



DOI 10.22363/1815-5235-2022-18-3-204-214  
УДК 539

НАУЧНЫЙ ОБЗОР / REVIEW

## Жесткость, адгезия и расслоение покрытия в системе «подложка – покрытие»

С.Н. Якупов  , Р.И. Губайдуллин 

Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН», Казань, Российская Федерация  
 [tamas\\_86@mail.ru](mailto:tamas_86@mail.ru)

### История статьи

Поступила в редакцию: 15 января 2022 г.  
Доработана: 7 апреля 2022 г.  
Принята к публикации: 15 апреля 2022 г.

### Для цитирования

Якупов С.Н., Губайдуллин Р.И. Жесткость, адгезия и расслоение покрытия в системе «подложка – покрытие» // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2022. Т. 18. № 3. С. 204–214. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-3-204-214>

**Аннотация.** Защитные покрытия находят широкое применение во всех отраслях производства и жизнедеятельности. Необходимые качества покрытий обеспечиваются путем разработки сложных тонкослойных композиций. Сложность структуры покрытия проявляется и в процессе эксплуатации в результате воздействия окружающей среды, физических полей, человеческого фактора. Многие покрытия исходно формируются непосредственно на поверхностях конструкций, имеющих исходно сложную геометрию. При этом ряд smart-покрытий наряду со сложной структурой при срабатывании изменяют физико-механические свойства. При выборе покрытия, адгезива и технологии его нанесения возникают вопросы, связанные с определением их необходимых геометрических и физических параметров, с оценкой механических свойств и сроков их службы в зависимости от окружающей среды, физических полей и т. д. Для этого необходим надежный инструмент исследования. В обзоре на базе известных публикаций и патентов на изобретение отмечены методы исследования механических свойств расчлняемых и нерасчлняемых покрытий, методы определения адгезии – прочности сцепления покрытия к подложке, методы исследования расслоения составных элементов и отслоения покрытия от подложки. Акцентировано внимание на эффективных экспериментально-теоретических методах оценки механических свойств покрытия и адгезива на плоских и неплюских поверхностях, а также на некоторых актуальных результатах.

**Ключевые слова:** защитное покрытие, система, подложка, покрытие, сложная геометрия, структура, жесткость на растяжение, модуль упругости, адгезия, расслоение, методы исследования, экспериментально-теоретический метод

## Rigidity, adhesion and delamination of the coating in the “substrate – coating” system

Samat N. Yakupov  , Ruslan I. Gubaidullin 

Federal Research Center «Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences», Kazan, Russian Federation  
 [tamas\\_86@mail.ru](mailto:tamas_86@mail.ru)

### Article history

Received: January 15, 2022  
Revised: 7 April 2022  
Accepted: April 15, 2022

**Abstract.** Protective coatings are widely used in all branches of production and life. The necessary qualities of coatings are provided by developing complex thin-layer compositions. The complexity of the structure of the coating also arises during operation as a result of the influence of the environment, physical fields,

**Якупов Самат Нухович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт механики и машиностроения, Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН», Российская Федерация, 420111, Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31; ORCID: 0000-0003-0047-3679, Scopus Author ID: 26968046600, eLIBRARY SPIN-код: 7382-4759; [tamas\\_86@mail.ru](mailto:tamas_86@mail.ru)

**Губайдуллин Руслан Илгамович**, аспирант, Институт механики и машиностроения, Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН», Российская Федерация, 420111, Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31; ORCID: 0000-0002-8047-7962; [ruslan\\_221294@mail.ru](mailto:ruslan_221294@mail.ru)

**Samat N. Yakupov**, PhD in Technical Sciences, senior researcher, Institute of Mechanics and Engineering, Federal Research Center “Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences,” 2/31 Lobachevsky St, Kazan, 420111, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-0047-3679, Scopus Author ID: 26968046600, eLIBRARY SPIN-code: 7382-4759; [tamas\\_86@mail.ru](mailto:tamas_86@mail.ru)

**Ruslan I. Gubaidullin**, postgraduate student, Institute of Mechanics and Engineering, Federal Research Center “Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences”, 2/31 Lobachevsky St, Kazan, 420111, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8047-7962; [ruslan\\_221294@mail.ru](mailto:ruslan_221294@mail.ru)

© Якупов С.Н., Губайдуллин Р.И., 2022



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

**For citation**

Yakupov S.N., Gubaidullin R.I. Rigidity, adhesion and delamination of the coating in the “substrate – coating” system. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022;18(3):204–214. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-3-204-214>

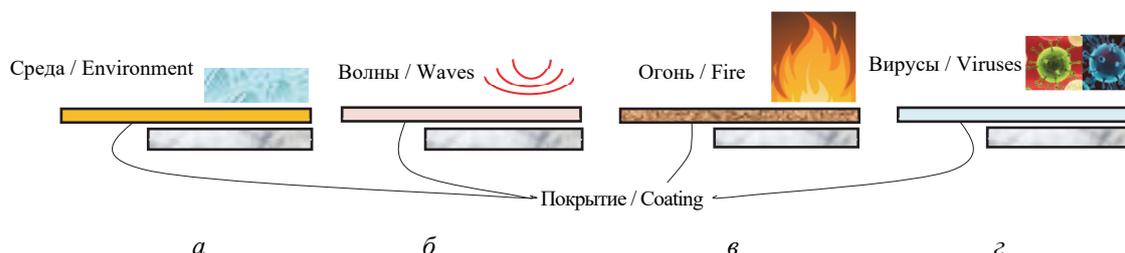
human factor. Many coatings are initially formed directly on the surfaces of structures with initially complex geometry. At the same time, a number of smart coatings, along with a complex structure, change their physical and mechanical properties when triggered. When choosing a coating, adhesive and technology for its application, questions arise related to determining their necessary geometric and physical parameters, assessing their mechanical properties and service life depending on the environment and physical fields, etc. This requires a reliable research tool. In the review, based on well-known publications and patents for the invention, the following are noted: methods for studying the mechanical properties of decomposable and non-decomposable coatings; methods for determining adhesion – the adhesion strength of the coating to the substrate; methods for studying the delamination of constituent elements and delamination of the coating from the substrate. Attention is focused on effective experimental and theoretical methods for assessing the mechanical properties of the coating and adhesive on flat and non-planar surfaces, as well as on some relevant results.

