

На правах рукописи



Гетманов Александр Георгиевич

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЩИТНЫХ
Порошковых ЭПОКСИДНО-ПОЛИЭФИРНЫХ ПОКРЫТИЙ НА
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОДЛОЖКАХ**

Специальность: 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и
аппаратуры

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва – 2020 г.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Рабинский Лев Наумович**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Сопротивление материалов, динамика и прочность машин» Московского авиационного института (НИУ)

Официальные оппоненты: **Могилевич Лев Ильич**, доктор технических наук, профессор, профессор, кафедры «Прикладная математика и системный анализ» Саратовского Государственного Технического Университета имени Гагарина Ю.А.;

Хейло Сергей Валерьевич, доктор технических наук, доцент, и.о. профессора кафедры «Теоретическая и прикладная механика» ФГБОУ ВО "РГУ им. А.Н. Косыгина"

Ведущая организация: **ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта»**

Защита диссертации состоится 16 декабря 2020 г. в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.125.05 при ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4. и на сайте:

https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=118397

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.05

Федотенков Григорий Валерьевич

Общая характеристика работы

Актуальность

Защита поверхностей элементов авиационных конструкций лакокрасочными покрытиями является важным технологическим этапом, необходимым для обеспечения коррозионной защиты, надежности и долговечности изделий. Исследование собственных свойств покрытий, их влияния на механическое поведение металлической подложки, а также влияние технологических процессов по подготовке и нанесению покрытий на механические характеристики тонкостенных элементов конструкций является важной и актуальной задачей, направленной на разработку наиболее долговечных и эффективных систем покрытие/подложка. К настоящему времени известно достаточно большое количество стандартных методик, позволяющих оценить механические свойства и, в частности, характеристики адгезионной прочности покрытий (например, DIN 50359-1, DIN EN ISO 14577-1, ASTM D3359, ASTM D4541), однако, актуальными остаются вопросы исследования влияния покрытий на поведение тонкостенных элементов конструкций, зависимости собственных свойств покрытий от характера их взаимодействия с подложкой, в том числе с учетом остаточных температурных напряжений, а также оценки адгезионной прочности покрытий к подложке в условиях сложно напряженного состояния. Поэтому разработка новых методов оценки и исследование механических свойств полимерных защитных покрытий, и, в частности, широко-используемых в авиации эпоксидно-полиэфирных покрытий, является актуальной задачей, рассматриваемой в данной диссертации.

Объектом исследований настоящей диссертации являются защитные порошковые эпоксидно-полиэфирные покрытия, наносимые на металлические

подложки, для которых предложены и реализованы новые методы оценки механических характеристик.

Предметом и задачей исследований является определение модуля упругости, остаточных напряжений и адгезионной прочности эпоксидно-полиэфирных покрытий и их влияния на механическое поведение металлических подложек в условиях различных вариантов статического нагружения, включая испытания на устойчивость при комнатной и повышенной температуре.

Методы исследования

Экспериментальные исследования проводятся на образцах эпоксидно-полиэфирных покрытий, нанесенных на подложки из стали 08ПС и алюминиевого сплава Д16 различной толщины от 0.7 мм до 1.5 мм. Проводятся испытания покрытий на подложках методом наноиндентирования, методом трехточечного изгиба образцов с односторонним и двусторонним покрытием, методом испытания на отрыв в различных схемах закрепления образцов, позволяющих оценить влияние остаточных напряжений и сложно напряженного состояния покрытий на характер их адгезионной прочности к подложке. Образцы с покрытиями также испытываются на растяжение для оценки и на сжатие (для оценки характеристик устойчивости). Обработка и анализ результатов испытаний проводится на основе моделей механики деформируемого твердого тела, в частности с привлечением моделей упругих и термоупругих слоистых балок и пластин, с использованием численного моделирования в плоской и трехмерной постановке.

Научная новизна работы определяется следующими полученными результатами:

- результаты испытаний эпоксидно-полиэфирных покрытий на подложках методом наноиндентирования, в которых показано, что для тонких

покрытий реализуются повышенные механические свойства, по сравнению с аналогичными объемными материалами;

- предложенные подходы для оценки остаточных напряжений и определения модуля упругости покрытий путем измерения остаточных деформаций образцов и их прогибов в условиях нагружения по схеме трехточечного изгиба;

- результаты исследования влияние покрытий на поведение металлических пластин в испытаниях на растяжение, изгиб и устойчивость, в которых показана важность учета температурных деформаций покрытий и возникающих остаточных напряжений на механическое поведение тонких образцов;

- предложенная и реализованная методика оценки прочности контакта покрытий с подложкой, основанная на аналитической или численной оценке предельных напряжений, реализующихся при отслоении покрытия в условиях стесненных деформаций образцов в испытаниях на трехточечный изгиб.

