

УДК 621.791.927.5

Волков Д. А., Катренко В. Т.

### **МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ СЦЕПЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ НАПЛАВКОЙ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ**

При восстановлении изношенных деталей или производстве новых с помощью метода электроконтактной наплавки порошковых материалов в металлической оболочке (ЭКНПММО), качество покрытий зависит от прочности их сцепления с основным металлом. Кинетика развития взаимодействия присадочного металла с металлом основы, как и при сварке давлением [1], соответствует кинетике развития пластической деформации. Однако все стадии образования соединения при электроконтактной наплавке имеют ярко выраженную специфику, обусловленную особенностями нагрева, пластической деформации в процессе формирования единичных площадок наплавленного покрытия [2]. Поэтому именно определению прочности сцепления, как основного показателя качества покрытия уделяется особое внимание. Под прочностью сцепления покрытия с основой понимается минимальная сила, необходимая для полного отрыва слоя покрытия, отнесенная к единице поверхности раздела между покрытием и основой, при перпендикулярном к ней направлении действия отрывающей силы [3]. Прочность сцепления характеризует несущую способность покрытия. Определение ее истинной величины представляет собой весьма сложную и до настоящего времени неразрешенную задачу с точки зрения методики и техники эксперимента, что объясняется специфическими условиями и многофакторностью процесса формирования покрытий при их нанесении методом ЭКНПММО. В связи с этим представляет интерес выбор образца и метода измерения для получения достоверных сведений о прочности сцепления покрытий.

Основные работы по исследованию прочности сцепления покрытий с основой, полученных с использованием технологий электроимпульсного спекания порошковых материалов ведутся в Институте проблем надежности и долговечности машин АН Республики Беларусь, Брянском филиале ПО «Стройдормаш», ПО «Ремдеталь», МАТИ, ЧИМЭСК, РНИИТМ и др. организациях. Большой вклад в разработку комплексных методик по определению качественных показателей покрытий из порошков с использованием электроконтактного нагрева внесли: А. И. Райченко, Е. В. Рыморов, И. Д. Радомысельский, Н. Н. Дорожкин, В. К. Ярошевич, Я. С. Генкин, В. А. Верещагин. Несмотря на это, на сегодняшний день не существует универсальной комплексной методики оценки прочности сцепления электроконтактных покрытий с основой, обеспечивающей высокую точность полученных результатов при испытании на отрыв, сдвиг и изгиб.

Целью данной работы является анализ существующих схем испытания прочности сцепления покрытий с основой, полученных методом электроконтактной наплавки на отрыв, сдвиг и изгиб, а так же выбор методики, обеспечивающей высокую точность и достоверность полученных результатов при определении прочности сцепления покрытий, полученных методом ЭКНПММО.

Заключение порошкового материала в металлическую оболочку является одним из направлений синтеза новых наплавочных материалов путем связывания порошков в компактное тело с заданным распределением параметров. При определении прочности сцепления таких металлопокрытий необходимо обеспечивать:

- разрушение только под действием нормальных сил;
- исключение пластической деформации металла основы;
- структурное подобие образцов и реальных деталей;
- хорошее воспроизведение полученных результатов.

При одноосном напряженом состоянии способы измерения прочности сцепления можно классифицировать по следующим признакам: прямые или косвенный; испытания на отрыв, сдвиг или изгиб.

Для измерения прочности сцепления на изгиб используют образцы типа биметаллической прямой балки, расположенной на двух опорах и нагруженной в центре сосредоточенной силой (рис. 1).

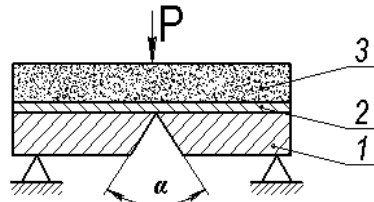


Рис. 1. Образец для испытаний на изгиб:

1 – образец; 2 – металлическая оболочка; 3 – порошковый слой

Этот способ применяется для сравнительной оценки различных порошковых покрытий. О прочности сцепления между частицами порошкового слоя судят по углу изгиба в случае появления первой трещины.

