

## Экспериментальная оснастка и методика определения когезионной прочности порошковых покрытий

*Д.В. Малий, П.Н. Медведев*

*Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого, Тула*

**Аннотация:** В статье описана конструкция экспериментальной оснастки (образца) для определения когезионной прочности порошковых покрытий в инактивных и агрессивных средах. Представлена методика определения механических характеристик образцов с покрытиями, а также данные результатов испытания на когезионную прочность покрытий на основе никеля, ПН60Ю40, ПН40Ю60, железо-алюминия, покрытий из самофлюсующихся сплавов на основе никеля ПГСР-2, ПГСР-3, ПГСР-4.

**Ключевые слова:** экспериментальная оснастка, когезионная прочность, газотермические порошковые покрытия, физико-механические свойства, плазменное напыление.

В настоящее время существует необходимость разработки комплексной методики исследования процессов фрикционного взаимодействия и определения когезионной прочности сцепления покрытий с подложкой, которая позволит решить ряд актуальных проблем: расширить возможности технологий определения когезионной прочности покрытий [1]; определить зависимости физико-механических и эксплуатационных свойств порошковых покрытий и построить их модели с использованием результатов испытаний [2]; оптимизировать технологические режимы нанесения покрытий с применением многокритериальных методов оптимизации [3]; установить режимы дополнительных видов обработки в направлении повышения механических эксплуатационных характеристик функциональных покрытий [4,5].

В попытке уменьшить трудоемкость, повысить точность и достоверность определения когезионной прочности порошковых покрытий в инактивных и агрессивных средах [6], получаемых на одной и той же конструкции устройства с возможностью многоразового его использования, а также обеспечения возможности проведения ускоренных лабораторных

испытаний покрытия в условиях, имитирующих эксплуатацию изделий, нами была разработана экспериментальная оснастка [7].

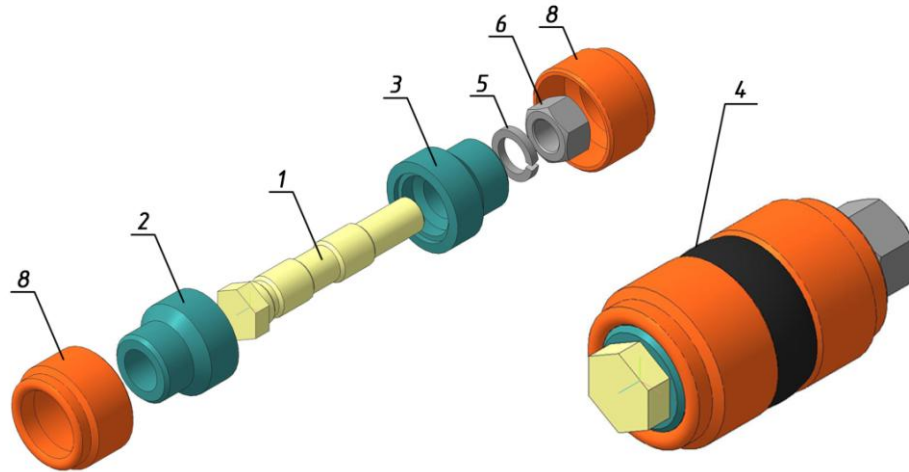


Рис. 1. – Образец для определения когезионной прочности покрытий

Образец для определения когезионной прочности покрытий состоит из двух полых цилиндров (деталей) 2 и 3, имеющих ступенчатую внешнюю поверхность, образованную двумя участками с различным диаметром (рис. 1). Соединение цилиндров 2 и 3 осуществляют на оправке 1, оно выполнено в виде сопряжения конических торцевых поверхностей цилиндров, выполненных на торцах деталей большего диаметра под углом  $75^\circ$ , т.е. торец детали 2 имеет коническую выемку, а соединенный с ним торец детали 3 с соответствующим коническим выступом. На торцах меньшего диаметра деталей 2 и 3 выполнены центровые отверстия, позволяющие выполнять механическую обработку всех наружных поверхностей образца. На внешних поверхностях цилиндров большего диаметра 2 и 3 с двух сторон от сопряжения, установлены защитные экраны 8, закрепленные резьбовым соединением на участках цилиндров меньшего диаметра, и выполнены в виде охватывающего кольца, ограничивающего зону нанесения связывающего покрытия 7. Связывающее покрытие 7 нанесено на внешние поверхности цилиндров больших диаметров с двух

сторон от места сопряжения цилиндров и выполнено из самофлюсующихся материалов.

Коническое сопряжение цилиндров выполнено именно под углом  $75^\circ$ , поскольку по конической поверхности при сборке на оправке позволяет повышать точность испытания, т.к. детали устанавливаются без зазора, исключается нарушение соосности относительно их оси и радиального смещения наружных поверхностей цилиндров на всех этапах испытания.