Практическая ценность работы заключается в разработке и реализации новых вариантов прикладных методов испытаний и аналитических методов расчета механических характеристик защитных полимерных покрытий.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обосновывается использованием строгих и апробированных подходов механики деформируемого твердого тела, в частности, моделей упругих и термоупругих тонких слоистых балок и пластин, подтвержденных результатами численного конечно-элементного моделирования, а также результатами проведенных в работе экспериментальных исследований.

Основные положения, выносимые на защиту:

- экспериментальные исследования механических характеристик эпоксидно-полиэфирных покрытий методом наноиндентирования и результаты численного моделирования процесса наноиндентирования, в которых показано повышение упругих характеристик покрытий, по сравнению с объемными материалами;

- результаты экспериментальных исследований и методики расчета для определения модуля Юнга и остаточных напряжений в покрытиях, нанесенных на металлические подложки с одной и с двух сторон;

- результаты исследования влияния покрытий на поведение металлических пластин в испытаниях на растяжение, изгиб и устойчивость при комнатной и повышенной температуре;

- методика оценки прочности контакта покрытий с подложкой, основанная на аналитической оценке предельных напряжений, реализующихся при отслоении покрытия в условиях стесненных деформациях образцов в испытаниях на трехточечный изгиб.

Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях:

1. Международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г.Горшкова. Москва, МАИ, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020
2. Международный научный семинар "Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы", Москва, МАИ, 2014, 2016, 2017.
3. Международная научно-практическая конференция «Проблемы безопасности на транспорте», Респ. Беларусь, Гомель. 2019, 2020.

Объем и структура диссертации.

Работа состоит из введения, семи глав и заключения, содержит 134 страницы основного текста, 51 рисунка, а также списка литературы в количестве 80 ссылок.

Основное содержание работы

Во введении проводится анализ состояния рассматриваемых вопросов, определяются цель диссертационной работы и задачи исследований, новизна полученных результатов и их практическая ценность, формулируются основные положения, выносимые на защиту, кратко излагаются результаты диссертации.

В первой главе приводятся основные сведения о лакокрасочных материалах и о существующих методах определения механических свойств покрытий. Представлено описание составов и композиций, применяемых для изготовления защитных покрытий. Дается общее описание методов нанесения исследуемых порошковых покрытий и различных косвенных методов определения их механических свойств, в том числе, метода растяжения свободных пленок. Представлено описание методики изготовления и подготовки партий экспериментальных образцов, используемых в данной работе.

Во второй главе представлены результаты измерения свойств покрытий методом наноиндентирования на установке NanoTest 600, а также результаты численного моделирования процесса наноиндентирования. В главе изложена методика проведения испытаний, а также проанализированы результаты испытаний покрытий с использованием различных инденторов. В экспериментах использовалась следующая методика. Образец с покрытием закреплялся на подложке при помощи клея, затем образец подводился к индентору. После установки образца в держатель экспериментального комплекса производили обработку поверхности пьезофиллометром. Это

необходимо для определения геометрии поверхности, на которой осуществляется вдавливание индентора. Индентирование образца проводилось в 10 точках с интервалом 20-30 мкм. Нагрузка увеличивалась с постоянной скоростью 0,05 мН/с до достижения заданной максимальной нагрузки 10 мН при использовании индентора Берковича и до 50 мН при использовании сферического индентора. Этот выбор нагрузки обоснован различной площадью контакта инденторов. В данном эксперименте использовался индентор Берковича с углом при вершине $65,3^\circ$ и радиусом закругления 200 нм. Радиус сферического индентора составлял 10 мкм. Скорость индентирования была задана из расчёта, что цикл нагрузки должен занимать 20 с. По результатам эксперимента и расчетов показано, что рассматриваемые покрытия обладают более высоким модулем Юнга по сравнению с аналогичными объемными материалами (рис.1), что может быть как следствием собственной структуры покрытия, так и следствием образования упрочненных межфазных на границе покрытия и подложки.

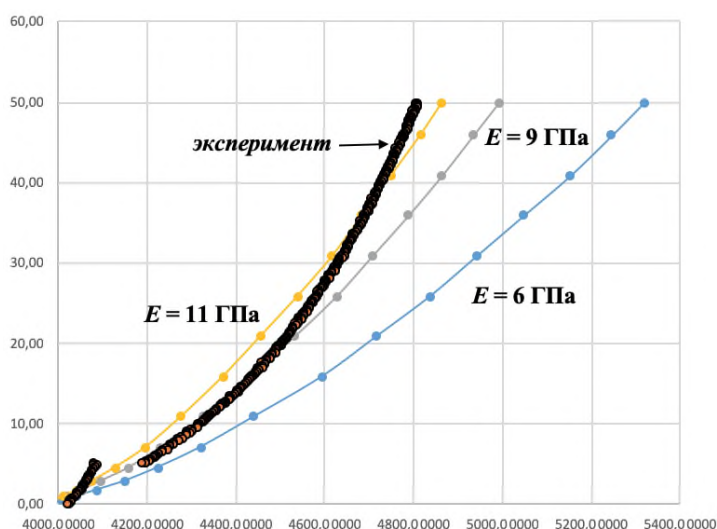


Рис. 1. Сопоставление экспериментальной диаграммы (жирная линия), возникающей при снятии нагрузки с индентора, и результатов численных расчетов с различным модулем Юнга покрытия (значения модуля Юнга указаны на диаграмме). Значительный прогиб экспериментальной диаграммы связан с вязкоупругими эффектами, которые проявляются и в процессе разгрузки.