Все схемы испытаний покрытий на срез основаны на определении напряжений среза вдоль плоскости соединения порошкового слоя и металла детали.

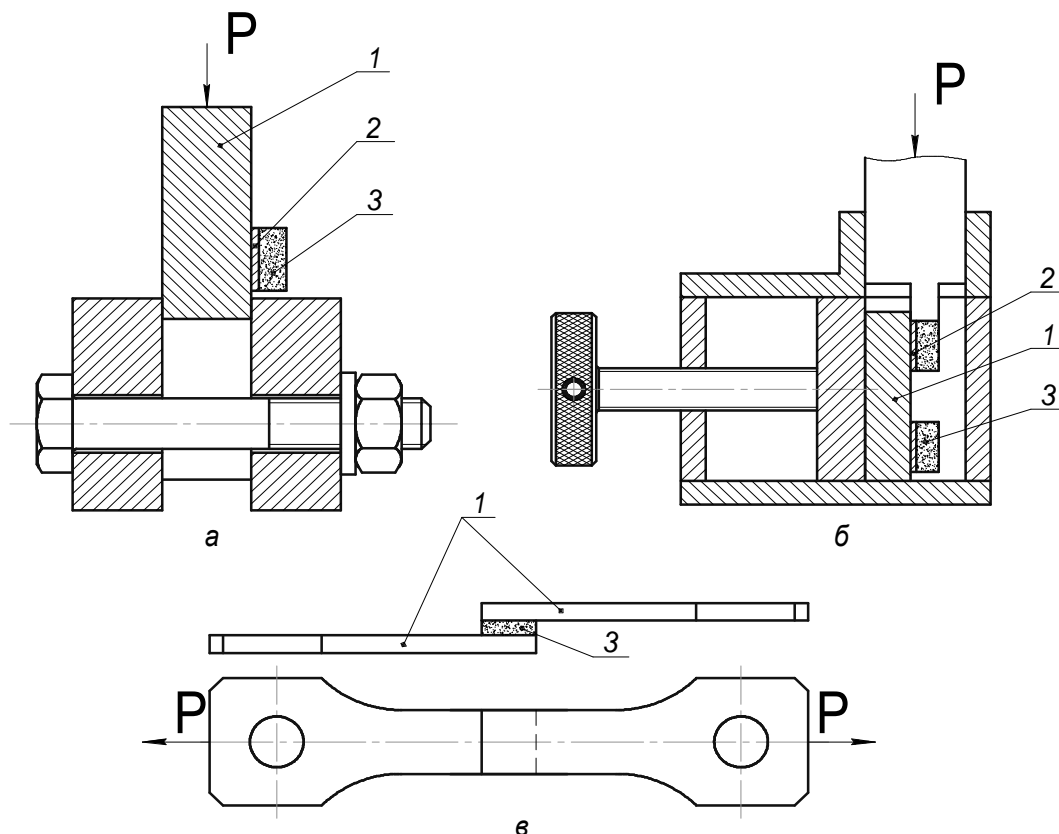


Рис. 2. Образцы для испытаний на срез:

1 – образец; 2 – металлическая оболочка; 3 – порошковый слой

Недостатком схемы, показанной на рис. 2, а, является получение завышенных показателей из-за трения образца о стенку матрицы. При использовании схемы, показанной на рис. 2, в,

возникает сложное напряжение отрыва и среза, что искажает точность результатов. Разница показаний по схемам замера прочности сцепления покрытий с основой может превышать 50 МПа.

В работе [4] предложен усовершенствованный метод замера прочности связи слоев в биметалле (рис. 2, б). Особенностью данного метода является то, что нагрузка прикладывается не к образцу, а к пуансону. Способ позволяет испытывать многослойные образцы.

Общие недостатки методов «среза» – приближенные результаты, так как большое влияние на показатели прочности сцепления в данном случае оказывают высота и характер микронеровностей. Однако надо отметить, что данный метод является наиболее подходящим для оценки качества износостойких покрытий, так как в реальных условиях эти покрытия работают под действием нормальной и тангенциальной нагрузок. В этом случае необходимо проведение сравнительных испытаний, причем шероховатость поверхности стальных образцов должна быть одинаковой.

