

# МЕТОД КОЛИЧЕСТВЕННО-КАЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

Гайфуллин М.Р.<sup>1</sup>, Мингажев А.Д.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Гайфуллин Мурат Рамилевич – студент магистратуры факультета ИАТМ,  
Уфимского государственного авиационного технического университета

<sup>2</sup>Мингажев Аскар Джамалиевич – кандидат технических наук, доцент,  
Уфимского государственного авиационного технического университета

г. Уфа, Российская Федерация

**Аннотация:** в статье предлагается метод количественно-качественной оценки адгезионной прочности одно- и многослойных покрытий, позволяющий оценить адгезионную прочность между покрытием и основой и между слоями покрытия.

**Ключевые слова:** адгезионная прочность, количественно-качественного метод, ионно-плазменные покрытия

## METHOD OF QUANTITATIVE-QUALITY ASSESSMENT OF THE ADHESIVE STRENGTH OF ION-PLASMA COATINGS

Gaifullin M.R.<sup>1</sup>, Mingazhev A.D.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Gaifullin Murat Ramilevich – Master's student of the IATM faculty, Ufa State  
Aviation Technical University

<sup>2</sup>Mingazhev Askar Dzhamalievich – Candidate of Technical Sciences, Associate  
Professor, Ufa State Aviation Technical University

Ufa, Russian Federation

**Annotation:** the article proposes a method of quantitative and qualitative assessment of the adhesion strength of single and multilayer coatings, which allows to evaluate the adhesion strength between the coating and the substrate and between the coating layers.

**Keywords:** adhesive strength, quantitative-qualitative method, ion-plasma coating

УДК 620.179.4

Развитие авиационной техники и ее эксплуатация в условиях воздействия на ее основные детали и узлы различных агрессивных и силовых факторов, привело к разработке специальных защитно-упрочняющих покрытий.

При этом количественная оценка параметров качества защитно-упрочняющих покрытий, позволяющая более надежно управлять качеством производимой продукции машиностроения, является весьма актуальной задачей. В технике и технологии машиностроения количественная оценка является основой расчетов, а качественная оценка - направлена на обеспечение эффективного их функционирования. При управлении качеством проектирования или качеством продукции, задача состоит в возможности обеспечения требуемых функциональных свойств деталей с покрытиями. Поэтому для решения этой задачи необходимо уметь количественно выражать качественное состояние объекта, т. е. количественно оценивать его качество.

Совершенствование защитных покрытий привело к созданию более сложных конструкций, в том числе к появлению многослойных и мультислойных вариантов покрытий. Переход от простых покрытий к более сложным достаточно остро поставил задачу контроля параметров их качества, одним из важнейшим из которых является их адгезионная прочность [ 1, 2].

Наиболее перспективными для защиты ответственных деталей авиационной техники и, в частности газотурбинных двигателей являются ионно-плазменные покрытия. Эти покрытия отличаются высокой адгезионной прочностью, что в значительной степени ограничивает использование таких количественных методов оценки прочности сцепления как клеевой и штифтовой [1, 3]. Клеевой метод лимитирован прочностью клеевого соединения на границе «покрытие – отрывной элемент», а штифтовой метод не позволяет, из-за зазора между бобышкой и штифтом выращивать сплошное покрытие [1].

Это объясняет тот факт, что для оценки качества ионно-плазменных покрытий используются, в основном, качественные методы определения адгезионной прочности, наиболее распространенным из которых является метод изгиба образца-свидетеля с покрытием [4, 5]. Однако последний из

рассматриваемых методов также имеет ограничения при оценке многослойных покрытий, не позволяя выявить параметры адгезионной прочности покрытия и прочность сцепления между слоями покрытия.

В этой связи целью настоящей работы являлась разработка и исследование количественно-качественного метода оценки адгезионной прочности одно и многослойных ионно-плазменных защитно-упрочняющих покрытий.