В третьей главе диссертации рассмотрены варианты испытания на трехточечный изгиб образцов с двухсторонними и односторонними покрытиями для определения модуля Юнга материала покрытий. Показано, что образцы с двухсторонними покрытиями являются менее предпочтительными, так как из-за симметрии структуры и достаточно большой относительной жесткости подложки, они не позволяют с приемлемой точностью оценить вклад покрытий в эффективную изгибную жесткость образца. Напротив, применение односторонних покрытий позволяет получить образцы с первоначальной погибью (возникающей в процессе остывания изготовленных образцов вследствие разницы КТР покрытия и подложки), которые могут быть эффективно использованы для идентификации свойств покрытий. Однако, при этом необходимо привлекать соответствующие модели искривленных слоистых балок, варианты которых представлены в данной главе и использованы для обработки полученных экспериментальных данных. В таких расчетах, оказывается необходимым оценивать и уровень остаточных напряжений, действующих в покрытии, что было выполнено с использованием классической модели Стоуни и ряда более общих моделей, учитывающих конечную толщину покрытия по сравнению с подложкой. Эквивалентная изгибная жесткость образца с односторонним покрытием определяется на основе соотношения:

$$(EI)_{eq}^* \left(1 - \frac{R_2}{R_1}\right) = (\sigma_x^0)_c \times \frac{bh_c E_s h_s}{2} \times \frac{(h_c + h_s) R_2}{E_c^* h_c + E_s h_s} + E_c^* I_c + E_s I_s + \frac{E_c^* h_c E_s h_s b}{E_c^* h_c + E_s h_s} \times \left(\frac{h_c}{2} + \frac{h_s}{2}\right)^2 \quad (1)$$

где индексы с и s обозначают, соответственно, характеристики покрытия или подложки, h – толщина, E – модуль Юнга, R₂, R₁ – радиус кривизны образца до и после приложения нагрузки в испытаниях на трехточечный изгиб, I – момент инерции при изгибе, $(\sigma_x^0)_c$ – величина остаточных напряжений, действующих в покрытии.

Таким образом, мы имеем две неизвестные характеристики в (1): модуль Юнга покрытия E_c и значение остаточных напряжений, действующих в

покрытия, $(\sigma_X^0)_c$. Для определения этих величин предлагается проведение испытаний на трехточечный изгиб образцов с односторонним покрытием с предварительным измерением возникающих в них остаточных деформаций.

Остаточные напряжения в покрытии, в первом приближении могут быть оценены на основе формулы Стоуни $\sigma^{Stoney} = -\frac{E_s h_s^2}{6h_c R_1}$ или с более высокой точностью на основе моделей, в которых не пренебрегается членами, пропорциональными толщине подложки. В частности, уровень напряжений, действующих в слое покрытия и в подложке после изготовления $({}^R \sigma_X)_{c,s}$, может быть найден из соотношения, следующего из классической теории слоистых балок типа Бернулли-Эйлера:

$$({}^R \sigma_X)_{c,s} = (\sigma_X^0)_c + E_{c,s} \frac{Z_0 - Z}{R_1}, \quad (2)$$

где $E_{c,s}$ Z – координата в направлении толщины образца; Z_0 – координата расположения нейтральной оси (при расположении начала координат на границе контакта покрытия с подложкой); R_1 – радиус кривизны, реализующийся в образце после изготовления в результате возникновения остаточных напряжений.

На основе (2) для модели двухслойной балки могут быть получены оценки действующих напряжений, обобщающие формулу Стоуни на случай сопоставимых толщин покрытия подложки. В частности, учет 2 и 4 степеней относительной толщины покрытия дает следующее выражение для остаточных напряжений в покрытии, в пренебрежении продольными деформациями образца:

$$(\sigma^0)_c^* = -\frac{E_c^{*2} h_c^4 - 2E_c^* h_c E_s h_s (2h_c^2 + 3h_c h_s + 2h_s^2) + E_s^2 h_s^4}{6h_c E_s h_s (h_c + h_s) R_1},$$

и с учетом продольных деформаций образца:

$$(\sigma^0)_c^{**} = -\frac{E_c^{*2} h_c^4 - 2E_c^* h_c E_s h_s (2h_c^2 + 3h_c h_s + 2h_s^2) + E_s^2 h_s^4}{6h_c (h_c + h_s) (E_c^* h_c + E_s h_s) R_1}.$$

Кривизна образца R_1 измерялась при проведении испытаний. Таким образом, в выражении (1) остается единственная неизвестная характеристика – модуль Юнга покрытия. Эта характеристика находится по результатам дополнительных испытаний, в которых измеряется кажущийся модуль упругости образца с односторонним покрытием. Эта характеристика в экспериментах определялась на основе классического соотношения

$$(E_{app})_j = \frac{L_j^3}{4bh^3} \left(\frac{P}{\delta} \right) \quad (3)$$

где j – индекс, определяющих номер испытаний, которые проводились с различным расстоянием между опорами L_j , P – заданная в испытаниях нагрузка, h – толщина образца с покрытием, b – ширина образца, δ - прогибы в центрально части образца.

