

## **НЕКОТОРЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ПОКРЫТИЙ**

**Л.А. Лопата, н. с.,**

**В.Л. Кобзарь, асп.,**

**В.М. Кулыжский, асп.,**

*ИПП им. Г.С. Писаренко НАН Украины, г. Киев, Украина*

**А.В. Лопата, асп.,**

**И.В. Смирнов, д-р. техн. наук, проф.**

*Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт им Игоря Сикорского", г. Киев, Украина*

**В.Я. Николайчук, препод.**

*Винницкий национальный аграрный университет, г. Винница, Украина*

**Состояние проблемы.** Независимо от области применения покрытия адгезионная прочность (прочность сцепления) является основным фактором, определяющим его пригодность. Согласно ДСТУ 3761.1 – 98 – ДСТУ 3761.5 – 98 "Зварювання та споріднені процеси", адгезионная (прочность сцепления покрытия с основой) – условное напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, предшествующей отделению покрытия от основы. Прочность сцепления принимается в качестве основного параметра оптимизации технологических процессов нанесения покрытий [1].

Вопросы адгезионной прочности затрагивают покрытия, клеевые и паяные соединения, биметаллы, композитные материалы с металлической, полимерной и кристаллической матрицей. Исследователи адгезионной прочности, как правило, рассматривают применимость теорий адгезии к какому-либо определенному виду покрытий (лакокрасочных, гальванических, жаростойких) [2, 3]. Каждый вид покрытий отличается свойствами и областью применения и для каждого вида присущи определенные теории адгезии, методы экспериментального исследования и приборы.

В работе дан анализ состояние существующих теоретических подходов и методов оценки адгезионной прочности, применяемых в исследовании различных видов адгезионных соединений.

**Цель исследований.** Оценить возможность применения существующих гипотез и теорий адгезии для решения проблем прочности материалов с покрытиями.

**Результаты исследований.** Несмотря на большое количество исследований при создании покрытий еще не разработана общая теория адгезионной прочности. Адгезионная прочность покрытий определяется лишь экспериментальными исследованиями. Существующие теории и гипотезы адгезии остаются дискуссионными. Отсутствие расчетов прочности сцепления обусловлено трудностями теоретического и экспериментального анализа формирования покрытия и сложной зависимостью процессов от большего числа параметров [1].

Обзор современных концепций и представлений, касающихся разрушения адгезионных соединений, указывает на аналогию с механикой разрушения [1]. В проведенной нами работе приведен обзор современного состояния теоретических представлений физических, химических и механических явлений адгезии.

Адгезия покрытия – образование атомной или молекулярной связи между основой и частицами покрытия во время нанесения покрытия. Многочисленными экспериментами установлено, что сцепление покрытий с основой происходит за счет различных явлений и процессов, происходящих при их нанесении – механического зацепления, физической адгезии, образования химической связи, сил усадки, металлургического взаимодействия, диффузии [2]. В соответствии с этим в основу многих теорий адгезии положены эти

отдельные явления и процессы. В основном каждая теория адгезии рассматривает одно из этих явлений как главную причину образования прочной связи, пренебрегая остальными. [3].

При образовании адгезионного соединения различают первичные (возникновение молекулярной или химической связи (ионной, ковалентной, механической)) и вторичные (химические и электрохимические реакции, растворение, диффузия) процессы [3].

Прочное сцепление возникает в результате химического взаимодействия отдельных компонент [2]. Для систем основа (металл) - покрытие предложены теория кислотно-основного взаимодействия, окисная, дендритная и электролитная гипотезы [2]. Теория и гипотезы, предложенные для объяснения сцепления металлов, довольно противоречивы, не дают зависимости способности к сцеплению от физико-химических свойств компонентов [2].

Рекристаллизационная гипотеза [2] объясняет сцепление совместной рекристаллизацией зерен на границе раздела слоев. Металлографический анализ опровергает эту гипотезу, она не объясняет многих явлений.

Энергетическая гипотеза основана на активировании сцепления пластической деформацией [2, 3]. Развитие ее привело к дислокационной гипотезе сцепления, согласно которой адгезионная связь вызвана движением дислокационных границ отдельных контактов до образования связей на всей площади контакта. Однако обе эти гипотезы не могут объяснить от каких физико-химических свойств материалов зависит адгезионная прочность.