Метод оценки адгезионной прочности одно или многослойного покрытия, заключается в нанесении слоев испытуемого покрытия на образец в виде металлической пластины и изгиб пластины с испытуемым покрытием и оценку прочности сцепления по результатам разрушения покрытия. При этом до или после деформации приготавливают микрошлиф в плоскости, перпендикулярной линии надреза, и на микрошлифе или его фотографическом изображении определяют (рис. 1):

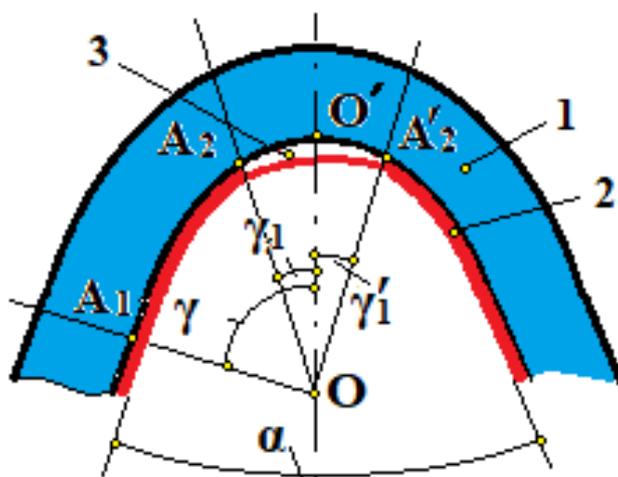


Рис. 1. Схема определения углов деформации и отслоения изгиба образца с покрытием (1 – изогнутый пластинчатый образец с покрытием, 2 – покрытие, 3 – зона отслоения.  $OO'$  - биссектриса угла изгиба,  $O$  – точка пересечения биссектрисы с линией, перпендикулярной поверхности покрытия,  $\alpha$  – угол изгиба образца,  $A_1$  – точка начала зоны деформации

пластины,  $A_2$  ( $A_2'$ ) – точка конца участка отслоения покрытия от основы,  $\gamma$  – угол деформации покрытия,  $\gamma_1$  ( $\gamma_1'$ ) – угол отслоения покрытия от основы)

$O$  – точку пересечения биссектрисы угла изгиба образца  $\alpha$ , проходящей через центр изгиба образца  $O'$ , с линией, перпендикулярной поверхности покрытия в точке  $A_1$  и проходящей через точку  $A_1$ , проводят из точки  $O$  линию через точку  $A_2$  и определяют угол  $\gamma_1$  между этой линией  $OA_2$  и биссектрисой  $OO'$ , затем проводят из точки  $O$  линию через точку  $A_3$  и определяют угол  $\gamma_{\max}$  (рис.2) между этой линией  $OA_3$  и биссектрисой  $OO'$ , затем проводят из точки  $O$  линию через точку  $A_4$  и определяют угол  $\gamma_{\min}$ , между этой линией  $OA_4$  и биссектрисой  $OO'$ , где:

$\alpha$  – угол изгиба образца,

$A_1$  – точка начала зоны деформации пластины,

$A_2$  – точка конца участка отслоения покрытия от основы,

$\gamma$  – угол деформации ( $\gamma = \angle A_1OO'$ );

$\gamma_1$  – угол отслоения покрытия от основы ( $\gamma_1 = \angle A_2OO'$ );

$A_3$  – точка конца участка максимального отслоения слоя покрытия от нижележащего слоя покрытия,

$\gamma_{\max}$  – угол максимального отслоения слоев покрытия ( $\gamma_{\max} = \angle A_3OO'$ ),

$A_4$  – точка конца участка минимального отслоения слоя покрытия от нижележащего слоя покрытия,

$\gamma_{\min}$  – угол минимального отслоения слоев покрытия ( $\gamma_{\min} = \angle A_4OO'$ ),

а по значениям углов  $\gamma_1$ ,  $\gamma_{\max}$ ,  $\gamma_{\min}$  судят о прочности сцепления между слоями и между покрытием и основой, причем чем меньше значение углов  $\gamma_1$ ,  $\gamma_{\max}$ ,  $\gamma_{\min}$  тем больше адгезионная прочность покрытия.