Далее, на основании сравнения идентифицированного в эксперименте кажущегося модуля упругости (3) и его расчетного значения, следующего из (1), определялся собственный модуль упругости покрытия E_c , входящий в выражение (1). По результатам серии испытаний (Рис 2) было идентифицировано значения модуля упругости покрытия, равное 7.5 ГПа, что ниже, чем значение, полученное методом наноиндентирования, но выше, по сравнению со стандартными характеристиками эпоксидно-полиэфирных смол.

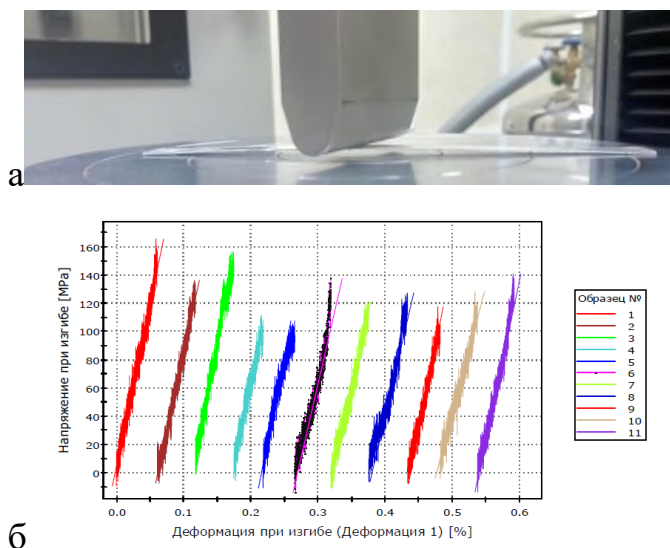


Рис. 2. Испытание образцов с односторонним покрытием, а: измерение начальной кривизны образца (вдавливанием образца в опору до полного прилегания), б: характерные диаграммы нагрузка-перемещение для образцов, испытываемых по схеме трехточечного изгиба

В четвертой главе представлены результаты испытаний образцов с покрытиями на растяжение при комнатной и повышенной (70°C) температуре. Показано, что влияние покрытия в таких испытаниях сводится к снижению уровня определяемых средних напряжений в образцах. Снижение возникает вследствие увеличения закладываемой в расчет площади поперечного сечения образца с покрытием. С точки зрения несущей способности образцов влияние покрытий является несущественным. Однако, установлено, что в образцах с покрытием изменяется характер разрушения образцов (рис. 3а) – поверхность разрушения проходит не под 45 градусов к оси образца, а, практически, перпендикулярно к ней, при этом разрушение сохраняет характер пластического (рис. 3б). Установленный эффект может быть объяснен, по-видимому, влиянием подготовки поверхности и термообработки в процессе нанесения покрытий, а также действующими в образцах остаточными напряжениями.