Наиболее широко используется способ испытания слоя на отрыв нормально приложенной силой. Однако данный способ применим только для покрытий сравнительно большой толщины, что имеет место при электроконтактной наплавке.

При испытании электроконтактных покрытий на отрыв наиболее часто используют так называемый образец Стеффенса [5, 6] (см. рис. 3, а). Для уменьшения сил трения, а следовательно, улучшения воспроизводимости результатов измерений используют модификацию образца с коническим штифтом (см. рис. 3, б).

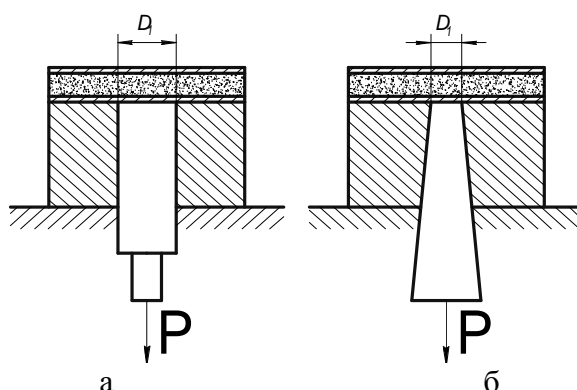


Рис. 3. Образцы для испытания на отрыв:

а – образец Стеффенса; б – модернизированный образец

Для повышения точности приложения нагрузки по оси образца рекомендуется устанавливать матрицу на сферические шайбы. Достижимые в данном случае преимущества в некоторой степени ослабляются неточностью измерения диаметра торца конического штифта. В образцах на рис. 3, а и б стержень вытягивают из отверстия и отрывают от покрытия. Силу отрыва фиксируют, а нормальные напряжения на отрыв рассчитывают по формуле:

$$s = \frac{P}{A_0}, \quad (1)$$

где  $s$  – прочность сцепления при нагрузке, перпендикулярной поверхности сцепления;

$P$  – сила отрыва, действующая перпендикулярно поверхности сцепления;

$A_0$  – начальная поверхность сцепления.

Английская фирма Deloro Stellite [7] использует образец (см. рис. 4), который отличается от предыдущих двух тем, что нагрузка на стержень приложена в обратном направлении. При этом геометрические параметры образца ограничивают следующим образом:

$$s = \frac{(D_2^2 - D_1^2) \cdot p}{4} < t_r D_1 p \Delta, \quad (2)$$

где  $D_1, D_2$  – диаметр стержня и торца образца соответственно;

$t_r$  – прочность покрытия на срез;

$\Delta$  – толщина покрытия.

Геометрические параметры образца и прочностные характеристики  $s$  и  $t_r$  следует подбирать такими, чтобы наплавляемый слой не срезался по диаметру прежде, чем оторвется от основного тела (от подложки).

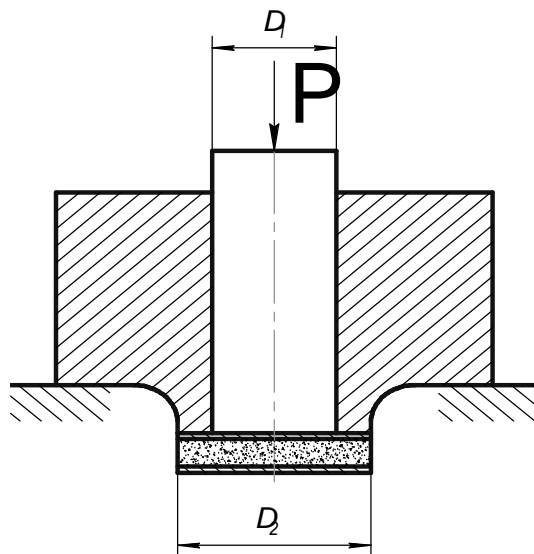


Рис. 4. Образец фирмы Deloro Stellite

Особую сложность вызывает определение прочности сцепления слоев, нанесенных электроконтактным методом, характеризующимся небольшими толщинами (0,3–1,5 мм). Увеличение толщины слоев за счет получения многослойных покрытий искажает истинную картину разрушения.