Адсорбционная гипотеза отмечает незначительное влияние на адгезию чистых металлов физически адсорбированного газа и более значительное влияние химически адсорбированного газа [2]. Адсорбционная гипотеза развита в адсорбционную теорию адгезии, объясняющую сцепление взаимодействием межмолекулярных сил (дисперсионных, водородных, индукционных, ориентационных, электростатических). Адсорбционная теория не объясняет больших значений прочности сцепления [2].

Молекулярная теория адгезии является развитием адсорбционной теории, она учитывает поверхностную и объемную диффузию, микрореологию и эффект поверхностных сил [2]. Молекулярная теория может послужить базой для создания единой теории адгезии.

Электронная теория адгезии основана на возникновении двойного электрического слоя на границе раздела фаз. Электризация при разрушении адгезионного контакта и возникающие за ее счет силы электрического притяжения обуславливают высокие значения прочности сцепления [2, 3]. Электронная теория является своеобразным развитием адсорбционной теории. В развитие электронной теории предложена электрорелаксационная теория адгезии, учитывающая работу разрушения двойного электрического слоя на границе раздела, диффузионные явления и зависимости работы деформации адгезива от скорости деформирования [3].

Механическая адгезия зависит от шероховатости и пористости контактных поверхностей [3]. Электрохимическая теория сцепления с металлом покрытий объясняет адгезионную связь неравномерным растворением поверхности электрохимической коррозией и увеличением механической составляющей адгезии [2].

Для покрытий решающей является стадия химического взаимодействия, а в образовании адгезионной связи покрытий велика роль диффузионных процессов [2]. Согласно диффузионной теории сцепления диффузия один из эффективных способов достижения молекулярного контакта между компонентами в покрытии и в системе покрытие-основа.

Анализ теорий и гипотез адгезии, а также экспериментальных данных подтверждают достоверность диффузионной теории адгезионной прочности. Диффузионная теория адгезии развита до микрореологической, в основе которой лежат процессы, которые зависят от времени, температуры, давления [2, 3]. Диффузионная теория рассматривает адгезию как объемное явление, а не поверхностное. Диффузионное взаимодействие на границе раздела фаз приводит к образованию межфазного слоя с особыми механическими свойствами [2, 3]. Поэтому в исследовательской практике стали уделять больше внимания изучению

межфазной, интерфейсной, связующей, промежуточной зоне в покрытиях и композитах. Основные вопросы – структура и свойства этой зоны [2, 3]. Металлографический анализ переходной зоны представлен на рис. 1 [4-6].

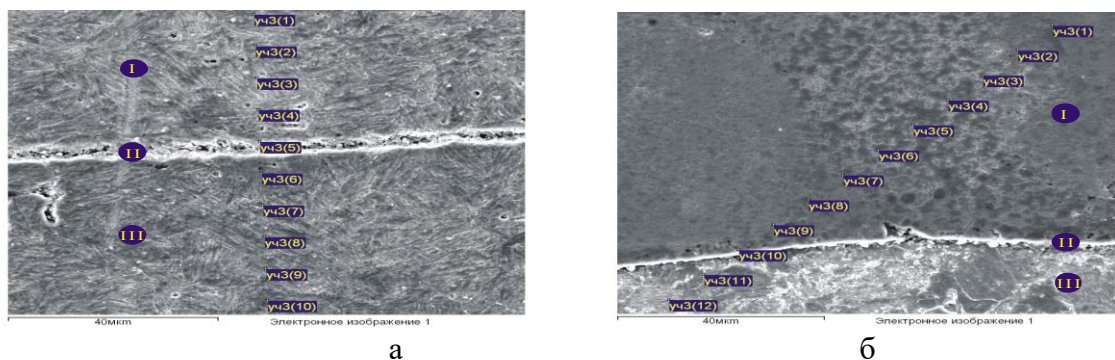


Рисунок 1 - Микроструктура покрытий (x1000), полученных электроконтактным припеканием. Материал покрытия: (а) ПГ-СР4; (б) ПГ-С1. 1 – покрытие; 2 – переходная зона (диффузионная зона), 3 – основа (подложка).