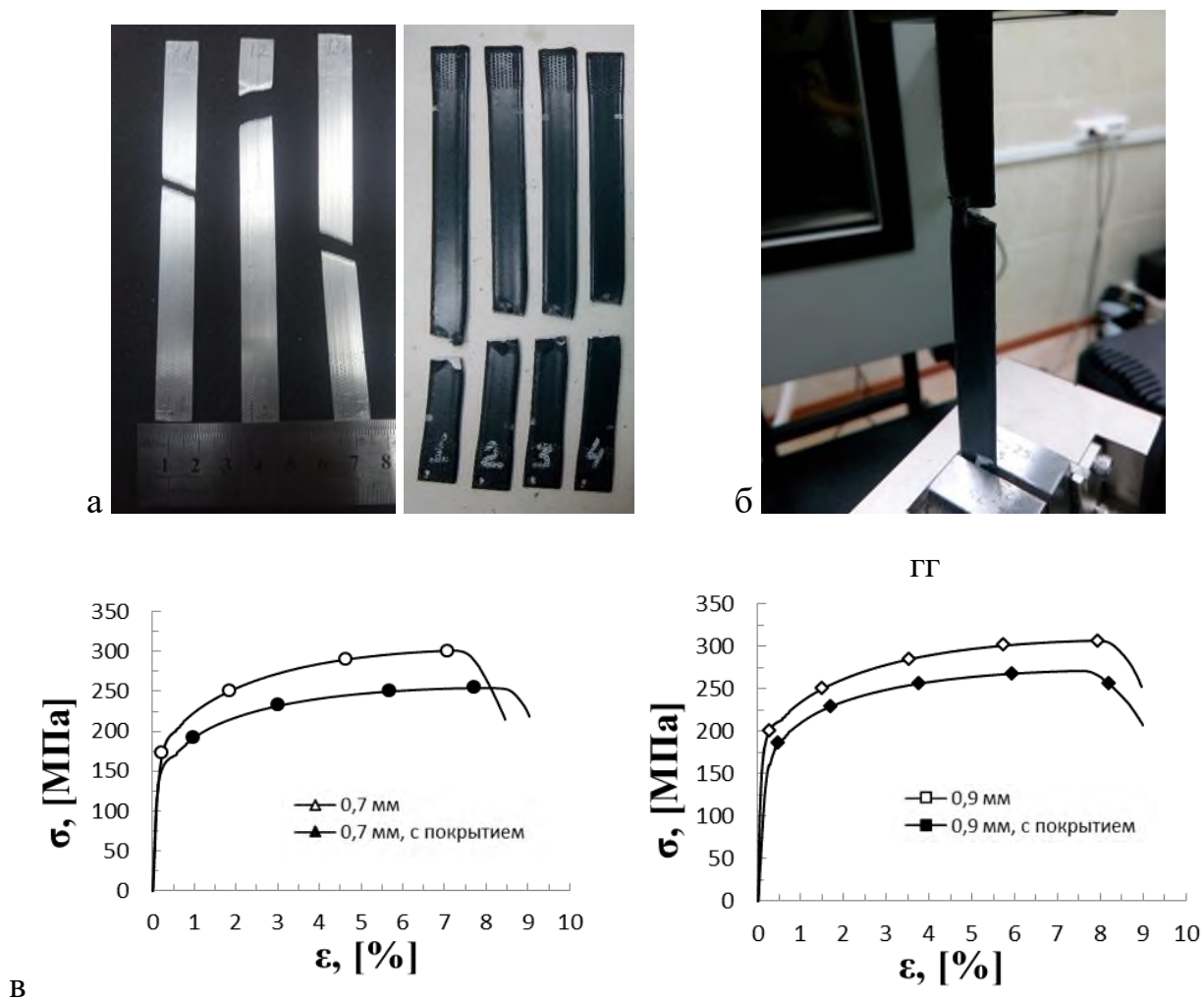


Рис. 3. а: образцы с покрытием и без после испытаний на растяжение;
 б: процесс разрушения образца с покрытием;
 в: диаграммы напряжения-деформации, полученные при испытании на растяжение образцов с подложками толщиной 0,7 мм и 0,9 мм с покрытиями и без покрытий.

В пятой главе представлены результаты расчетов и испытаний образцов с двухсторонними покрытиями на устойчивость при сжатии. По результатам сравнения экспериментов и моделирования показано, что для достоверной оценки критической нагрузки рассматриваемых образцов важно учитывать уровень действующих в образцах остаточных напряжений, которые могут приводить к погрешности расчетов до 20%. Кроме этого, установлен ряд эффектов, возникающих при испытании на устойчивость образцов с покрытиями. Во-первых, показано, что в испытаниях на устойчивость при

повышенной температуре необходимо контролировать уровень усилия в захватах для образцов с покрытиями, так как при нагреве возникает ослабление усилия в захватах (по-видимому, вследствие температурного расширения покрытия и его размягчения). Соответствующие результаты испытаний показаны на рис 4. Другим установленным эффектом является влияние предварительного изгиба в упругой области образцов на их устойчивость. Для таких образцов установлено, что предварительный изгиб образцов в упругой зоне деформаций (до 80-90% от кажущегося предела пропорциональности при изгибе) существенно снижает критическую нагрузку образцов на тонких подложках (рис5). Это объясняется, по-видимому, возникновением пластических деформаций в материале покрытия, которые не проявляются на диаграмме при испытании образца с жесткой подложкой, но вызывают асимметрию остаточного напряженно-деформированного состояния образцов.

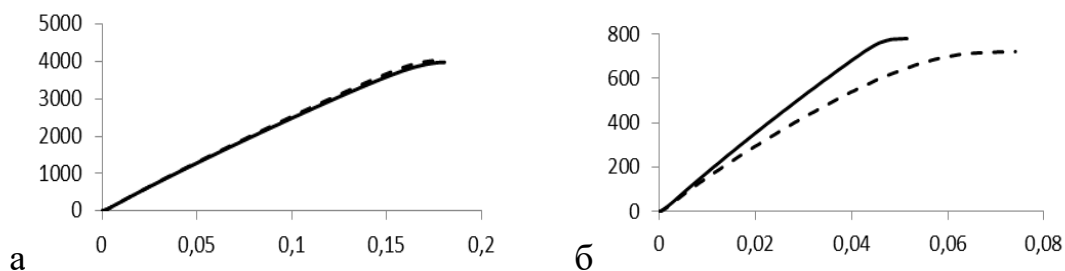


Рис. 4. Характерные результаты испытания на устойчивость при температуре 70°С (диаграммы нагрузка-перемещение) для образцов без покрытий (а) и с покрытиями (б). Пунктирная линия – испытание образцов с затяжкой захватов только при комнатной температуре, сплошная линия – испытание образцов, в захватах, дополнительно затянутых после нагрева образцов).