**Keywords:** protective coating, substrate, coating, system, complex geometry, structure, tensile rigidity, modulus of elasticity, adhesion, delamination, research methods, experimental-theoretical method

**Введение**

Среди тонкостенных элементов конструкций, сочетающих легкость с высокой прочностью, особо выделяются пленочные и мембранные элементы, к которым относятся и различные защитные покрытия. Они находят широкое применение во всех отраслях производства и жизнедеятельности<sup>1</sup> [1–3]. Сама природа подсказывает эффективность использования различных пленок и покрытий, достаточно рассмотреть строение флоры и фауны.

Нет сферы человеческой деятельности, где бы ни пытались решать технические и экономические проблемы на базе поверхностных покрытий<sup>1</sup> [1–5]. Это проблемы трения и износа, коррозии и эрозии (рис. 1, а), поглощения волн заданного диапазона (рис. 1, б), защиты от высоких температур и огня (рис. 1, в), защиты от вирусов и бактерий (рис. 1, г) и т. д.



**Рис. 1.** Защитные покрытия:

а – от коррозии; б – волн; в – огня; г – вирусов

**Figure 1.** Protective coatings:

а – against corrosion; б – waves; в – fire; г – viruses

Покрытия должны быть надежным барьером для защиты элементов конструкций в зависимости от своего назначения: теплоизоляционные и огнезащитные – предохранять от воздействия теплового потока и пламени; лакокрасочные – надежно защищать от коррозии и т. д. При этом покрытия должны быть технологичны в изготовлении и применении, иметь хорошую адгезию к конструкции и обеспечивать требуемую долговечность в заданных условиях эксплуатации. Применение защитных покрытий – эффективный способ защиты поверхностей конструкций от воздействия окружающей среды и различных физических полей<sup>1</sup> [1–3].

Необходимые качества покрытий обеспечиваются путем разработки сложных тонкослойных композиций с различными включениями (так называемые материал-конструкции) и адгезива. Создаются различные покрытия, в том числе smart-покрытия (умные) [4–7] и адгезионные компоненты, используя весь накопленный технологический арсенал, включая нанотехнологию. Разрабатываются smart-самозалечи-

<sup>1</sup> Якупов Н.М. Механика тонкостенных конструкций: история, диагностика, лечение: учебное пособие. Казань: Изд-во КГАСУ, 2020. 159 с.

вающиеся, противообрастающие, сверхгидрофобные покрытия [1–8], новые группы биоцидов и инкапсулированные противообрастающие вещества [9], супергидрофобное композиционное покрытие из сополимеров стирола, метилметакрилата и наночастиц диоксида кремния рассмотрено, в частности, в [10]. Модификация покрытий углеродными нанотрубками и нановолокнами позволяет получать наноструктурированные поверхности, способствующие повышению механических свойств [11]. Эпоксидные краски, содержащие силоксан, позволяют получать покрытия с заданными свойствами [12–15].

Многие покрытия исходно формируются непосредственно на поверхностях конструкций, имеющих исходно сложную геометрию. При этом ряд smart-покрытий наряду со сложной структурой при срабатывании (например, раскапсуляции – вливании определенных компонент в состав покрытия) изменяют физико-механические свойства.

Современные покрытия, как правило, обладают сложной внутренней структурой, формируются непосредственно на поверхностях элементов конструкций, которые, исходя из функционального назначения, зачастую имеют неплоскую геометрию. Сложность структуры покрытия возникает и в процессе эксплуатации в результате воздействия окружающей среды, физических полей, а также человеческого фактора – на поверхности покрытия появляются различные дефекты (царапины, вмятины, трещины, локальные углубления); происходит деградация полимерных частей композиций, образуются области расслоения и т. д. При этом изменяются механические и физические свойства покрытия и адгезива. Сложная структура покрытия вызывает появление различной анизотропии в механических свойствах покрытия и адгезива.

Деградация защитного покрытия приводит к серьезным последствиям, в частности к оголению поверхностей несущих элементов и интенсивному коррозионному износу несущего элемента конструкции, образованию царапин, локальных углублений и т. д.

Для обеспечения безаварийной работы конструкций с тонкослойным покрытием необходимо особое внимание уделять покрытиям, которые обеспечивают функциональное назначение самой конструкции. Необходимо достоверно определять исходные механические свойства покрытия и адгезива, сформированных на плоских и неплоских поверхностях элементов конструкций, а также изменение свойств покрытия и адгезива в процессе эксплуатации при воздействии физических полей и сред.

При выборе покрытия, адгезива и технологии его нанесения возникают вопросы, связанные с определением их необходимых геометрических и физических параметров, с оценкой механических свойств и сроков их службы в зависимости от окружающей среды и физических полей и т. д. Для этого необходим надежный инструмент исследования.

Грамотное проектирование тонкослойных покрытий, диагностика свойств покрытия, его адгезии к несущему элементу и учет расслоения в процессе эксплуатации – залог безопасного функционирования конструкций. Тема исследования актуальна для всех отраслей: машиностроения, транспорта, трубопроводов, нефтехимии и т. д.

### **Методы исследования механических свойств покрытий**

Вопросам определения механических свойств тонкослойных покрытий уделяется определенное внимание. По данной теме имеется ряд отечественных изобретений, авторских свидетельств<sup>2</sup>, а также патенты зарубежных стран<sup>3</sup>.

