

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, доцента

Хейло Сергея Валерьевича

на диссертационную работу Гетманова Александра Георгиевича

«Расчетно-экспериментальный метод исследования физико-механических характеристик защитных порошковых эпоксидно-полиэфирных покрытий на металлических подложках» на соискание ученой степени

кандидата технических наук по специальности

01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры»

В диссертационной работе проводится исследование механических свойств порошковых эпоксидно-полиэфирных покрытий. Предложены методы испытаний и исследованы свойства покрытий, а также оказываемое ими влияние на механические характеристики металлических подложек. Результаты исследований могут быть использованы для оценки качества и долговечности рассматриваемого класса покрытий, а также более широких классов защитных коррозионностойких покрытий, применяемых в авиационно-космической технике. Поэтому, тема диссертационной работы является **актуальной и соответствует** специальности 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры».

**Научная новизна** работы определяется полученными результатами 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. Также предложены новые 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. Представлены результаты исследования влияния 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

Отдел документационного  
обеспечения МАИ  
«30 11 2020»

поведение тонких образцов.

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

Диссертационная работа изложена на 125 страницах и включает в себя восемь глав, введение, заключение и список литературы (на 10 стр.).

**Во введении** проводится анализ состояния исследований в области тематики диссертационной работы, определяется цель и задачи квалификационной работы.

**В первой главе** представлен обзор литературы. Описаны существующие методы нанесения порошковых покрытий, рассматриваемых в работе, известных методов испытаний для определения свойств покрытий, представлено описание методики изготовления экспериментальных образцов, используемых в настоящей работе.

**Во второй главе** представлены результаты измерения свойств покрытий методом наноиндентирования. Излагается методика проведения испытаний, дан анализ результатам испытаний покрытий для различных инденторов.

**В третьей главе** представлены результаты экспериментальных исследований и их обработки на основе предложенных расчетных моделей для вариантов испытания на трехточечный изгиб образцов с двухсторонними и односторонними покрытиями для определения модуля Юнга материала покрытий. Описана методика испытаний образцов с односторонними покрытиями, разработаны методы аналитического расчета.

**В четвертой главе** представлены результаты испытаний образцов с покрытиями на растяжение при комнатной и повышенной температуре. Представлены диаграммы напряжения-деформации, полученные при испытании на растяжение образцов с покрытием и без.

**В пятой главе** представлены результаты расчетов для экспериментальных образцов с двухсторонними покрытиями на устойчивость при сжатии.

Установлен ряд эффектов, возникающих при испытании на устойчивость образцов с покрытиями.

**В шестой главе** представлены расчетные модели и результаты расчетов для оценки остаточных напряжений, действующих в исследуемых покрытиях. Полученные результаты могут быть использованы для оценки износостойкости долговечности защитных покрытий.

**В седьмой главе** представлена методика экспериментального определения адгезионной прочности контакта покрытий с подложкой, которая включает в себя, как известные простые схемы испытаний покрытий на отрыв и срез, так и более сложные, обеспечивающие реализацию сложного напряженного состояния покрытия. Представлена аналитическая методика для обработки экспериментальных данных и результаты численного моделирования.

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

**Обоснованность и достоверность** научных положений и выводов диссертации, обосновывается использованием строгих подходов механики деформируемого твердого тела, в частности, моделей теории упругих многослойных балок и пластин, в том числе модели балки Тимошенко, а также теории устойчивости. Результаты аналитических расчетов подтверждены в результате сопоставления их с численным конечно-элементным моделированием и экспериментами.

**Практическая ценность** работы заключается в разработке и реализации новых методов испытаний и методов аналитического расчета механических характеристик защитных полимерных покрытий, имеющих прикладное значение.

По результатам исследования опубликовано 10 работ, в том числе – 3 работы в изданиях из списка ВАК и две работы в изданиях, индексируемых Scopus. Содержание диссертации соответствует содержанию опубликованных работ. Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации.

#### **Замечания по диссертационной работе:**

1. В диссертации на рисунке 1.4 (микроснимок образца с покрытием) не ясно,

что представляет собой материал черного цвета - является ли он частью образца или это элемент крепления и т.п..

2. В работе делается вывод о влиянии покрытия на условия закрепления образцов при их испытании на устойчивость при повышенной температуре. Было бы интересно проверить эти данные численными или аналитическими оценками. Что оказывает влияние в первую очередь? Температурное расширение покрытия или его размягчение? Или оба эффекта одновременно? Аналогичное замечание к результатам по оценке устойчивости образцов после изгиба.
3. Результаты расчетов на рис. 7.7-7.17 могут требовать уточнения с использованием более мелкой конечно-элементной сетки.
4. На рис. 7.19 видно, что отслоение покрытия от подложки носит неоднородный по ширине характер – отслоение начинается вблизи края закрепленной части образца, но дальше смещается внутрь закрепленной зоны. Этот эффект в работе не обсуждается, хотя на основе полученных результатов численного моделирования, можно было бы оценить характер распределения напряжений по ширине образца.
5. Для оценки остаточных напряжений и поводок образцов с покрытием, нанесенным с одной стороны, предложено несколько расчетных формул, однако было бы интересно также провести численное моделирование, в котором, к тому же, можно было бы легко учесть зависимость свойств покрытия от температуры.
6. Структура диссертации содержит 7 глав. Однако, можно было уменьшить их количество объединением некоторых глав. Так, например, главы 3, 4 и 5 относящиеся к испытаниям образцов на изгиб, растяжение и сжатие, можно было бы объединить в одну.
7. Зачем использовался острый индентор Берковича в наноиндентировании, если материал покрытия достаточно низкопрочный и податливый, что и приводило к его повреждению в процессе испытаний?

В целом, указанные замечания не снижают общего уровня и научной ценности полученных в диссертационной работе результатов, а несут

исключительно уточняющий характер.

Представленная диссертация является законченной квалификационной работой, которая посвящена решению важной научной задачи, имеющей большое значение в создании новых материалов авиационных конструкций. Диссертация **соответствует** квалификационным требованиям, предъявляемым ВАК к диссертационным работам, в том числе соответствует требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 №842. Автор диссертации Гетманов А.Г., **заслуживает** присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры».

Официальный оппонент:

доцент, доктор технических наук,

профессор кафедры «Теоретическая и прикладная механика»

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)»



Хейло Сергей Валерьевич

27.11.2020 г.

Адрес места работы: 119071, г. Москва, ул. Малая Калужская, д. 1

Тел.: +7 (916) 159-53-27.

E-mail: Kheylo-sv@rguk.ru

Подлинность подписи удостоверяю  
Ученый секретарь Ученого совета  
ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина»  
ПАРАХИН В.А.