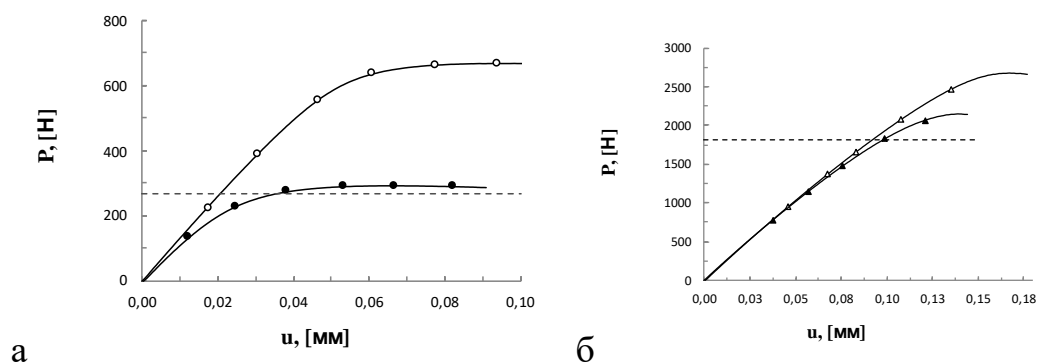


Рис. 5. Характерные результаты испытаний на устойчивость образцов, подвергнутых предварительному изгибу, а: толщины подложки 0.7 мм, б: толщина подложки 1.5 мм. Пунктир – оценка критической нагрузки по формуле Эйлера, сплошные линии – результаты испытаний (диаграммы с более высокой нагрузкой – для образцов, не подвергнутых изгибу)

В шестой главе представлены результаты обработки испытаний и расчетов по оценке уровня остаточных напряжений, действующих в образцах. Показано, что характерными являются значения порядка 10 МПа на алюминиевой подложке и до 40 МПа на стальной подложке, что связано с соотношением КТР материалов покрытия и подложек. Расчеты проводились на основе соотношений, обобщающих классическую формулу Стоуни и учитывающих конечную толщину подложки. Исходными данными для расчетов являлись значения начального изгиба образцов с односторонним покрытием, которые определялись экспериментально (рис. 2а). Полученные оценки могут и примененные расчетные подходы могут быть использованы для оценки долговечности защитных покрытий, а также для уточнения параметров их износостойкости.

В седьмой главе предложена методика для оценки прочности адгезионного контакта покрытий к подложке в условиях сложнапряженного состояния. Здесь на основе модели балки Тимошенко представлено решение для оценки уровня нормальных и касательных напряжений в зоне контакта консольно-закрепленной балки на жесткой подложке. Рассмотрен вариант

испытаний образцов в виде тонких металлических пластин (полос) с покрытиями, закрепленных одним концом на жесткой подложке (рисунок б). Закрепление на подложке реализуется с использованием высокопрочного клеевого соединения, когезионная и адгезионная прочность которого превышает адгезионную прочность покрытия к подложке и, соответственно, обеспечивает возможность изменения последней в данном эксперименте. Пластика нагружается силой на свободном конце, направленной вертикально вверх, в том время как жесткая подложка фиксируется на нижней поверхности. Таким образом, обеспечивается отрыв пластинки от подложки. Выбором высокопрочного клея, как было сказано, разрушение локализуется на границе покрытия с подложкой и, таким образом, в испытаниях возможно определить максимальную нагрузку, при которой это разрушение начинается. Механизм разрушения является в данном случае сложным, так как в представленной схеме испытаний в покрытии и в подложке действуют, как нормальные, так и касательные напряжения. Максимум этих напряжений реализуется в точке, где заканчивается жесткая подложка ($x = L - a$). На основе модели балки Тимошенко проведены расчет для оценки этих напряжений. В расчетах учитывается, что толщиной покрытия и клеевого соединения можно пренебречь.

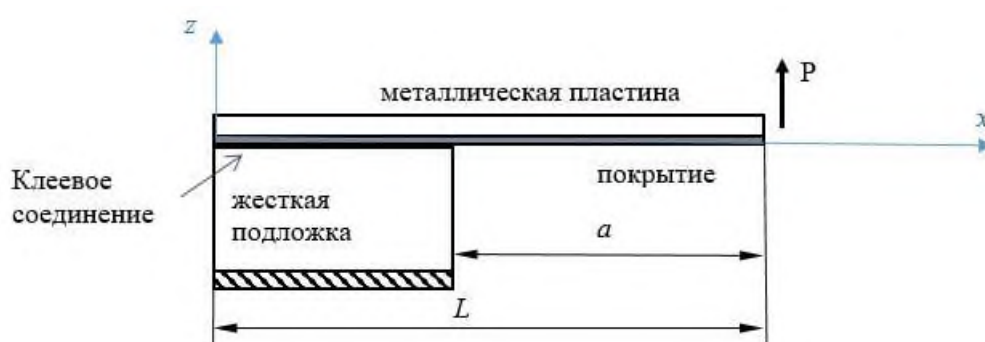


Рис. 6 – Схема испытания образца с покрытием, консольно закрепленного на жесткой подложке

