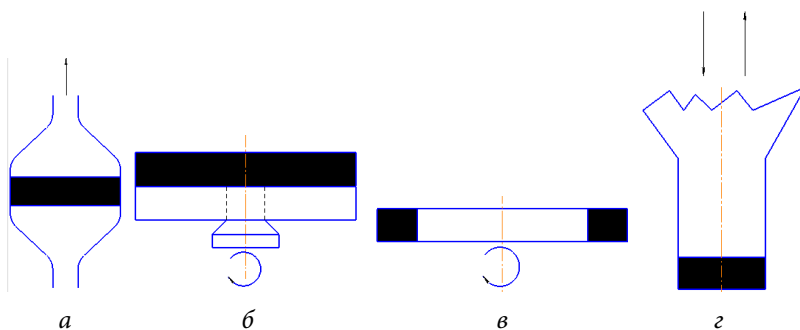


Рис. 2. Варианты определения АП покрытий методом одновременного отрыва:

a — грибовый метод; *б* — метод штифтов; *в* — метод ультрацентрифуги;
г — ультразвуковой (или вибрационный) метод

Метод ультрацентрифуги. Этот метод предусматривает предварительное нанесение пленки на поверхность некоторого тела (подложку), которое совершает вращательное движение. Возникающая при этом центробежная сила стремится оторвать пленку от подложки [7]. В этом случае пленка наносится на цилиндрическую поверхность ротора, который приводится во вращение с постепенно увеличивающейся скоростью до тех пор, пока пленка не оторвется. Для измерения адгезии на пленке делают разрезы, параллельные оси. Адгезия определяется выражением

$$\sigma = 4\pi n^2 r d \rho$$

где n — скорость вращения ротора; r — радиус ротора; d — толщина пленки; ρ — плотность пленки.

В целом оценка АП с помощью центрифугирования является довольно трудоемким процессом. Внешнее воздействие зависит от размеров отрываемой пленки, которые могут колебаться в значительных пределах. Это обстоятельство затрудняет обработку экспериментальных данных и приводит к большим разбросам значений АП. Поэтому метод ультрацентрифуги применяют сравнительно редко и главным образом в исследовательских целях [8].

Ультразвуковой метод. Метод основан на том, что при прохождении ультразвуковых колебаний через материалы, имеющие различную плотность, часть волн отражается от граничной поверхности раздела. Если покрытие в отдельных местах отделено от основы, то в возникших воздушных зазорах ультразвуковые волны будут отражаться, что будет регистрироваться на экране дефектоскопа [9]. Метод является трудоемким и требует использования специализированного оборудования.

Метод склерометрии. Суть метода заключается в нанесении на поверхность образца царапин движущимся индентором под действием вертикальной нагрузки. Количественную оценку АП проводят между формирующимся оксидным слоем и металлической подложкой. Метод разработан для оценки АП различных покрытий (в том числе твердых TiN, CrN, TiC [10–12]) на стальных

подложках, а также для оценки прочности адгезии оксидных слоев, формирующихся при окислении [13]. Недостатками метода можно считать возможность его применения только для определенных покрытий и необходимость проведения испытаний в оборудованных лабораториях.

Метод многократного изгиба. Сущность метода заключается в многократном изгибе поверхности с нанесенной на нее пленкой, вследствие чего может произойти адгезионное нарушение ее целостности. Показателем, характеризующим адгезию пленки, является число циклов изгиба. Этот метод можно реализовать с помощью специальных приборов, и только в том случае, когда субстратом служит тонкая эластичная поверхность, поддающаяся изгибу. В качестве субстрата можно использовать, например, гибкую прозрачную лавсановую ленту [8]. Как и метод решетчатых надрезов с обратным ударом, метод многократного изгиба предназначен только для эластичных поверхностей.

Вывод. Для определения АП наибольшее распространение получил метод решетчатых надрезов ввиду низкой стоимости и простоты проведения экспериментов. Он не требует специализированного оборудования и больших затрат времени. Его можно применять для жестких, эластичных, тонкослойных и многослойных покрытий, а проводить как в полевых, так и лабораторных условиях.

Литература

- [1] Есенберлин Р.Е., ред. *Справочник по капитальному ремонту автомобилей*. Москва, Транспорт, 1989, 335 с.
- [2] ГОСТ 28246–2006. *Материалы лакокрасочные. Термины и определения*. Москва, Стандартинформ, 2006, 40 с.
- [3] Кравцов В.В. *Коррозионные испытания полимерных материалов и покрытий*. Уфа, Изд-во УГНТУ, 2004, 195 с.
- [4] ГОСТ 32702.2–2014. *Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом X-образного надреза*. Москва, Стандартинформ, 2014, 14 с.
- [5] ГОСТ 27890–88. *Покрытия лакокрасочные защитные дезактивируемые. Метод определения адгезионной прочности нормальным отрывом*. Москва, Изд-во стандартов, 1988, 17 с.
- [6] ГОСТ 15140–78. *Материалы лакокрасочные. Методы определения адгезии*. Москва, Изд-во стандартов, 1996, 10 с.
- [7] Углов А.А., Анищенко Л.М., Кузнецов С.Е. *Адгезионная способность пленок*. Москва, Радио и связь, 1987, 104 с.
- [8] Зимон А.Д. *Адгезия пленок и покрытий*. Москва, Химия, 1977, 352 с.
- [9] Абрамов Б.Г., Гольдштейн В.Л. *Интенсификация теплообмена излучением с помощью покрытия*. Москва, Энергия, 1977, 256 с.
- [10] Perry A.J. Scratch adhesion testing of hard coatings. *Thin Solid Films*, 1983, vol. 107, no. 2, pp. 167–180.
- [11] Bull S.J., Berasetegui E.G. An overview of the potential of quantitative coating adhesion measurement by scratch testing. *Tribology International*, 2006, vol. 39, no. 2, pp. 99–114.