Широко используется стандартный способ одноосного испытания на растяжение образцов в форме прямоугольника шириной от 10 до 25 мм, длиной не менее 150 мм<sup>4</sup>. Однако стандартный способ малоэффективен при исследовании механических свойств покрытий, имеющих сложную структуру, различные поверхностные дефекты и повреждения. В зависимости от расположения вырезаемой полоски механические характеристики будут различными. Порой невозможно даже описать структуру материала и формы дефектов, не говоря уже об определении реальных характеристик композиций. При исследовании жесткостных характеристик покрытий сложной структуры стандартным способом наблюдается большой

<sup>2</sup> № 1742671, № 1458766, № 601599А, № 1441243А1, № 765697А, № 1756786, № 2184361, № 2296976, № 2310184, № 2387973, № 2403556, № 2421707, № 2572673, № 2653473.

<sup>3</sup> US 5764068А. США, 1998; US 6050139А. США, 1998; US 6951144В2. США, 2001; Японии JP 8313422А.

<sup>4</sup> ГОСТ 14236-81. Пленки полимерные. Метод испытания на растяжение. М., 1989; ASTM D 412-16. Standard test methods for vulcanized rubber and thermoplastic elastomers – tension. ASTM International, 2021; ГОСТ 29088-91. Материалы полимерные ячеистые эластичные. Определение условной прочности и относительного удлинения при разрыве. М., 1991.

разброс результатов испытания<sup>5</sup> [3]. Этот метод малоэффективен или вовсе неприменим для исследования исходно неплоских покрытий.

При рассмотрении покрытий сложной структуры малоэффективен и инденторный метод<sup>6</sup> [16], позволяющий определять свойства покрытий в окрестности исследуемой точки. В [17] методом наноиндентирования описан масштабный эффект при переходе к наномасштабам. Возникают большие трудности при оценке интегральных характеристик покрытий неоднородной структуры.

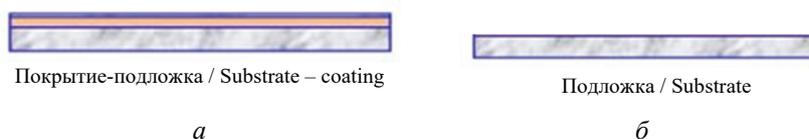
Делаются попытки моделирования деформирования тонких пленок на молекулярном уровне, в частности [18; 19]. Однако возникают трудности при описании сложной структуры на микро- и наноуровнях, а также задании информации о дефектах на разных уровнях одновременно.

Эффективным подходом определения механических свойств плоских покрытий сложной структуры является экспериментально-теоретический метод (ЭТМ) [20–23], основанный на синтезе экспериментальных данных и теоретических соотношений, полученных из нелинейной теории тонких оболочек, теории упругости и пластичности. Метод позволяет определять интегральные механические свойства оболочечных покрытий и может быть использован для исследования нанопокровтий и нанопленок [23].

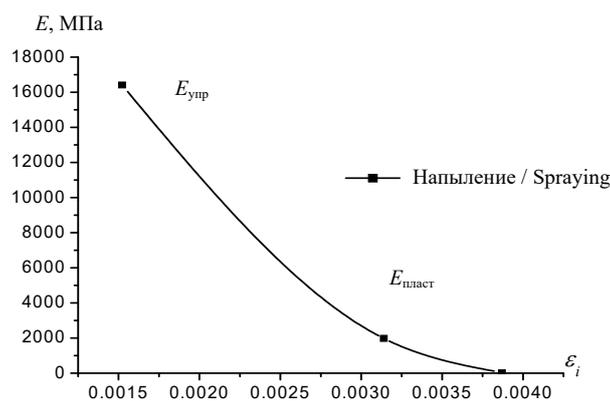
Экспериментально-теоретический метод [3; 20–23] можно использовать для оценки механических характеристик нерасчленимых плоских и неплоских покрытий в системе «покрытие – подложка». Раздельно исследуя свойства пакета «подложка – покрытие» ( $h_{\text{подл}} + h_{\text{покр}}$ ) (рис. 2, а), подложки толщиной  $h_{\text{подл}}$  (рис. 2, б) и из условия равенства модуля упругости композиции на растяжение  $E_c$  сумме модулей упругости на растяжение подложки  $E_{\text{подл}}$  и покрытия, оценивается модуль упругости  $E_{\text{покр}}$  [24; 25]:

$$E_{\text{покр}} = \frac{E_c (h_{\text{покр}} + h_{\text{подл}}) - E_{\text{подл}} h_{\text{подл}}}{h_{\text{покр}}}$$

Величины  $E_c$  и  $E_{\text{подл}}$  определяются экспериментально-теоретическим методом. Такой подход использован для оценки механических свойств нанопокровтия из оксида титана  $\text{TiO}_2$  толщиной  $h_{\text{покр}} \approx 80$  нм, нанесенной ионно-плазменным способом на полимерную пленку толщиной  $h_{\text{подл}} = 0,1$  мм [24; 25]. Зависимость модуля упругости от интенсивности деформаций  $\varepsilon_i$  приведена на рис. 3.



**Рис. 2.** Схема исследования системы:  
а – подложка – покрытие; б – подложка  
**Figure 2.** System study scheme:  
а – substrate – coating; б – substrate



**Рис. 3.** Модуль упругости покрытия – деформация  
**Figure 3.** Modulus of elasticity of the coating – deformation

<sup>5</sup> Куприянов В.Н. Пленочно-тканевые материалы для строительных конструкций: учебное пособие. Казань: КИСИ, 1989. 94 с.

<sup>6</sup> United States Patent US4699000. Automated device for determining and evaluating the mechanical properties of materials. 13.10.1987.