Полное решение рассматриваемой задачи представлено в диссертации – для действующих напряжений на свободном конце балки и в зоне контакта, где балка остается закрепленной и обладает нулевой кривизной, но при это за счет возникающих сдвигов в ней присутствуют ненулевые значение моментов и отрывающих усилий. Для достаточно длинного конца балки (выступающего за пределы подложки) предельным переходом получено следующее решение для максимальных напряжений, приводящих к срезу (сдвигу) или к отрыву покрытия, соответственно:

$$\tau_{\max} \Big|_{L \rightarrow \infty} = k_{\tau} \frac{aP}{bh^2} \sqrt{\frac{5}{1+\nu}} \quad S_{\max} = k_s \frac{aP}{bh^2} \frac{5}{1+\nu}$$

где a – длина выступающего конца образца, b – ширина образца, P – действующая нагрузка на свободном конце балки, E , G , ν - модуль Юнга, модуль сдвига и коэффициент Пуассона материала подложки, I – момент инерции сечения образца, $k_{\tau} = 8/7$, $k_{\sigma} = 4/3$ - поправочные коэффициенты, учитывающие характер распределения напряжений по сечению образца вблизи закрепления, значения которых получены по результатам сравнения аналитических расчетов с конечно-элементным моделированием в плоской постановке.

Предложенные расчетные методы апробированы в испытания образцов, с исследуемыми эпоксидно-полиэфирными покрытиями, в которых консольное закрепление заменялось жесткой массивной подставкой, приклеиваемой к образцу со стороны действия растягивающих напряжений (рис.7а). Использовался достаточно прочный эпоксидный клей, обеспечивающий возникновение расслоения при испытании образца именно на границе подложки с покрытием, но не на границе покрытия и клеевого соединения (рис. 7б). Отслоение происходило в зоне упругих деформаций (рис. 7в), что позволяет использовать решение (3) для обработки результатов испытаний. В результате испытания образцов с различной длиной свободного конца образца,

выступающего за подложку, были идентифицированы значения адгезионной прочности покрытия на уровне 2.5-3 МПа на срез и 5-9 МПа на отрыв.

В заключении диссертации представлены выводы по работе и перечислены основные результаты проведенного исследования.