Сборку образца для испытаний на когезионную прочность проводят следующим образом (рис. 1). На оправку 1 насаживают детали 2 и 3, соединяют их под углом  $75^\circ$  по конической торцевой поверхности и плотно затягивают при помощи шайбы 5 и гайки 6. Детали 2 и 3 выполняют из материала подложки (например, сталь 45). Наружные цилиндрические поверхности большего диаметра деталей 2 и 3 образца подвергают дробеструйной обработке и очистке до получения диаметра  $d_1$ , равного  $0,02$ . На винтовые поверхности меньшего диаметра деталей 2 и 3 образца навинчивают защитные экраны 8, затем на поверхности большего диаметра деталей 2 и 3, заключенных между защитными экранами 8, наносят связывающее покрытие из самофлюсующихся материалов 4 толщиной слоя, равной толщине стенок защитных экранов 8, и подвергают его оплавлению с последующим шлифованием до получения диаметра  $d_2$  равного  $0,02$ .

Перед испытанием образец, состоящий из двух сопряженных деталей, неподвижно соединенных связывающим покрытием в форме охватывающего кольца, симметрично расположенного относительно наружной линии сопряжения деталей, снимают с оправки и устанавливают в захваты испытательной машины, а затем подвергают одноосному растяжению до разрушения (рис. 2).

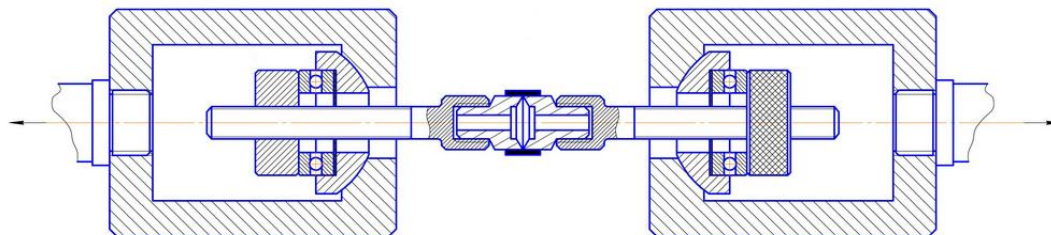


Рис. 2. – Образец, установленный в захваты испытательной машины

Разработанный для моделирования и оптимизации процессов фрикционного взаимодействия с определением когезионной прочности сцепления покрытий с подложкой программный комплекс позволяет сократить время расчёта характеристик механических свойств покрытий на 45-76%, а применение разработанного экспериментального образца для испытаний газотермических порошковых покрытий, состоящего из двух установленных встык цилиндров, выполненных сопрягаемыми между собой, повышает точность при испытании в два раза.

Разработана методика определения механических характеристик образцов с покрытиями:

1. Напыление покрытий на образцы из конструкционной стали производили по режиму: ток (320 А), напряжение (45 В), расход газов (40-45 л/мин), дистанция напыления (100 мм), фракция порошка меньше 45 мкм. Далее проводили дополнительную механическую обработку (шлифование) на заданную толщину от 0,3 до 1,2 мм.

2. После нанесения покрытий по результатам визуально-измерительного контроля определяли соответствие внешнего вида покрытия нормативным требованиям (по цвету, структуре, качеству нанесения), а также выявляли видимые дефекты (повреждения), если они обнаруживаются, то образец бракуется.

3. Толщину покрытия измеряли профилометрическим методом.

4. С помощью акустического дефектоскопа определялась сплошность покрытия.

5. Интенсивность и другие параметры процесса дефектообразования исследовались с помощью метода акустической эмиссии. Измерения параметров сигналов АЭ проводились с помощью системы Vallen AMSY-5, разработанной компанией Systeme GmbH (Германия). Данная система предназначена для проведения полевых испытаний, мониторинга технологических процессов и лабораторных исследований. Датчики на образцах закреплялись вдоль боковой поверхности по спирали.

6. Микронаклеп и микродеформация определялись методами внутреннего трения (ВТ). Измерения ВТ проводились на образцах с покрытиями, деформируя статическим одноосным растяжением ( $\varepsilon = 0, 3.3, 13, 17, 20 \%$ ). Анализируется информация, полученная при низко- и среднечастотных измерениях амплитудных и температурных зависимостей ВТ.

7. Металлографические исследования покрытий проводятся при помощи металлографического микроскопа на металлографических шлифах поперечного разреза образца. При необходимости подробного изучения шлифа применяют растровый электронный микроскоп.

Комплексный анализ параметров эффектов позволяет детально описать изменения субструктуры, приводящие материал в предельное состояние и к началу локального разрушения [8].