Развитие подхода [24; 25] для исследования жесткостных свойств нерасчленимых покрытий на подложке сложной формы изложено в [3]. Подход базируется на факте, что тангенциальная жесткость исследуемого покрытия  $B_{\text{coat}}$  равна разности тангенциальной жесткости тонкостенной подложки с покрытием  $B_{\text{sum}}$  за вычетом тангенциальной жесткости тонкостенной подложки  $B_{\text{shel}}$ :

$$B_{\text{coat}} = B_{\text{sum}} - B_{\text{shel}}.$$

При этом для оценки тангенциальных жесткостей подложки с покрытием  $B_{\text{sum}}$  и подложки  $B_{\text{shel}}$  используется ЭТМ. При исследовании произвольных объектов нужно выбрать рациональный вариант контура заземления, чтобы на экспериментальном этапе обеспечить эффективное заземление, а на теоретическом – упростить разработку численной модели.

Способ оценки уровня напряжений в пленке в консольной системе «пленка – подложка» рассмотрен в [26]. Влияние напряженно-деформированного состояния на границе раздела «пленка – подложка» на процессы упругой деформации пленок  $T_i$  при знакопеременном изгибе представлено в [27].

Экспериментально-теоретический метод развит для исследования механических свойств покрытий исходно неплоской формы [3; 28–30]. Рассмотрены сферические и цилиндрические мембранные покрытия, в том числе покрытие в виде катеноида (рис. 4). При исследовании фрагментов неплоских образцов используются зажимы конкретной формы. Изображение крепления для образцов сферической формы представлено на рис. 5. Метод развит для исследования механических характеристик биологических мембран (в частности, экзокарпий апельсина) [30], схема экспериментальной установки приведена на рис. 6.



Рис. 4. Образец «катеноид»  
Figure 4. Sample “catenoid”



Рис. 5. Крепление образца  
Figure 5. Sample holder

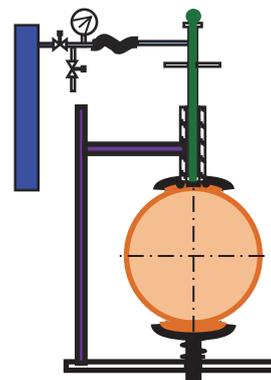


Рис. 6. Схема экспериментальной установки  
Figure 6. Scheme of the experimental setup

### Методы определения адгезии покрытия к подложке

Несмотря на актуальность вопросам определения адгезии тонкослойных покрытий к элементам конструкций уделяется относительно мало внимания. Известны различные способы определения прочности сцепления покрытия с подложкой, в частности авторские свидетельства СССР<sup>7</sup>.

Адгезия определяется на базе приборов<sup>8</sup>, адгезиметров (например, серии ПСО-ХМГ). Однако, известные приборы не всегда эффективны, а идентичность замеров в процессе изучения влияния различных факторов трудно обеспечить.

Способ определения адгезии пленки к подложке для малых прогибов, используя параметры «пузыря», описан в [31]. Используются соотношения для упругих пленок, которые дают значительный разброс с увеличением радиуса «пузыря».

Существует способ<sup>9</sup> определения прочности сцепления покрытий с подложкой, при котором в покрытие имплантируют ионы, идентичные по химическому составу. Ионы проникают через поры в покрытие при наличии в нем дефектов и повышают внутренние напряжения, приводящие в случае плохой прочности сцепления к отделению покрытия от основы. В способе измеряют дозу облучения покрытия

<sup>7</sup> № 183459; № 1305579; № 689411. РФ, 2012; № 2207544. РФ, 2003; US6050139A. США, 1998.

<sup>8</sup> US6050139A. Devices and methods for testing tack uniformity of a coating on a substrate. 18.04.2000.

<sup>9</sup> Авторское свидетельство СССР 1305579, 1985.

ионами и по ее величине судят о прочности сцепления покрытия с подложкой. Недостаток: исследуется не исходное покрытие, а покрытие, насыщенное структурными дефектами радиационного характера, вызванными имплантацией ионов.

Для жестких плоских покрытий разработан экспериментально-теоретический метод определения адгезии покрытий в виде пленки к плоской подложке в двумерной постановке<sup>10</sup>. В подложке формируют центральное отверстие путем удаления материала подложки до покрытия. Замеряют изменение диаметра основания купола в процессе отслаивания покрытия. Предполагается, что напряжение по радиусу, начиная от кромки, распределено по параболе четвертого порядка [4; 32]:

$$\sigma = ar^4 + b, \quad a = \frac{\sigma_m}{G}, \quad b = -\frac{\sigma_m A^4}{G}, \quad A = r_i + h, \quad G = r_i^4 - A^4,$$

где  $r_i$  – радиус образуемого купола;  $h$  – толщина покрытия;  $\sigma_m$  – напряжения отрыва.

Метод развит для оценки адгезии гибкого тонкослойного покрытия к несущему элементу конструкции (рис. 7)<sup>11</sup> [33; 34]. Способ повышает точность определения параметров адгезии вследствие учета механических свойств материала и толщины покрытия, а также высоты  $H$  (рис. 7) и эллипсности основания купола (рис. 8), возникающей вследствие анизотропии адгезива и материала покрытия.

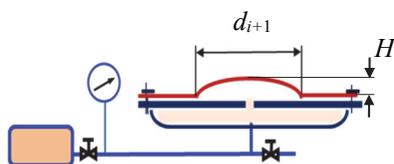


Рис. 7. Схема установки  
Figure 7. Installation scheme

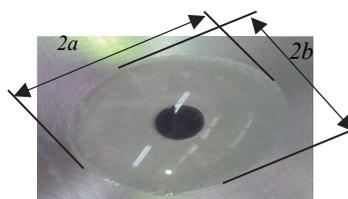


Рис. 8. Фото образуемого купола  
Figure 8. Photo of the formed dome

Прочность сцепления  $\eta_{otr}$  определяют через радиальное усилие  $T$  в пленке у основания купола в области малой полуоси  $b$  отрыва:

$$\eta_{otr} = \frac{2EH^3T \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{[a^2 + H^2(\cos^2\theta + \lambda^2\sin^2\theta)]\sqrt{\lambda^2\cos^2\theta + \sin^2\theta}}}{a(1 - \nu^2) \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{\cos^2\theta + \lambda^2\sin^2\theta}}},$$