В работе [8] описан метод определения прочности сцепления применительно к электроконтактной наплавке (рис. 5, а). Особенность способа состоит в том, что слой порошка 2 находится между деталью и цилиндрическим штифтом 1. Исключен прогиб слоя. Отрыв происходит по всей поверхности штифта.

Для определения прочности слоев, полученных методом припекания или наплавки на шовных электросварочных машинах, целесообразно использовать схему, показанную на рис. 5, б.

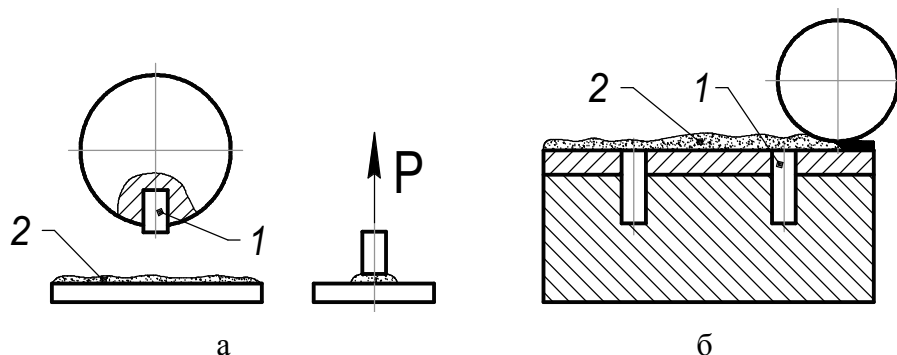


Рис. 5. Образцы для наплавки на шовных электроконтактных машинах

Этим методам присущ общий недостаток. В тех случаях, когда покрытие получают припеканием порошковой шихты к детали, эти приспособления не могут обеспечить достаточную точность эксперимента, поскольку частицы порошка, попадая на сопряженные поверхности державки и штифта, соединяют их вследствие действия высокой температуры, необходимой для припекания. Соединение штифта с державкой может быть соизмеримо сцеплению штифта со слоем, что вносит серьезные ошибки в измерения. Авторами [9] разработан способ, позволяющий устранить этот недостаток (рис. 6). Отличительной особенностью его является выполнение штифта с тонкопластинчатой головкой, предназначенной для предотвращения попадания материала покрытия на сопрягаемые поверхности штифта и державки. Образец содержит державку 1, в отверстие 2 которой вставлен штифт 3, выполненный с тонкопластинчатой головкой 4. На торец головки наносится покрытие 5. На торец головки наносится покрытие 5.

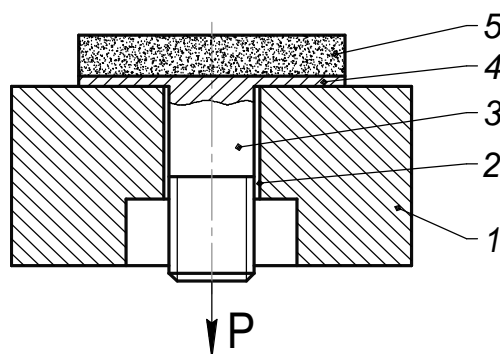


Рис. 6. Образец ИНДМАШ АН Республики Беларусь:

1 – державка; 2 – отверстие державки; 3 – штифт; 4 – тонкопластинчатая головка; 5 – наносимое покрытие

Отрыв штифта от покрытия происходит при действии нормально приложенной силы  $P$ . Усилие, затрачиваемое на срезание головки, может быть легко определено расчетным или экспериментальным путем. При вычитании из общего усилия, необходимого для отрыва штифта, усилия, затрачиваемого на срезание головки, получают искомую прочность сцепления по формуле:

$$s_{cy} = \frac{4(P_0 - P_{cp})}{\rho D^2}, \quad (3)$$

где  $P_0$  – усилие отрыва штифта от слоя, Н;

$D$  – диаметр штифта, м;

$P_{cp}$  – усилие среза тонкопластинчатой головки, Н.