Диффузионная теория адгезии широко применяется в технологиях нанесения упрочняющих покрытий. Особенно эффективно ее применение при нанесении газотермических покрытий. На практике теория реализуется различными видами термической и механотермической обработки покрытий. Влияние термообработки на прочность сцепления различных материалов свидетельствует о роли диффузионных процессов и переходных слоев [1, 3]. Адгезионная прочность повышается за счет диффузионных процессов благодаря эффекту аномального переноса, который имеет место как при механотермической обработке покрытий, так и при термической обработке [4]. Этот эффект реализуется в технологии газотермических покрытий и их электроконтактной обработке [5]. На примере электроконтактной обработки (ЭКО) покрытий, полученных газопламенным (ГПН) и электродуговым напылением (ЭДН), достигнуто повышение адгезионной прочности покрытий с основой в два раза. При механотермической обработке (МТО) [4] напыленных покрытий (например, электроконтактной и др.) газотермических покрытий скорость диффузии ускоряется на несколько порядков [5, 6].

Адгезионная прочность (прочность сцепления) покрытий зависит как от состава покрытия, так и от рельефа поверхности, на которую наносится покрытие, от образования промежуточных слоев при нанесении покрытий [1]. Существующие теории и гипотезы адгезии рассматривают только соотношение между теоретической и реальной адгезионной прочностью и не противоречат, а только дополняют одна другую.

На снижение адгезионной прочности системы основа-покрытие влияют остаточные напряжения ( $\sigma_{ост.}$ ) [7]. Увеличение остаточных напряжений ( $\sigma_{ост.}$ ) может привести к растрескиванию и отслоению покрытия. Если бы удалось полностью исключить влияние на реальную адгезию остаточных напряжений ( $\sigma_{ост.}$ ), то показатели ее были бы занижены влиянием концентраторов напряжений. Определяемая экспериментально адгезионная прочность – это часть прочности удержания или еще меньшая часть реальной адгезионной прочности. Приняв эту теорию за основу в Институте проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины исследовали влияние на адгезионную связь напряженного состояния основы и установили функциональные зависимости между этими факторами [1, 7]. Из эксперимента получали интегральную характеристику реальной адгезии и остаточных напряжений  $\sigma_{ост.}$  (прочность удержания покрытия на основе (подложке) или техническая адгезия).

**Выводы.** Существующие теории и гипотезы адгезии не противоречат, а только дополняют одна другую. Для применения любой теории адгезии в каждом случае необходим конкретный анализ адгезионных явлений. В практике многооперационных технологий упрочняющих покрытий наиболее распространена и востребована диффузионная теория адгезии, реализуемая при различных видах термомеханической, механической, термической

и химико-термической обработки. Прочность сцепления (адгезионная прочность) является функцией смачивающей способности и химической активности материала покрытия, энергии межатомных связей и формы микрорельефа поверхности, на которую наносится покрытие.

### Список литературы

1. Ляшенко Б.А., Агеев М.С., Лопата Л.А. Роль теорий адгезии в формировании упрочняющих покрытий *Инженерия поверхности и реновация изделий*: матер. 18-й Междун. науч.-техн. конф. (Свялява, 4-8 июня 2018). Киев, АТМ Украины. 2018.-С. 6-10
2. Аппен А.А. О теоретических критериях адгезии покрытий в металлах. [Текст] – В кн.: Неорганические и органические покрытия. Л.: 1975, - С 3-11.
3. Э.С. Уманский, Б.А. Ляшенко, В.В. Ришин и др. О применении различных теорий адгезии к жаростойким покрытиям. *Защитные покрытия на металах*. Рес. межвед. сб. Вып. 12, Киев: Наукова думка, 1978. – с.125-132.
4. Л.А. Лопата, Б.А. Ляшенко, А.О. Корниенко, В.Н. Корж. Влияние аномального массопереноса на адгезионную прочность износостойких порошковых покрытий, полученных механо-термическими методами. *Прогрессивные технологии и системы машиностроения*, Междун. сб. научн. трудов: Донецк: 2008, Вып. 36. – С. 257-261.
5. Лопата Л.А. Влияние аномального массопереноса на адгезионную прочность порошковых покрытий при электроконтактном припекании. *Вісник Черкаського національного технічного університету*, 2007. Вип.117, серія фіз-мат. наук. - С. 87-94.
6. Д.В. Миронов, В.Ф. Мазанко, Д.С. Герцикен, Л.А. Лопата, В.П. Бевз Влияние эффекта Троицкого на диффузионные процессы в деформируемых металлах при электроконтактном припекании. *Журнал Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии*, 2013 г., №3, - С 27-34.
7. Лопата Л.А. Адгезионная прочность и остаточные напряжения при электроконтактном припекании порошковых покрытий. *Проблемы прочности*. 2010, № 4. – С. 71-76.