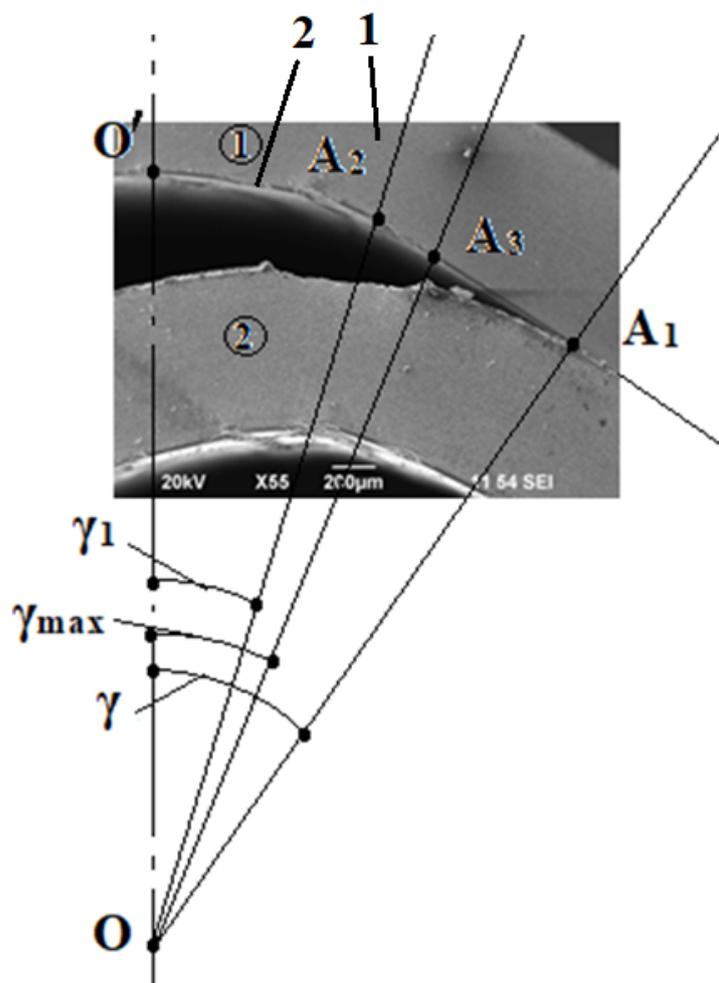


Рис. 2. Определение углов деформации и отслоения покрытия в двуслойном ионно-плазменном покрытии системы Ti-TiN (1 – изогнутый образец с покрытием, 2 – покрытие; в круге обозначены номера образцов; определения углов произведены для образца, обозначенного «1» в круге;  $\gamma$  – угол деформации покрытия,  $\gamma_1$  – угол отслоения покрытия от основы,  $\gamma_{\max}$  – угол максимального отслоения слоев покрытия)

Для оценки адгезионной прочности между покрытием и основой, а также между слоями покрытия были проведены исследования двух- и четырехслойных ионно-плазменных покрытий из нитрида титана, микрофотографии которых представлены на рисунках с определением углов деформации и отслоений (рис. 2, рис. 3).

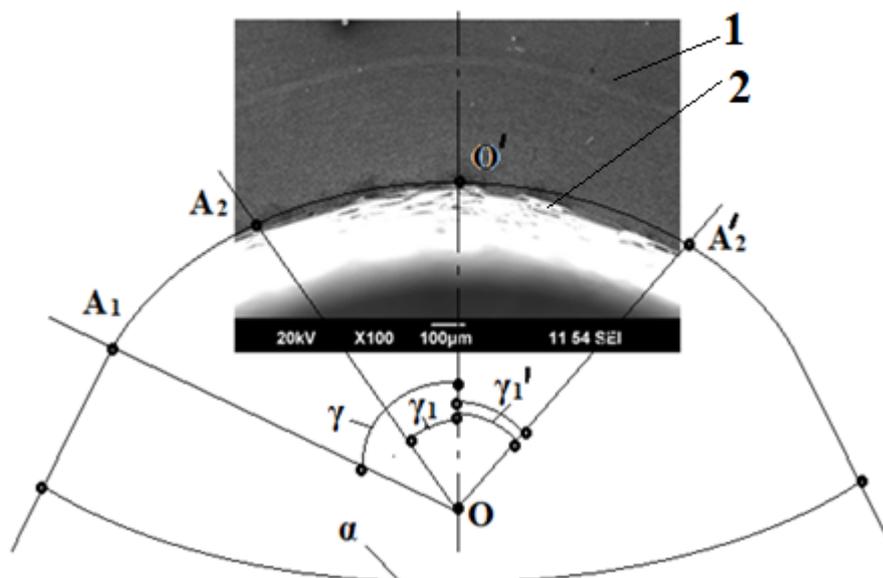


Рис. 3. Двухстороннее определение углов деформации и отслоения покрытия в четырехслойном ионно-плазменном покрытии системы Ti-TiN (1 – изогнутый образец с покрытием, 2 – покрытие;  $\alpha$  – угол изгиба образца,  $\gamma$  – угол деформации покрытия,  $\gamma_1$  ( $\gamma_1'$ ) – угол отслоения покрытия от основы)