Существует группа образцов, обладающих известной универсальностью и позволяющих производить измерения прочности сцепления покрытий с основным материалом как на отрыв, так и на чистый сдвиг (см. рис. 7, а, б). Безусловными преимуществами обладает образец рис. 7, а. На его открытый торец наносят покрытие, прочность сцепления которого с кольцевой поверхностью штифта  $I$  хотят измерить. При этом условия нанесения покрытия на этот образец аналогичны условиям наплавки на образцы, представленные на рис. 3 и 4. Кроме того, по сравнению с этими образцами влияние краевых эффектов сводится к минимуму. Это происходит потому, что зона измерений находится во внутренней области образца, на которую наносят покрытие, при условии, что жесткость неподвижных внутренних штифтов и наружной втулки во много раз больше, чем покрытия. Причем воспроизводимость результатов возрастает с уменьшением толщины кольцевого штифта. При достаточно тонкой стенке штифт легко деформируется, и в результате измерений вносятся дополнительные погрешности.

Поэтому был предложен усовершенствованный образец со штифтом ступенчатой формы (рис. 7, б), в котором кольцевую часть, непосредственно участвующую в измерениях, выполняют необходимой толщины, а начальная длина тонкой части составляет 20...50 толщин кольца. Жесткость образца при этом не снижается, а точность измерений повышается.

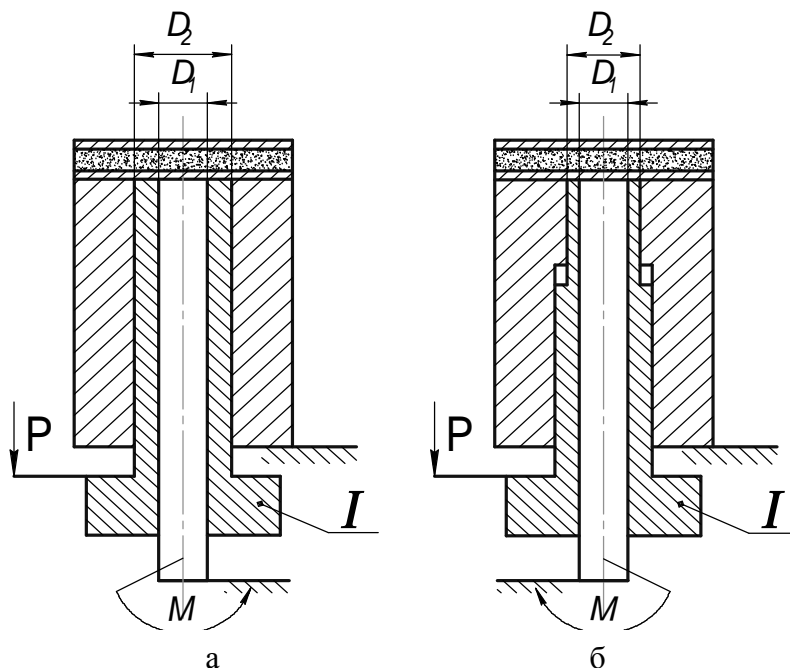


Рис. 7. Образцы для совместных испытаний на отрыв и сдвиг

Прочность сцепления покрытий на отрыв в образце, представленном на рис. 7, б рассчитывают по формуле:

$$s = \frac{4P}{p(D_2^2 - D_1^2)}, \quad (4)$$

где  $D_1, D_2$  – внутренний и наружный диаметры кольцевого штифта соответственно;  $P$  – сила, необходимая для отрыва штифта от покрытия.

Следует отметить, что вследствие использования цилиндрических стержней отрывающая сила всегда нормальна к наплавленной поверхности, что способствует повышению стабильности результатов измерений. Как отмечено выше, на образцах данного типа возможно осуществление испытаний прочности сцепления покрытий на чистый сдвиг. При этом тангенциальные напряжения рассчитывают по формуле:

$$t = \frac{16M}{p(D_1 + D_2)(D_2^2 - D_1^2)}, \quad (5)$$

где  $t$  – прочность сцепления на чистый сдвиг;

$M$  – момент, приложенный к образцу при разрушении покрытия.

