

## ОТЗЫВ

официального оппонента, профессора, доктора технических наук

Могилевича Льва Ильича

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»

Диссертация посвящена исследованию механических свойств порошковых эпоксидно-полиэфирных покрытий. Предложены методы испытаний и исследованы собственные свойства покрытий, а также их влияние на механическое поведение металлических подложек. Результаты исследований могут быть использованы при оценке качества и долговечности рассматриваемого класса покрытий, а также более широких классов защитных коррозионностойких покрытий, применяемых в авиационной и 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

«25» 11 2017.

поведение тонких образцов.

Новизной является 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.

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 рассматриваемых вопросов, определяются цель диссертационной работы и задачи исследований.

В первой главе представлен обзор литературы. Дается общее описание методов нанесения исследуемых порошковых покрытий и известных методов испытаний для определения свойств покрытий, представлено описание методики изготовления и подготовки партий экспериментальных образцов, используемых в данной работе.

Во второй главе представлены результаты измерения свойств покрытий методом наноиндентирования. В главе изложена методика проведения испытаний, а также проанализированы результаты испытаний покрытий с использованием различных инденторов. Установлена реализация повышенных упругих свойств покрытия, по сравнению с объемными материалами.

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. Дано изложение методики испытания образцов с односторонними покрытиями, для обработки результатов которой, разработаны аналитические расчетные методы. На основании сопоставления изменения жесткости экспериментальных образцов, в том числе криволинейных и с остаточными деформациями, с расчетными данными определяется собственный модуль упругости исследуемых покрытий.

В четвертой главе представлены результаты испытаний образцов с

покрытиями на растяжение при комнатной и повышенной температуре. Представлен анализ изменения упруго-пластического поведения и характера разрушения исследуемых образцов с покрытиями.

В пятой главе представлены результаты расчетов и экспериментальных 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%. Даны рекомендации по проведению испытаний с учетом эффектов температурных деформаций и релаксации остаточных напряжений в образцах с покрытиями при повышенной температуре.

В шестой главе представлены расчетные модели и результаты расчетов для оценки остаточных напряжений, действующих в исследуемых покрытиях. Полученные результаты используются в других главах диссертации, в том числе, в расчетной методике для оценки модуля Юнга покрытий.

В седьмой главе предложена методика для оценки прочности адгезионного контакта покрытий к подложке в условиях сложнапряженного состояния. Представлено решение для оценки уровня нормальных и касательных напряжений в зоне контакта консольно-закрепленной балки на жесткой подложке. Предложенная аналитическая методика расчета протестирована на основе экспериментальных данных и численных расчетов. Показана возможность ее применения для оценки адгезионной прочности к подложке в условиях сложно напряженного состояния.

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, теории устойчивости. Результаты аналитических расчетов подтверждены численным

конечно-элементным моделированием и экспериментами.

Практическая ценность работы заключается в разработке и экспериментальной проверке прикладных методов испытаний и аналитических оценок для определения механических свойств покрытий рассмотренного класса. Получен большой объем экспериментальных данных по собственным свойствам покрытий, их влиянию на механическое поведения подложки и адгезионной прочности к подложке.

По результатам работы 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. Как представляется, в решении для оценки адгезионной прочности покрытий, полученном на основе модели балки типа Тимошенко, было бы важным оценивать деформированное состояние образца на основе балочной теории более высокого порядка с учетом поперечного обжатия. В этом случае возможно было бы получить более аккуратные оценки распределения напряжений в зоне отрыва балки от подложки.
2. В работе излагаются результаты испытаний образцов на устойчивость, после испытаний на изгиб в упругой зоне. Полученные интересные экспериментальные результаты, для которых, однако, не дано теоретического обоснования. Представляется, что можно было бы численно или аналитически оценить возможность возникновения пластических деформаций в слое покрытия при изгибе, которые и приводят к установленному снижению критической нагрузке в последующих испытаниях на устойчивость. Такая трактовка результатов испытаний обсуждается в диссертации, но непосредственных результатов расчетов не представлено.
3. Представленная диссертация содержит 7 глав - можно было бы объединить некоторые главы и уменьшить до 5 (главы 3 и 4 - испытание образцов на изгиб, главы 5 и 6 - испытания на растяжение и сжатие образцов).
4. Формула 3.30 для начального радиуса кривизны образца с покрытием

представлена без вывода, хотя, вообще говоря, она не является очевидной.

В целом, указанные замечания носят уточняющий характер и не снижают общего уровня и научной ценности полученных в диссертации результатов.

Представленная диссертация является законченной квалификационной работой, которая посвящена решению практически важной научной задачи. 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, профессор,  
доктор технических наук, профессор кафедры  
«Прикладная математика и системный анализ»  
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Саратовский государственный технический  
университет имени Гагарина Ю.А.»

Могилевич Лев Ильич

25.11.2020г.

Адрес места работы: 410057, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.

Тел.: +7 (845) 299-88-25.

E-mail: primat@sstu.ru

Специальность ВАК, по которой защищены: докторская диссертация 05.11.03 – «Приборы навигации», кандидатская диссертация 01.02.05 – «Механика жидкости, газ и плазмы»

Подпись профессора, доктора технических наук Могилевича Льва Ильича удостоверяю.

Ученый секретарь Ученого совета

СГТУ имени Гагарина Ю.А.



Н.В. Тищенко