Исследования проводились на следующих покрытиях: никель (отожженный), ПН60Ю40, ПН40Ю60, на основе железо-алюминия, покрытия из самофлюсующихся сплавов на основе никеля, содержащих хром, бор, кремний ПГСР-2, ПГСР-3, ПГСР-4. Покрытия наносили на образцы, изготовленные из конструкционной стали марки 30ХГСА.

В табл. 1 представлены данные по когезионной прочности покрытий на основе никеля, ПН60Ю40, ПН40Ю60, железо-алюминия, покрытий из самофлюсующихся сплавов на основе никеля ПГСР-2, ПГСР-3, ПГСР-4, после дополнительной механической обработки (шлифования) на заданную толщину от 0,3 до 1,0 мм. Режим напыления: ток (320 А), напряжение (45 В), расход газов (40-45 л/мин), дистанция напыления (100 мм), фракция порошка меньше 45 мкм.

Таблица № 1

Когезионная прочность исследуемых покрытий

№ п/п	Толщина покрытия	Когезионная прочность, МПа						
		Ni	ПН60Ю40	ПН40Ю60	Fe-Al	ПГСР-2	ПГСР-3	ПГСР-4
1	0,3	95,3	18,5	4,2	80,4	55,0	62,3	64,7
2	0,3	110,2	11,0	4,5	105,3	53,6	49,8	68,7
3	0,3	92,4	18,1	5,1	96,0	61,3	68,4	70,1
4	0,6	115,6	27,0	8,5	138,6	82,6	83,3	90,6
5	0,6	170,4	28,8	7,9	145,7	77,4	85,7	85,8
6	0,6	122,9	26,5	9,1	139,7	75,3	94,8	96,3
7	1,0	118,3	34,7	6,4	111,4	107,0	105,5	101,0
8	1,0	136,3	31,2	7,2	121,5	89,7	102,7	108,8
9	1,0	132,8	27,8	7,0	109,6	102,5	108,0	110,7

Среднее значение когезионной прочности покрытий (рис. 3): для никеля (отожженного) – 122 МПа (1), ПН60Ю40 – 25 МПа (2), ПН40Ю60 – 7 МПа (3), на основе железо-алюминия – 116 МПа (4), ПГСР-2 – 78 МПа (5), ПГСР-3 – 85 МПа (6), ПГСР-4 – 89 МПа (7). На рис. 3 представлены зависимости когезионной прочности от толщины покрытий. Исследование когезионной прочности указанных выше покрытий показало, что когезионная прочность покрытий ПН60Ю40 и ПН40Ю60 на порядок ниже, чем когезионная прочность остальных покрытий.

Металлографическое исследование структуры покрытий на образцах, используемых для определения когезионной прочности, показало, что характерным для данных покрытий является их слоистое строение, наличие окислов, равномерно расположенных вдоль межслойных границ, пор.

Наиболее дефектными, с точки зрения пористости, являются покрытия ПН60Ю40, ПН40Ю60.

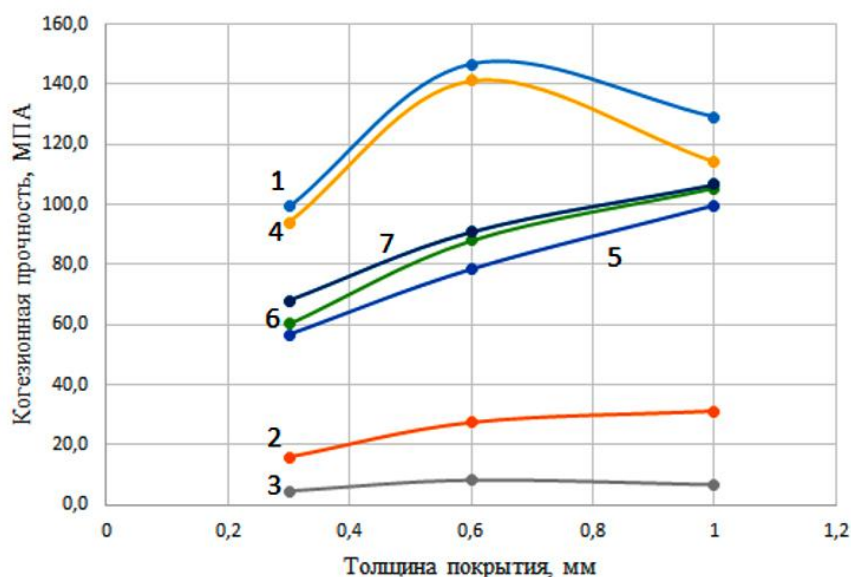


Рис. 3. – Зависимости когезионной прочности от толщины покрытий

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы:

– отработана методика и технологическая оснастка для определения механических характеристик образцов покрытий;

– при исследовании влияния толщины напыленного слоя на когезионную прочность покрытий установлено влияние толщины покрытия на когезионную прочность;

– когезионная прочность покрытий ПН60Ю40 (25 МПа), ПН40Ю60 (9 МПа) на порядок ниже остальных исследуемых покрытий.