Исследования адгезионной прочности покрытий проводились также на пластинчатых образцах размерами 10x100x2мм из нержавеющей стали марки 12X18Н10Т. Были нанесены ионно-плазменные многослойные покрытия с чередующимися слоями титана и нитрида титана. Толщина слоя титана составляла 0,6 мкм, толщина слоев нитрида титана – 2,2 мкм при толщине первого слоя титана 0,8 мкм. Использовали многослойное покрытие, содержащее восемь слоев при общей толщине покрытия, равной 11,4 мкм. Испытания проводили при угле изгиба  $\alpha = 90$  градусов. Было испытано 8 образцов. На четырех образцах микрошлифы на боковых поверхностях образцов приготавливали до изгиба, на других четырех образцах – после изгиба. Для облегчения оценки параметров покрытия в деформированной изгибом зоне образцов микрошлифы в зоне отпечатка фотографировали и на фотографиях микрошлифов производили необходимые замеры. Микрошлиф приготавливали на боковой стороне испытуемого образца в плоскости. В

таблице 1 приведены результаты испытаний образцов с многослойными покрытиями.

Таблица 1.

Результаты испытаний образцов с многослойными покрытиями на изгиб.

№	Параметры адгезионной прочности многослойного покрытия					
	$\gamma$ 1, град	$\gamma_m$ ax, град	$\gamma_m$ in, град	$K_{отс.п}$ ок	$K_{отс.сл.м}$ ax	$K_{отс.сл.}$ min
1	<b>1</b>	4	8	0,13	0,04	0,09
	<b>2</b>					
2	8	5	<b>12</b>	0,08	0,05	<b>0,13</b>
3	1	3	9	0,12	0,03	0,10
	1					
4	1	5	11	0,11	0,05	0,12
	0					
5	9	<b>6</b>	10	0,10	<b>0,07</b>	0,11
*						
6	7	4	11	0,07	0,04	0,12
*						
7	1	4	9	<b>0,14</b>	0,04	0,10
*	3					
8	1	3	11	0,11	0,03	0,12
*	0					

Примечания:

1. Звездочкой (\*) отмечены номера образцов со шлифами, изготовленными после изгиба образцов.

2. Жирным шрифтом выделены значения образцов с минимальной адгезионной прочностью

При оценке прочности сцепления между покрытием и основой, а также между слоями покрытия следует учитывать, что чем меньше значения углов  $\gamma_1$ ,  $\gamma_{max}$ ,  $\gamma_{min}$  и меньше значения коэффициентов отслоения, тем больше соответствующие величины адгезионной прочности.

Заключение

1. Существует проблема количественной оценки адгезионной прочности одно- и многослойных ионно-плазменных покрытий.

2. Предложен метод количественно-качественной оценки адгезионной прочности одно- и многослойных покрытий, позволяющий оценить адгезионную прочность между покрытием и основой и между слоями покрытия. Метод может быть использован для оценки адгезионной прочности ионно-плазменных покрытий.

3. Проведены исследования образцов с ионно-плазменными одно- и многослойными покрытиями из нитрида титана, позволившие произвести сравнительный анализ покрытий, полученных по различным вариантам.

#### *Список литературы*

1. Тушинский Л.И., Плохов А.В. Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий. Новосибирск, Наука 1986. 218 с.
2. Зимон А.Д. Адгезия пленок и покрытий. М.: Химия, 1977. 345 с.
3. Хасуи А., Моричаки О. Наплавка и напыление / пер. с яп. О.Н. Попов; под ред. В.С. Степина, Н.Г. Шестеркина. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
4. Табаков, В.П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 2008. – 311 с.
5. А.С. СССР № 538271 «Образец для определения прочности покрытий при изгибе», Бюл. №46, 1976г