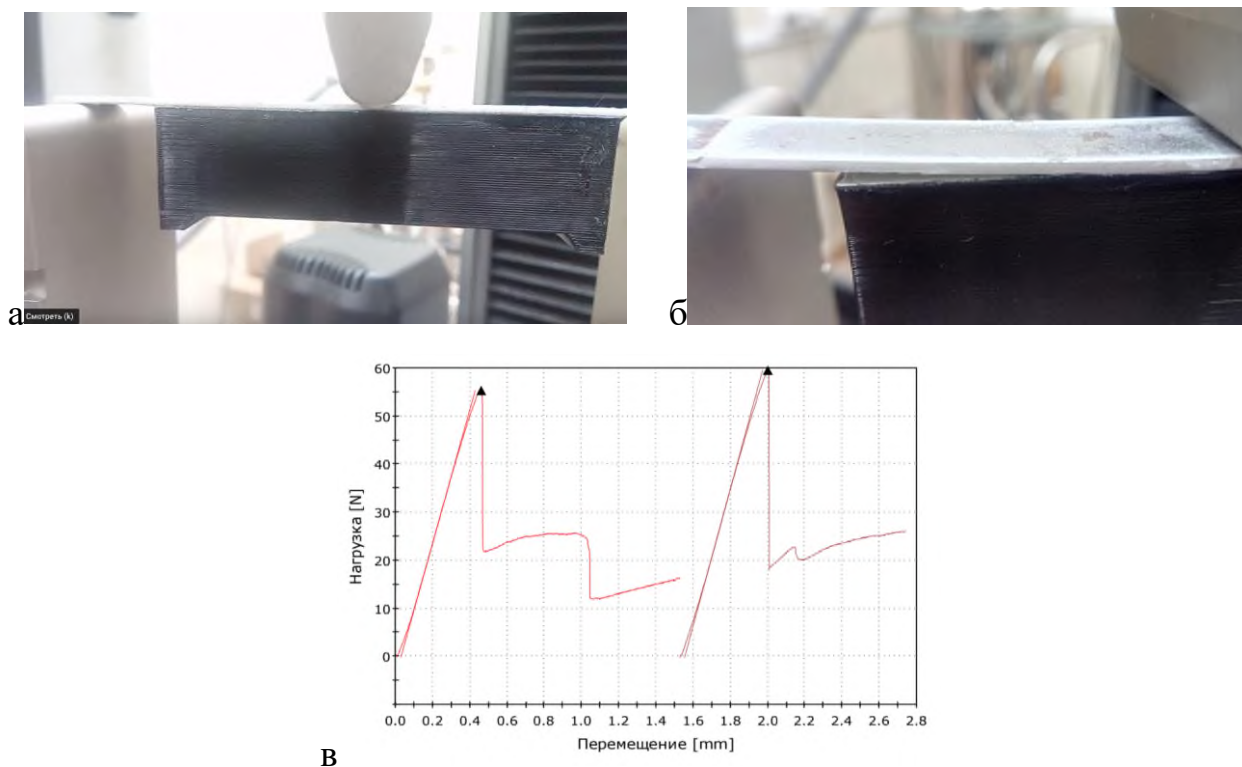


Рис. 7. Испытание на отрыв образца с покрытием и дополнительной поддержкой, исключающей изгиб в центральной части образца. а: процесс испытаний, б: характер отслоения покрытия от подложки, в: характерные диаграммы нагрузка/перемещения, получаемые в испытаниях.

Основные результаты:

- предложены новые методы испытаний и исследованы механические свойства защитных эпоксидно-полиэфирных покрытий.

- на основе испытаний методом наноиндентирования показано, что в исследуемых покрытиях реализуются повышенные механические свойства, по сравнению с объемными материалами.

- реализована методика оценки остаточных напряжений и определения модуля упругости покрытий на основе модели двухслойной балки путем измерения остаточных деформаций образцов и их прогибов в условиях нагружения по схеме трехточечного изгиба (с учетом наличия изначальной кривизны).

- исследовано влияние покрытий на поведение металлических пластин в испытаниях на растяжение, изгиб и устойчивость, показана важность учета температурных деформаций покрытий и возникающих остаточных напряжений на механическое поведение тонких образцов.

- предложена и реализована методика оценки прочности контакта покрытий с подложкой, основанную на аналитической или численной оценке предельных напряжений, реализующихся при отслоении покрытия в условиях стесненных деформациях образцов в испытаниях на трехточечный изгиб.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах базы Scopus (4-5) и из списка ВАК РФ (1-3):

1. Гетманов, А. Г., Мамонов, С. В., Мартиросов, М. И., Рабинский, Л. Н. *Экспериментальное исследование механических свойств полимерных покрытий на образцах из алюминиевого сплава*. Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 72. (2014).
2. Бабайцев, А. В., Гетманов, А. Г., Мартиросов, М. И., Рабинский, Л. Н., Соляев, Ю. *Исследование влияния тонких полимерных покрытий на механические свойства стальных пластин в испытаниях на растяжение, изгиб и устойчивость*. Технология металлов, (5), 12-19. (2017).
3. Гетманов, А. Г., Кузнецова, Е. Л., Мартиросов, М. И., Рабинский, Л. Н. *Определение механических характеристик металлических образцов с порошковыми покрытиями на основе экспериментальных исследований*. Известия Тульского государственного университета. Технические науки, (4), 190-196. (2017).
4. A.G. Getmanov, Rabinskiy, Lev N. *Assessment of durability of coatings in difficult stress conditions*. PERIÓDICO TCHÊ QUÍMICA. Periódico Tchê Química. ISSN 2179-0302. (2019); vol.16 (№33) 490-497
5. A.G. Getmanov, Kornev, Y.V., Martirosov, M.I., Rabinskiy, L.N. *Experimental investigations of mechanical characteristics of powder coatings on an epoxy-polyester substrate by nanoindentation*. International Journal of Nanomechanics Science and Technology 2015 6(3), с. 193-202

Прочие публикации по тематике диссертационной работы:

6. Ян, Н. М., Гетманов, А. Г., Рабинский, Л. Н. *Экспериментальное определение остаточных напряжений образованных при нанесении покрытий. Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред*. 226-227. (2019).
7. Бабайцев, А. В., Гетманов, А. Г., Мартиросов, М. И., Рабинский, Л. Н. *Исследование влияния тонких полимерных покрытий на уровень критической нагрузки в испытаниях на устойчивость тонких стальных пластин*. Тезисы

докладов VI Международного научного семинара" Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы". 14-14. (2017).

8. Гетманов, А. Г., Корнев, Ю. В., Рабинский, Л. Н. Исследование механических характеристик покрытий на эпоксидно-полиэфирной основе с использованием метода наноиндентирования. Тезисы докладов IV Международного научного семинара "Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы". 42-44. (2016).

9. Бабайцев, А. В., Гетманов, А. Г., Мартиросов, М. И., Рабинский, Л. Н., & Соляев, Ю. О. Исследование влияния полимерных покрытий на механические характеристики металлических образцов по результатам испытаний на растяжение, изгиб и устойчивость. Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред. 7-8. (2017).

10. Гетманов, А. Г., Мартиросов, М. И., Рабинский, Л. Н. Анализ прочностных характеристик полимерных защитных покрытий на металлических элементах машиностроительных конструкций. Материалы XXI Международного симпозиума" Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред" им. АГ Горшкова. 50-52. (2015).