Полученные сравнительные характеристики по когезионной прочности указанных покрытий позволяют корректировать технологию плазменного напыления для получения оптимальных свойств [9], обеспечивающих увеличение срока службы изделий, а также значительно расширить область их применения [10].

## Литература

1. Kretinin V.I., Sokolova V.A., Voinash S.A. The qualitative assessment of gas-thermal coating's cohesive strength estimation methods // Solid State Phenomena. 2020. Vol. 299. pp. 949-954.

2. Журавлев Г.М., Гвоздев А.Е., Малий Д.В. и др. Математическое моделирование разрушения элементов строительных конструкций под действием динамической нагрузки // Чебышевский сборник. 2019. Т. 20. № 4 (72). С. 372-386.

3. Gvozdev A.E., Sergeyev N.N., Minayev I.V., et al. Temperature distribution and structure in the heat-affected zone for steel sheets after laser cutting // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Vol. 8. № 1. Pp. 148-152.

4. Макаров Э.С., Гвоздев А.Е., Журавлев Г.М. и др. Применение теории пластичности дилатирующих сред к процессам уплотнения порошков металлических систем // Чебышевский сборник. 2017. Т. 18. № 4 (64). С. 268-284.

5. Селедкин Е.М., Журавлев Г.М., Гвоздев А.Е. и др. Моделирование ресурсосберегающих процессов обработки металлов и сплавов: монография. Тула: ТулГУ, 2016. 204 с.

6. Wu W., Wang Y., Tao P., Gong J., Li X. Cohesive zone modeling of hydrogen-induced delayed intergranular fracture in high strength steels // Results in Physics. 2018. Vol. 11. pp. 591-598.

7. Сергеев Н.Н., Сергеев А.Н., Провоторов Д.А., Хонелидзе Д.М., Минаев И.В., Малий Д.В. и др. Образец для определения когезионной прочности газотермических порошковых покрытий: патент на полезную модель RU166249U1, 20.11.2016. Заявка № 2016122692/28 от 08.06.2016.

8. Журавлев Г.М., Гвоздев А.Е., Колмаков А.Г., Сергеев А.Н., Малий Д.В. Применение математического метода локальных вариаций для решения задач пластического формоизменения металлических, порошковых и

---



нанокomпозиционных материалов // Чебышевский сборник. 2018. Т. 19. № 4 (68). С. 43-54.

9. Гончарова О.Н., Бережной Ю.М., Бессарабов Е.Н., и др. Аддитивные технологии – динамично развивающееся производство // Инженерный вестник Дона. 2016. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3931

10. Польской П.П., Василенко Н.В., Меретуков З.А. О влиянии модуля упругости композитных материалов на прочность и деформативные свойства усиленных конструкций // Инженерный вестник Дона. 2019. № 8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N8y2019/6144

### References

1. Kretinin V.I., Sokolova V.A., Voinash S.A. Solid State Phenomena. 2020. Vol. 299. pp. 949-954.

2. Zhuravlev G.M., Gvozdev A.E., Maliy D.V. et al. Chebyshevskij sbornik. 2019. Vol. 20. № 4 (72). pp. 372-386.

3. Gvozdev A.E., Sergeev N.N., Minayev I.V., et al. Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Vol. 8. № 1. pp. 148-152.

4. Makarov E.S., Gvozdev A.E., Zhuravlev G.M., et al. Chebyshevskij sbornik. 2017. Vol. 18. №. 4 (64). pp. 268-284.

5. Seledkin E.M., Zhuravlev G.M., Gvozdev A.E., et al. Modelirovanie resursosberegayushchih processov obrabotki metallov i splavov: monografiya [Modeling of resource-saving processes of metal and alloy processing]. Tula: TulSU, 2016. 204 p.

6. Wu W., Wang Y., Tao P., Gong J., Li X. Results in Physics. 2018. Vol. 11. pp. 591-598.

7. Sergeev N.N., Sergeev A.N., Provotorov D.A., Honelidze D.M., Minaev I.V., Maliy D.V. et al. Obrazec dlya opredeleniya kogeziionnoj prochnosti gazotermicheskikh poroshkovyh pokrytij: patent na poleznuyu model' RU166249U1, 20.11.2016. Zayavka № 2016122692/28 ot 08.06.2016.



8. Zhuravlev G.M., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G., Sergeev A.N., Maliy D.V. Chebyshevskij sbornik. 2018. Vol. 19. № 4 (68). pp. 43-54.
9. Goncharova O.N., Berezhnoy YU.M., Bessarabov E.N. et al. Inzhenernyj vestnik Dona. 2016. № 4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3931](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3931)
10. Pol'skoj P.P., Vasilenko N.V., Meretukov Z.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. № 8. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N8y2019/6144](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N8y2019/6144)