где  $E$  – модуль упругости пленки;  $H$  – высота подъема купола отслоившейся пленки;  $\theta$  – угловая координата в плоскости подложки;  $a, b$  – полуоси основания купола;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

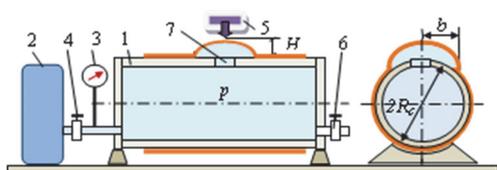
Усилие  $T$  определяется из решения задачи нелинейной теории оболочек, в частности при удовлетворении исходных данных можно воспользоваться решением [32]. Способ позволяет повысить точность определения адгезии за счет учета механических свойств и толщины материала пленки; снижается разброс результатов.

Экспериментально-теоретический метод оценки адгезии пленки к цилиндрической подложке описан в [35]. Алгоритм исследования: подаем ступенчато в емкость 1 давление (рис. 9); на каждом шаге нагружения  $p$  замеряем параметры купола  $a, b$  и  $H$  и получаем зависимость «прогиб  $H$  – давление  $p$ » для вершины купола; составляем модель фрагмента цилиндрического покрытия эллиптической формы в плане, например ANSYS или сплайновый вариант МКЭ; методом пристрелки – варьируя свойствами материала, приближаемся к параметрам купола, соответствующим экспериментальным параметрам  $a, b$  и  $H$  (рис. 10); определяем распределение НДС и усилие  $T_1$  покрытия, а также механические свойства покрытия; исследуем адгезионные свойства покрытия:

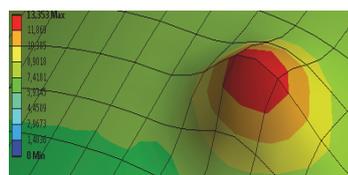
$$\eta_{otr} = T_{otr}/S_{otr}, \quad S_{otr} = h_0(1 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2), \quad T_{otr} = T_1 \frac{ab\sqrt{R_c^2(b^2\cos^2\theta + a^2\sin^2\theta) - a^2b^2\sin^2\theta}}{RR_c(b^2\cos^2\theta + a^2\sin^2\theta)}.$$

<sup>10</sup> Патент 2421707 РФ. Способ определения адгезии пленки к подложке / Гольдштейн Р.В., Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Якупов С.Н., Якупова Р.Н. 2011.

<sup>11</sup> Патент 2572673 РФ. Способ определения адгезии пленки к подложке / Якупов С.Н. 2016.

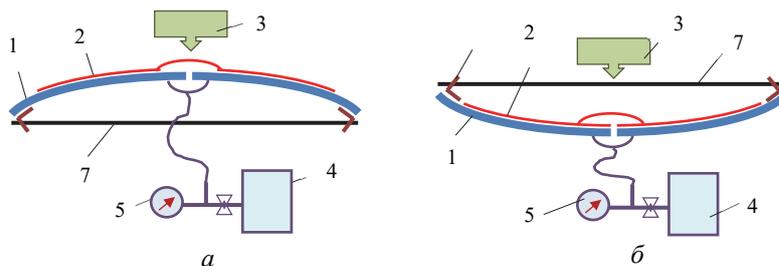


**Рис. 9.** Схема установки  
**Figure 9.** Installation scheme



**Рис. 10.** Фрагмент модели  
**Figure 10.** Model fragment

Влияние деформации поверхности подложки на адгезию покрытия изучено в [36]. Для этого была разработана специальная установка, схема которой приведена на рис. 11.



**Рис. 11.** Схема установки:

*a* – покрытие на растянутой поверхности подложки; *б* – покрытие на сжатой поверхности подложки;  
1 – подложка; 2 – покрытие; 3 – измерительное устройство; 4 – узел подачи сжатого воздуха; 5 – манометр; 6 – уголки; 7 – тяги

**Figure 11.** Installation scheme:

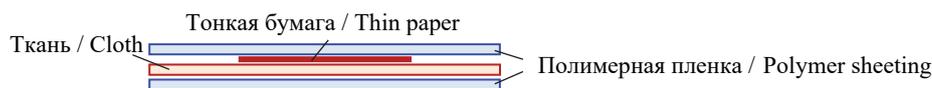
*a* – the coating on the stretched surface of the substrate; *b* – the coating on the compressed surface of the substrate;  
1 – substrate; 2 – coating; 3 – measuring device; 4 – compressed air supply unit; 5 – pressure gauge; 6 – angles; 7 – rods

Установлено, что наличие деформации поверхности пластины снижает прочность сцепления, причем на сжатой поверхности этот эффект более значителен.

### Методы исследования расслоения составных элементов и отслоения покрытия от подложки

В элементах композиционных конструкций, в том числе в системах «подложка – покрытие», под воздействием механических и физических полей могут возникать напряжения, вызывающие расслоение составных элементов композиций и отслоение покрытия от подложки [37; 38]. В частности, напряжения, возникающие в покрытии, приводят к образованию складок и гофров, растрескиванию покрытия<sup>12</sup> [37–41] и т. д. Актуальность проблемы стабильности тонких пленок на подложке отмечается в [37], где рассмотрены процессы упругой и пластической деформации металлических, оксидных и полупроводниковых пленок при механическом нагружении. Внешним осмотром трудно определить наличие расслоения. Важно знать, произошло ли расслоение, его размеры и местонахождение. Возникает потребность в методах исследования расслоения в композиционных структурах, в том числе в системах «покрытие – подложка».