- [12] Attar F., Johannesson T. Adhesion evaluation of thin ceramic coatings on tool steel using the scratch testing technique. *Surface and Coatings Technology*, 1996, vol. 78, no. 1-3, pp. 87–102.
- [13] Федорова Е.Н., Монсо Д., Окаб Д., Худонотов С.А. Высокотемпературное окисление сплавов на основе никеля и оценка прочности адгезии формирующегося оксидного слоя. *Физикохимия поверхности и защита материалов*, 2011, т. 47, № 3, с. 295–301.

Гинсар Ирина Эдуардовна — студентка кафедры «Технологии машиностроения», Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Российская Федерация.

Научный руководитель — В.В. Калмыков, старший преподаватель кафедры «Технологии машиностроения», Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Российская Федерация.

GENERAL GUIDELINES FOR RATIONAL SELECTION OF A METHOD FOR EVALUATING ADHESIVE STRENGTH OF PAINT COATINGS

I.E. Ginsar

irinaginsar07@rambler.ru

Kaluga subsidiary, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, Russian Federation

Abstract

The article deals with general methods of measuring adhesive strength of paint coatings. We state normative documents that specify equipment, tools, and the correct sequence of testing adhesive strength of paint coatings and of processing the results obtained during tests pertaining to each method. We evaluate the primary methods of measuring adhesive strength in terms of application efficiency under industrial or laboratory conditions. We present guidelines for selecting a method best suitable for specific tasks, taking into account estimated testing expenditure. We select the most affordable method for estimating adhesive strength of paint coatings.

Keywords

Paint coatings, adhesive strength, flaking, measurement methods, disintegration, coating and substrate, guidelines, testing

© Bauman Moscow State Technical University, 2017

References

- [1] Esenberlin R.E., ed. Spravochnik po kapital'nomu remontu avtomobiley [Handbook on overall repair of machines]. Moscow, Transport publ., 1989, 335 p.
- [2] GOST 28246–2006. Materialy lakokrasochnye. Terminy i opredeleniya [State Standard 28246–2006. Paint materials. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform publ., 2006, 40 p.
- [3] Kravtsov V.V. Korrozionnye ispytaniya polimernykh materialov i pokrytiy [Corrosion testing of polymer materials and coatings]. Ufa, UGNTU publ., 2004, 195 p.
- [4] GOST 32702.2–2014. Materialy lakokrasochnye. Opredelenie adgezii metodom X-obraznogo nadreza [State Standard 32702.2–2014. Paint materials. Determination of adhesion by X-cut test method]. Moscow, Standartinform publ., 2014, 14 p.
- [5] GOST 27890–88. Pokrytiya lakokrasochnye zashchitnye dezaktiviruemye. Metod opredeleniya adgezionnoy prochnosti normal'nym otrivom [State Standard 27890–88. Decontaminable protective coatings (paints). Adhesion determination by normal pull-off method]. Moscow, Izdatelstvo standartov publ., 1988, 17 p.
- [6] GOST 15140–78. Materialy lakokrasochnye. Metody opredeleniya adgezii [State Standard 15140–78. Paintwork materials. Methods for determination of adhesion]. Moscow, Izdatelstvo standartov publ., 1996, 10 p.
- [7] Uglov A.A., Anishchenko L.M., Kuznetsov S.E. Adgezionnaya sposobnost' plenok [Adhesive ability of the films]. Moscow, Radio i svyaz' publ., 1987, 104 p.
- [8] Zimon A.D. Adgeziya plenok i pokrytiy [Adhesion of films and coatings]. Moscow, Khimiya publ., 1977, 352 p.
- [9] Abramov B.G., Gol'dshteyn V.L. Intensifikatsiya teploobmena izlucheniem s pomoshch'yu pokrytiya [Heat exchange intensification using radiation from coating]. Moscow, Energiya publ., 1977, 256 p.

- [10] Perry A.J. Scratch adhesion testing of hard coatings. *Thin Solid Films*, 1983, vol. 107, no. 2, pp. 167–180.
- [11] Bull S.J., Berasetegui E.G. An overview of the potential of quantitative coating adhesion measurement by scratch testing. *Tribology International*, 2006, vol. 39, no. 2, pp. 99– 114.
- [12] Attar F., Johannesson T. Adhesion evaluation of thin ceramic coatings on tool steel using the scratch testing technique. *Surface and Coatings Technology*, 1996, vol. 78, no. 1-3, pp. 87–102.
- [13] Fedorova E.N., Monso D., Okab D., Khudonogov S.A. High-temperature oxidation of nickel-based alloys and estimation of the adhesion strength of resulting oxide layers. *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov*, 2011, vol. 47, no. 3, pp. 295–301. (Eng. version: *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2011, vol. 47, no. 3, pp. 347–353).

Ginsar I.E. — student, Department of Engineering Technologies, Kaluga subsidiary, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, Russian Federation.

Scientific advisor — V.V. Kalmykov, Assist. Professor, Department of Engineering Technologies, Kaluga subsidiary, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, Russian Federation.