При испытаниях образца (рис. 7) на чистый сдвиг появляются дополнительные возможности проведения измерений с ошибкой, не превышающей некоторую, заранее заданную. При нагружении кольцевого элемента моментом  $M$  тангенциальные напряжения на внутренней ( $t_1$ ) и наружной ( $t_2$ ) поверхностях рабочей части элементов будут соответственно равны:

$$t_1 = \frac{2M}{D_1 s}; \quad t_2 = \frac{2M}{(D_1 + 2t)s}, \quad (6)$$

где  $S$  – площадь нормального сечения кольцевого элемента;

$t = (D_1 + D_2)/2$  – толщина кольцевого элемента.

Относительную ошибку при испытаниях рассчитывают по формуле:

$$e = \left| \frac{2(t_1 - t_2)}{t_1 + t_2} \right|. \quad (7)$$

Решая совместно уравнения (5, 6 и 7), получают соотношение между геометрическими параметрами образца и относительной ошибкой измерений:

$$\frac{t}{D_1} = \frac{e}{2 - e} \quad \text{или} \quad e = \frac{2t}{D_1 + t}. \quad (8)$$

Таким образом, задаваясь геометрическими параметрами образца, можно свести к минимуму ошибку измерений.

В образцах данного типа возможно реализовать одноосное напряженное состояние при толщине покрытия не менее 0,5  $t$ . Кроме того, достаточно просто реализуется вариант испытаний прочности сцепления при повышенных или пониженных температурах и в разных средах. В этом случае внутренний, наружный и средний элементы образца выполняют из одного материала для обеспечения постоянного коэффициента линейного расширения.

## ВЫВОДЫ

Результаты анализа различных образцов, предложенных для испытаний прочности сцепления покрытий, полученных методом электроконтактной наплавки порошковых материалов в металлической оболочке с основой на отрыв и сдвиг, свидетельствуют о том, что существующие методики измерения не дают высокой точности и достоверности получаемых результатов. Наименьшей привесной ошибкой измерений обладает образец, представленный на рис. 7, б, который можно принять за основу при разработке соответствующего ГОСТа или ТУ для оценки прочности сцепления электроконтактных покрытий с основой.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дорожкин Н. Н. Упрочнение и восстановление деталей машин металлическими порошками / Н. Н. Дорожкин. – Мн. : Наука и техника, 1975. – 152 с.
2. Ярошевич В. К. Электроконтактное упрочнение / В. К. Ярошевич, Я. С. Генкин, В. А. Верещагин. – Мн. : Наука и техника, 1982. – 256 с.
3. Волков Д. А. Влияние твердых смазок на прочность сцепления фрикционного покрытия с несущим каркасом при электроконтактной наплавке / Д. А. Волков, В. Т. Катренко, В. А. Пресняков // Вісник східноукраїнського національного університету ім. В. Даля : науковий журнал. – Луганськ, СНУ, 2002. – Вып. 7 (53). – С. 22.
4. Малышев В. А. Усовершенствованный метод определения прочности слоев в биметалле / В. А. Малышев // Заводская лаборатория. – 1993. – № 2. – С. 210–211.
5. Steffens H. D. Fundamentals of Arc Spraying. Seminar Handbook. Metal Spraying by the Electric Arc. – «The Welding Institute, Abington Cambridge», 1998. – P. 2–4.
6. Steffens H. D. Present status and future developments of arc spraying. Seminar Handbook. – Metal spraying by the electric, arc. – «The Welding Institute, Abington Cambridge», 1998. – P. 37–43.
7. Products & Services/Coating Services/Coating Services Overview [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.stellite.com>.
8. Моторин В. Н. Исследование электроконтактной приварки порошковых твердых сплавов для упрочнения лезвий рабочих органов сельскохозяйственных машин при их восстановлении : автореф. дис. канд. техн. наук. – М., 1975. – 22 с.
9. А. с. 278182 СССР (СССР), МПК G01n 19/04. Приспособление для определения прочности сцепления покрытий с основным металлом / Н. Н. Дорожкин, И. М. Зуев. – № 1142072/25-28 ; заявл. 28.11.1967 ; опубл. 05.08.1970, Бюл. № 25.