Еще один подход – исследование жесткости композиционных структур с расслоением. В [41] рассмотрены варианты формирования композиции путем ламинирования отдельных слоев. Схема структуры образца «полимерная пленка + ткань + полимерная пленка» с участком расслоения представлена на рис. 12.



**Рис. 12.** Структура образца до ламинирования  
**Figure 12.** Sample structure before lamination

<sup>12</sup> United States Patent US6092414. Method for analyzing a separation in a deformable structure / John W; 25.07.2000.

Образцы для исследования в [41] получены путем ламинирования композиции: пленка из полиэстера, ткань – белая бязь, тонкая бумага (салфетка). Для определения жесткостных свойств композиций использован экспериментально-теоретический метод [20–23].

Исследованы полимерно-тканевые композиции диаметром  $D = 100$  мм с толщиной пленок  $t = 75$  мкм, 100 мкм и 125 мкм: группа 1 – склеенная композиция «пленка + ткань + пленка»; группа 2 – не склеенная композиция «пленка + бумага + ткань + бумага + пленка»; группа 3 – композиция «пленка + ткань + пленка», не склеенная в центре диаметром  $d = 1$  см. Результаты исследования по [41] приведены в таблице.

Экспериментальные и расчетные величины по [41]

$p$ , МПа	Группа 1		Группа 2		Группа 3	
	$H$ , мм	$B$ , кГ см	$H$ , мм	$B$ , кГ см	$H$ , мм	$B$ , кГ см
0,03	3,84	397,4	4,35	273,3	4,07	333,7
0,04	4,32	372,1	4,81	269,6	4,37	359,5
0,05	4,71	358,9	5,25	259,2	4,78	343,4
0,06	5,14	331,4	5,59	257,6	5,17	325,6
		$B_{cp} = 365$		$B_{cp} = 265$		$B_{cp} = 341$

Примечание:  $H$  – прогибы образцов от давления  $p$ ;  $B$  и  $B_{cp}$  – тангенциальные жесткости и средние значения жесткости для рассмотренного диапазона нагрузок.

Experimental and calculated values according to [41]

$p$ , МПа	Group 1		Group 2		Group 3	
	$H$ , mm	$B$ , kG cm	$H$ , kG cm	$B$ , kG cm	$H$ , mm	$B$ , kG cm
0.03	3.84	397.4	4.35	273.3	4.07	333.7
0.04	4.32	372.1	4.81	269.6	4.37	359.5
0.05	4.71	358.9	5.25	259.2	4.78	343.4
0.06	5.14	331.4	5.59	257.6	5.17	325.6
		$B_{average} = 365$		$B_{average} = 265$		$B_{average} = 341$

Note:  $H$  – deflections of samples from pressure  $p$ ;  $B$  и  $B_{average}$  – tangential stiffness and average stiffness values for the considered load range.

Как видно из таблицы, расслоение композиции влияет на ее жесткость, то есть на ее несущую способность.

Исследование расслоения в деформируемой конструкции представлено в патенте US6092414<sup>13</sup>. Выявляется выпуклость, образованная на поверхности шины автомобиля под и над брекерами при каждом испытательном давлении, и сравнивается площадь поперечного сечения выпуклости с площадью поперечного сечения эталонной выпуклости для определения глубины отрыва в испытательной деформируемой конструкции (рис. 13). Местоположение расслоения определяется путем снижения давления вблизи разрыва до обеспечения эталонной деформируемой конструкции того же размера.

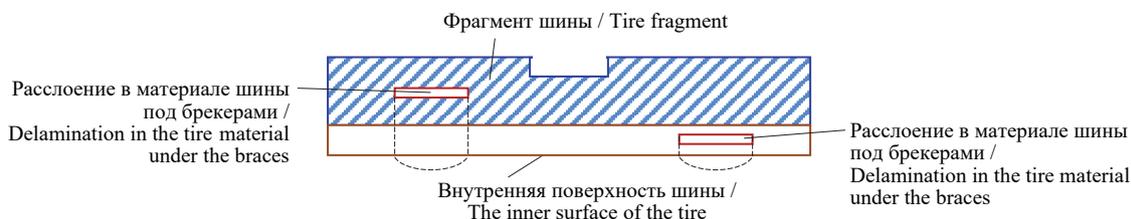


Рис. 13. Расслоение материала деформируемой шины (разрез) по патенту US 6092414<sup>12</sup>  
 Figure 13. Delamination of deformable tire material (cut) according to US 6092414

<sup>13</sup> United States Patent US6092414. Method for analyzing a separation in a deformable structure / John W; 25.07.2000.

## Заключение

Защитные покрытия – надежный барьер защиты элементов конструкций в зависимости от назначения. При исследовании защитных покрытий необходимо оценить свойства покрытий и прочность сцепления покрытия с подложкой, а также обратить внимание на расслоение составных элементов и отслоения покрытия от подложки. Двумерные экспериментально-теоретические методы исследования свойств покрытия и его адгезии к подложке – наиболее эффективные подходы.

Рассмотренная область исследования недостаточно изучена. Необходимо дальнейшее совершенствование методов исследования и создание на их базе новой приборной базы.

## Список литературы / References

1. Yakupov S.N., Yakupov N.M. Thin-layer films and coatings. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017;857(1):012056. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/857/1/012056>
2. Yakupov N.M., Yakupov S.N. Thin-layer coatings. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2017;(1):6–14. (In Russ.)  
*Якупов Н.М., Якупов С.Н.* Тонкослойные покрытия // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2017. № 1. С. 6–14.
3. Yakupov S.N., Yakupov N.M. Research of mechanical characteristics thin coating. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1328:012103. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1328/1/012103>
4. Gad-el-Hak M. (ed.) *MEMS: Applications*. Boca Raton: CRC Press; 2006. <https://doi.org/10.1201/9781420036558>
5. Montemor M.F. Functional and smart coatings for corrosion protection: a review of recent advances. *Surface & Coatings Technology*. 2014;258:17–37. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.06.031>
6. Taryba M., Lamaka S.V., Snihirova D., Ferreira M.G.S., Montemor M.F., Wijting W.K., Toews S., Grundmeier G. The combined use of scanning vibrating electrode technique and micro-potentiometry to assess the self-repair processes in defects on “smart” coatings applied to galvanized steel. *Electrochim. Acta*. 2011;56(12):4475–4488.
7. García J., Fischer H.R., van der Zwaag S. A critical appraisal of the potential of self-healing polymeric coatings. *Progress in Organic Coatings*. 2011;72(3):211–221. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2011.06.016>
8. Taylor S.R., Shiflet G.J., Scully J.R., Buchheit R.G., Van Ooij W.J., Sieradzki K., Diaz R.E., Brinker C.J., Moran A.L. Increasing coating functionality using nanodimensioned materials. In: Fernando R.H., Sung L.-P. (eds.) *Nanotechnology Applications in Coatings*. American Chemical Society; 2009. p. 126–155. <https://doi.org/10.1021/bk-2009-1008.ch008>
9. Lejars M., Margailan A., Bressy C. Fouling release coatings: a nontoxic alternative to biocidal antifouling coatings. *Chemical Reviews*. 2012;112:4347–4390. <https://doi.org/10.1021/cr200350v>
10. Huang Y.F., Huang C., Zhong Y.L., Yi S.P. Preparing superhydrophobic surfaces with very low contact angle hysteresis. *Surface Engineering*. 2013;29:633–636. <https://doi.org/10.1179/1743294412Y.0000000087>
11. Ildarkhanova F.I., Mironova G.A., Bogoslovsky K.G., Menshikov V.V., Bykov E.D. Development of paint coatings with superhydrophobic properties. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2012;48:796–802. <https://doi.org/10.1134/S2070205112070076>
12. Ahmad S., Gupta A.P., Sharmin E., Alam M., Pandey S.K. Synthesis, characterization and development of high performance siloxane-modified epoxy paints. *Progress in Organic Coatings*. 2005;54:248–255. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2005.06.013>
13. Qian M., Soutar A.M., Tan X.H., Zeng X.T., Wijesinghe S.L. Two-part epoxy-siloxane hybrid corrosion protection coatings for carbon steel. *Thin Solid Films*. 2009;517(17):5237–5242. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.03.114>
14. Xue D., Van Ooij W.J. Corrosion performance improvement of hot-dipped galvanized (HDG) steels by electro-deposition of epoxy-resin-ester modified bis-[tri-ethoxy-silyl]ethane (BTSE) coatings. *Progress in Organic Coatings*. 2013;76:1095–1102. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2013.03.004>
15. Zhang X., He Q., Gu H., Colorado H.A., Wei S., Guo Z. Flame-retardant electrical conductive nanopolymers based on bisphenol F epoxy resin reinforced with nano polyanilines. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2013;5:898–910. <https://doi.org/10.1021/am302563w>
16. Tsui T.Y., Ross C.A., Pharr G.M. Nanoindentation hardness of soft films on hard substrates: effects of the substrate. *MRS Online Proceedings Library*. 1997;473:57–62. <https://doi.org/10.1557/PROC-473-57>
17. Gao H., Huang Y., Nix W. Modeling plasticity at the micrometer scale. *Naturwissenschaften*. 1999;86: 507–515. <https://doi.org/10.1007/s001140050665>
18. Bolesta A.V. Molecular dynamics simulation of the deformation of thin films. *Bulletin of the Nizhny Novgorod University named after N.I. Lobachevsky*. 2011;(4):396–398. (In Russ.)

Болеста А.В. Молекулярно-динамическое моделирование деформации тонких пленок // Вестник Нижегородского университета имени Н.И. Лобачевского. 2011. № 4 (2). С. 396–398.

19. Yanovsky Yu.G., Nikitina E.A., Nikitin S.M., Karnet Yu.N. Quantum mechanical studies of the mechanism of deformation of carbon nanotubes. *Mechanics of Composite Materials and Structures*. 2009;15(3):345–368. (In Russ.)

Яновский Ю.Г., Никитина Е.А., Никитин С.М., Карнет Ю.Н. Квантово-механические исследования механизма деформации углеродных нанотрубок // Механика композиционных материалов и конструкций. 2009. Т. 15. № 3. С. 345–368.

20. Yakupov N.M., Galimov N.K., Leontiev A.A. Experimental-theoretical method for studying the strength of polymer films. *Mechanics of Composite Materials and Structures*. 2000;6(2):238–243. (In Russ.)

Якупов Н.М., Галимов Н.К., Леонтьев А.А. Экспериментально-теоретический метод исследования прочности полимерных пленок // Механика композиционных материалов и конструкций. 2000. Т. 6. № 2. С. 238–243.

21. Yakupov N.M., Nurgaliev A.R., Yakupov S.N. Method for testing films and membranes under conditions of uniformly distributed surface pressure. *Industrial Laboratory. Materials Diagnostics*. 2008;74(11):54–56. (In Russ.)

Якупов Н.М., Нургалиев А.Р., Якупов С.Н. Методика испытаний пленок и мембран в условиях равномерно распределенного поверхностного давления // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008. Т. 74. № 11. С. 54–56.

22. Yakupov N.M., Yakupov S.N. Definition of mechanical characteristics of films with the pores, nano-inclusions and nanocoatings. *The Second Nanotechnology International Forum: Abstracts*. Moscow: Rusnanotech Publ.; 2009. p. 344–346. (In Russ.)

Якупов Н.М., Якупов С.Н. Определение механических характеристик пленок с порами, нановключениями и нанопокрывтиями // Сборник тезисов докладов участников Второго Международного форума по нанотехнологиям. М.: РОСНАНО, 2009. С. 427–429

23. Yakupov N.M., Nurullin R.G., Yakupov S.N. Mechanical properties of thin films and nanofilms. *Russian Engineering Research*. 2010;29(6):571–574. <https://doi.org/10.3103/S1068798X09060100>

24. Yakupov S.N. Mechanical characteristics of thin titanium oxide coatings in the “coating – polymer film” system. *Mechanics of Composite Materials and Structures*. 2010;16(3):436–444. (In Russ.)

Якупов С.Н. Механические характеристики тонких покрытий из оксида титана в системе «покрытие – полимерная пленка» // Механика композиционных материалов и конструкций. 2010. Т. 16. № 3. С. 436–444.

25. Yakupov S.N. Way of definition of mechanical characteristics of thin coverings in system “the covering – the substrate.” *The Second International Competition of Scientific Papers in Nanotechnology for Young Researchers: Abstracts*. Moscow: Rusnanotech Publ.; 2009. p. 439–440. (In Russ.)

Якупов С.Н. Способ определения механических характеристик тонких покрытий в системе «покрытие – подложка» // Сборник тезисов докладов участников Второго Международного конкурса научных работ молодых ученых в области нанотехнологий. М.: РОСНАНО, 2009. С. 488–489.

26. Markochev V.M., Egorov G.P. Deformations and stresses in the console system “film – substrate.” *Industrial Laboratory. Materials Diagnostics*. 2018;84(3):61–66. (In Russ.) <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2018-84-3-61-67>

Маркочев В.М., Егоров Г.П. Деформации и напряжения в консольной системе «пленка – подложка» // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 3. С. 61–66. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2018-84-3-61-67>

27. Shugurov A.R., Panin A.V., Kazachenok M.S. Investigation of elastic deformation of Ti films under alternating bending. *Journal of Technical Physics*. 2010;80(11):35–40. (In Russ.)

Шугуров А.Р., Панин А.В., Казаченок М.С. Исследование упругой деформации пленок Ti при знакопеременном изгибе // Журнал технической физики. 2010. Т. 80. № 11. С. 35–40.

28. Galimov N.K., Yakupov N.M., Yakupov S.N. Experimental-theoretical method for determining the mechanical characteristics of spherical films and membranes with a complex structure. *Solid Mechanics*. 2011;46(3):58–66. (In Russ.) <https://doi.org/10.3103/S0025654411030058>

Галимов Н.К., Якупов Н.М., Якупов С.Н. Экспериментально-теоретический метод определения механических характеристик сферических пленок и мембран со сложной структурой // Механика твердого тела. 2011. № 3. С. 58–66.

29. Yakupov N.M., Galimov N.K., Yakupov S.N. Methodology of studying non-planar films and membranes of complex structure. *Industrial Laboratory. Materials Diagnostics*. 2019;85(2):55–59. (In Russ.) <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-2-55-59>

Якупов Н.М., Галимов Н.К., Якупов С.Н. Методика исследования неплоских пленок и мембран сложной структуры // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 2. С. 55–59. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-2-55-59>

30. Kharislamova L.U., Yakupov S.N. Methods for assessing strength of biological membranes. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2014;(6):65–70. (In Russ.)

Харисламова Л.У., Якупов С.Н. Методы оценки прочности биологических мембран // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2014. № 6. С. 65–70.

31. Goldstein R.V. (ed.) *Fracture mechanics. The destruction of the materials*. Moscow: Mir Publ.; 1979. p. 222–224. (In Russ.)

Механика разрушения. Разрушение материалов / под ред. Р.В. Гольдштейна. М.: Мир, 1979. С. 222–224.

32. Weil N.A., Newmark N.M. Large deflections of elliptical plates. *Journal of Applied Mechanics*. 1956;23(1):21–26.

33. Yakupov S.N. Experimental – theoretical method for determining the adhesion of a film to a substrate. *Mechanics of Solids*. 2017;52(5):587–593. (In Russ.) <https://doi.org/10.3103/S0025654417050144>

Якупов С.Н. Экспериментально-теоретический метод определения адгезии пленки к подложке // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2017. Т. 52. № 5. С. 137–144.

34. Yakupov S.N. Mechanics of the “substrate – film” system. *XI All-Russian Congress on Fundamental Issues of Theoretical and Applied Mechanics*. Kazan; 2015. p. 4323–4325. (In Russ.)

Якупов С.Н. Механика системы «подложка – пленка» // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Казань, 2015. С. 4323–4325.

35. Yakupov S.N., Gubaidullin R.I., Yakupov N.M. Determination of hardness of thin layer coating and its adhesion to the shell of the cylindrical form. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1158(4):042039. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1158/4/042039>

36. Yakupov S.N., Gubaidullin R.I., Yakupov N.M. Investigation of the influence of the nature of surface deformation on coating adhesion. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1954:012053. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1954/1/012053>

37. Shugurov A.R., Panin A.V. Mechanisms of periodic deformation of the film-substrate system under the action of compressive stresses. *Physical Mesomechanics*. 2009;12(3):23–32. (In Russ.)

Шугуров А.Р., Панин А.В. Механизмы периодической деформации системы «пленка – подложка» под действием сжимающих напряжений // Физическая мезомеханика. 2009. Т. 12. № 3. С. 23–32.

38. Freund L.B., Suresh S. *Thin film materials: stress, defect formation and surface evolution*. Cambridge: Cambridge University Press; 2003.

39. Yoo P.J., Lee H.H. Evolution of a stress-driven pattern in thin bilayer films: spinodal wrinkling. *Physical Review Letters*. 2003;91(15):154502.

40. Tolpygo V.K., Clarke D.R. Wrinkling of  $\alpha$ -alumina films grown by oxidation. II. Oxide separation and failure. *Acta Materialia*. 1988;46(14):5167–5174.

41. Yakupov N.M., Kharislamova L.U. Stiffness of compositions with delaminations and the influence of ultraviolet on adhesion. *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2019;40(6):840–845.